

631.3
Е-446



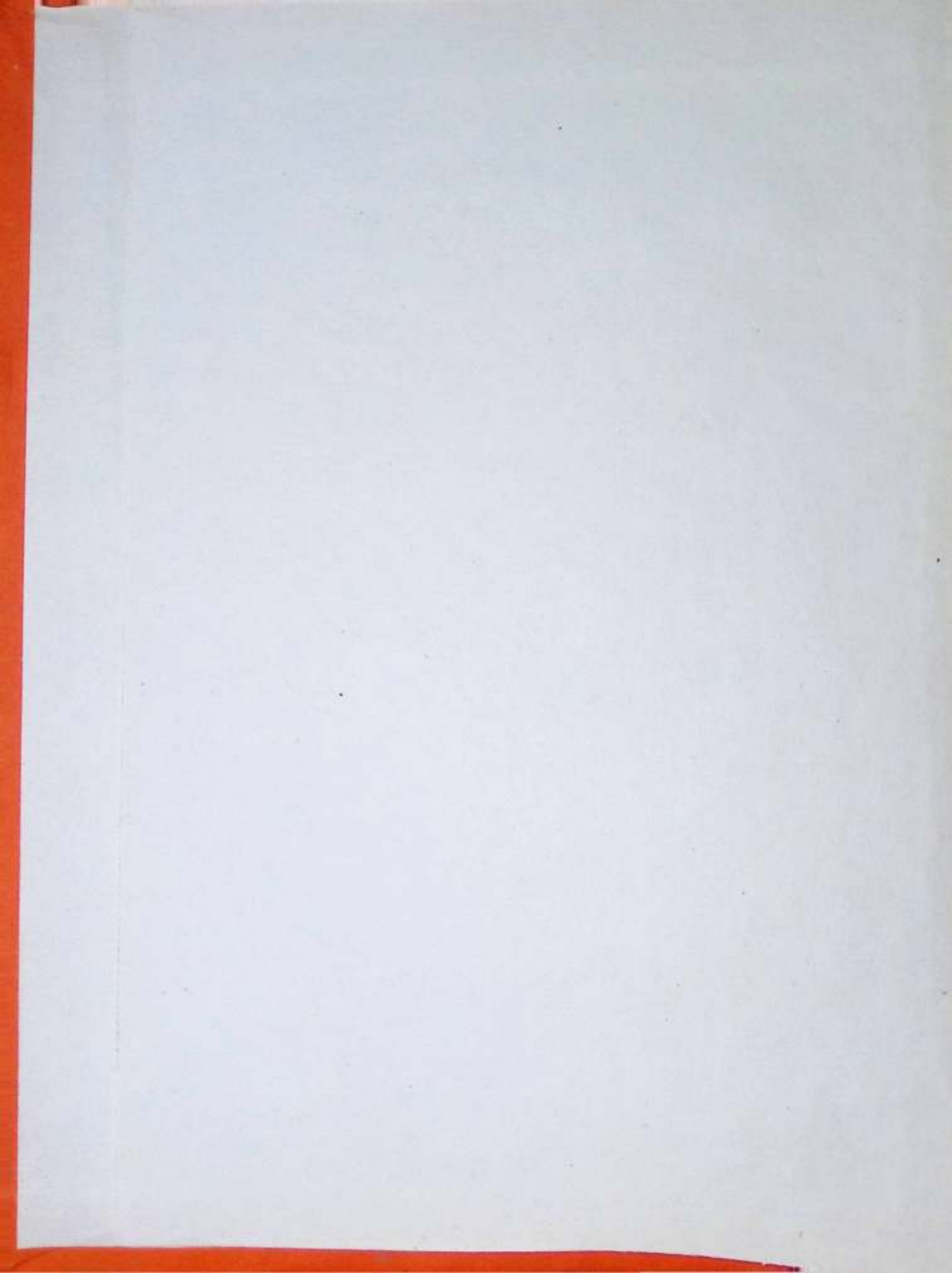
УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ВУЗОВ

Л.С.Ермолов

В.М.Кряжков

В.Е.Черкун

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКО- ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ





УЧЕБНИКИ
И УЧЕБНЫЕ
ПОСОБИЯ
ДЛЯ ВЫСШИХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

631.3
Е-446

Л.С.Ермолов
В.М.Кряжков
В.Е.Черкун

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКО- ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

[ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ]

Допущено Главным управлением
высшего и среднего сельскохозяйст-
венного образования Министерства
сельского хозяйства ~~СССР~~ в качестве
учебного пособия для студентов выс-
ших сельскохозяйственных учебных
заведений по специальности 1509
«Механизация сельского хозяйства».

Библиотека
СамСХИ
ИНВ. №



МОСКВА «КОЛОС» 1982

ББК 40.72

Е74

УДК 631.3—192(075.8)

Авторский коллектив: кандидат технических наук, и. о. профессора *Л. С. Ермолов* (введение, глава 2); доктор технических наук, профессор, академик ВАСХНИЛ *В. М. Кряжков* (глава 5); кандидат технических наук, доцент *В. Е. Черкун* (главы 1 и 3). Подготовка рукописи к изданию и общее редактирование выполнены *Л. С. Ермоловым*.

Рецензенты — преподаватели ЧИМЭСХ: заслуженный деятель науки и техники РСФСР доктор технических наук, профессор *И. Е. Ульман*; кандидаты технических наук, доценты *Н. А. Николаев* и *Г. С. Игнатьев*; кандидат технических наук, и. о. профессора *Ю. Н. Ломоносов*.

Ермолов Л. С. и др.

Е 74 Основы надежности сельскохозяйственной техники/Л. С. Ермолов, В. М. Кряжков, В. Е. Черкун. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Колос, 1982. — 271 с., ил. — (Учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений).

В книге рассматриваются основные понятия и положения, принятые в надежности, физические основы надежности, математические методы в теории надежности машин и оборудования, методы испытания машин на надежность, основные направления повышения надежности сельскохозяйственной техники и эффективность этих мероприятий.

Второе издание по сравнению с первым (вышло в 1974 г.) значительно переработано и обновлено.

Е $\frac{3802040400-284}{035(01)-82}$ 252—82

ББК 40.72
631.303

© Издательство «Колос», 1974
© Издательство «Колос», 1982, с изменениями

ВВЕДЕНИЕ

Надежность и качество машин, оборудования и приборов во многом определяют успех научно-технической революции на современном этапе. Вопросы, связанные с повышением надежности и качества, должны решать инженерные работники, которые обязаны овладеть теоретическими знаниями в области надежности машин, с тем чтобы на практике быть подлинными творцами научно-технического прогресса.

Надежность различной техники — чрезвычайно многогранная проблема, отражающая все этапы существования объекта (от конструкторской идеи до списания). Она постоянно находится в стадии развития по мере совершенствования знаний и умений человека, а также изменения условий службы различных объектов.

От древних времен до настоящих дней, от первых орудий труда (каменного ножа и топора) до современных космических кораблей и роботов — все, что ни делает человек, он стремится сделать надежно в меру своих сил и возможностей. Однако создать совершенно безотказную и предельно долговечную машину невозможно потому, что с течением времени на нее непрерывно воздействуют различные факторы, изменяя свойства деталей и, как следствие, вызывая отклонение установленных показателей надежности. Экономические расчеты показывают, что создавать такую машину нецелесообразно, так как с течением времени изменяется технология производства, непременно влекущая к изменению машин для ее осуществления.

Возникнув вначале в авиационной и космической технике, радиотехнике, автоматике, телемеханике и современных средствах связи, надежность стала «проблемой номер один» и выделилась в самостоятельную дисциплину, главная задача которой дать оценку надежности объекта.

Первоочередными вопросы надежности стали и в машиностроении. По решению II межвузовской конференции по надежности машин и оборудования большинство высших технических учебных заведений страны (в том числе и факультеты механизации сельскохозяйственных вузов) включили в учебные планы дисциплину «Основы надежности техники». Основная задача этой дисциплины — обеспечение надежности работы объектов и в частности сельскохозяйственной техники.

Наука о надежности техники изучает закономерности изменения показателей работоспособности объектов с течением времени, а также физическую природу отказов и на этом основании разрабатывает методы, обеспечивающие с наименьшей затратой времени

и средств необходимую долговечность и безотказность работы объектов.

Надежность объекта — один из основных показателей его качества. Применительно к технике качество — это неотъемлемая от объекта совокупность признаков, выражающая его специфику и отличие от других объектов. Эта совокупность определяет обычно степень пригодности объекта для использования его по назначению.

Проблема надежности техники — комплексная проблема, состоящая из связи многих этапов, четко из которых выделяются следующие.

1. Утверждение идеи, исследование, проектирование и расчет объекта определенной надежности, которая на этой стадии зависит от качества проведенных исследований и конструкторских расчетов. Это самый ответственный этап, так как ошибка в один рубль при выборе принятого решения (конструкции сборочных единиц и сопряжений, применяемых материалов, способов защиты их от вредных воздействий, системы технического обслуживания и ремонта и др.) повлечет за собой убытки в тысячи рублей на этапе эксплуатации.

2. Производство объекта. Надежность его на этом этапе в первую очередь зависит от качества материала деталей и точности их изготовления, от качества сборки и обкатки, от других составляющих технологического процесса. Ошибка в осуществлении технологии в один рубль на данном этапе обернется в сотни рублей на этапе эксплуатации. Следует заметить, что на большинстве предприятий не проводятся полная обкатка и испытание объектов продукции. Вся сложная сельскохозяйственная техника требует полевой обкатки (доводки). Такая практика должна быть устранена, для чего необходимо повсеместно внедрять ускоренные испытания как новой, так и отремонтированной техники.

3. Эксплуатация объекта. На этом этапе реализуется и поддерживается надежность, заложенная при расчете и обеспеченная при изготовлении. Обычно до сих пор рассматривали цепочку «человек — машина — среда», которая описывала процесс эксплуатации обслуживания и ремонта. Необходимо добавить и социальный фактор (условия труда и быта, заработная плата, участие оператора в жизни коллектива и др.), который в ряде случаев может быть определяющим.

Итак, расчет возможного поведения машин в предполагаемых условиях эксплуатации, технологическое обеспечение качества и регламентация условий использования машин — основная схема системы управления оптимальной надежностью. Рассчитывать, изготавливать и эксплуатировать долговечную технику — основное содержание науки о надежности.

Считается, что обеспечение такого показателя качества объекта, как его производительность, не входит в сферу науки о надежности. Это положение спорно. Если, например, зерноуборочный комбайн не в состоянии убирать хлеб урожайностью 5 т/га, так зачем тогда нужна его надежность по любым другим показателям.

Очевидна необходимость обеспечения функциональной надежности указанной машины. Это самое главное в надежности техники.

Специфические особенности надежности следующие: все этапы создания и использования объектов влияют на требуемую надежность; процессы изменения функциональных параметров объектов случайны; физические закономерности, определяющие изменения характеристик объектов, разнообразны и сложны; во всех закономерностях обязателен фактор времени.

Теоретические основы науки о надежности техники базируются на отдельных разделах фундаментальных наук.

1. Математические методы в теории надежности с самого начала были положены в основу этой науки и получили достаточно широкую разработку. Это прежде всего применение теории вероятностей и математической статистики как для установления закономерностей возникновения отказов, так и главным образом для изучения механо-физико-химических процессов, которые изменяют свойства, приводящие к разрушению деталей машин, а также для расчета поведения объекта в процессе эксплуатации, т. е. прогнозирования. Развитие математических методов для разработки теоретической базы надежности необходимо, но недостаточно.

2. Теория симметрии нашла свое отражение в науке о надежности. По определению Германа Вейля: *«Симметрия является той идеей, посредством которой человек на протяжении веков пытался постичь и создать порядок, красоту и совершенство»*. *«Понятие о симметрии — одно из наиболее обобщающих фундаментальных понятий физики и естествознания в целом...»* — так определяет значение этой теории академик Б. К. Вайнштейн. Теория симметрии — фундаментальное учение в объяснении зависимости между происхождением и строением, с одной стороны, и свойствами, с другой стороны, материалов, применяемых для изготовления деталей машин.

3. Теория надежности базируется также на учении об объемной и поверхностной прочности материалов деталей машин. Если расчеты деталей машин на объемную прочность не представляют особой сложности, то расчет долговечности деталей с учетом поверхностной прочности или износостойкости представляет большую трудность. Поэтому изучение и установление закономерностей различных видов изнашивания — ключ к резкому повышению надежности техники. Где и когда будет установлена зависимость износа I от строения материала $СМ$, т. е. $I=f(СМ)$, там и тогда появится реальная возможность инженерного расчета машин на надежность. Износ — структурно-чувствительный фактор.

4. Широко используются в теоретических основах надежности достижения таких наук, как физика твердого тела, химия, металлофизика, кристаллофизика, кристаллохимия, физическая химия, химическая физика, кристаллография и другие, которые служат теоретической основой современного материаловедения. Без глубоких знаний природы и строения (структуры) материала, причин его разрушения в различных условиях (усталость, износ, коррозия и др.), без основ управления формированием необходимых свойств невозможно создать способы получения практически безыносных поверхностных слоев деталей, а также принципиально новых материалов.

Без установления зависимостей и математического описания изменений начальных свойств материала деталей в процессе эксплуатации невозможно решить коренную задачу надежности — из-

менение долговечности, безотказности, ремонтпригодности, сохранности объекта (машины), т. е. изменение основных показателей надежности, и разработать методы создания прочных материалов.

Оценивая надежность сельскохозяйственной техники, отметим, что по мере развития производства создаются машины различного уровня надежности.

Надежность современных машин несоизмеримо выше надежности тех, которые были полвека назад. Так, если трактор ХТЗ-15/30 требовал подтяжки шатунных подшипников через 50...70 моточасов, то современные тракторы требуют подобного вмешательства только через 5...6 тыс. моточасов. И все же надежность сельскохозяйственной техники в меру требований сегодняшнего дня нельзя признать достаточной по основным ее показателям: средний ресурс наработки новых тракторов до капитального ремонта пока не превышает 5...6 тыс. моточасов; вероятность безотказной работы большинства сложных машин не превышает 0,7...0,8; коэффициент технической готовности уборочных машин колеблется в пределах 0,7...0,75.

Решениями XXVI съезда ~~КС~~ и майского (1982 г.) Пленума ЦК КПСС намечено неуклонно повышать технический уровень, качество и особенно надежность тракторов, комбайнов, машин и оборудования для сельскохозяйственного производства.

**§ 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ,
ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

ГОСТ 13377—75 «Надежность в технике. Термины» содержит 86 терминов, которые разделены на следующие основные группы:

- 1) общие понятия;
- 2) виды отказов;
- 3) показатели надежности;
- 4) термины, относящиеся к резервированию.

Рассмотрим термины ГОСТ и некоторые другие общие понятия, приводимые в технической литературе по надежности.

Технические объекты могут иметь следующие основные состояния: исправность и неисправность, работоспособность и неработоспособность, предельное состояние.

Исправность (исправное состояние) — это состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Неисправность — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно-технической документацией.

К неисправностям относят снижение производительности и экономичности трактора сверх допустимых пределов, потерю точности станком, отклонение в толщине слоя окраски кузова, вмятины на кабине автомобиля и т. п.

Работоспособность — это состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Понятие исправность шире, чем понятие работоспособность. Исправный объект всегда работоспособен. Работоспособный объект может быть неисправным, однако при этом неисправность не влияет на функционирование объекта. Например, коробка передач сохраняет работоспособность, если шестерни изношены, но ее эксплуатационные показатели не вышли за пределы, установленные техническими требованиями.

Неработоспособность — это состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Предельное состояние — это состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, или неустранимого ухода заданных параметров за установленные пределы, или неустранимого снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой, или необходимости проведения капитального ремонта.

Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данный объект.

Причинами прекращения эксплуатации могут быть: невозможность обеспечения безотказности или эффективности эксплуатации объекта и минимально необходимого уровня безопасности, значительные затраты на ремонт объекта (экономическая нецелесообразность), моральное старение объекта.

Переход объекта из исправного состояния в неисправное, из работоспособного в неработоспособное состояние характеризуется следующими событиями: повреждением и отказом.

Повреждение — это событие, заключающееся в нарушении исправности объекта или его составных частей вследствие влияния внешних воздействий, превышающих уровни, установленные в нормативно-технической документации на объект.

Повреждение может быть несущественным, при котором работоспособность объекта сохраняется, и существенным, которое может явиться причиной нарушения работоспособности.

Несущественные повреждения в случаях их неустранения могут переходить в существенные с нарушением работоспособности, т. е. приводить к отказам.

Отказ — это событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, т. е. это событие, при котором происходит полная или частичная утрата работоспособности объекта.

При отказе работу на объекте необходимо прекратить вследствие возникших технических неисправностей или работы его с недопустимыми отклонениями от заданных эксплуатационных характеристик (параметров).

Появление отказа всегда связано с возникновением неисправности. Снижение мощности двигателя автомобиля сверх установленного предела будет отказом. Одновременно с этим автомобиль переходит в состояние неисправности.

Однако не всегда возникновение неисправности означает появление отказа. Например, подтекание масла в агрегатах трактора свидетельствует об их неисправности, но не всегда приводит к отказам.

С точки зрения восстановления работоспособности объекты можно разделить на следующие: восстанавливаемые и невосстанавливаемые, ремонтируемые и неремонтируемые.

Восстанавливаемый объект — это объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Невосстанавливаемый объект — это объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Ремонтируемый объект — это объект, исправность и работоспособность которого в случае возникновения отказа или повреждения подлежит восстановлению.

Неремонтируемый объект — это объект, исправность и работоспособность которого в случае возникновения отказа или повреждения не подлежит восстановлению.

Большинство объектов сельскохозяйственной техники восстанавливаемые и ремонтируемые.

Неремонтируемыми (невосстанавливаемыми) являются поршневые кольца, фрикционные накладки тор-

мозов и сцепления, прокладки, уплотнительные кольца и др. Такие детали при ремонте заменяют.

Одни и те же изношенные изделия в зависимости от технического состояния и наличия дефектов могут быть неремонтируемыми, например тонкостенные вкладыши коленчатого вала или коленчатый вал с трещинами, и ремонтируемыми — эти же детали без трещин.

Надежность — одна из главных оценок качества и эксплуатационных характеристик сельскохозяйственной техники.

В ГОСТ 13377—75 дано следующее определение термина «надежность».

Надежность — свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

В теории применяются понятия физическая и схемная надежность.

Физическая надежность отдельного объекта, или простого изделия характеризуется его способностью надежно работать в заданных условиях в течение заданного времени. На уровень физической надежности влияет стабильность характеристик материалов и производственных процессов изготовления или ремонта объектов.

Схемная надежность сложного изделия или системы характеризуется их способностью выполнять заданные функции в заданных условиях в течение заданного времени при наличии отказов отдельных элементов, агрегатов или сборочных единиц. Она обуславливается уровнем физической надежности отдельных элементов и агрегатов, схемами их включения и взаимосвязей в общей функциональной схеме сложного изделия или тем, т. е. фактический уровень надежности сложного изделия зависит от уровня физической надежности отдельных элементов и их рационального включения в конструктивные схемы сборочных единиц и системы изделия.

Надежность закладывается при проектировании, обеспечивается в производстве (при изготовлении) и поддерживается (сохраняется) в эксплуатации. Важное место в поддержании (сохранении), а точнее в реа-

лизации необходимого уровня надежности имеет эксплуатация, включая техническое обслуживание и ремонт.

Техническое обслуживание (ГОСТ 18322—78) — это операция или комплекс операций по поддержанию работоспособности или исправности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

Ремонт — это комплекс операций, предназначенный для восстановления исправности или работоспособности изделий и восстановления ресурса изделий или их составных частей.

Надежность как сложное свойство в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации должна включать в себя в отдельности или в определенном сочетании следующие свойства: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. Из этого определения следует, что отказов не должно быть в течение заданного промежутка времени или заданной наработки. **Наработкой** называется продолжительность или объем работы, выполненный объектом. Она может измеряться в часах, моточасах, километрах пробега, гектарах убранный площади или других единицах.

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Различие между безотказностью и долговечностью заключается в следующем. Безотказность — это непрерывная работоспособность в течение некоторого времени или наработки, а долговечность предусматривает перерывы в эксплуатации, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом.

Ремонтпригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения его отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

От приспособленности машины к работам, предусмотренным системами технического обслуживания и ремонта, зависят убытки, возникающие вследствие не-

Продукция — это материализованный результат процесса трудовой деятельности, полученный в определенном месте за определенный интервал времени и предназначенный для использования потребителями в целях удовлетворения их потребностей как общественно-го, так и личного характера.

Продукция может быть готовой или находящейся в незавершенном производстве (в процессах изготовления, выращивания и т. п.) в процессе ремонта и т. д. Продукция — обобщающее понятие и бывает двух видов: изделия и продукты.

Изделие — единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках или экземплярах. В отдельных случаях количество определенных деталей (например, крепежных деталей и др.) характеризуется непрерывной величиной, исчисляемой с помощью единиц массы.

Продукт — результат работы производственного предприятия (нефтепродукты, волокно и др.) или предприятий сельского и лесного хозяйства (зерно, мясо, древесина и др.). Количество продуктов характеризуется непрерывной величиной, исчисляемой, например, в килограммах, тоннах, кубических метрах.

Свойство продукции — объективная особенность, которая может проявляться при создании, эксплуатации или потреблении продукции.

Эксплуатация — термин, рекомендуемый для применения к объектам или изделиям, у которых в процессе использования расходуется ресурс.

Потребление — это расход продуктов и изделий в процессе их использования. Например, нефтепродукты, метизы, скобяные изделия и др.

Продукция имеет много различных свойств. Совокупность всех свойств данной продукции позволяет различать разные виды продукции.

Присущие продукции свойства проявляются при проектировании, разработке, изготовлении, испытаниях, использовании, техническом обслуживании, ремонте, хранении, транспортировании и т. д.

Качество продукции — совокупность ее свойств, обуславливающих пригодность продукции удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Качество продукции характеризуется целым рядом простых и сложных свойств, которые условно можно объединить в пять групп: 1) эксплуатационные показатели и потребительские свойства (для трактора — мощность, скорость, расход топлива; для станка — точность, производительность, степень автоматизации и т. д.); 2) надежность; 3) технологичность; 4) показатели технической эстетики (внешний вид и т. д.), эргономические показатели (физиологические и гигиенические показатели, удобство работы и т. п.); 5) степень стандартизации, унификации и взаимозаменяемости.

§ 4. КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ

Важнейший признак качества промышленной продукции — ее надежность, которая проявляется в процессе работы. Надежность — одна из составляющих частей качества.

Перечень устройств, надежность которых ежечасно, ежеминутно беспокоит человека, очень велик. Нет человека, который в той или иной степени в своей жизни и деятельности не сталкивался бы с проблемой надежности.

Надежность зависит от качества создания (изготовления), т. е. совокупности свойств процесса создания (изготовления) объектов, от которых зависит соответствие этого процесса и его результатов установленным требованиям. Качество изготовления объектов определяется качеством оборудования, инструмента, сырья, материалов и комплектующих изделий, качеством нормативной документации на изготовление объектов и качеством труда изготовителей.

Рассмотрим такие понятия, как качество эксплуатации объекта, качество ремонта объекта и качество труда работника.

Качество эксплуатации объекта — это совокупность свойств процесса эксплуатации объекта, от которых зависит соответствие этого процесса и его результатов установленным требованиям. Оно зависит от качества эксплуатационной документации, эксплуатационного оборудования и приспособлений, запасных частей и принадлежностей (в том числе материалов), а также от качества труда эксплуатационников.

Качество ремонта объекта — один из факторов, определяющих состояние отремонтированной продукции. Другой фактор — качество объектов, предназначенных для ремонта (состояние ремфонда). В свою очередь, качество ремонта зависит от качества ремонтной технической документации, ремонтного оборудования, инструмента, запасных частей и комплектующих изделий, а также от труда ремонтников. Эффективность, качество и надежность системы «человек — машина» взаимосвязаны и зависят как от машины, так и от труда работников.

Качество труда работников — совокупность свойств процесса труда, обусловленных способностью и стремлением работника выполнить определенное задание в соответствии с установленными требованиями. Оно зависит от сложности труда, квалификации, навыков, психофизиологического состояния работника и его отношения к труду.

Система «человек — машина» в условиях современного сельскохозяйственного производства чрезвычайно сложна. Для повышения эффективности использования сельскохозяйственной техники требуется: надежность машин и механизмов; постоянное улучшение их эксплуатационных возможностей; мощная ремонтная база; высокая квалификация всех, кто имеет отношение к производству и использованию тракторов, комбайнов, автомобилей и разнообразного оборудования для земледелия и животноводства, а также оборудования ремонтных предприятий. В эту систему также необходимо включить социальный аспект, который в настоящее время играет немаловажную роль,

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Отказы объектов в процессе их эксплуатации возникают по трем основным причинам: усталость материала, коррозионное разрушение, изнашивание поверхностей трения деталей. Классифицировать отказы сельскохозяйственной техники можно по следующим признакам.

По природе происхождения отказы делят на естественные и преднамеренные (искусственные). Последние могут быть вызваны различными причинами вследствие сознательных или несознательных действий персонала, эксплуатирующего технику.

По месту возникновения отказа различают слабые элементы объекта, которые необходимо или усилить, или изменить их конструкцию.

По времени возникновения отказа судят о моменте его появления в течение «жизненного» цикла машины. Физическая природа приработочных отказов заключается в несовершенстве технологии изготовления деталей (неправильно выбран материал и способ его упрочнения) и низком качестве сборки машины.

По характеру возникновения отказы подразделяют на внезапные, постепенные, перемежающиеся, устойчивые, самоустраняющиеся и сбой. Обычно это деление ограничивается внезапными и постепенными отказами.

Физическая природа внезапных отказов в период нормальной эксплуатации заключается в усталости материала деталей и разрушении их вследствие возникновения пиковых нагрузок, которых в условиях эксплуатации избежать невозможно.

Физическая природа постепенных, т. е. износных, отказов (сюда относится и коррозия) заключается в

накоплении необратимых изменений в поверхностных слоях металла, приводящих к изменению размеров и физико-механических свойств деталей и пар трения.

По взаимосвязи отказов определяют их совместимость. Например, к зависимому отказу можно отнести заедание вкладышей коленчатого вала, возникшее вследствие отказа масляного насоса двигателя. Отказ же клапанного механизма не может быть зависим от отказа коробки передачи и т. д.

По внешним признакам определяют доступность обнаружения отказов невооруженным глазом. Они могут быть очевидными (например, течь радиатора) и скрытыми (обрыв клапана двигателя).

По степени воздействия отказа делают заключение о возможности дальнейшего использования объекта или его элемента. При полном отказе неремонтированных элементов их работоспособность не восстанавливают. Частичный отказ присущ ремонтируемым объектам и их элементам. Эти отказы часто называют соответственно ресурсным и эксплуатационным.

По причине возникновения отказы разделяются на следующие виды: а) исследовательские отказы, возникают вследствие ошибок, допущенных на стадии исследований, приводящих к выдаче неверных исходных данных для проектирования (конструирования) объекта или его элемента; б) расчетно-конструкторские отказы, появляются вследствие ошибок при выборе кинематики механизмов и выполнении прочностных расчетов, расчетов на износ и назначении технических условий на изготовление элементов и объекта в целом; в) производственно-технологические отказы, возникают вследствие плохого качества материала деталей, несовершенных технологических способов и методов их обработки, применения недостаточно точных рабочих и мерительных инструментов и оборудования, приводящих к невыполнению технических условий на изготовление и сборку элементов и объекта в целом. Низкую надежность сельскохозяйственной техники в основном следует отнести на эти причины; г) эксплуатационные отказы — вследствие использования объектов в условиях, для которых они не предназначались, нарушения правил эксплуатации (недопустимые перегрузки, невыполнение

правил технического обслуживания, транспортирования и хранения), а также низкого качества ремонта.

По последствиям или затратам отказ может быть тягчайшим, когда он приводит к человеческим жертвам (отказ рулевого управления или тормозов мобильных машин), тяжелым, средним или незначительным (по мере затрат времени и средств на его устранение). Здесь имеется прямая связь с классификацией отказов, действующей на предприятиях Госкомсельхозтехники СССР [6, 7], согласно которой по сложности устранения все они подразделяются на три группы.

Первая группа сложности — это отказы, устраняемые ремонтом или заменой деталей, расположенных снаружи сборочных единиц, и агрегатов без разборки последних, а также отказы, устранение которых требует внеочередного проведения операций ТО-1 и ТО-2.

Вторая группа сложности — это отказы, устраняемые ремонтом или заменой легкодоступных сборочных единиц и агрегатов (или их деталей), а также отказы, устранение которых требует раскрытия внутренних полостей основных агрегатов без их разборки или внеочередного проведения операций ТО-3.

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

Более подробно разнообразие внешних и внутренних факторов, приводящих к отказам техники, будет рассмотрено в последующих параграфах этой главы.

§ 2. ВНЕШНИЕ И ВНУТРЕННИЕ ФАКТОРЫ, СНИЖАЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ ОБЪЕКТОВ

Создав машину как средство производства, человек по мере расширения своих знаний, умений и возможностей улучшает ее. Высокий уровень знаний и применение современной техники, а также научных методов организации производства — необходимые условия для обеспечения высокой производительности труда.

В современных машинах причина различных изменений (повреждений и разрушений) деталей — это воздействие на них различных видов энергии (механичес-

кой, тепловой, химической, электромагнитной) в виде различных полей и сред тех или иных параметров.

Детали сельскохозяйственной техники повреждаются и разрушаются: под действием несущих нагрузок и скоростей (физических полей), так называемых факторов P , v , T ; от воздействия кислотной или щелочной сред (химических полей); вследствие совместного воздействия физических и химических полей. В большинстве случаев одна и та же деталь или сопряжение подвержены одновременному действию нескольких причин, но ведущей будет, как правило, одна из них.

Разрушенный объект — это такой объект, или его элемент, который утратил в результате длительного использования свои функциональные свойства и работоспособность. Под разрушением детали следует понимать всякий протекающий в материале или на ее поверхности процесс, приводящий к тому, что в период использования или хранения объекта его элементы больше не могут выполнять свои функции.

Поврежденный элемент — это такой элемент, который частично потерял свои функциональные свойства.

Кроме множества факторов, возникающих под действием внешних причин, детали машин претерпевают повреждения и разрушения под действием внутренних факторов. К ним относятся: 1) усталость материала вследствие перераспределения внутренних напряжений, возникших в процессе структуро- и формообразования деталей; 2) объемная газовая коррозия. Эти причины возникают в процессе естественного старения, т. е. стремления материалов возвратиться в равновесное состояние, избавиться от технологической «наследственности». Они приводят к короблению детали, образованию трещин, изменению макро- и микроразмеров отдельных поверхностей, а также к полному разрушению детали на отдельные части.

Ниже рассмотрим разрушения деталей машин под действием различных полей и сред.

Разрушение деталей под действием физического поля. Поле физической величины — совокупность значений физической величины (температуры, скорости и т. д.) во всех точках какой-либо пространственной области в данный момент времени. Если поле изменяется во времени, оно называется нестационарным; если не изменяется во времени — стационарным. Например,

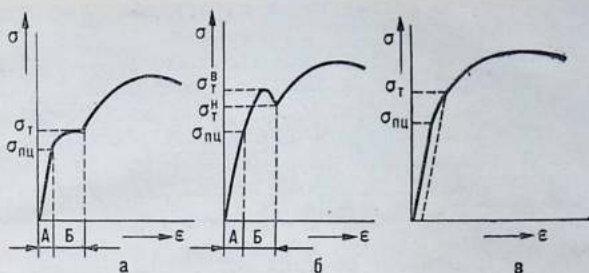


Рис. 1. Диаграммы растяжения металлов:

а — появление текучести в виде площадки; *б* — образование текучести в виде зуба; *в* — постепенное нарастание пластической деформации; *А* — зона упругости; *Б* — упругопластическая зона.

нестационарным физическим полем будет усилие на крюке трактора при пахоте или другой работе.

На детали действуют следующие виды физических полей: силовое (механическое), тепловое, электрическое, магнитное, звуковое, световое и др.

Пластическое деформирование деталей проявляется в виде изгиба, скрученности, растяжения или смятия отдельных поверхностей. Происходит это под действием силовых (статических и динамических) нагрузок, вызывающих увеличение напряжений в материале, превышающих предел текучести. Так, изгибаются (коробятся), скручиваются, растягиваются детали рам, облицовки кузова и др.

Текучесть — это свойство металлов и их сплавов деформироваться в упруго-пластической зоне с нарастающей остаточной деформацией по достижении напряжения в материале свыше определенного значения. На диаграммах растяжения (рис. 1) наступление текучести часто выражается в виде площадки, которая возникает при напряжениях, соответствующих пределу текучести σ_T (рис. 1, *а*). У металлов с большим количеством примесей (малоуглеродистые стали, из которых изготавливают большинство деталей сельскохозяйственных машин) наступление текучести связано с образованием зуба текучести (рис. 1, *б*). В данном случае при повышении напряжений вплоть до верхнего предела текучести σ_T^B пластическая деформация очень мала, затем наступает срыв напряжения до нижнего предела

текучести σ_T^H и последующее нарастание пластической деформации без прироста напряжения.

Большинство качественных поликристаллических металлов и сплавов не обнаруживает резко выраженного предела текучести: у них после достижения предела пропорциональности наблюдают постепенное нарастание пластической деформации (рис. 1, в). В этом случае определяют условный предел текучести по значению заданной пластической деформации (обычно 0,2...0,3 %).

Текучесть зависит от типа структуры металла, размера зерна, наличия и видов дефектов кристаллической структуры и др. Для сравнительно чистых металлов уровень предела текучести зависит от размера зерна в соответствии с уровнем Холла — Потча:

$$\sigma_T^H = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}},$$

где σ_0 и k — постоянные металла; d — средний размер зерна, мкм.

В корпусных деталях (блоки, корпуса коробок передач и задних мостов, головки цилиндров, корпуса редукторов и др.) при воздействии на них внешних силовых нагрузок, вибрации, нагреве протекают процессы старения, и внутренние напряжения в связи с этим перераспределяются. Вследствие этого детали изгибаются (коробятся).

Хрупкое и вязкое разрушение. Хрупкое разрушение наступает без предварительной деформации под действием нормальных напряжений.

Вязкое разрушение сопровождается значительной предварительной деформацией, вызываемой касательными напряжениями.

Прочность деталей во многом зависит от состояния тонкого поверхностного слоя, в котором обычно образуются трещины и на поверхности которого происходит выход дислокаций. Прочность углеродистых сталей при закалке увеличивается с возрастанием содержания углерода, что приводит к образованию пересыщенных твердых растворов углерода в железе, препятствующих движению дислокаций, но способствующих образованию трещин.

Прочность мягких сталей ($C < 0,2$ %) почти не зависит от содержания перлита, а определяется размером ферритных зерен, что объясняется неспособностью

перлита у этих сталей образовывать «корсет» в металле. Для сталей с содержанием углерода свыше 0,3 % влияние перлита увеличивается, однако ферритные зерна во всем диапазоне доэвтектоидных сталей ($C \leq 0,83\%$) остаются фактором, определяющим прочность металла, так как они составляют одну непрерывную фазу, выделяющуюся по границам бывших зерен, тогда как перлит группируется внутри этих зерен.

Усталостное разрушение. Детали, несущие статические и циклические силовые нагрузки (элементы рам машины, коленчатые и торсионные валы, листы рессор, пружины, шатуны и др.), разрушаются вследствие усталости. Усталостное разрушение металлов связано с пластической деформацией. Оно приводит к полной потере работоспособности деталей.

Прочность — способность материала сопротивляться разрушению до определенного напряжения (предела прочности). Она зависит от свойств материала и приложенного физического поля и определяется главным образом значением напряжения, скоростью его изменения, видом деформации и характером напряженного состояния.

Многократное приложение нагрузки вызывает разрушение деталей при напряжениях, значительно меньших, чем в случае однократного их приложения. Явление, при котором напряжения разрушения при большом числе повторных нагружений могут быть ниже не только предела прочности и предела текучести, но и предела упругости, называется усталостью металлов.

Разрушение может происходить тремя путями (рис. 2), но оно всегда заканчивается образованием трещин вплоть до разрушения. Образование субмикротрещин носит дислокационный характер.

Характер повторно-переменных нагружений деталей может быть различным (рис. 3). Цикл напряжений характеризуется максимальным $\sigma_{\max}$, минимальным $\sigma_{\min}$ напряжениями, амплитудой

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2},$$

средним напряжением

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

и коэффициентом асимметрии цикла $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$.

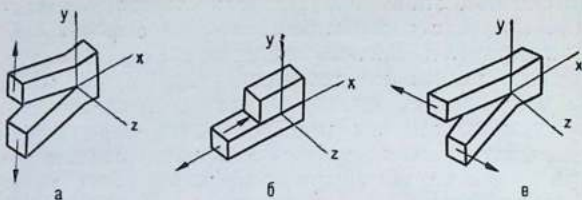


Рис. 2. Схема деформаций:

a — нагружение растяжением; *b* — нагружение сдвигом (плоская деформация); *в* — нагружение сдвигом (антиплоская деформация).

Используя эти основные параметры, можно описать каждый из показанных на рисунке 3 циклов напряжений, принимая, что напряжения растяжения положительны, а напряжения сжатия отрицательны. Например, знакопеременный симметричный цикл описывается так:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_a; \quad \sigma_m = 0; \quad R = \frac{-\sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} = -1.$$

Основной критерий, характеризующий сопротивление металла усталостному разрушению, — предел выносливости (предел усталости), который для знакопеременного симметричного цикла обозначается σ_{-1} .

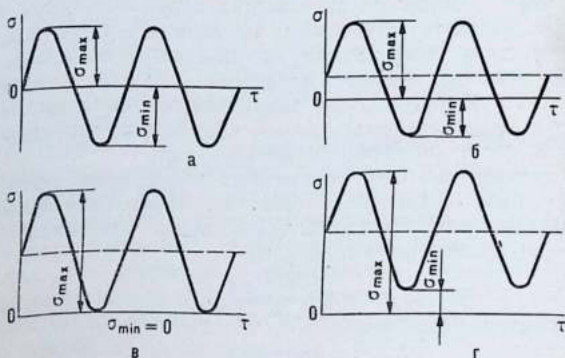


Рис. 3. Характер повторно-переменных напряжений:

a — знакопеременный симметричный цикл; *b* — знакопеременный асимметричный цикл; *в* — пульсирующий цикл; *г* — знакопеременный цикл.

Предел выносливости (при данном R) — это наибольшее напряжение цикла $\sigma_{\max}$, которое может выдерживать металл образца без разрушения от усталости. При этом число перемен нагрузки, называемое базой, должно быть неограниченным и не должно вызывать усталостного разрушения.

Другой критерий, которым обычно характеризуют стойкость металла против усталости, — долговечность,

Долговечность N — это число циклов напряжения, при котором происходит разрушение в данных условиях испытания.

Характерные признаки разрушения деталей от усталости — отсутствие заметных остаточных деформаций и образование на поверхности излома двух зон: зоны развития трещины с гладкой поверхностью и зоны поломки с шероховатой поверхностью.

Процесс усталости металла обычно разделяют на два периода во времени: 1) накопление необратимых изменений в металле под влиянием локальных микродеформаций, приводящее к образованию зародыша трещины; 2) развитие (подростание) трещины.

Тепловое разрушение происходит под действием теплового поля. Некоторые детали машин во время работы нагреваются, вследствие чего в них разрушается созданная ранее структура материала, и они теряют свои служебные свойства. К таким деталям относятся головки цилиндров, форкамеры, поршни, выпускные коллекторы и трубы.

Большому тепловому напряжению подвержены токопроводящие детали электрооборудования машин при коротком замыкании или замыкании «на массу» вследствие разрушения изоляции или обрыва проводов, обмоток. Детали, претерпевшие тепловое разрушение, восстановлению не подлежат.

Оплавление и разрушение поверхности деталей вызываются действием электромагнитного поля. Некоторые детали электрооборудования машин, проводящие ток, согласно кинематике механизмов, размыкаются и замыкаются или находятся друг от друга на определенном расстоянии. Между этими деталями периодически возникает искровой разряд. В этом случае электроны перемещаются с катода на анод. С поверхности анода уносятся частицы металла, которые частично рассеиваются в окружающей среде, а частично

переносятся на катод. Такому виду разрушения подвержены электроды искровых свечей зажигания, контакты прерывателей и др. Эти детали обычно подлежат замене.

Потеря приданных служебных свойств. Такие детали, как роторы магнето, генераторов переменного тока, и другие намагниченные детали, не изменяя своих геометрических размеров и целостности, теряют работоспособность вследствие потери магнитных свойств под воздействием накладываемых электрического и магнитного полей, а также силового поля путем встряски и вибрации. Работоспособность зависит и от действия теплового поля.

Такие детали, как листы рессор, пружины, торсионные валы, не изменяя своих размеров, теряют упругость и форму вследствие перераспределения внутренних напряжений под действием силового поля. Приданные служебные свойства деталей могут быть восстановлены путем проведения повторных операций (намагничивания роторов и термической обработки упругих деталей).

Разрушение деталей под действием химического поля (среды). Поле химической величины — это совокупность значений химической величины (кислотности, щелочности) во всех точках какой-либо пространственной области в данный момент времени.

В дальнейшем будем употреблять определения среды и химическое поле как равнозначные.

Под действием среды (химического поля) детали претерпевают коррозионное разрушение. Коррозия — это разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней (коррозионной) средой. Борьба с коррозией металлов — старейшая техническая проблема, которая превратилась в проблему государственной важности. Поэтому не удивительно, что дальнейший технический прогресс не может развиваться без решения коррозионных и триботехнических (износных) проблем.

Термодинамика и кинетика коррозии. Причина коррозии — термодинамическая неустойчивость металлов, вследствие чего в природе они всегда находятся в окисленном состоянии. Задача металлургии, затрачивая определенную энергию, восстановить металлы из различных природных соединений. Кор-

розия — процесс, прямо противоположный металлургическому, не нуждающийся в каких-либо энергетических затратах. Определить возможность протекания коррозии можно по изменению изобарно-изотермического потенциала (энергии Гиббса). Если G_1 — энергия исходных веществ, а G_2 — энергия продуктов реакции, то изменение энергии системы составит:

$$\Delta G = G_2 - G_1 \quad (2.1)$$

Самопроизвольно протекают лишь те процессы, в результате которых происходит уменьшение энергии Гиббса, т. е. $G_1 < G_2$ или $\Delta G < 0$.

Если рассмотреть типичную реакцию окисления для металлов $2Me + 2O_2 + H_2O \rightarrow 2Me(OH)_2$, то ΔG° (для стандартных условий) для реакций превращения в гидроксиды магния, меди и золота на 1 моль соответственно составит: -598 , -120 и $+66$ кДж. Из этих данных следует, что магний более склонен к окислению, чем медь; окисление же золота невозможно. Но первостепенное практическое значение имеет представление о скорости коррозии.

Коррозия — гетерогенный процесс, т. е. процесс, протекающий на границе раздела металл — газ или металл — жидкость. Реальная скорость коррозии определяется многими факторами: состоянием поверхности металла и особенностями его структуры, температурой, составом и скоростью движения коррозионной среды, механическими напряжениями материала и др. Скорость зависит от протекания следующих основных стадий.

1. Доставка к поверхности металла коррозионно-активных частиц (ионов, молекул), осуществляемая конвекцией или диффузией.

В соответствии с законом Фика скорость диффузии (количество вещества, перенесенное в единицу времени) определяется следующим уравнением:

$$v_D = K_D S dc/dx, \quad (2.2)$$

где K_D — коэффициент диффузии (возрастает с увеличением температуры); S — площадь сечения, через которое протекает диффузия; dc/dx — градиент концентрации.

2. Взаимодействие частицы с металлом, протекающее во многих случаях, многостадийно. Скорость реак-

ции (количество вещества, реагирующего в единицу времени) определяют в соответствии с уравнением:

$$v_p = K_p C \exp[-W/RT], \quad (2.3)$$

где K_p — постоянный коэффициент скорости реакции; C — концентрация частиц; W — энергия активации, представляющая собой тот избыток энергии по сравнению со средней, обладание которым делает частицу реакционноактивной; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; $\exp[-W/RT]$ — член уравнения, характеризующий долю частиц, обладающих необходимой энергией активации, т. е. долю активных частиц.

Из уравнения (2.3) следует, что скорость реакции выше при низкой энергии активации и что она возрастает с увеличением концентрации и температуры.

3. Отвод продуктов коррозии от поверхности металла, осуществляемый в соответствии с законом диффузии. Продукты коррозии во многих случаях положительно влияют на торможение коррозионного процесса. В частности, на поверхности металлов образуются соответствующие пленки, тормозящие проникновению коррозионноактивных частиц.

Классификация коррозии. По геометрическому характеру коррозионных разрушений сплошная (общая) и местная коррозия может быть подповерхностная, межкристаллитная, избирательная и др.;

по характеру взаимодействия металла со средой — химическая, протекающая в средах, не проводящих электрический ток (газы, нефть и т. д.), и электрохимическая — в водных растворах электролитов (солевая, кислотная, щелочная и пр.);

по типу коррозионной среды — атмосферная, газовая, морская, подземная.

По характеру дополнительных воздействий, которым подвергается металл одновременно с действием коррозионной среды, — коррозия под напряжением, коррозия при трении, контактная коррозия, фреттинг-коррозия, электрокоррозия внешним током, радиохимическая коррозия (под действием радиоактивного излучения), биокоррозия (под воздействием продуктов, выделяемых микроорганизмами) и др.

Характерные типы коррозионных разрушений стали показаны на рисунке 4. Необходимо отметить, что единой, общепризнанной классификации коррозии нет, как нет и не может быть общего ответа на вопрос о том, какой вид коррозионного разрушения наиболее опасен.

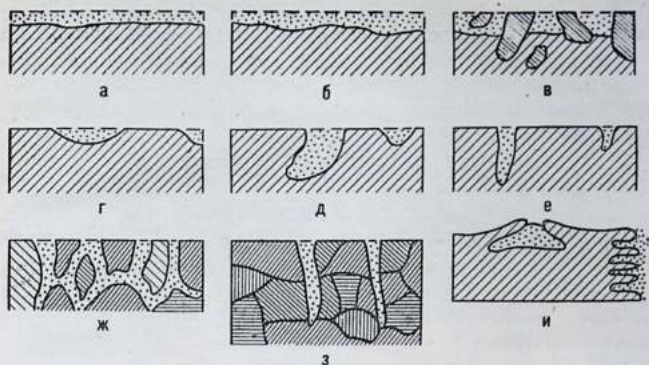


Рис. 4. Типы коррозионных разрушений стали:

а — равномерная; б — неравномерная; в — структурно-избирательная; г — коррозия пятнами; д — коррозия язвами; е — коррозия точками; ж — межкристаллитная; з — коррозионное растрескивание; и — подповерхностная.

Такой ответ всегда конкретен для строго определенных условий использования объекта или изделия.

Наиболее опасные виды коррозии в современной технике — коррозионное растрескивание (рис. 5, а); межкристаллитная коррозия (рис. 5, б); питтинговая коррозия, или коррозия пятнами (рис. 5, в). Таким видам коррозии подвержены соответственно детали топков кормоприготовительных машин, головки цилиндров, выпускные коллекторы; выпускные трубы; кузова автомобилей, гильзы цилиндров в полосе движения верхнего компрессионного кольца.

Для оценки скорости или степени коррозии различают прямые и косвенные показатели.

Прямые показатели: а) уменьшение или увеличение массы, отнесенные к единице поверхности (этот показатель, отнесенный ко времени, выражает скорость коррозии); б) глубина коррозии; в) доля поверхности, занятая продуктами коррозии; г) число коррозионных точек на единице поверхности; д) объем выделившегося с единицы поверхности водорода или поглощенного кислорода; е) время до появления первого очага коррозии; ж) время до появления коррозионной трещины или до полного разрушения образца; з) значение тока коррозии.

Косвенные показатели. После определенного времени коррозионных испытаний степень коррозионного разрушения можно определить по изменению: а) физико-механических свойств (временного сопротивления, относительного удлинения и т. д.); б) электросопротивления.

Различают два механизма коррозии: химический и электрохимический.

Химическая коррозия. Применительно к деталям сельскохозяйственной техники химическая коррозия чаще проявляется в виде газовой коррозии. Она проявляется при контакте металлов с кислородом, сернистым газом, сероводородом, углекислотой и другими газами (главным образом при повышенных температурах).

Газовая коррозия начинается при химической адсорбции атомов или ионов химического поля на поверхности металла с образованием нового химического соединения, слой которого увеличивается двумя путями: 1) проникновением через слой компонентов химического поля и их взаимодействием с металлом на границе фаз «металл — продукты реакций»; 2) проникновением через слой атомов соединения и их взаимодействием с химическим полем на границе фаз «продукты реакции — химическое поле».

Взаимодействие металла с кислородом (окисление металла) протекает по уравнению $Me + O_2 \rightleftharpoons MeO_2$.

Постоянную равновесия этой реакции можно выразить через равновесное значение активности a'_{O_2} или

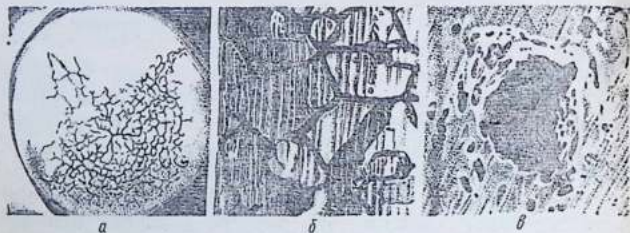


Рис. 5. Внешний вид деталей, претерпевших коррозию: а — коррозионное растрескивание; б — межкристаллитная коррозия; в — питтинговая коррозия.

равновесное значение давления кислорода p'_{O_2} , которое называют упругостью диссоциации оксида:

$$K_{\text{равн}} = 1/a'_{O_2} = 1/p'_{O_2} \quad (2.4)$$

При протекании реакции окисления массы металла и кислорода будут убывать, а масса оксида — возрастать. Поэтому, используя уравнение (2.1), следует учесть, что свободная энергия вещества пропорциональна числу его молей. Зависимость свободной энергии вещества от числа его молей определяется химическим потенциалом и выражается уравнением:

$$\mu = \mu_0 + RT \ln a, \quad (2.5)$$

где μ_0 — химический потенциал 1 моля при активности $a=1$.

Таким образом, используя уравнения (2.1) и (2.5) для реакции окисления, можем записать:

$$\Delta G = \mu_{MeO_2} - \mu_{Me} - \mu_{O_2} = \mu^0_{MeO_2} + RT \ln a_{MeO_2} - \mu^0_{Me} - RT \ln a_{Me} - \mu^0_{O_2} - RT \ln a_{O_2} \quad (2.6)$$

Для данной реакции $\mu^0_{MeO_2} - \mu^0_{Me} - \mu^0_{O_2}$ представляет собой стандартное изменение энергии Гиббса ΔG^0 , которое связано с постоянной равновесия реакции

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{\text{равн}} \quad (2.7)$$

Учитывая это равенство и то, что активность твердой фазы (металла и оксида) принято считать равной единице, получаем уравнение (2.6) в следующем виде:

$$\Delta G = -RT \ln K_{\text{равн}} - RT \ln a_{O_2} \cdot$$

Используя уравнение (2.4) и выражения изменения энергии Гиббса через величины равновесного и парциального давления кислорода, окончательно имеем

$$\Delta G = -RT \ln \frac{1}{p'_{O_2}} - RT \ln p_{O_2} = -RT \ln \frac{p_{O_2}}{p'_{O_2}} \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) позволяет оценить возможность протекания процесса окисления. Если $p_{O_2} > p'_{O_2}$, то процесс окисления возможен, ибо в этих условиях $\Delta G < 0$. Если $p_{O_2} < p'_{O_2}$, то окисление невозможно, так как при этом $\Delta G > 0$.

Скорость газовой коррозии обычно принято выражать через скорость роста оксидной пленки, $v_{\text{газ}} =$

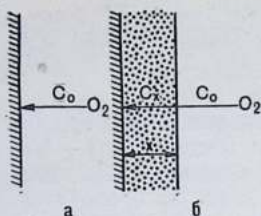


Рис. 6. Схема взаимодействия кислорода с металлом:

а — при образовании тонкой пленки; б — при образовании толстой пленки.

$= dx/d\tau$. Рассмотрим условия роста пленки при кинетическом и диффузионном контроле. На рисунке 6 представлены два возможных случая процесса окисления. Непосредственное взаимодействие кислорода с поверхностью металла возможно не только при полном отсутствии пленки, но и при очень тонкой или пористой (несплошной) пленке (рис. 6, а). В этом случае скорость коррозии в соответствии с законом действия

масс должна быть пропорциональна концентрации кислорода C_0 :

$$dx/d\tau = K_p C_0, \quad (2.9)$$

где K_p — постоянный коэффициент скорости реакции.

После разделения переменных и интегрирования получаем $x = K'\tau + A$. В этом уравнении $K' = K_p C_0$ — величина постоянная для данной концентрации кислорода. Считая величину A близкой к нулю, окончательно уравнение линейного роста оксидной пленки запишется так:

$$x = K'\tau. \quad (2.10)$$

Линейный рост пленки характерен для тонких и проницаемых пленок. Если пленка сплошная и оказывает торможение проникновению кислорода к металлу (рис. 6, б), можно записать:

$$dx/d\tau = K_D S dc/dx.$$

При коэффициенте диффузии K_D , принимая сечение, через которое идет диффузия, равным единице ($S=1$) и выражая градиент концентрации через $C_0 - C_x/x$, где C_x — концентрация кислорода у поверхности металла, а x — толщина пленки, находим:

$$\frac{dx}{d\tau} = K_D \frac{C_0 - C_x}{x}. \quad (2.11)$$

Если диффузия — лимитирующий фактор, то весь кислород, достигший металла, успевает вступить в реакцию и $C_x \rightarrow 0$. Тогда имеют место предельные условия диффузии $dx/d\tau = K_D C_0/x$.

Окончательно после разделения переменных и интегрирования получаем уравнение параболического роста оксидной пленки:

$$x^2 = K'' \tau. \quad (2.12)$$

В этом уравнении $K'' = 2K_D C_0$. Уравнение характеризует рост сплошной оксидной пленки.

В тех случаях, когда $C \neq 0$, что бывает в начальный период окисления, необходимо учитывать и кинетическое, и диффузионное торможение.

Скорость окисления (газовой коррозии) должна быть равна скорости реакции (2.9), которая, в свою очередь, должна равняться скорости диффузии (2.11). Если две последние скорости не равны, то или $C_x \rightarrow 0$ и действительно уравнение (2.12), или $C_x \rightarrow C_0$, что соответствует прободению пленки и условиям протекания процесса будет отвечать уравнение (2.10). Поэтому для стационарной скорости газовой коррозии, протекающей на единице поверхности с кинетическим и диффузионным контролем, следует записать:

$$v_{\text{газ}} = dx/d\tau = K_p C_x = K_D \frac{C_0 - C_x}{x}.$$

В этом уравнении необходимо исключить трудную для определения величину C_x , для чего проведем некоторые простые преобразования.

Подставляя значение C_x в уравнение закона действия масс (2.9), получаем

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{K_p K_D}{K_p x + K_D} C_0. \quad (2.13)$$

Это уравнение учитывает влияние на скорость окисления скорости реакции и диффузии. Разделив правую часть уравнения (2.13) на $K_p K_D$, и проведя интегрирование, получим:

$$\frac{x^2}{K_D} + \frac{2x}{K_p} = K''' \tau.$$

где $K''' = 2 C_0$.

Если пленка очень тонкая ($x \rightarrow 0$), то первый член уравнения значительно меньше второго. Поэтому, пре-

небрегая первым членом уравнения, мы придем к линейному закону роста пленки. Если же пленка велика, то, пренебрегая вторым членом уравнения, мы придем к параболическому закону роста пленки. Когда рост пленки замедлен, то он подчиняется логарифмическому закону:

$$x = \ln(K\tau). \quad (2.14)$$

Различные металлы в различных температурных интервалах окисляются по-разному. Линейный закон характерен для натрия, кальция, магния; параболический — для меди, железа, никеля; логарифмический — для алюминия, цинка, хрома.

В технических металлах и сплавах наблюдается еще один тип коррозионного разрушения — объемная газовая коррозия, которая снижает физико-механические и другие свойства изделий, их качество и надежность. Следует различать два механизма образования объемной газовой коррозии металлов.

1. Поглощение жидким металлом в процессе его производства различных газов: кислорода, водорода, азота и др.

2. Все металлы окклюдируют (поглощают) водород из электролитов, газовой среды, при трибохимических процессах и т. п. Проникновение водорода в металл начинается с его адсорбции на поверхности, даже процесс окклюзии определяется диффузией. Из электролитов происходит адсорбция гидратированных ионов; из газовой фазы адсорбируют как ионы, так и атомы водорода. Водород, вступая в химическое соединение с основным металлом или с его примесями, вызывает объемную коррозию металла.

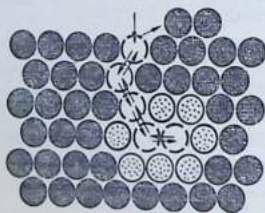


Рис. 7. Схема механизма образования объемной газовой коррозии.

Ионы и атомы кислорода, водорода и азота могут проникать в решетку кристаллов металла по обратному пути, чем атомы металла, которые оставили решетку, создав вакансии, как это показано на рисунке 7. Атомы газов, попав в вакансию, начинают перемещаться вместе с ней по кристаллу, корродируя его по внут-

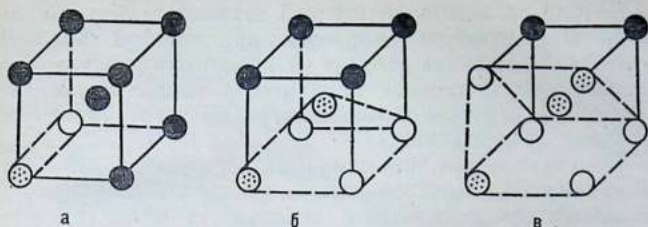


Рис. 8. Схема образования химических соединений в решетке железа:

a — FeO ; *б* — Fe_2O_3 ; *в* — Fe_3O_4 .

ренней поверхности и образуя при этом химические соединения и твердые растворы. Механизмы коррозионного разрушения решетки железа показаны на рисунке 8. В зависимости от того, какое число вакансий будет заполнено кислородом, могут соответственно образоваться следующие соединения: FeO (рис. 8, *a*), Fe_2O_3 (рис. 8, *б*), Fe_3O_4 (рис. 8, *в*), причем коррозионное разрушение решетки в данном случае осуществляется по законам симметрии только в обратном порядке построения решетки.

Легче всего образуются тепловые вакансии по механизму Шоттки. Атом поверхностного слоя, приобретая избыток энергии от соседних, легко испаряется из кристалла или еще легче переходит в адсорбционный слой. В последнем случае не происходит полного разрыва всех межатомных связей. Через некоторое время на место атома поверхностного слоя переходит соседний атом из более глубокого слоя. Таким путем образуется вакансия, переходящая в глубь кристалла. Кристалл как бы растворяет пустоту. Источники тепловых вакансий — свободные поверхности кристалла, а также пустоты и трещины внутри него.

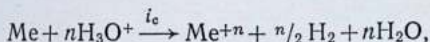
Этот тип объемной газовой коррозии поражает все детали машин, вследствие чего они преждевременно «устают», изнашиваются, уменьшается срок их службы. Яркое свидетельство этого типа объемной газовой коррозии деталей — их повышенная хрупкость при длительном пребывании в нерабочем состоянии.

Электрохимическая коррозия происходит в водных растворах солей, кислот, щелочей, в растворах солей и щелочей, во влажной атмосфере и почве.

Детали сельскохозяйственной техники наиболее подвержены атмосферной коррозии, при которой скорость разрушения металла зависит от влажности воздуха, его температуры, солнечной радиации, а также от загрязненности воздуха коррозионно-агрессивными газовыми и солевыми примесями.

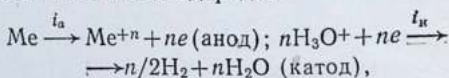
Постулат о том, что коррозия — результат действия гальванических микроэлементов, устарел. Согласно современным представлениям, поверхность металла независимо от наличия или отсутствия на ней каких-либо неоднородностей можно рассматривать как единый электрод, на котором одновременно и независимо друг от друга протекают катодная и анодная реакции, составляющие процесс самопроизвольного растворения (коррозии) металла в растворе электролита. К каждой из этих реакций применимы законы электрохимической кинетики.

Если взять систему электроотрицательный металл (например, Fe) — раствор кислоты, то протекающий в ней коррозионный процесс записывается следующей реакцией:



где H_3O^+ — ион гидроксония; i_c — скорость коррозии.

В действительности этот процесс состоит из двух электродных реакций: анодной реакции — ионизации (окисления) атомов металла и катодной реакции — восстановления ионов водорода:



где i_a и i_k — скорость соответствующих процессов.

Для этих реакций характерно то, что каждая из них протекает со скоростью, не зависящей от скорости другой реакции. В этом смысле они взаимонезависимы. Однако на скорость и той, и другой влияет потенциал электрода*, и притом влияет различно: с ростом потенциала скорость анодной реакции растет, а катодной снижается. Поэтому реакции в то же время взаимосвязаны.

* Потенциал электрода — разность потенциалов, возникающая на границе металл—среда (электролит).

При самопроизвольном протекании процесса скорость коррозии i_c и потенциал корродирующего металла* φ_c определяются условием стационарности, которое сводится к равенству скоростей обеих реакций ($i_k = i_a$). Конкретная форма получаемых при этом выражений зависит от реальных условий протекания коррозионного процесса.

На рисунке 9 показана зависимость скорости реакции от потенциала. Прямые AKD и BKF показывают

зависимость скоростей соответственно катодной и анодной реакций от потенциала. В точке K скорости катодной и анодной реакций равны ($i_k = i_a$), внешний ток $i_{\text{внешн}} = 0$. Координаты точки K соответствуют логарифму скорости коррозии и потенциалу коррозии. На участках AL и BO прямые совпадают соответственно с катодной (ALN) и анодной (BOM) поляризационными кривыми. Однако вблизи потенциала коррозии такого совпадения нет. В этом случае значение внешнего тока в большой степени зависит от обеих реакций. Поэтому пунктирные участки кинетических прямых не могут быть определены поляризационными измерениями. Они легко прослеживаются при помощи аналитических и, в частности, радиохимических методов. Скорость коррозии может быть оценена по результатам поляризационных измерений.

Процесс перехода металла в ионное состояние (коррозия) сложен. Он состоит из ряда последовательных стадий различной природы: диффузионных, химических, электрохимических. Суммарная скорость процесса всегда ограничена скоростью самой медленной стадии, так называемой лимитирующей. Если обе реакции лимитируются электрохимическими стадиями в состоянии

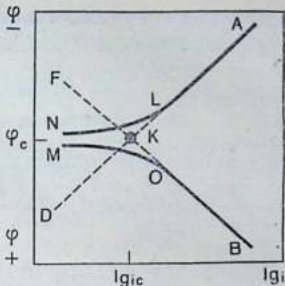


Рис. 9. Зависимость скорости реакции от потенциала металла при коррозии

* Потенциал корродирующего металла (потенциал коррозии) — потенциал, самопроизвольно устанавливающийся на металле при его погружении в агрессивную среду.

ях, далеких от равновесия, то скорость их в общем случае выражается соотношениями:

$$i_a = K_1 \exp(\beta n F / RT \varphi);$$

$$i_k = K_2 C_{H_3O^+} \exp(-\alpha F / RT \varphi),$$

где φ — электродный потенциал металла; $C_{H_3O^+}$ — концентрация ионов гидроксила; α и β — коэффициенты переноса; K_1 и K_2 — постоянные коэффициенты; R — универсальная газовая постоянная; F — число Фарадея.

Любое отклонение от стационарности, которое может быть достигнуто, например, за счет поляризации металла внешним током или контакта его с другим металлом, неизбежно приводит к снижению скорости одной и увеличению скорости другой реакции. При этих условиях возможно отдельно исследовать кинетику каждой из реакций, составляющих процесс коррозии. Это стало основой широко распространенного метода борьбы с коррозией — метода катодной защиты.

Сущность катодной защиты состоит в том, что катодную поляризацию осуществляют путем присоединения защищаемой конструкции к отрицательному полюсу внешнего источника тока или к металлу, имеющему более отрицательный электродный потенциал. Этот метод используют для борьбы с коррозией таких металлов как сталь, медь, латунь, алюминий.

Для борьбы с электрохимической коррозией металлов применяют различные меры, учитывающие не только особенности самого металла, но и условия его эксплуатации. Поэтому нет какой-либо единой системы выбора и применения мер защиты от этой коррозии. Все меры по характеру их воздействия можно разделить на три основных фактора.

1. Воздействие на металл. К числу этих мер можно отнести коррозионностойкое легирование, термообработку, применение различных покрытий, ингибиторов и смазок, а также использование электрохимической защиты.

2. Воздействие на среду. Например, в целях снижения коррозии при нагреве металла используют так называемые инертные или защитные газы. Для уменьшения электрохимической коррозии в коррозионную среду вводят ингибиторы. Другой способ снижения коррозии в водных растворах — обескислороживание.

К способам борьбы с коррозией относится также осушение воздуха специальными адсорбентами в замкнутом пространстве, используемое при консервации металлоизделий. В этом случае также могут быть использованы летучие ингибиторы и инертные газы.

3. Воздействие на конструкцию. Здесь необходимо предотвратить контактную коррозию путем подбора материалов и прокладок; устранить возможность скопления влаги; обеспечить слитность сечения (наименьшее отношение параметра сечения к его площади) деталей; большее предпочтение следует отдавать сварным соединениям, чем болтовым; обеспечить возможность нанесения и возобновления различных покрытий в процессе эксплуатации и ремонта объектов и др.

Наиболее полные сведения о коррозии и защите металлов можно почерпнуть в работе [8].

Разрушения деталей под действием физического и химического полей. Очень редко на детали машин действует отдельно то или иное физическое или химическое поле. В подавляющем большинстве случаев их действия совместны. Мало того, при нагружении, например, стальной пружиной силовое поле содействует образованию теплового, звукового, электромагнитного полей, которые, в свою очередь, действуют на химическое поле, облегчая процесс взаимодействия его с твердым телом и ускоряя процесс его разрушения. Радиационное (лучевое) поле, действуя на смазочные масла, превращает их в коррозионноактивные химические поля.

При деформации деталей вследствие действия силового поля часть механической работы затрачивается на изменение формы и размера металла детали и на повышение его химического потенциала. При этом работа упругой деформации увеличивает химический потенциал и снижает электродный потенциал металла пропорционально напряжению.

Применительно к деталям сельскохозяйственной техники действие физического и химического полей вызывает следующие виды повреждений и разрушений.

Износ — это результат изнашивания поверхности деталей и пар трения под действием физического и химического полей при внешнем трении твердых тел; твердого тела с жидкостью, газом или их консистенцией.

Различают детали и пары трения. Последние — это различные сопряжения деталей в большинстве подвижных соединений. Детали трения представляют собой рабочие органы различных машин и оборудования ферм и комплексов, которые по своей численности в несколько крат превосходят пары трения. Они изнашиваются при внешнем трении о перерабатываемый продукт или массу.

§ 3. МЕХАНО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Причина износа деталей машин — внешнее трение. Согласно ГОСТ, внешнее трение — это явление сопротивления относительно перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии [5]. Таким образом, трение — это прежде всего сопротивление.

Причина внешнего трения твердых тел — действие на них физического или химического поля, а чаще всего следствие их совместного действия. Эти поля возникают прежде всего вследствие тяготения, преодоления инерции, а также из-за превращения одних видов полей в другие, которые могут быть вызваны извне, например, человеком.

В «Диалектике природы» Ф. Энгельс пишет: «...Гров, не профессиональный естествоиспытатель, а английский адвокат, доказал посредством простой обработки уже достигнутых в физике отдельных результатов, что все так называемые физические силы — механическая сила, теплота, свет, электричество, магнетизм и даже так называемая химическая сила — переходят при известных условиях друг в друга без какой бы то ни было потери силы» [1, с. 13].

«Эти различные силы (за исключением звука) — физика небесных тел: а) переходят друг в друга и взаимно замещают друг друга и б) на известной степени количественного нарастания каждой из этих сил, различной для каждого тела, в подвергающихся их действию телах — будут ли это химически сложные тела или несколько химически простых тел — появляются

химические изменения. И мы попадаем в область химии» [1, с. 215].

«Таким образом, мы имеем превращение движения масс в молекулярное движение. Мы вступаем в область молекулярного движения, в физику, и продолжаем исследовать дальше. Но и здесь мы находим, что исследование молекулярным движением не заканчивается. Электричество переходит в химические превращения и возникает из химических превращений; теплота и свет тоже. Молекулярное движение переходит в атомное движение: химия» [1, с. 222].

«Трение и удар порождают внутреннее движение соответствующих тел, молекулярное движение, диффундирующее в зависимости от обстоятельств на теплоту, электричество и т. д. Однако это движение — только временное; с прекращением причины прекращается и его действие. На известной степени все они превращаются в перманентное молекулярное изменение — химическое» [1, с. 256].

Таким образом, исследуя основные формы движения материи, Ф. Энгельс блестяще показал, что внешнее трение твердых тел имеет тройственную механо-физико-химическую природу. Заметим здесь, что сами твердые тела — элементы периодической таблицы химических элементов, разработанной Д. И. Менделеевым.

Основная характеристика внешнего трения — сила трения. Для случая сухого трения эта сила по закону Амонтона равна:

$$F_{\text{ск}} = fP, \quad (2.15)$$

где $F_{\text{ск}}$ — сила трения скольжения; f — коэффициент трения скольжения; P — нормальная к плоскости трения нагрузка (давление тел друг на друга).

Более точным для сухого трения скольжения является двучленный закон трения Б. В. Дерягина:

$$F_{\text{ск}} = \mu(P + p_0 S), \quad (2.16)$$

где μ — истинный коэффициент трения; p_0 — добавочное давление, вызванное силами ионно-атомного притяжения (сцепления); S — общая площадь всех точек непосредственного контакта между телами.

Сила сухого трения качения шара или цилиндра радиусом r по плоской поверхности по закону Кулона равна:

$$F_{\text{кач}} = f_k \frac{P}{r}, \quad (2.17)$$

где f_k — коэффициент трения качения.

Обычно силы трения качения значительно (примерно в 100 раз) меньше сил трения скольжения. Как следует из анализа формул (2.15) ... (2.17), основная причина внешнего трения твердых тел — нормальная нагрузка или давление, возникающие как следствие силы тяготения. Из опыта и практики известно, что на силу трения влияют такие факторы: 1) площадь фактического контакта трущихся тел; 2) скорость относительного перемещения; 3) физико-механические характеристики материала трущихся тел (коэффициент гистерезисных потерь, модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, твердость, пластичность и др.); 4) микронеровность трущихся тел и ее направление; 5) состав и влажность воздуха; 6) свойства смазки и др.

Фундаментальный вклад в теорию трения качения сделан Тейбором, который вывел расчетное соотношение для случая качения жесткого цилиндра радиусом r по деформируемой плоскости.

$$f = \alpha \frac{4}{3\pi} \sqrt{\frac{q(1-\nu^2)}{\pi r E}},$$

где α , E и ν — соответственно коэффициент гистерезисных потерь, модуль упругости и коэффициент Пуассона деформируемой плоскости; q — нагрузка на единицу ширины цилиндра.

Очень хорошее совпадение опытных данных с приведенной формулой имеет место для тел с высоким α , т. е. для тел, имеющих несовершенную упругость. Однако считать потери на упругий гистерезис исчерпывающим объяснением сопротивления качению нельзя хотя бы потому, что при качении шара по плоскости (практически идеальная упругость) получают значение $f=0,003$, а при скольжении того же шара по той же плоскости — $f=0,3$, т. е. различие их составляет практически два порядка.

Это различие объяснить можно тем, что тела скольжения с позиций теории симметрии обладают небольшим набором элементов симметрии, в них нет ни одного элемента поворотной симметрии, а тела качения: окружность — на плоскости (сфера — в пространстве) в силу их полной поворотной симметрии — наиболее совершенные геометрические фигуры [9, 10].

Для совмещения тела скольжения, например, при перемещении по плоскости его надо перенести из одно-

го положения в другое по правилам одного из элементов симметрии — трансляции; при этом необходимо затратить большую работу, так как $v_{отн} \neq 0$, а $f = 0,3$. Для свободного перемещения тела качения по той же плоскости достаточно приложить небольшое усилие, чтобы в силу полной поворотной симметрии это тело качения совместилося само с собой, при этом $v_{отн} = 0$, а $f = 0,003$.

Кроме того, при свободном качении тела вращения по плоскости его не надо переносить из одного положения в другое еще и потому, что, обладая полной поворотной симметрией, в нем возникает вращательный момент $M = Pr$, а при вращении между двумя плоскостями $M = Pd$.

Если же теперь мы затормозим тело качения и оно начнет при прочих равных условиях скользить, то у тела вращения выродится бесконечное число осей симметрии бесконечного порядка и оно будет обладать теми же элементами симметрии, что и тело скольжения. Коэффициенты трения и характер относительного перемещения станут равнозначными.

Согласно адгезионно-деформационной теории И. В. Крагельского, причина возникновения поверхностных связей — одновременное действие молекулярного сцепления и механического зацепления шероховатостей трущихся поверхностей. Силу трения определяют по формуле:

$$F = \tau_{мех} + \tau_{мол} = \alpha S_{\phi} + \beta P, \quad (2.18)$$

где $\tau_{мех}$ и $\tau_{мол}$ — составляющие силы соответственно механического и молекулярного происхождения; P — нагрузка; S_{ϕ} — фактическая площадь трущихся поверхностей; α и β — коэффициенты, определяемые опытным путем.

Для случая жидкостного трения, согласно гидродинамической теории Н. Н. Петрова, силу трения определяют по формуле:

$$F = \frac{\eta S v}{h}, \quad (2.19)$$

где η — вязкость масла; S — площадь поверхностей, скользящих одна относительно другой; v — относительная скорость перемещения трущихся поверхностей; h — толщина масляного слоя.

Первое теоретическое положение (о природе силы трения). Формулируя его, следует считать, что сила внешнего трения имеет тройственную механо-физико-

химическую природу. Эту силу можно определить по формуле:

$$F = \nu_1 F_M + \nu_2 F_d + \nu_3 F_a, \quad (2.20)$$

где F — суммарная сила трения; F_M — составляющая механического взаимодействия шероховатостей технологического происхождения и возникшая при нагружении трением; F_d — составляющая, вызываемая деформацией поверхностного слоя; F_a — составляющая атомарного взаимодействия поверхностей трения; ν_1 , ν_2 и ν_3 — коэффициенты, учитывающие действие составляющих силы химического происхождения (определяют опытным путем).

В формуле (2.20) первые две составляющие силы внешнего трения (F_M и F_d) относятся к механической природе, третья составляющая (F_a) учитывает физическую природу, а коэффициенты ν_1 , ν_2 , ν_3 учитывают химическую природу силы внешнего трения.

Механическое и физическое взаимодействие при внешнем трении определяется химической активностью материалов, поэтому нецелесообразно химическую составляющую силы трения выделять в самостоятельную слагаемую.

Коэффициент ν_1 учитывает соотношение прочности шероховатости трущихся поверхностей в зависимости от их химической природы и действия на них ПАВ и ХАВ.

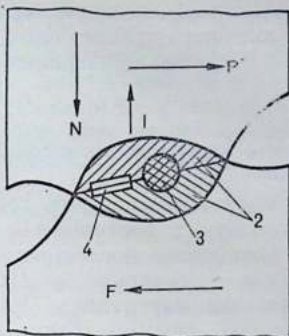
Коэффициент ν_2 учитывает изменение степени активации деформированных поверхностных слоев в зависимости от свойств трущихся поверхностей и действия на них поверхностно активных веществ (ПАВ) и химически активных веществ (ХАВ), а также скорость образования вторичных структур, их механическую прочность и прочность сцепления с основной деталью.

Коэффициент ν_3 учитывает изменение степени химического средства трущихся поверхностей (смачиваются или нет), а следовательно, прочность их атомарного сцепления.

Предложенную формулу (2.20) можно считать универсальной. Так, для случая сухого трения скольжения силу трения можно определить по этой формуле, объединив первый и второй члены в правой ее части. В таком виде она будет описывать так называемую молекулярно-механическую теорию трения И. В. Крагельского ($F = \alpha S_{\phi} + \beta N$). Заметим здесь, что при рассмотрении металлических твердых тел о молекулярной составляющей можно говорить лишь условно, так как в

Рис. 10. Модель пары трения для сухого и жидкостного трения в случае зацепления неровностей поверхностей:

1 — сила механического происхождения, расходуемая на преодоление неровностей поверхности трения; 2 — область упругопластического деформирования поверхностных слоев; 3 — область атомарного сцепления, 4 — область образования вторичных структур.



атомных, ионных и металлических кристаллах отдельных молекул нет.

Для случая трения скольжения ювенильных поверхностей силу трения можно определить по той же формуле (2.20) при условии исключения в правой части первого ее члена. В таком виде она будет описывать молекулярную теорию трения Б. Д. Дерягина ($F = f(N + P_0 S_\phi)$).

При трении скольжения с малыми скоростями для определения силы трения в формуле надо исключить в правой части второй ее член. В этом случае она будет описывать закон Амонтона — Кулона ($F = fN + A$).

Для жидкостного трения применима формула профессора Н. П. Петрова ($F = \frac{\eta v S}{h}$), где благодаря динамической вязкости смазочного слоя можно определить его химические свойства.

Таким образом, при внешнем трении твердых тел самым сложным образом сочетаются и при различных условиях проявляются механические, физические и химические законы движения материи, которые еще не удалось описать строгими аналитическими зависимостями.

На рисунке 10 показана модель пары трения для сухого и жидкостного трения в момент зацепления неровностей поверхностей при относительном перемещении.

Второе теоретическое положение (о работе внешнего трения), разработанное Б. И. Костецким и основан-

ное на первом законе термодинамики, гласит, что работа внешнего трения расходуется на образование теплоты и поглощение энергии:

$$A = Q + \Delta E,$$

где Q — работа внешнего трения, переходящая в теплоту; ΔE — количество энергии, поглощенной поверхностными слоями трущихся деталей.

Работа A внешнего трения не полностью переходит в теплоту, а поглощенная энергия ΔE не равна нулю.

Отношение поглощенной энергии к работе внешнего трения — величина непостоянная и зависит от свойств трущихся материалов (M), характера их взаимодействия (B), режима трения (H), среды трения (C).

Принципиальная схема, описывающая изменения энергетических соотношений при изменении условий трения, показана на рисунке 11. На процессы трения и изнашивания влияют многие факторы случайного характера, поэтому на рисунке показана область их возможных реализаций в виде семейства кривых линий, а среднее их значение — прямыми отрезками. В зависимости от изменения режима нагрузки (давления и скорости) при постоянных материале, характере взаимодействия и среде участок установившегося трения

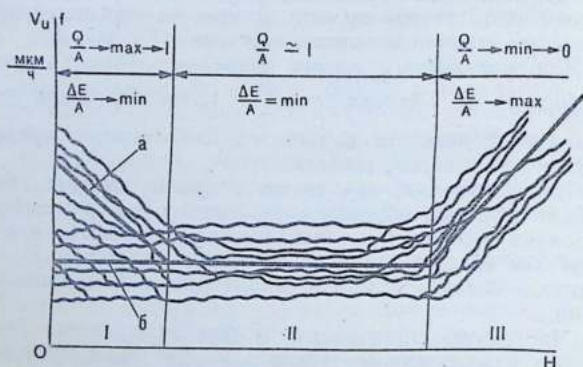


Рис. 11. Энергетические соотношения для различных условий трения:

а — несформированный поверхностный слой детали; *б* — сформированный слой; *I* — переходной участок от неустановившегося трения к установившемуся; *II* — участок установившегося трения; *III* — участок резкого нарушения процесса внешнего трения.

и изнашивания может изменяться относительно ординаты и абсциссы.

Участок *I* характеризует переходную область от неустановившегося к установившемуся трению, а следовательно, и изнашиванию, когда поверхности трения не приработаны (линия *a*). Если же поверхности трения приработаны в процессе изготовления деталей и им заданы необходимые физико-механические свойства, то уже на участке *I* будут те же энергетические соотношения, что и на участке *II* (линия *b*).

Участок *II* характеризует область установившегося трения, когда характеристики его имеют линейную зависимость. Скорость изнашивания на этом участке минимальная и синусоидально колеблется около некоторой постоянной. На данном участке вид связи и природа контакта постоянные. Здесь наблюдается динамическое равновесие процессов трения и изнашивания. Условия этой области наиболее желательны для деталей и пар трения машин, так как при этих условиях срок службы их будет максимальным.

Участок *III* представляет собой область резких изменений характеристик трения. Работа сил трения все больше переходит в поглощенную энергию поверхностных слоев $\frac{\Delta E}{A} \rightarrow \max$, что приводит к полному изменению их физических свойств, природы и вида связей.

В конечном итоге разрушаются поверхности трения: образуются глубокие царапины, выкрашиваются части металла и появляется схватывание микрообъемов металла, то есть исчезает внешнее трение как таковое.

На основании первых двух положений теории внешнего трения твердых тел предлагается следующее уравнение износа в самом общем качественном виде:

$$I = \int_0^t \varphi(M, B, H, C, t) dt, \quad (2.21)$$

где *I* — износ детали; *M* — материал детали, его химическая природа, строение и физико-механические свойства; *B* — характер взаимодействия, учитывающий род и вид трения, геометрию контакта, макро- и микрогеометрию поверхностей трения, посадку сопряжения или взаимодействие детали с перерабатываемым продуктом; *H* — нагрузка (статическая или динамическая, ее значение); *C* — химическое поле (среда), в котором протекает процесс

изнашивания детали; t — время изнашивания; dt — приращение времени процесса изнашивания.

Следует иметь в виду, что в уравнении (2.21) функциональная зависимость износа от ряда переменных наблюдается редко. Главным образом это корреляционная зависимость с определенной в каждом случае полнотой связей.

Это уравнение износа в общем виде в определенной степени универсально, и анализ его показывает, что, варьируя значениями отдельных переменных в правой части, можно эффективно управлять процессом изнашивания деталей, сведя его к минимуму. Основа управления — создание необходимых свойств материала (M), подверженного нагружению трением.

Третье теоретическое положение (об установившемся процессе трения). В результате установившегося (нормального) трения происходит износ детали и динамическое саморегулирование образования и разрушения вторичных структур.

При заданных материале, характере взаимодействия и среде трения существует область изменения режима трения, в которой интеграл отношения запасенной энергии к работе сил трения по деформируемому объему принимает минимальное значение:

$$\int \frac{\Delta E}{A} dV = \min.$$

где V — объем, воспринимающий нагружение трением.

В результате рассмотрения основных положений теории внешнего трения твердых тел можно достичь научно обоснованного управления процессом изнашивания деталей машин, сведя его к минимуму. А это позволит на практике разрабатывать и эксплуатировать детали и пары трения с предельно малым износом. При заданных конструкции характере взаимодействия деталей сопряжения, режиме трения и свойствах химического поля можно путем подбора материала и его обработки обеспечить установившийся нормальный окислительный износ для таких, например, деталей, как лемехи плугов, лапы культиваторов, детали подшипников качения, благодаря чему значительно повысится надежность сельскохозяйственной техники.

§ 4. ВИДЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Износ деталей — результат их изнашивания, определяемый в установленных единицах (в единицах длины, объема, массы и др.), проявляющийся в виде отделения и (или) остаточной деформации материала [5].

Изнашивание — процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела [5].

Согласно ГОСТ, изнашивание деталей подразделяют на три основных вида: механическое, коррозионно-механическое, абразивное. В свою очередь, эти три основных вида разделены на 10 подвидов.

Абразивное изнашивание — механическое изнашивание материала, происходящее в результате режущего и царапающего действия на него твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. При абразивном изнашивании протекают две его формы: механическая и механо-химическая с преобладанием той или иной в зависимости от свойств материала (рис. 12). Этому изнашиванию подвержены плужные лемехи, культиваторные лапы и др.

Окислительное изнашивание — коррозионно-механическое изнашивание, при котором в основном на изнашивание влияет химическая реакция ма-

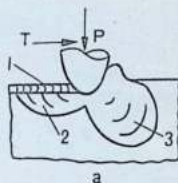
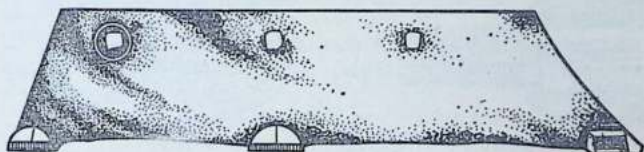


Рис. 12. Схема разрушения поверхности при абразивном изнашивании (а) и вид лемеха (б), претерпевшего абразивное изнашивание:

1 — упругопластическая зона; 2 — зона растяжения; 3 — зона сжатия.



б

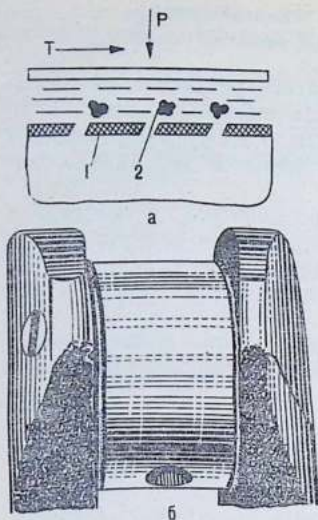


Рис. 13. Схема разрушения поверхности детали от окислительного изнашивания и внешний вид детали, претерпевшей окислительное изнашивание:

а — схема разрушения; 1 — деформированный слой; 2 — продукт износа; б — шейка коленчатого вала.

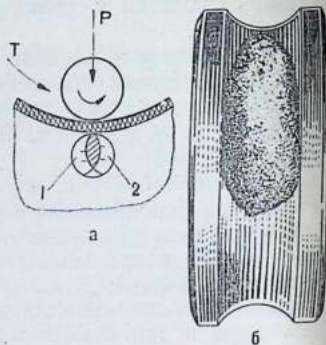


Рис. 14. Схема усталостного изнашивания (а) и внешний вид кольца подшипника (б), претерпевшего усталостное изнашивание:

1 — зона сжатия; 2 — зона растяжения

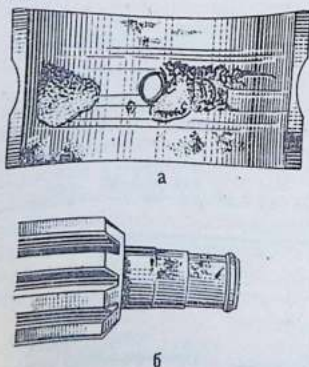


Рис. 15. Внешний вид деталей, претерпевших изнашивание схватыванием:

а — вкладыш двигателя; б — цапфа вала коробки передач.



Рис. 16. Поверхность гильзы цилиндра двигателя СМД-14, подверженная кавитационному разрушению.

тернала с кислородом или окисляющей окружающей средой (химическим полем) (рис. 13). Окислительному изнашиванию подвержены такие детали, как палец поршня, шейка коленчатого вала и др.

Усталостное изнашивание — механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя подшипников качения и скольжения, зубьев шестерен и им подобных деталей по условиям работы (рис. 14).

Изнашивание при заедании — изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность (рис. 15). Такому изнашиванию подвергаются следующие детали: втулка колеса плуга, оси балансиров и др.

Изнашивание при фреттинг-процессе — механическое или коррозионно-механическое разрушение соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях. Изнашиваются отверстия под подшипники коробки передач, шлицы вторичного вала и др.

Водородное изнашивание — это разрушение поверхностного слоя вследствие расширения (взрыва) поглощенного металлом водорода, находящегося или выделяющегося в зоне трения деталей. Этому изнашиванию подвержены гильзы цилиндров, тормозные барабаны и др.

Гидро-газоэрозионное изнашивание — эрозионное разрушение поверхности металла в результате воздействия потока жидкости (газа). Такому изнашиванию подвергаются шлицы вторичного вала коробки передач, выпускной клапан и др.

Гидро-газоабразивное изнашивание — механическое, абразивное изнашивание в результате действия твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе и перемещающихся по поверхности трения детали. Изнашиваются плунжерные пары, форсунки поливных машин и др.

Кавитационное изнашивание — гидроэрозионное изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, во время которого пузырьки газа разрываются вблизи поверхности, что создает мест-

ное повышение температуры, образуя дыры и сплошную перфорацию детали (рис. 16).

Электроэрозионное изнашивание — эрозионное разрушение поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока. Изнашиваются коллекторы, щетки, детали прерывателя и др.

На основании изложенного можно утверждать, что изнашивание твердых тел (деталей машин) имеет эрозионный характер. Для подтверждения этого дадим определение эрозии металлов, приведенное в политехническом словаре.

Эрозия металлов (от лат. *erosio* — разъедание) — постепенное разрушение поверхности металлических изделий в потоке газа или жидкости, а также под влиянием механических воздействий или электрических разрядов. Эрозия металлов — комплексный физический и физико-химический процесс, протекающий в результате влияния окружающей среды, окисления, наклепа, температурных и остаточных напряжений, хрупкого и усталостного разрушения; для полимеров — коксования и термического разрушения и др. На явлении эрозии металлов основан ряд технологических процессов (пескоструйная, дробеструйная, электроэрозионная и ультразвуковая обработка); она же приводит к разрушению при кавитации, износе и трении. Повышение сопротивления металлов эрозии — важная задача для многих областей техники. Она решается подбором высокотвердых тугоплавких и достаточно пластичных материалов, иногда армированием и другими способами. Здесь трудно что-либо добавить. Отметим лишь, что назрела необходимость создания новой области знаний — науки о поверхностной прочности деталей машин. Она должна охватить следующие направления исследований: а) триботехническое материаловедение на основе теории симметрии; б) теплофизика трения; в) химия и физико-химическая механика контактного взаимодействия, в том числе и учение о микрогеометрии взаимодействия поверхностей трения; г) разработка кадастра условий службы; д) разработка аналитических зависимостей для расчета деталей и пар на поверхностную прочность для типичных условий службы.

Аналитические закономерности абразивного изнашивания. Абразивному изнашиванию подвержено по-

давяющее большинство деталей и пар трения вследствие специфических условий работы сельскохозяйственных машин.

Фундаментальные закономерности абразивного изнашивания, предложенные М. М. Хрутовым [11], следующие.

1. Значение износа при постоянных условиях прямо пропорционально пути трения.

2. Износ при прочих постоянных условиях не зависит от скорости трения, т. е. скорость изнашивания прямо пропорциональна скорости трения:

$$\frac{dh}{dt} = cPv,$$

где h — значение износа; t — время; c — коэффициент пропорциональности; P — нагрузка; v — скорость.

3. Значение износа при прочих постоянных условиях прямо пропорционально значению нормальной нагрузки P :

$$\frac{dh}{dS} = cP,$$

где S — длина пути трения.

4. Относительная износостойкость технически чистых металлов в ненаклепанном состоянии и сталей в отожженном состоянии прямо пропорциональна их твердости H , определенной до испытания (рис. 17):

$$\epsilon = bH,$$

где b — коэффициент пропорциональности.

5. Для конструкционных и некоторых инструментальных углеродистых и легированных сталей, испытанных в состоянии после закалки и отпуска, относительная износостойкость возрастает линейно с увеличением твердости (рис. 17, б) и выражается соотношением:

$$\epsilon = \epsilon_0 + b'(H - H_0),$$

где ϵ_0 — относительная износостойкость стали в отожженном состоянии; b' — коэффициент, имеющий разные значения для сталей различного химического состава; H_0 — твердость стали в отожженном состоянии.

6. Относительная износостойкость механически наклепанных металлов и сталей не зависит от твердости, определенной после наклепа (но до испытания на из-

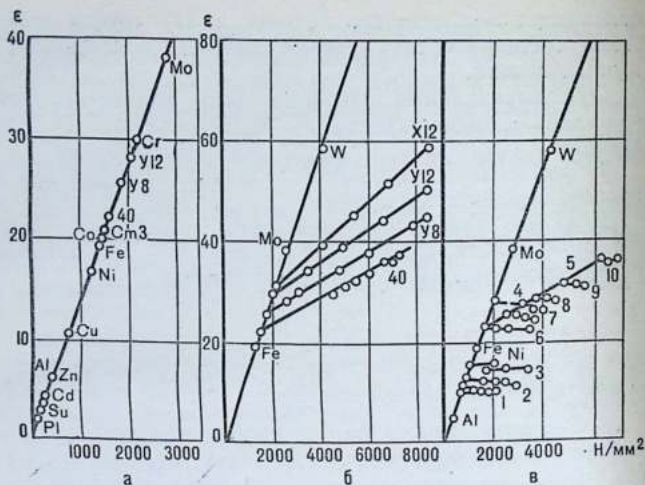


Рис. 17. Зависимость относительной износостойкости (ϵ) при абразивном изнашивании от твердости (H) до испытания на изнашивание:

а — для технически чистых металлов и отожженных сталей; *б* — для термически обработанных; *в* — для металлов с разной степенью наклепа при пластической деформации.

нашивание), или немного снижается с ее повышением (рис. 17, *в*).

М. М. Тененбаумом также установлено [12], что, если твердость абразивных зерен значительно превышает твердость испытуемого материала, износ не зависит от разницы значений твердости. С уменьшением этой разницы наблюдается понижение износа материала. При отношении $\frac{H_m}{H_a} < 0,6$ (H_m и H_a — соответственно твердость металла и абразива) зависимость имеет линейный характер. Это отношение оценивается коэффициентом K_T ; при увеличении значения коэффициента выше 0,6 износостойкость отклоняется от линейной функции твердости.

Между относительной износостойкостью и модулем нормальной упругости E для двойных металлических сплавов установлена зависимость:

$$\epsilon = 0,49 \cdot 10^{-4} E^{1,3}$$

Рассмотренные закономерности справедливы для условий сухого трения скольжения при относительно малых (в пределах 1,0 м/с) скоростях.

Аналитические, вероятностные характеристики механо-физико-химического изнашивания. Износ металлов зависит от большого числа факторов, воздействующих с разной силой и в разных направлениях не только на ход изнашивания и его конечные результаты, но и на характер и степень влияния каждого фактора в отдельности. При изучении изнашивания приходится учитывать различные по природе, но тесно взаимодействующие один с другим процессы, протекающие на макро- и микроуровнях. В данном случае трудно четко разграничить действие переменных факторов различной природы (механической, физической, химической) и тем более четко выделить отдельные явления. Поэтому для количественного описания процессов изнашивания при внешнем трении наиболее приемлемы теории вероятностей и методы математической статистики.

Изучение механизма изнашивания показывает, что его сущность имеет тройственную (механо-физико-химическую) природу. Под этим следует понимать комплекс явлений, связанный с образованием и разрушением вторичных структур в поверхностных слоях деталей при нагружении их трением.

В зависимости от рода и вида трения, характера приложения и значения нагрузки, скорости трения, температуры, состава жидкой и газовой среды, физико-механических и химических свойств трущегося материала механо-физико-химическое изнашивание может иметь две формы. Первая форма характеризуется образованием на поверхности трения (металлических деталей) твердых растворов кислорода, водорода и азота и тонких эвтектик их соединений с металлом. Вторая форма характеризуется образованием химических соединений металла с активными элементами химического поля: кислородом, водородом, азотом и др.

Механо-физико-химическое изнашивание, равно как и окислительное изнашивание по Б. И. Костецкому [13], включает следующие фазы процесса.

1. Непосредственный механический контакт трущихся поверхностей или через среду и образование равно-

мерного слоя деформированного активированного металла.

2. Химическая реакция активированного слоя металла с активными элементами (компонентами) среды и как результат образование ослабленных вторичных структур, толщина которых в зависимости от условий их возникновения находится в пределах $0,01 \dots 0,02$ мкм.

3. Разрушение вторичных структур последующими механическими воздействиями. На обнажившихся в результате разрушения вторичных структур поверхностях металла практически мгновенно, в течение нескольких наносекунд, образуются новые вторичные структуры, которые затем также разрушаются.

Схематически процесс механо-физико-химического изнашивания показан на рисунке 18. По оси абсцисс отложено время t работы детали, а по оси ординат — значения накопленного износа I .

Предельного износа деталь достигнет, если она накопит m разрушений пленки вторичных структур, причем число актов разрушения m пленки может быть подсчитано из уравнения:

$$m = \frac{I_{\text{пр}}}{M_{\text{И}i}}, \quad (2.22)$$

где $M_{\text{И}i}$ — математическое ожидание толщины пленки вторичных структур.

Процесс механо-физико-химического изнашивания деталей — случайный процесс, поэтому и наработка T_p детали до предельного износа будет случайной величиной. В подтверждение этого можно высказать следующие соображения. Пленки вторичных структур разрушаются в результате того, что усилия, возникающие

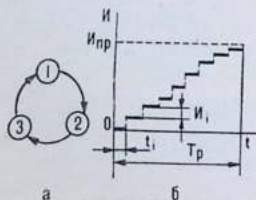


Рис. 18. Модель механо-физико-химического изнашивания:

a — процесс образования и разрушения вторичных структур; b — динамика изнашивания; $I_{\text{пр}}$ — предельный износ детали; t_i — время работы детали от момента возникновения в ее поверхностном слое упругоэластической деформации до разрушения пленки вторичных структур; I_i — толщина разрушенной пленки вторичных структур, то есть приращение износа детали в результате единичного акта разрушения пленки; T_p — время работы (наработка) детали до предельного износа.

при нагружении детали трением, превосходят прочность этих пленок.

По своей физической природе усилия трения, действующие на пленку, можно изобразить схемой, показанной на рисунке 19.

Усилие трения меняется непрерывно. Поэтому если взять два соседних отрезка времени работы детали, то на них значения усилия трения будут связаны друг с другом; если же взять отрезки времени, расположенные на некотором расстоянии, то на них уже эти усилия будут очень слабо связаны и их можно считать асимптотически независимыми друг от друга.

Другая особенность изменения усилия трения состоит в том, что в течение всего рассматриваемого периода работы детали усилие трения не имеет направленного изменения.

Это означает, что «пиковые» нагрузки на пленку, отмеченные точками 1, 2, 3, 4, 5, 6, возникают случайным образом, и невозможно предвидеть момент их появления.

Пленки вторичных структур обладают ограниченной прочностью, поэтому некоторые предельные значения усилия трения $P_{пр}$ пленки могут выдержать без разрушения. Если же усилие трения P_t превысит усилие $P_{пред}$, то пленка вторичных структур разрушится. На рисунке 19 условно показан уровень предельно допустимой нагрузки $P_{пред}$. Линия $\bar{P}_t$ представляет собой среднее значение усилия трения, которое можно подсчитать как среднее арифметическое от усилий трения, действующих в течение длительного времени t работы детали.

Так как нагрузка, превосходящая по значению усилие $P_{пред}$, возникает в случайные моменты времени работы детали, то и время существования пленки вторичных структур $t_{раз}$ будет случайной величиной. Следовательно, случайной величиной будет и наработка детали

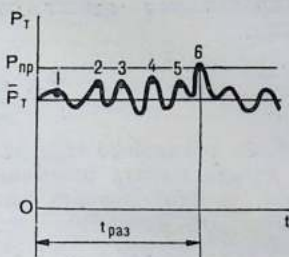


Рис. 19. График усилия трения, действующего на пленку вторичных структур.

до предельного износа, которая представляет собой сумму:

$$T = \sum_{j=1}^m t_{\text{раз}} \quad (2.23)$$

Если в какой-то момент времени t_p от начала работы детали пленка вторичных структур не была разрушена, то это означает, что ее время существования больше или равно времени t_p . Обозначим вероятность этого события как $P_1(t_p)$. Это означает, что

$$P_1\{t_{\text{раз}} \geq t_p\}.$$

Как видно из рисунка 19, вероятность разрушения пленки вторичных структур не зависит от положения t_p на оси времени работы детали, а определяется только ее длительностью существования. Обозначим вероятность разрушения пленки в период времени работы детали от t_p до $t_p + \Delta t_p$ через γ_1 . Приведенные рассуждения позволяют записать для этой вероятности следующее уравнение:

$$\gamma_1 = \mu \Delta t_p + 0(\Delta t_p), \quad (2.24)$$

где μ — постоянная величина, не зависящая от t_p ; $0(\Delta t_p)$ — величина, имеющая порядок малости более высокий, чем Δt_p .

Событие, заключающееся в том, что в период времени работы детали от t_p до $t_p + \Delta t_p$ пленка вторичных структур не разрушится, означает, что в течение времени от 0 до t_p не было разрушения и в течение времени от t_p до $t_p + \Delta t_p$ не будет разрушения этой пленки. Поэтому вероятность указанного события представится уравнением:

$$\begin{aligned} P_1(t_p + \Delta t_p) &= P_1\{t_{\text{раз}} \geq t_p + \Delta t_p\} = \\ &= P_1(t_p) [1 - \mu \Delta t_p + 0(\Delta t_p)]. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Раскрыв квадратную скобку и произведя несложное преобразование, получим равенство:

$$\begin{aligned} P_1(t_p + \Delta t_p) - P_1(t_p) &= -\mu P_1(t_p) \Delta t_p - \\ &- P_1(t_p) 0(\Delta t_p). \end{aligned}$$

Левая часть этого равенства — приращение вероятности разрушения пленки вторичных структур за время работы детали Δt_p .

Разделив обе части равенства на Δt_p и перейдя к пределу при $\Delta t_p \rightarrow 0$, получим

$$\frac{dP_1(t_p)}{dt_p} = \mu P(t_p), \quad (2.26)$$

так как

$$\lim_{\Delta t_p} \frac{0(\Delta t_p)}{\Delta t_p} = 0.$$

Интегрируя уравнение (2.26) и учитывая, что вероятность того, что в начальный момент времени пленка не разрушена, т. е. условно, равна единице: $P_1(0) = P_1(t_{\text{раз}} \geq 0) = 1$, найдем уравнение для вероятности того, что время существования пленки больше времени t_p , т. е. что до момента времени t_p она также не разрушилась:

$$\begin{aligned} P_1(t_p) &= P_1\{t_{\text{раз}} \geq t_p\}; \\ P_1(t_p) &= e^{-\mu t_p}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Таким образом, формула (2.27) представляет собой вероятность того, что разрушение пленки вторичных структур произойдет в течение времени, равном или большем t_p .

При накоплении m разрушений деталь достигнет предельного износа. Если во время t_p деталь накопит j разрушений пленки вторичных структур, будем считать, что она находится в состоянии $i(j)$. Изменение состояния детали в этом соотношении опишется цепочкой

$$i(0) \rightarrow i(1) \rightarrow i(2) \rightarrow \dots \rightarrow i(m).$$

Состояние детали можно охарактеризовать функциями $P_j(t_p)$, $j=0,1$, где $P_j(t_p)$ — вероятность того, что в момент времени t_p работы детали она находится в состоянии $i(j)$.

Путем соответствующих математических преобразований из уравнений (2.24) и (2.27) можно получить уравнение для этой вероятности:

$$P_j(t_p) = \frac{(\mu t_p)^j}{j!} e^{-\mu t_p}, \quad j=0. \quad (2.28)$$

Так как наработка детали исчисляется до m разрушений пленки вторичных структур, то сумма вероятностей $P_0(t_p) + P_1(t_p) + \dots + P_{m-1}(t_p)$ имеет смысл вероятности того, что на детали произойдет следующее

число разрушений пленки: 0 или 1, ..., или $m - 1$, т. е. меньше m . Иными словами, это является вероятностью того, что наработка T детали не меньше t_p , т. е.

$$P(t_p) = P\{T \geq t_p\} = \sum_{j=0}^{m-1} P_j(t_p) = \sum_{j=0}^{m-1} \frac{\mu^j t_p^j}{j!} e^{-\mu t_p}. \quad (2.29)$$

Полагая, что число j разрушений пленки вторичных структур может принимать все положительные значения числовой оси, представим полученное уравнение в виде:

$$P(t_p) = 1 - \frac{1}{\Gamma(m+1)} \mu^{m+1} \int_0^{t_p} t_p^m e^{-\mu t_p} dt_p, \quad (2.30)$$

где $\Gamma(m+1) = \int_0^\infty x^m e^{-x} dx$ — гамма-функция; x — параметр интегрирования.

При больших m гамма-функция в уравнении (2.30) стремится к виду:

$$P(t_p) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\frac{m}{\mu^2}}} \int_0^{t_p} e^{-\frac{(t_p - \frac{m}{\mu})^2}{2 \frac{m}{\mu^2}}} dt_p, \quad (2.31)$$

или

$$P(t_p) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{t_p} e^{-\frac{(t_p - c)^2}{2\sigma^2}} dt_p, \quad (2.32)$$

где $c = \frac{m}{\mu}$; $\sigma^2 = \frac{m}{\mu^2}$ — параметры распределения.

Так, распределение времени работы (наработки) детали до предельного состояния при механо-физико-химическом изнашивании подчиняется нормальному закону.

Для сокращения приведем уравнение (2.32) к виду:

$$P(t_p) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t_p - C}{\sigma}} e^{-\frac{H^2}{2}} dH = 1 - \Phi \left(\frac{T_p - C}{\sigma} \right), \quad (2.33)$$

где $\Phi \left(\frac{T_p - C}{\sigma} \right)$ — функция Лапласа.

Как известно, нормальное распределение задается на всей числовой оси t от $-\infty$ до $+\infty$, хотя ясно, что время работы детали не может быть отрицательной величиной. В этом нет противоречия, так как вероятность $P(t_p)$ отрицательного значения t_p , подсчитанного по формуле (2.32), оказывается ничтожно малой величиной, практически не влияющей на точность расчетов.

Параметры формулы (2.33) C и σ^2 означают соответственно математическое ожидание и дисперсию наработки детали при механо-физико-химическом изнашивании. Аналитические выражения этих параметров можно преобразовать при помощи уравнения (2.22). Тогда

$$C = \frac{I_{\text{пред}}}{M_{II} \mu}; \quad \sigma^2 = \frac{I_{\text{пред}}}{M_{II} \mu^2}. \quad (2.34)$$

Учитывая, что микрорельеф (шероховатость) трущихся поверхностей деталей при механо-физико-химическом изнашивании образуется в результате разрушения и отделения пленок вторичных структур, можно считать, что средняя толщина этих пленок будет соответствовать средней высоте микронеровностей, установившихся на рабочих поверхностях. Это дает возможность выразить величины математического ожидания и дисперсии наработки детали следующим образом:

$$C = \frac{I_{\text{пред}}}{1,25 R_a \mu}; \quad \sigma^2 = \frac{I_{\text{пред}}}{1,25 R_a \mu^2}. \quad (2.35)$$

Таким образом установлены аналитические соотношения параметров закона нормального распределения вероятностей, связывающие математическое ожидание C и дисперсию наработки σ^2 с величиной предельного износа $I_{\text{пред}}$, средним арифметическим отношением профиля трущихся поверхностей детали R_a и постоянной механо-физико-химического изнашивания μ . Эти соот-

Таблица 1. Основные расчетные уравнения износа

Величины	Расчетные уравнения	Символы и их значения
Относительная износостойкость	$\frac{B_1}{B_2} = b + kH$	B_1 — износостойкость испытуемого материала B_2 — износостойкость эталона
Относительная износостойкость	$\epsilon = kH$	H — твердость k — коэффициент пропорциональности
Атомный износ	$\omega = z \frac{P}{HB}$	z — число удаляемых атомов с поверхности трения
Объем изношенного материала со всей площади на единичном пути трения	$\omega = k \frac{P}{HB}$	$k = 10^{-2} \dots 10^{-7}$ — число связей P — нагрузка HB — твердость
Линейный износ	$lh = i_h \frac{A_r}{A_a}$	A_r и A_a — фактическая и номинальная площади контакта
Интенсивность износа:	$l = 0,7 \frac{P_a}{E_n}$	i_h — удельный износ
при упругом контакте » пластическом »	$l = \frac{0,07}{n} \sqrt{\frac{h_{max}}{r}} \times \frac{P_a}{c\sigma_s}$	P_a — номинальное давление n — число циклов до разрушения c — коэффициент упрочнения металла
Объем изношенного материала со всей площади на единичном пути трения	$Q = \frac{1}{\sin} \operatorname{tg} \theta \frac{\omega}{P_m}$	2θ — угол при вершине частицы износа ω — фактическая площадь касания
Число проходов до разрушения поверхности трения	$N = \frac{(\gamma n \tau_y)^{0,2} \cdot 10^3}{\tau_{max}^2}$	τ_{max} — величина допускаемого напряжения сдвига $\gamma n \tau_y$ — величина напряжения при нулевом износе достигается за $2 \cdot 10^3$ проходов

Величины	Расчетные уравнения	Символы и их значения
Линейная интенсивность износа	$I_h = \frac{0,45kP\sqrt{\frac{R_a}{r}}}{HB}$	P — удельное давление k — коэффициент свойств материала R_a — высота неровностей r — радиус округления вершины абразивной частицы

ношения открывают возможность расчета надежности (по долговечности) деталей и пар трения, исходя из их функциональных характеристик $I_{\text{пред}}$ и характеристик изнашивания R_a , μ . В данном случае теоретически подтверждена наблюдаемая экспериментально взаимосвязь между шероховатостью и износом трущихся поверхностей деталей машин.

Для практического использования полученных зависимостей необходимо провести экспериментальные определения постоянной механо-физико-химического изнашивания для различных его форм и материалов деталей машин.

Основные расчетные уравнения износа приведены в таблице 1. Более полные данные по расчету износа приведены в работах [14, 15].

§ 5. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ СТРУКТУР ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Скорость изнашивания находится в обратной зависимости от качества поверхностного слоя детали. Качество этого слоя находится в прямой зависимости от химической природы металла и его микро- и субмикроструктуры. Последние определяются законами симметрии [9, 10].

Внешнее трение и изнашивание имеют тройственную эрозионную природу, а не двойственную молекулярно-механическую, как это толковалось до недавнего времени. Поэтому для борьбы с эрозией необходимо глу-

боко исследовать различные механизмы тройственной природы внешнего трения, разработать кадастр условий службы деталей и на этой основе создать инженерные методы расчетов на износ как при изготовлении, так и при ремонте деталей машин. Для разработки этого кадастра от самых легких условий (например, трение в подшипниках часовых механизмов) до самых тяжелых (трение лезвия резца по обрабатываемой поверхности детали) необходимо установить граничные условия для каждого случая по следующим признакам (параметрам).

1. Характер взаимодействия (качение или скольжение, микрогеометрия поверхности трения, наличие смазки).

2. Параметры физического и химического полей.

3. Глубина (толщина) разрушаемого слоя.

4. Шероховатость изношенной поверхности.

5. Природа продуктов износа.

Для исследования процесса поверхностного разрушения необходимо применять квантовую механику элементарных частиц, так как процесс изнашивания имеет, как правило, дискретный характер.

Объемная прочность, а в известной мере и поверхностная, металлов и сплавов в настоящее время достигается созданием бездефектной структуры; повышением плотности барьеров (в том числе и дислокаций), затрудняющих движение дислокаций; созданием и применением композиционных материалов.

Различают техническую прочность, определяемую значениями получаемых механических свойств (σ_y , σ_t , σ_b , E и др.), и теоретическую. Последняя — это сопротивление деформации и разрушению, которое должны были бы иметь материалы согласно физическим расчетам с учетом сил межатомного взаимодействия кристаллических тел. Теоретическую прочность металлов определяют по формуле

$$\sigma_{\text{теор}} = \frac{G}{2\pi} \quad (2.36)$$

Если принять более точный закон изменения межатомных сил в зависимости от смещения плоскостей атомов, то

$$\sigma_{\text{теор}} = \frac{G}{30} \quad (2.37)$$

где G — модуль сдвига, т. е. коэффициент пропорциональности между касательным напряжением τ и относительным сдвигом γ ($\tau = G\gamma$).

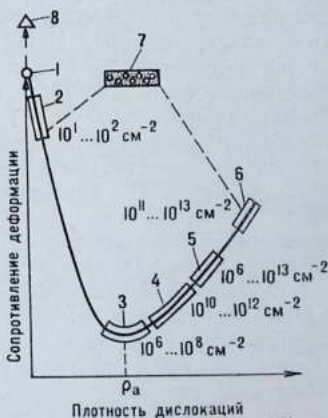
Получаемые в настоящее время кристаллы, практически не содержащие дислокаций, называемые «усами» или нитевидными (длиной 2...10 мм и толщиной 0,5...2,0 мкм), обладают прочностью, близкой к теоретической (рис. 20). Предел прочности нитевидных кристаллов железа, меди и цинка соответственно составляет 13 000, 3000 и 2250 Н/мм², в то время как для тех же технических материалов он соответственно равен 300, 260 и 180 Н/мм². Малые размеры нитевидных кристаллов и высокая чувствительность их к поверхностным дефектам ограничивают массовое производство и использование их в технике [16, 17].

Теоретическое значение прочности, рассчитываемое по формуле (2.36), в 100...1000 раз больше технической прочности. Это связано с дефектами в кристаллическом строении и прежде всего с наличием дислокаций. Снижение прочности металла сопровождается до определенной плотности этих дислокаций $\rho_a = 10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 20), после чего с увеличением плотности несовершенств происходит упрочнение металла. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$\sigma_T = \sigma_0 + K_1 Gb \sqrt{\rho_a},$$

Рис. 20. Схема зависимости сопротивления деформации от плотности дислокаций и других дефектов кристаллического строения металлов:

1 — теоретическая прочность; 2 — материалы с минимальным количеством дефектов, так называемые «усы»; 3 — неупрочненные металлы; 4 — сплавы, упрочненные наклепом, термической и химикотермической обработкой; 5 — сплавы, упрочненные термомеханической и механической обработкой; 6 — композиционные материалы; 7 — слоистые композиты из нитевидных кристаллов и ультрадисперсного наполнителя; 8 — принципиально новое строение металла с предельно уплотненной кристаллической решеткой.



где σ_0 — напряжение сдвига до деформации (после отжига); b — вектор Бюргерса; K_1 — коэффициент упрочнения, зависящий от природы металла, его кристаллической решетки и структуры (определяется вкладом различных механизмов торможения дислокаций в общем упрочнении и имеет значение порядка 10^{-1}).

При плотности дислокаций, превышающей $\rho_a = 10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$, в металле образуются трещины, поэтому это значение плотности дислокаций является предельным.

Все применяемые в настоящее время методы упрочнения металлов: ППД (холодный наклеп), легирование (создание различных сплавов), термическая и термомеханическая обработки и др. (скоростная электротермическая — СЭТО, электротермическая — ЭТМО и т. д.) основаны на принципе торможения движения дислокаций [16]. Во всех случаях происходит торможение дислокаций вследствие увеличения их плотности; возрастания сил трения при движении дислокаций за счет упругого взаимодействия с атомами легирующих элементов, образования на дислокациях приместных атмосфер; измельчения блоков (субзерен), т. е. увеличения при этом малоугловых границ; образования дисперсных частиц второй фазы (карбидов, нитридов, различных химических соединений и т. д.).

С увеличением степени холодной (ниже $0,15 \dots 0,2 T_{пл}$) деформации (ППД) свойства, характеризующие сопротивление деформации (σ_t , σ_b , НРС и др.), повышаются, а способность к пластической деформации — пластичность (δ и Ψ) уменьшается. Это явление роста упрочнения получило название наклепа. Упрочнение металла в процессе наклепа объясняется увеличением числа дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, межузельных атомов). С самого начала пластической деформации происходит упрочнение металла, связанное со скоплением дислокаций у границ. Однако основное упрочнение при этом определяется характером множественного скольжения в каждом зерне. Предел текучести при наклепе может достигнуть $\sigma_t = 10^{-3} \dots 10^{-2} G$ ($\rho_a = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

При легировании и термической обработке упрочнение связано с образованием твердого раствора, гетерогенных структур различной дисперсности или метастабильных структур, например мартенсита. Упрочнение при образовании твердого раствора может быть

определено по формуле Мотта — Наборро:

$$\sigma_T = G\varepsilon^2 C,$$

где ε — параметр, зависящий от различия размеров атомов растворенного компонента r и растворителя r_0 ($\varepsilon = \frac{r-r_0}{r_0}$); C — атомная концентрация растворенного компонента.

Упрочнение при образовании твердого раствора достигает $\sigma_T = 10^{-3} G$.

Наиболее сильно прочностные характеристики (σ_T , σ_B) возрастают при создании в сплавах высокодисперсной гетерофазной структуры с помощью закалки и старения. Упрочнение при старении объясняется торможением дислокаций зонами ГП (Гинье — Престона) или частицами выделений. При образовании зон ГП, расстояния между которыми составляет $\sim 10^{-8}$ м, дислокации проходят через них (перерезают), что требует повышенных напряжений, потому что зоны ГП имеют модуль сдвига больше, чем у исходного твердого раствора α . Кроме того, вокруг зон ГП создается зона значительных упругих напряжений, которая также тормозит движение дислокаций, способствуя упрочнению при старении.

В случае когерентных частиц избыточной фазы дислокации под действием приложенных напряжений либо перерезают, либо огибают эти частицы, что зависит от их размеров, прочности и расстояния между ними.

Упрочнение дисперсными частицами достигает $\sigma_T = 10^{-1} G$ Н/мм². Дисперсные частицы — это чаще всего химические соединения. Чем сложнее кристаллическая решетка фазы упрочнителя и чем больше отличается ее состав от основного твердого раствора, тем сильнее упрочнение. Химические соединения, особенно карбиды и нитриды, имеют высокую твердость, но хрупки. Например, твердость карбида вольфрама WC — Н1790, карбида титана — TiC — Н2850, карбида тантала TaC — Н3230.

Эффективный барьер для движения дислокаций в металлах — межзеренная граница. Это объясняется тем, что дислокация не может перейти границу зерна, так как в новом зерне плоскости скольжения не совпадают с плоскостью движения этой дислокации в данном зерне. Поэтому чем мельче зерно (больше протяженность границ), тем выше прочность металла.

Повышение прочности при измельчении зерна не сопровождается увеличением хрупкости металла.

Развитие физического материаловедения позволяет предполагать, что в ближайшее время будут разработаны сплавы и стали с пределом прочности 3500...6000 Н/мм² и легкие сплавы с пределом прочности 1000...1500 Н/мм², что составит 50 % их теоретической прочности [16, 17].

Высокая прочность может быть достигнута не только путем повышения плотности несовершенств кристаллического строения (прежде всего дислокаций), но и созданием композиционных материалов. Применение этих материалов, сочетающих свойства сравнительно мягкой матрицы и прочных высокомодульных (до 500 000 Н/мм²) волокон, дающих под нагрузкой малую деформацию, позволяет повысить удельную прочность материала на 20...40 %.

Перспективны дисперсноупрочненные сплавы. Под ними понимают композиционные материалы, упрочнители в которых равномерно распределенные на определенном расстоянии (0,1...0,5 мкм) друг от друга дисперсные частицы (размером менее 0,01...0,05 мкм), не растворяющиеся в матрице (чистом металле при твердом растворе). Эти частицы искусственно вводят в сплавы в процессе их получения.

Рассмотренные способы упрочнения деталей машин полностью относятся к объемной прочности и лишь частично к поверхностной (в частности, для случая абразивного и усталостного изнашивания). Механизмы объемного и поверхностного разрушения, как правило, различны. Если при объемном нагружении сопротивление разрушению оказывают все зерна и субзерна, и очень важно, чтобы не было концентраторов напряжений на поверхности детали, то при поверхностном нагружении, то есть нагружении трением, факторы напряжения в ряде случаев влияния не оказывают. В данном случае определяющим является строение микрообъемов поверхностного разрушения, то есть как ориентированы атомы в плоскости и принимаемой поверхностью детали нагрузки, как активна поверхность поверхностного разрушения к физическому, тепловому и химическому воздействию. Для поверхностной прочности материала характерны зависимость от природы и прочности межатомных связей решетчатого строения.

ро- и микро-) определяется химической природой материала и законами симметрии. Макростроение деталей определяется способом формообразования и видом отделочной технологии. Далее макроструктура материала деталей определяется способом производства его; микроструктура определяется способом упрочняющей технологии; субмикроструктура (субзерна, блоки, домены) также определяется способом упрочняющей технологии, и прочность этой структуры прежде всего зависит от размера субзерен и угла их разориентации (от 10... 15 градусов до долей градуса). Наконец, идет решетка с определенным пространственным расположением атомов и видом связи между ними (ионной, ковалентной, металлической, вандерваальсовой). Атомные решетки также могут быть различной степени бездефектного строения. Все это необходимо учитывать, управляя созданием безызысных структур.

Для различных условий службы деталей и пар трения могут быть применены следующие способы создания практически безызысной структуры (строения) металлов и сплавов.

1. Создание объемной бездефектной структуры, т. е. нитевидных кристаллов.
2. Измельчение зерна до размеров 0,1...0,01 мкм.
3. Повышение плотности дефектов кристаллического строения до значений $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$.
4. Измельчение зерна и равномерное распределение указанной плотности дислокаций.
5. Применение самосмазывающихся композитов из системы «металл — полимер».
6. Применение дисперсноупрочненных композитов.
7. Перевод поверхностного слоя с решетчатого (кристаллического) строения в аморфное.
8. Плакирование поверхностей трения конденсированным слоем интерметаллидных соединений.
9. Плакирование поверхностей трения бездефектными структурами.
10. Получение поверхностного слоя с принципиально новым строением, с изменением геометрии и плотности упаковки атомов и их связи в решетке металла.

Последний способ может быть осуществлен подобно тому, как получают искусственные алмазы, т. е. применением сверхвысоких давлений и температур, в том числе и с отводом тепла для получения метастабиль-

ного состояния металла. В этом случае возникнет принципиально новая связь атомов в кристаллической решетке, которая должна обеспечить прочность материалов значительно больше теоретической прочности, ныне рассчитанной с учетом сил межатомного взаимодействия кристаллических тел.

В заключение этой главы необходимо отметить, что основная причина потери работоспособности машин — эрозия (износ и коррозия) деталей, которую можно резко снизить, упрочнив поверхность трения и повысив объемную прочность материалов. Единого подхода к решению этой задачи быть не может ввиду значительной разности условий службы отдельных деталей и пар трения. Поэтому необходимо разработать кадастр этих условий, на основании параметров которого вывести расчетные формулы и способы создания практически безыносных деталей. Глубокому исследованию необходимо подвергнуть комплекс явлений: с одной стороны, химические и физические свойства и строение материала с позиций теории симметрии, а с другой, характер нагружения и сопротивления разрушению материала при различных условиях службы. Для получения сверхпрочного металла необходимо увеличить плотность упаковки атомов в решетке (т. е. предельно уплотнить решетку — ПУР) путем применения сверхвысоких давлений и температур, в том числе и с отводом тепла для получения метастабильного состояния металла.

§ 1. СЛУЧАЙНОСТЬ ОТКАЗОВ
ОБЪЕКТОВ

В результате эксплуатации в различных климатических, дорожных и других условиях сельскохозяйственная техника подвергается не только переменным, но и случайным воздействиям. Поэтому для анализа и контроля надежности используется теория вероятностей и математическая статистика.

Надежная работа сельскохозяйственной техники зависит от многочисленных объективных и субъективных факторов, зачастую находящихся в весьма сложной зависимости.

Объективные факторы — это воздействия окружающей среды, механические и другие внешние воздействия (изнашивание, старение, нагрузки и т. п.).

Субъективные факторы — это факторы, которые в той или иной мере зависят от деятельности человека: выбор схемы и конструктивного решения при проектировании; выбор элементов, входящих в изделие, и их материалов; выбор режимов нормальной эксплуатации; организация технического обслуживания и ремонта машин и др.

Зависимость надежности от многочисленных и разнообразных факторов приводит к тому, что появление отказов, а также изменение характеристик надежности носят случайный, стохастический (беспорядочный) характер.

Оценка надежности объектов при помощи математических методов на основании обобщения накопленной статистической информации об их работе в реальных условиях эксплуатации позволяет выявлять вероятностные закономерности и соотношения между случайными факторами, в различной мере влияющими на

работоспособность, безотказность и долговечность объектов. Методы исследований надежности основаны на том, что отказ — случайное событие и для его предупреждения необходимо знать физические причины и закономерности возникновения и развития его.

Некоторые сведения из теории вероятностей и математической статистики. В теории вероятностей и основанной на ней математической статистике применяют ряд специфических понятий, основными из которых служат следующие: испытание (опыт), событие, случайная величина, вероятность, частота и частость.

Испытание (опыт) — это практическое создание некоторых условий, правил, т. е. всякой определенной совокупности условий, влияющих на некоторое физическое явление. Испытания сопровождаются регистрацией результата.

Событие — это явление, происходящее в результате выполнения определенного комплекса условий, т. е. в результате испытания (опыта). Оно является качественным результатом испытания, проводимого при вполне определенных условиях, например результатом эксплуатации сельскохозяйственной техники в определенных условиях с целью оценки ее надежности.

Достоверным называют такое событие, которое неизбежно произойдет при данном комплексе действующих условий.

Невозможным называют событие, которое при тех же условиях заведомо произойти не может.

Случайным называют событие, которое при рассматриваемом сочетании условий может произойти, а может и не произойти. Случайное событие — появление отказов.

Все явления в технике с точки зрения количественной характеристики их проявления разделяют на единичные и массовые.

Единичным называют явление, которое возникло однократно и при многократном воспроизведении того же испытания (опыта) практически не повторяется.

Массовыми называют явления, повторяющиеся при многократном воспроизведении испытаний (опытов).

Несовместными называют два события, если при испытании появление одного из них исключает возможность появления другого. Например, отказ и работо-

способность — это событие и состояние, которые не могут возникать одновременно.

Совместными называют два события, если при испытаниях появление одного из них не исключает возможности появления другого.

Единственно возможным называют событие, хотя бы раз зафиксированное при испытании.

Равновозможными называют несколько возможных событий, появившихся в процессе испытания, и при этом нет основания предполагать, что появление одних возможнее появления других.

Независимыми считаются такие события, появление которых не зависит от того, какое событие произошло перед этим (например, независимый отказ).

Зависимые события — это события, которые зависят от того, что произошло перед этим.

Случайная величина — это такая величина, которая в результате опыта может принимать различные значения в определенных пределах.

Случайные величины обычно обозначаются прописной буквой латинского алфавита, например X . Значения случайной величины, которые она принимает в результате испытания, записываются строчными буквами: $x_1, x_2, \dots, x_n$.

Все случайные величины можно разделить на две группы: непрерывные и дискретные.

Непрерывными случайными величинами называют такие, которые в некотором интервале могут принимать любое значение (время безотказной работы объекта, значение того или иного технического параметра и т. д.).

Дискретными случайными величинами называют такие, которые могут принимать лишь определенные значения (число отказов, возникающих в течение какого-либо интервала времени, число неисправных объектов в партии и т. д.). Число бракованных деталей в партии изношенных — дискретная случайная величина, а величина износа этих деталей — непрерывная случайная величина.

Теория вероятностей изучает массовые случайные отказы или величины, имеющие к тому же устойчивую частоту появления. Если проведено N испытаний машин и получена частота (количество) отказов m , то относительная частота, или частость, отказов:

$$W = \frac{m}{N} \quad \text{или} \quad W = \frac{m}{N} 100\%.$$

Частота — это число одинаковых или близких (полученных по наблюдениям) появлений события или абсолютных значений случайных величин, соединенных в одну группу (интервал) или разряд.

Частость, или относительная частота, — это частота, выраженная в долях единицы или процентах от общего числа испытаний или объектов изучаемой совокупности.

Можно сказать, что при неограниченном увеличении N статистическое значение W приближается или сходится к некоторому числу P , называемому вероятностью данного события:

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} W = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{m}{N}, \quad \text{т. е.} \quad P(A) \approx \frac{m}{N},$$

где $P(A)$ — вероятность события A ; m — число случаев, благоприятствующих наступлению события; N — число несовместных, единственно возможных и равновероятных событий.

При проведении большого числа испытаний, т. е. при многократной реализации одной и той же совокупности условий, обнаруживают определенные закономерности в наступлении случайных событий. Изучение этих закономерностей составляет одну из задач теории вероятностей. Изучение закономерностей появления отказов как случайных событий является центральным вопросом всей проблемы надежности.

Проводя какое-либо испытание или наблюдение в эксплуатации, мы не можем заранее точно сказать, какое значение примет в этом опыте та или иная случайная величина.

Иными словами, случайное событие при неоднократном воспроизведении одного и того же опыта или испытания в одних и тех же условиях протекает всякий раз несколько по-иному в различные моменты времени.

Ввиду этого для количественной оценки случайного события используют вероятность того, что случайная величина окажется в указанном интервале ее возможных значений.

Вероятность — это объективная математическая оценка возможности реализации случайного события или случайной величины.

Вероятность события A — это отношение числа случаев, благоприятствующих наступлению данного события, ко всему числу несовместных, единственно возможных и равновозможных событий.

Приближенное равенство $P \approx m/N$ позволяет определить вероятность P какого-либо события по эмпирической частоте, и, наоборот, по известной вероятности можно определить ожидаемую частоту этого события при N испытаниях, когда они не проведены.

Вероятность события принято выражать положительным числом, имеющим значение от нуля до единицы, т. е. $0 \leq P(A) \leq 1$. Если $m=N$, то $P(A) = m/N = 1$ и событие A достоверно (обязательно произойдет); при $P(A) = 0$ событие невозможно (произойти не может).

Обычно при решении технических задач приходится иметь дело не с достоверными или невозможными, а с так называемыми практически достоверными и практически невозможными событиями.

Практически достоверным называют такое событие, вероятность которого близка к единице.

Практически невозможным называют событие, вероятность которого близка к нулю.

Практически достоверные и практически невозможные события в одном и том же испытании или опыте всегда сопутствуют одно другому.

Полной группой событий называют несколько несовместных событий, из которых при одном испытании обязательно наступит хотя бы одно. В том случае, когда полная группа состоит из двух событий, эти два события называют противоположными. Событие, противоположное данному событию A , обозначают $\bar{A}$. Для полной группы событий достаточно иметь два несовместных события A и $\bar{A}$. Пример противоположных событий — запуск и незапуск двигателя. Если, например, в данном опыте событие A практически достоверно, то противоположное ему событие $\bar{A}$ практически невозможно.

Случайное событие имеет устойчивую частоту при массовых испытаниях, т. е. в каждой серии испытаний частота этого события изменяется незначительно и колеблется вблизи некоторого положительного числа. Это число и принимается за вероятность данного собы-

тия или случайной величины. Вычисленную этим способом вероятность называют статистической, так как она получена в результате испытаний (опытов).

Некоторые формулы (теоремы) теории вероятностей. Вероятности случайных событий или величин можно складывать или умножать.

Формула сложения вероятностей. Если при испытаниях может произойти только одно из рассматриваемых событий: $A_1, A_2, \dots, A_n$, а вместе они появиться не могут, то такие события, как отмечалось выше, называют несовместными. Это сложное событие A называют суммой исходных событий и условно обозначают:

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n = \sum_{i=1}^n A_i.$$

Если вероятности подчиняются таким же соотношениям, что и соответствующие им частоты, то получают формулу (теорему) сложения вероятностей, применяемую для несовместных событий, которая формулируется следующим образом.

Вероятность появления одного из нескольких независимых и несовместных однородных (принадлежащих к одной группе) событий (или иначе вероятность суммы несовместных событий $A_1, A_2, \dots, A_n$) равна сумме вероятностей этих событий:

$$P(A) = P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + \\ + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (3.1)$$

В общем случае для полной группы несовместных событий $A_1, A_2, \dots, A_n$ будем иметь

$$P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) = 1.$$

Полная группа событий будет в том случае, если в результате испытания обязательно наступит хотя бы одно из них (например, при длительных испытаниях обязательно появится отказ объекта). Для двух несовместных или противоположных событий A и $\bar{A}$, образующих полную группу событий, $P(A) = 1 - P(\bar{A})$.

На практике в надежности чаще всего рассматривают два несовместных противоположных события: состояние работоспособности объекта и отказ. Естественно, что они несовместны, т. е. любой объект в данный момент времени может находиться только в одном состоянии: или в рабочем, или в нерабочем. Эти события образуют полную группу, для которой

$$P + q = 1,$$

где P — вероятность того, что объект будет работоспособным; q — вероятность того, что наступит отказ, т. е. объект будет неработоспособным.

Так как эти события противоположны, т. е. появление одного из них достоверно, а совместное появление обоих в одном опыте невозможно, то

$$q = 1 - P.$$

Для двух совместных событий

$$P(A_1 + A_2) = P(A_1) + P(A_2) - P(A_1 A_2). \quad (3.2)$$

Формула умножения вероятностей. Если два события A и B независимы, т. е. появление одного из них не изменяет вероятности появления другого, то

$$P(AB) = P(A) P(B). \quad (3.3)$$

Эта формула выражает теорему умножения вероятностей для независимых событий, утверждающую, что вероятность совместного появления двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий. При $P(A) = P(B)$ $P(AB) = P(A)^2$.

Сложное событие A , заключающееся в одновременном осуществлении нескольких событий, называется произведением исходных событий A_i и условно обо-

значается $A = A_1 A_2 A_3, \dots, A_n = \prod_{i=1}^n P(A_i)$.

По теореме умножения вероятностей независимых событий

$$\begin{aligned} P(A) &= P(A_1 A_2, \dots, A_n) = \\ &= P(A_1) P(A_2), \dots, P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Если $P(A_1) P(A_2) = \dots = P(A) = P$, то $\prod_{i=1}^n P(A_i) = P^n$.

Для достаточно больших значений P , обозначая через q вероятность противоположного события

$$(P=1-q), \quad P(A) = (1-q)^n.$$

Пример. Машинно-тракторный агрегат состоит из двух машин с вероятностью безотказной работы соответственно $P_1=0,8$ и $P_2=0,7$ в течение некоторой наработки. Вероятность его безотказной работы будет:

$$P_1 P_2 = 0,8 \cdot 0,7 = 56.$$

Для зависимых событий

$$P(AB) = P_B(A)P(B). \quad (3.5)$$

где $P(AB)$ — вероятность одновременного появления событий; $P_B(A)$ — вероятность появления события A при условии, что произошло событие B (так называемая условная вероятность).

Если события несовместны, то произведение таких событий является невозможным событием, вероятность которого равна нулю.

Основные характеристики надежности имеют значительный разброс, т. е. они случайные величины, а поэтому при многократном повторении они подчиняются определенным статистически устойчивым законам распределения случайной величины.

Распределение случайных величин — это совокупность значений случайных величин, расположенных в возрастающем порядке с указанием их вероятностей для теоретических распределений или частот (частостей) для эмпирических распределений.

Закон распределения случайной величины — это всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайных величин и соответствующими этим значениям вероятностями или частотами (частостями).

Закон распределения случайных величин позволяет определить вероятность (частоту, частость) появления случайной величины в любом интервале ее возможных значений.

Дискретные (прерывные) случайные величины X могут принимать только ряд отдельных значений $x_1, x_2, \dots, x_n$, каждому из которых соответствует некоторое значение вероятности $P_1, P_2, \dots, P_n$. Рассматривая появление любого из перечисленных значений прерывной случайной величины как события, заметим, что эти события образуют полную группу несовместных случайных событий, а следовательно,

сумма вероятностей всех возможных значений прерывной случайной величины равна единице:

$$P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i = 1.$$

Распределение прерывной случайной величины может быть представлено в виде таблицы, называемой рядом распределения (табл. 2) или графически многоугольником распределения (рис. 21).

Таблица 2. Ряд распределения случайной величины

Значения случайной величины X	x_1	x_2	$\dots$	x_n
Вероятность $P(X=x_i)=P$	P_1	P_2	$\dots$	P_n

При графическом представлении (см. рис. 21) по оси абсцисс откладывают значения случайной величины x_i , а по оси ординат — вероятности P_i , соответствующие этим значениям.

Ряд распределения и многоугольник распределения — один из возможных форм представления закона распределения случайной величины.

Ряд распределения — удобная форма представления закона распределения дискретной случайной величины с конечным числом возможных значений. В случае непрерывной случайной величины, которая имеет бесчисленное множество значений, такая форма закона распределения непригодна.

В данном случае используют не вероятность события $P_i(X=x_i)$, а вероятность события $P(X < x_i)$. Это означает, что случайная величина X примет значение, меньшее какого-либо наперед выбранного значения x ($-\infty < x < +\infty$).

Функция (интегральный закон) распределения случайной величины — наиболее универсальная характе-

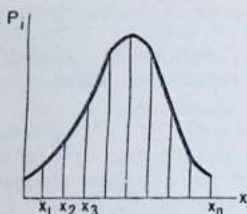


Рис. 21. Многоугольник распределения прерывной случайной величины.

ристика как дискретных (прерывных), так и непрерывных случайных величин.

Если X — случайная величина, а x — некоторое действительное число, то вероятность того, что $X < x$:

$$F(x) = P(X < x),$$

где $F(x)$ — функция распределения.

Функцию распределения можно представить в виде графика, если по оси абсцисс откладывать значение x , а по оси ординат — значение $F(x)$.

Если X — дискретная величина, то на основании теории сложения вероятностей несовместных событий ее функция распределения будет иметь вид: $F(x) = \sum P(x = x_i)$.

Для дискретной случайной величины график функции распределения будет иметь вид ступенчатой кривой (рис. 22). С увеличением числа значений x число ступеней (скачков) будет увеличиваться, а их величина — уменьшаться.

Функцию распределения непрерывной случайной величины изображают плавной кривой (рис. 23). При любом значении x $0 < F(x) < 1$.

В эмпирических распределениях возможные значения случайных величин оцениваются частотами или частостями, полученными в результате испытаний или опытов.

Следовательно, эмпирическим распределением случайных величин называют совокупность зафиксирован-

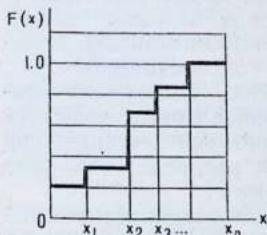


Рис. 22. Функция распределения дискретных (прерывных) случайных величин.

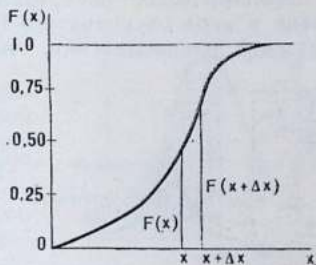


Рис. 23. Функция распределения непрерывной случайной величины.

ных их значений, расположенных в возрастающем порядке, с указанием соответствующих частот или частотостей. Это распределение может быть использовано для нахождения закономерностей рассеивания случайных величин.

На практике при изучении непрерывных случайных величин их полученные значения делят на интервалы или разряды. После этого подсчитывают частоты не по действительным значениям случайной величины, а по разрядам, т. е. мы будем иметь дело не с частотами зафиксированных значений непрерывной случайной величины, а с частотами их значений, лежащих в границах установленного разряда или интервала.

В таблице эмпирического распределения (табл. 3) случайной величины указывают интервалы (разряды) значений x_i , частоту m_i и частость $W_i = m_i/N = m_i / \sum_{i=1}^n m_i$.

Таблица 3. Эмпирический ряд распределения случайной величины

Значения случайной величины X	x_1	x_2	$\dots$	x_n
Частота (m_i)	m_1	m_2	$\dots$	m_n
Частость ($m_i/N = W_i$)	$m_1/N = W_1$	$m_2/N = W_2$	$\dots$	$m_n/N = W_n$

Эмпирическое распределение может быть изображено в виде ступенчатого графика, называемого гистограммой распределения, или в виде ломаной линии

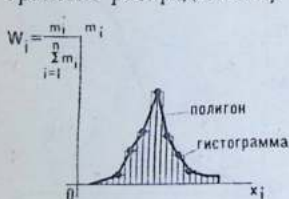


Рис. 24. Гистограмма и полигон (эмпирическая кривая) распределения случайной величины.

(кривой), называемой полигоном распределения (рис. 24). Реже пользуются кривой накопленных частостей (накопленной эмпирической кривой распределения) или кумулятой.

На гистограммах или полигонах распределения по оси абсцисс откладывают интервалы полученных по наблюдениям значений слу-

чайных величин, а по оси ординат — их частоты или частоту.

Высота прямоугольника гистограммы равна частоте m_i (частоты W) распределения, а основание — интервалам или разрядам, на которые разделены зафиксированные значения x_i .

При построении гистограмм и эмпирических кривых распределения промежутков, внутри которых заключаются значения x_i , делят на равные интервалы (разряды).

Таким образом, функция распределения вероятностей может характеризовать как дискретные (прерывные), так и непрерывные случайные величины и является неубывающей функцией, изменяющейся от 0 до 1.

Функция распределения непрерывной случайной величины имеет тот недостаток, что по ней трудно судить о характере распределения случайной величины в небольшой окрестности той или иной точки на числовой оси.

О характере распределения непрерывной случайной величины в окрестностях различных точек можно судить на основании особой функции, которая называется плотностью распределения вероятности или плотностью распределения.

Плотность распределения непрерывной случайной величины — это производная от функции распределения непрерывной случайной величины:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} . \quad (3.6)$$

Для дискретной величины функция плотности распределения не существует.

Графически плотность распределения представляет собой кривую распределения непрерывных случайных величин (рис. 25).

Площадь элементарного прямоугольника, равную произведению $f(x)dx$, называют элементом вероятности.

Для определения вероятности $P(X < x)$ необходимо вы-

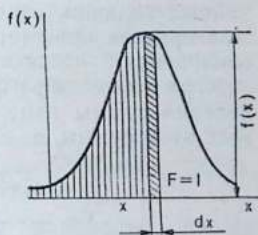


Рис. 25. Графики функции $f(x)$ для непрерывной случайной величины.

числить площадь, заключенную между кривой и осью в интервале от $-\infty$ до x .

Для этого необходимо сложить все элементы вероятностей, заключенные в данной площади в интервале от $-\infty$ до x , т. е.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

Плотность распределения характеризуется следующими основными свойствами.

1. Она неотрицательная функция от x вследствие того, что $F(x)$ — неубывающая функция.

2. Площадь, ограниченная кривой $f(x)$ и осью абсцисс (интеграл от плотности распределения в бесконечных пределах), равна единице, т. е.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1.$$

При изучении случайных величин часто достаточно знать числовые характеристики распределения случайной величины.

Характеристики (параметры) распределения случайных величин. Числовые характеристики, подсчитанные по полученным значениям в процессе испытания или опыта случайной величины x_i , называют статистическими характеристиками. Характеристики, определенные по теоретическим законам распределения, называются параметрами распределения.

Основными статистическими характеристиками случайных величин, изучаемых в теории надежности, служат среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения.

Среднее арифметическое — это частное от деления суммы измеренных значений на число слагаемых этой суммы, т. е. на число испытаний (опытов):

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N} \approx \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}, \quad (3.7)$$

где $\bar{X}$ — среднее арифметическое из N испытаний; $x_1, x_2, \dots, x_n$ — отдельные измеренные значения наблюдаемой величины; N — число проведенных испытаний.

В том случае, когда среди полученных значений случайных величин имеются одинаковые, несколько раз повторяющиеся с определенной частотой, их среднее значение называется средней взвешенной.

Средняя взвешенная величина определяется по формуле:

$$\bar{X} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (3.8)$$

где m_i — частота; $\sum_{i=1}^n m_i = N$ — число всех зафиксированных значений x_i .

Тогда

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{N}. \quad (3.9)$$

Для упрощения среднюю взвешенную очень часто подсчитывают по следующей формуле:

$$\bar{X} = A + \frac{\sum_{i=1}^n m_i (x_i - A)}{N}, \quad (3.10)$$

где A — произвольное число, которое подбирают так, чтобы разности $(x_i - A)$ были возможно простыми и малыми числами.

Обычно A выбирают приблизительно равным среднему значению случайной величины на глаз или равным значению, соответствующему наибольшей частоте значений случайной величины в ряду распределения.

Из формулы (3.10) следует, что средняя взвешенная подсчитывается как сумма произведений значений случайной величины x_i на соответствующие им частоты m_i/N , т. е.

$$\bar{X} = W_1 x_1 + W_2 x_2 + \dots + W_n x_n = \sum_{i=1}^n W_i x_i. \quad (3.11)$$

При достаточно большом числе испытаний $N \rightarrow \infty$ частоты приближенно равны соответствующей вероятности:

$$W_1 \approx P_1; \quad W_2 \approx P_2; \dots; \quad W_n \approx P_n.$$

Заменив в формуле (3.11) относительные частоты соответствующими вероятностями, получим для дискретной случайной величины равенство для определения математического ожидания:

$$MX \approx P_1x_1 + P_2x_2 + \dots + P_nx_n = \sum_{i=1}^n P_ix_i. \quad (3.12)$$

Математическое ожидание дискретной случайной величины, подсчитанное по заданному закону распределения, называется суммой парных произведений возможных значений случайной величины x_i на соответствующие им вероятности P_i .

Для непрерывной случайной величины:

$$MX = \int_{-\infty}^{+\infty} x dF(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx.$$

Среднее значение характеризует центр группирования значений случайной величины. При $N \rightarrow \infty$ величина $\bar{X}$ стремится по значению к математическому ожиданию, т. е. $\bar{X} \approx MX$.

Мода M_0 эмпирической совокупности — это значение прерывной случайной величины x_i , соответствующее наибольшей ординате полигона распределения (рис. 26, а). За моду прерывной случайной величины принимают значение, имеющее наибольшую вероятность.

Мода M_{00} теоретического распределения непрерывной случайной величины — это такое значение x , которое соответствует макси-

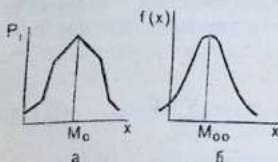


Рис. 26. Мода случайных величин:

а — дискретной (прерывной); б — непрерывной.

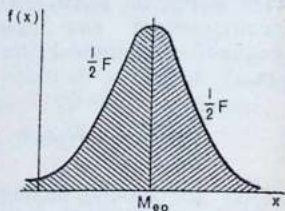


Рис. 27. Медиана непрерывной случайной величины.

мальному значению плотности распределения $f(x)$ (рис. 26, б).

Модой также называется значение признака, встречающееся с наибольшей частотой, т. е. значение признака, наиболее типичное в данном статистическом ряду.

Медиана M_e или срединное значение эмпирической совокупности — это такое зафиксированное значение случайной величины x_i , которое является срединным членом (объектом) в ряде значений, упорядоченных по их возрастанию или убыванию.

Другими словами, медианой называется значение признака, относительно которого эмпирическая совокупность делится на две равные по числу членов части. Если число членов n эмпирической совокупности нечетное и равное $2k+1$ и наблюдаемые значения x_i расположить в возрастающем порядке, то $x_1, x_2, \dots, x_k, x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_{2k+1}$; $M_e = x_{k+1}$. При четном $n = 2k$ в качестве медианы условно принимают

$$M_e = \frac{x_k + x_{k+1}}{2}. \quad (3.13)$$

Медиана M_{eo} теоретического распределения случайной величины — это такое значение x_i , при котором вероятность появления величины x , меньших M_{eo} , равна вероятности появления величины x , больших M_{eo} .

Ордината кривой распределения, соответствующая значению случайной величины $x = M_{eo}$, делит площадь под кривой распределения на две равные части (рис. 27).

Если дифференциальная функция распределения $f(x)$ симметрична относительно среднего арифметического значения X и имеет один максимум, то мода и медиана совпадают с математическим ожиданием, т. е.

$$M_{eo} = M_{eo} = MX.$$

Разброс случайной величины относительно центра распределения (среднеарифметической, математического ожидания, моды или медианы) характеризуется мерами рассеивания.

К мерам рассеивания относятся: размах, дисперсия (рассеивание), среднее квадратическое отклонение (стандарт) и коэффициент вариации.

Размах R распределения (диапазон рассеивания) в эмпирической совокупности — разность между максимальным и минимальным из значений случайной величины x_i , полученных в результате испытаний.

Размах определяют по формуле:

$$R = x_{i, \max} - x_{i, \min} . \quad (3.14)$$

Им пользуются в эмпирических распределениях как мерой рассеивания при малом числе испытаний ($N < 10$).

Рассеивание (степень изменчивости) случайной величины наиболее часто измеряют дисперсией (рассеиванием) и средним квадратическим отклонением.

Эмпирическая дисперсия S^2 — величина рассеивания зафиксированных значений вокруг их среднего значения.

При малом числе наблюдений, т. е. при $N < 25$,

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2 . \quad (3.15)$$

При $N \geq 25$

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2 = a_2 - \bar{X}^2 , \quad (3.16)$$

$$\text{где } a_2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 m_i}{N} .$$

Дисперсия для дискретной случайной величины теоретического распределения будет выглядеть так:

$$DX = \sum_{i=1}^n P(x_i) (x_i - MX)^2 . \quad (3.17)$$

Для непрерывной, заданной плотностью вероятности $f(x)$

$$DX = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) (x - MX)^2 dx . \quad (3.18)$$

При $N \rightarrow \infty$

$$S^2 \approx DX .$$

Эмпирическое среднее квадратическое отклонение и среднее квадратическое отклонение (стандарт) будут соответственно равны корням квадратным из дисперсии S^2 и из DX , взятых с положительным знаком.

При малом числе наблюдений, т. е. при $N < 25$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2}. \quad (3.19)$$

При $N \geq 25$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2}. \quad (3.20)$$

Размерность S и σ совпадает с размерностью самой случайной величины x .

Если при вычислении исходят не из отклонений от средней арифметической, а из непосредственно измеренных величин, то

$$S = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right] - \bar{X}^2}. \quad (3.21)$$

Чтобы при вычислении не возводить в квадрат многозначные числа, можно пользоваться отклонениями от условно избранной любой постоянной величины A с последующим расчетом по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - A)^2 - (\bar{X} - A)^2}. \quad (3.22)$$

$\sigma = \sqrt{DX}$ и определяет широту кривой распределения. На рисунке 28 изображено несколько кривых распределения с различными σ и одним и тем же $\bar{X}$.

Дисперсия суммы (разности) взаимно независимых случайных величин равна сумме (разности) их дисперсий:

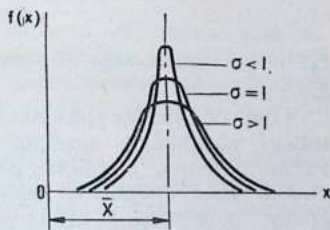


Рис. 28. Кривые распределения с различными σ и с одним и тем же $\bar{X}$.

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2. \quad (3.23)$$

Среднее квадратическое отклонение суммы конечно-го числа взаимно независимых случайных величин равно корню квадратному из суммы квадратов средних квадратических отклонений этих величин:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}. \quad (3.24)$$

Если взаимно независимые случайные величины одинаково распределены, средние квадратические отклонения σ_{Σ} каждой из них равны между собой и на основании формулы (3.24)

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{N} \sigma = \sigma \sqrt{N}.$$

Среднее квадратическое отклонение величины среднего арифметического значения $\bar{X}$ (средняя ошибка) составляет $1/N$ от σ_{Σ} и вычисляется так:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma_{\Sigma}}{N} = \frac{\sigma \sqrt{N}}{N} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}. \quad (3.25)$$

Таким образом, среднее квадратическое отклонение среднего арифметического N одинаково распределенных взаимно независимых случайных величин в $\sqrt{N}$ раз меньше среднего квадратического отклонения σ каждой из величин.

Совокупность не содержит грубых погрешностей согласно критерию Райта в том случае, если

$$|x_i| \leq 3\sigma, \quad (3.26)$$

где $|x_i|$ — максимальное по абсолютной величине отклонение, равное $|x_{\max} - \bar{X}|$.

При обработке результатов испытаний (опытов) может возникнуть необходимость сравнить различные распределения, а также рассеивание разнородных величин. Для сравнения рассеивания разнородных величин дисперсия и стандарт не могут быть использованы. В качестве отвлеченной меры рассеивания, не зависящей от единиц измерения сравниваемых величин, принимается коэффициент вариации или изменчивости v_x .

Для эмпирического распределения он выражается через отношение эмпирического среднего квадратического отклонения к среднему арифметическому.

$$v_x = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3.27)$$

Он показывает, насколько велико рассеивание по сравнению со средним значением случайной величины.

Коэффициент вариации для теоретического распределения представляет собой отношение среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию:

$$v_x = \frac{\sigma_x}{MX} \quad (3.28)$$

Коэффициент вариации может выражаться в процентах:

$$v_x = \frac{S}{\bar{X}} 100\%; \quad v_x = \frac{\sigma_x}{MX} 100\% \quad (3.29)$$

Тот из рядов распределения имеет большее рассеивание, у которого больше коэффициент вариации.

§ 2. ПОНЯТИЕ О КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ И НАДЕЖНОСТИ

В настоящее время нет единого показателя, который в целом давал бы оценку качеству продукции. Поэтому каждое свойство, рассмотренное ранее, характеризующее качество, оценивают своими показателями.

Квалиметрия — научная область, объединяющая количественные методы оценки качества, используемые для обоснования решений, принимаемых при управлении качеством продукции и стандартизации (по ГОСТ 15467—79).

Показатель качества продукции — это количественная характеристика одного или нескольких ее свойств, составляющих качество. Этот показатель рассматривают применительно к условиям создания, эксплуатации или потребления продукции. Различают следующие показатели качества продукции.

Единичный показатель — показатель, характеризующий только одно из свойств продукции.

Комплексный показатель — показатель, характеризующий несколько свойств продукции.

Интегральный показатель — отношение суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления продукции к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию или потребление.

Интегральный показатель качества И вычисляют по формуле:

$$И = \frac{\mathcal{E}}{З_с + З_э}, \quad (3.30)$$

где $\mathcal{E}$ — суммарный полезный эффект от эксплуатации или потребления продукции (например, наработка за срок службы до капитального ремонта); $З_с$ — суммарные затраты на создание продукции (разработку, изготовление, монтаж и другие единовременные затраты); $З_э$ — суммарные затраты на эксплуатацию продукции (техническое обслуживание, ремонт и другие текущие затраты).

Формула (3.30) справедлива для продукции, срок службы которой не превышает одного года. В этом случае единовременные и текущие затраты просто суммируют.

Для продукции, срок службы которой превышает один год, единовременные затраты на создание продукции приводятся к последнему году службы ее с использованием нормативного коэффициента, учитывающего самоокупаемость продукции.

Наряду с интегральным показателем качества продукции может применяться величина, обратная ему и называемая удельными затратами на единицу полезного эффекта.

Оценка надежности технических объектов также возможна с помощью показателя надежности.

Показатель надежности — количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность технического объекта, т. е. он количественно характеризует, в какой степени конкретному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие его надежность.

Как отмечалось ранее, для определения числовых значений показателей надежности могут использоваться как точные (теоретические), так и приближенные (статистические) уравнения. Точность приближенных уравнений зависит от того, насколько информация о надежности отвечает предъявляемым к ней требованиям.

Показатель надежности может иметь размерность или не иметь ее (например, вероятность безотказной работы).

При рассмотрении показателей надежности ГОСТ рекомендует различать: наименование показателя; численное значение, которое может изменяться в зависимости от условий эксплуатации объекта, стадии его создания или существования; формулировку показателя, содержащую указания о способах экспериментального или расчетного определения численного значения.

Многие показатели надежности — это параметры распределения случайных величин. Для их оценки основными величинами, участвующими в расчетах, приняты следующие случайные величины: наработка, число отказов и число объектов, находящихся в эксплуатации или на испытаниях.

При нормировании значений показателей надежности в документации регламентируют конкретные условия определения и контроля этих показателей.

При постановке и решении задач надежности и особенно при выборе показателей надежности технического объекта существенное значение имеет решение, которое должно быть принято в случае отказа, каким в данной конкретной ситуации в процессе эксплуатации является технический объект — восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

В соответствии с ГОСТ для количественной оценки надежности применяют единичные и комплексные показатели надежности.

Единичный показатель количественно характеризует только одно свойство надежности объекта, т. е. этот показатель относится к одному из свойств, составляющих надежность объекта (безотказность, долговечность, ремонтпригодность или сохраняемость).

Комплексный показатель количественно характеризует одновременно два или несколько различных свойств технического объекта, т. е. он относится к нескольким свойствам, составляющим надежность объекта. В качестве примера комплексного показателя надежности можно привести коэффициент готовности, который, как будет рассмотрено позже, характеризует два свойства надежности объекта: безотказность и ремонтпригодность.

§ 3. СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ О НАДЕЖНОСТИ

Сбор, обработка и анализ информации о надежности связаны с необходимостью исследования случайных событий.

Общие требования, предъявляемые к информации о надежности: полнота, достоверность, однородность, дискретность (данные по отдельным признакам), своевременность и др.

Статистическая оценка основных характеристик надежности дается совокупности предметов или явлений, объединенных единым признаком или свойством (например, детали могут группироваться в совокупности по различным признакам: размерам, отклонениям формы, износам и т. п.; машины — по долговечности и т. д.). При этом детали, сборочные единицы, системы машин служат объектами (членами) совокупности.

Статистическая совокупность — это такая совокупность, которая состоит из однородных объектов, обладающих качественной общностью.

В тех случаях, когда имеют дело с количественным признаком, его называют статистической переменной или по определению, принятому в теории вероятностей, случайной величиной.

Для каждого объекта (члена) совокупности, состоящей из конечного числа объектов, можно при помощи наблюдения определить соответствующее значение случайной величины, которое называют наблюдаемым значением случайной величины.

Если совокупность содержит очень большое число объектов или обследование объекта связано с разрушением его, из всей совокупности отбирают ограниченное число объектов и подвергают их изучению. При малом числе объектов обследуют каждый из членов совокупности относительно интересующего признака.

Генеральная или общая совокупность — это совокупность объектов, содержащая все исследуемые объекты, из которой делается выборка, т. е. над которой ведется наблюдение.

Выборка или выборочная совокупность, — определенное число объектов, отобранных из исследуемой совокупности для получения сведений о генеральной совокупности.

Выборка во всех своих частях должна быть подобна генеральной совокупности, чтобы на основании ее можно было достаточно уверенно судить об интересующем признаке генеральной совокупности. Это требование формулируется так: выборка должна быть представительной, т. е. такой, чтобы каждый объект был отобран случайно и все они имели одинаковую вероятность попасть в выборку.

Объем совокупности (генеральной или выборочной) — число объектов этой совокупности.

Объем выборки — число объектов наблюдений, составляющих выборку.

Согласно ГОСТ, система сбора и обработки информации о надежности серийно выпускаемых новых и отремонтированных изделий машиностроения и приборостроения представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий по получению необходимых и достоверных сведений о надежности.

Цели системы сбора и обработки информации о надежности изделий следующие: конструктивное усовершенствование изделий для повышения их надежности; усовершенствование технологии изготовления, сборки, контроля и испытаний, направленных на обеспечение и повышение надежности; разработка мероприятий, направленных на соблюдение правил эксплуатации и повышение эффективности технического обслуживания и текущих ремонтов, повышение качества ремонтов и снижение затрат на их проведение.

Задачи системы сбора и обработки информации о надежности:

- 1) определение и оценка показателей надежности изделий;
- 2) обнаружение конструктивных и технологических недостатков изделий, снижающих надежность;
- 3) выявление деталей и сборочных единиц, ограничивающих надежность конечных изделий;
- 4) определение закономерностей возникновения отказов;
- 5) установление влияния условий и режимов эксплуатации на надежность изделий;
- 6) корректировка нормируемых показателей надежности;

7) оптимизация норм расхода запасных частей, выявление недостатков эксплуатации и совершенствование системы технического обслуживания и ремонта;

8) определение эффективности мероприятий, направленных на повышение надежности изделий до оптимального уровня.

Обработка результатов экспериментальных наблюдений обычно ведется в такой последовательности:

а) по опытным данным строят эмпирическую кривую;

б) вычисляют характеристики эмпирического распределения;

в) выдвигают одну или несколько гипотез о функции плотности исследуемой случайной величины, исходя из внешнего вида экспериментальной кривой и значений ее характеристик распределения и факторов, влияющих на ее вид;

г) эмпирическая кривая выравнивается по одной или последовательно по нескольким принятым теоретическим кривым (теоретические частоты случайных величин находятся по соответствующим формулам и таблицам);

д) эмпирическая и теоретическая (выравненная эмпирическая) кривые сравнивают по одному из критериев согласия;

е) выбирают функцию (закон) для данного распределения с учетом наилучшего согласования эмпирической и теоретических кривых.

Можно решать и обратную задачу — выравнивать эмпирическое распределение по теоретическому (параметры берутся теоретические), сравнивать их по одному из критериев согласия.

Законы распределения случайных величин, характеризующие надежность. Они имеют большое значение для теории и практики обеспечения надежности технических объектов.

Чаще всего встречаются со следующими распределениями (законами распределения): нормальным и его разновидностями (усеченным нормальным, логарифмически нормальным), экспоненциальным (показательным), Релея, Вейбулла — Гнеденко, гамма-распределением, Пуассона, биномиальным.

Закон нормального распределения получил наибольшее применение в технических приложе-

ниях (нормальный закон Гаусса). Он занимает особое место и играет важную роль в теории вероятностей и теории надежности. Этому закону подчиняются многие случайные величины массовых явлений, на которые оказывает влияние большое число факторов, равнозначных по своим значениям (например, износы, измеренные микрометром большого числа деталей одного наименования).

Плотность нормального распределения непрерывной случайной величины выглядит так:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.31)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение случайной величины x ; e — основание натурального логарифма, равное 2,7183; x — случайная величина ($-\infty < x < +\infty$); $\bar{X}$ — среднее арифметическое значение (математическое ожидание) случайной величины x .

Дифференциальная кривая, соответствующая нормальному закону, симметрична относительно ординаты, проведенной в точке $x = \bar{X}$, называемой центром распределения, и имеет колоколообразный вид (рис. 29). Ветви этой кривой простираются в обе стороны в бесконечность, асимптотически приближаясь к оси абсцисс при $x \rightarrow \pm\infty$.

Случайная величина, подчиняющаяся закону нормального распределения, имеет три следующих свойства: одинаковые положительные и отрицательные отклонения от средней арифметической $\bar{X}$ равновозможны; меньшие отклонения более вероятны, чем большие; весьма большие отклонения от $\bar{X}$ крайне маловероятны.

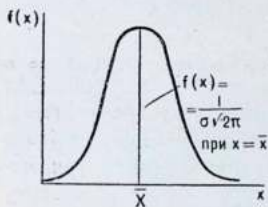


Рис. 29. Нормальный закон распределения случайных величин.

Характерная особенность нормального распределения — это то, что вероятность или частота значений x , заключенных в пределах от $\bar{X} - 3\sigma$ до $\bar{X} + 3\sigma$, составляет 0,9973, т. е. близка к единице.

Функция нормального распределения выражается в общем виде так:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3.32)$$

Для подсчета вероятности того, что случайная величина находится в тех или иных пределах, пользуются интегралом $\Phi(t)$, значения которого приводятся в таблицах, имеющихся в литературе по математической статистике.

В таблице 1 приложения приведены значения $\Phi(t)$, а в таблице 2 — значения функции $f(t)$ для нормального распределения:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (3.33)$$

где $t = \frac{x - \bar{X}}{\sigma}; \quad dt = \frac{dx}{\sigma}.$

Выражение $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt = Z_t$ представляет собой значения ординат (частостей) кривой нормального распределения.

Табличный интеграл $\Phi(t)$ соответствует площади под кривой, заключенной между осью симметрии кривой и ординатой, соответствующей значению t , и непосредственно дает вероятность того, что значение случайной величины находится в пределах от 0 до t .

Так, например, для $x=3\sigma$ ($t=3$) из таблицы значений $\Phi(t)$ находим, что $\Phi(3)=0,49865$, т. е. для $2\Phi(3)=0,9973 \approx 1$.

Следовательно, как отмечалось ранее, вероятность того, что случайная величина x лежит в пределах $\pm 3\sigma$, близка к 1 или к 100 % (правило «трех сигм»).

Вероятность того, что случайная величина, подчиняющаяся закону нормального распределения, при испытаниях примет значение в пределах от x_1 до x_2 , может быть записана следующим образом:

$$P(x_1 < x < x_2) = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = \Phi\left(\frac{x_2 - \bar{X}}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - \bar{X}}{\sigma}\right).$$

Для вычисления $F_0(x)$ при отрицательных значениях x используется выражение:

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x).$$

$F_0(x)$ обычно вычисляют для удобных значений x . Например, 0,8; 0,9; 0,95; 0,98; 0,99; 0,999 и т. д.

Можно поступить наоборот, т. е. выписать принятые для анализа значения $F_0(x)$, равные $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, и определить соответствующие им значения $x = U_\alpha$. Такие значения U_α называются квантилями.

Например, $F_0(x) = F_0(U_\alpha) = \alpha$,

где α — принятые значения функции $F_0(x)$; U_α — квантиль.

Значения квантилей приведены в таблице 3 приложения.

Пример. Если $\alpha_1 = 0,95$ и $\alpha_2 = 0,99$, то из таблицы 3 приложения находим, что квантиль $U_{\alpha_1} = U_{0,95} = 1,645$, а $U_{\alpha_2} = U_{0,99} = 2,326$. Требуется определить вероятность изменения от $U_{0,95} = 1,645$ до $U_{0,99} = 2,326$, т. е. определить вероятность того, что $1,645 \leq x \leq 2,326$.

Из таблицы 3 приложения имеем $P(x \geq U_{0,95}) = 0,95$; $P(x \leq U_{0,99}) = 0,99$ или $P(U_{0,95} \leq x \leq U_{0,99}) = F_0(U_{0,99}) - F_0(U_{0,95}) = 0,04$.

Таким образом, квантили $U_{0,99} = 2,326$ и $U_{0,95} = 1,645$ определяют область изменения случайной величины x , вероятность попадания в которую равна 0,04.

Кривые распределения, подчиняющиеся закону нормального распределения, могут характеризоваться так-

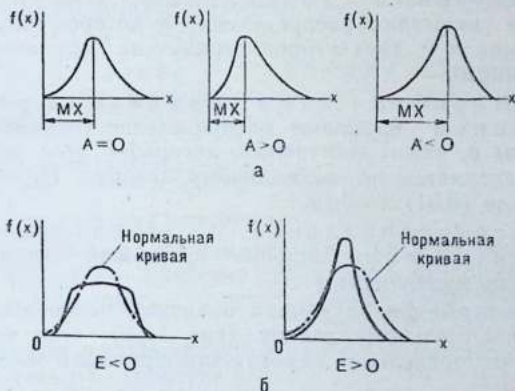


Рис. 30. Кривые распределения:
а — с асимметрией; б — с эксцессом.

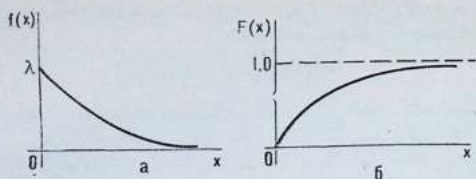


Рис. 31. Экспоненциальный закон распределения случайных величин:

a — плотность распределения; b — функция распределения.

же асимметрией A (рис. 30, a) и эксцессом E (рис. 30, b).

Если $A=0$, кривая симметрична; при $A>0$ кривая имеет положительную асимметрию, при $A<0$ — отрицательную.

Эксцесс характеризует крутизну кривой. Кривая нормального распределения будет кривой с нулевым эксцессом. Ее дифференциальная функция определяется из уравнения (3.31).

При $E<0$ наблюдается отрицательный эксцесс; при $E>0$ — положительный; при $E=0$ эксцесс отсутствует (нормальная кривая).

Усеченным нормальным распределением называют распределение, у которого случайная величина x с двух сторон ограничена определенными значениями.

Логарифмическим нормальным распределением называют распределение случайной величины y , если десятичный логарифм этой величины распределяется по нормальному закону. При этом в формуле (3.31) $x = \lg y$.

Экспоненциальное (показательное) распределение широко применяют при решении вопросов надежности.

Непрерывная случайная величина распределена по экспоненциальному закону (рис. 31, a), если ее плотность распределения вероятности при $x \geq 0$ имеет вид:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} = \lambda \exp(-\lambda x), \quad (3.34)$$

где λ — постоянная величина (коэффициент).

Функцию распределения (рис. 31, б) находят по формуле:

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_0^x f(x) dx = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} dx = \\ &= 1 - e^{-\lambda x} = 1 - \exp(-\lambda x). \end{aligned} \quad (3.35)$$

Математическое ожидание случайной величины x , имеющей показательное распределение, — это величина, обратная коэффициенту λ .

У показательного распределения математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение одинаковы:

$$MX = \sigma = \frac{1}{\lambda}.$$

Распределение Релея характеризуется тем, что распределение случайной положительной величины происходит с плотностью распределения вида:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.36)$$

Функцию распределения Релея находят по уравнению:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = 1 - \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma^2}\right]. \quad (3.37)$$

Распределение Вейбулла — Гнеденко (рис. 32) имеет следующую плотность распределения:

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad (3.38)$$

где b и a — параметры распределения.

Из формулы (3.38) следует, что при $b=1$ распределение Вейбулла — Гнеденко совпадает с экспоненциальным распределением, а при $b=2$ — с распределением Релея.

Функцию распределения Вейбулла — Гнеденко можно записать в следующем виде:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]. \quad (3.39)$$

Гамма-распределение в теории надежности находит широкое применение. Его плотность распределения имеет вид:

$$f(x) = \frac{x^{m-1}}{2^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{x}{2}\right). \quad (3.40)$$

Распределение Пуассона. При решении практических задач надежности часто приходится иметь дело с распределением дискретных случайных величин по закону распределения Пуассона. Например, если в начальный период эксплуатации изделия (период приработки) поток отказов нестационарный, то после окончания периода приработки поток отказов становится стационарным и, следовательно, простейшим (пуассоновским).

Вероятности частот событий, редко встречающихся при некотором числе испытаний, для распределения Пуассона находят по формуле:

$$P_m = \frac{(nP)^m e^{-nP}}{m!} = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (3.41)$$

где m — частота данного события; n — число испытаний (наблюдений); P — вероятность событий при одном испытании; $a = nP$ — математическое ожидание случайной величины.

Значения P_m приведены в таблице 4 приложения.

Для распределения Пуассона дисперсия равна математическому ожиданию.

Если принять в уравнении (3.41) $m=0$ и $a=\lambda t$, то получим уравнение экспоненциального закона распределения, который представляет собой частный случай закона распределения Пуассона.

Закон биномиального распределения, как и закон распределения Пуассона, имеет практическое значение для дискретных случайных положительных величин. Он применим, например, для следующего случая: если проводится се-

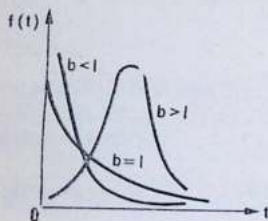


Рис. 32. Распределение Вейбулла—Гнеденко.

рия последовательных независимых испытаний, каждое из которых заканчивается одним из двух несовместных между собой результатов — либо событие A наступает, либо оно не наступает.

Вероятность появления события A в каждом испытании равна P , а вероятность не появления события A равна $q = 1 - P$. Так как испытания независимы, то вероятность появления или не появления A не зависит от результатов предыдущих испытаний.

При такой схеме испытаний вероятность появления события A заданное число раз подчиняется закону биномиального распределения, который можно сформулировать так: если вероятность события A постоянна в серии последовательных независимых испытаний и равна P , то вероятность появления события A m раз в n испытаниях будет:

$$P_{m,n} = C_n^m P^m q^{n-m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} P^m q^{n-m}. \quad (3.42)$$

Математическое ожидание $M(m)$ и дисперсия $\sigma^2(m)$ биномиального распределения:

$$M(m) = nP; \quad (3.43)$$

$$\sigma^2(m) = nPq. \quad (3.44)$$

Если вместо случайной величины m рассматривать случайную частоту $x = m/n$, то из уравнений (3.43) и (3.44) получим:

$$M(x) = \frac{1}{n} M(m) = P; \quad (3.45)$$

$$\sigma(x) = \frac{1}{n} \sigma(m) = \sqrt{\frac{Pq}{n}}. \quad (3.46)$$

Композиция законов распределения. На практике при анализе надежности чаще всего приходится иметь дело со сложными объектами, у которых возможны самые разнообразные физические причины отказов отдельных элементов объекта. Различные виды отказов подчиняются своим специфическим законам распределения. Например, как отмечалось выше, случайные внезапные отказы в основном подчиняются экспоненциальному закону распределения.

Таким образом, у сложных объектов законы распределения отказов и неисправностей — это сочетание многих разнообразных распределений.

Если случайная величина представляет собой сумму независимых случайных величин, каждая из которых подчиняется своему закону распределения, то закон распределения суммы может быть найден по законам распределения слагаемых.

Допустим, что имеется несколько независимых случайных величин: X , Y , Z . Этим величинам соответствуют плотности распределения вероятностей:

$$f(x); f(y); f(z).$$

Сложная величина U равна сумме независимых случайных величин:

$$U = X + Y + Z.$$

Если X , Y , Z — случайные величины, то и их сумма тоже будет случайной величиной и ее плотность распределения вероятностей будет $f(U)$. Закон распределения величины U называется композицией законов распределения величин X , Y , Z .

Плотность распределения $f(U)$ — композиция распределений $f(x)$, $f(y)$ и $f(z)$. Композиция может существовать для любого числа случайных величин.

Композиция законов распределения имеет ряд общих и частных свойств. Общие свойства композиций не зависят от вида рассматриваемых законов распределения.

Например, математическое ожидание и дисперсия композиции распределения соответственно равны сумме математических ожиданий независимых случайных величин, образующих сложную случайную величину.

Частные свойства применимы только к определенным законам распределения. Например, композиция случайных величин с нормальным распределением — это также нормальное распределение, композиция распределений Пуассона дает также распределение Пуассона и т. д.

Если имеем большое число любых распределений (с одинаковыми или различными законами распределения) при условии, что дисперсии составляющих распределений отличаются друг от друга незначительно, то распределение их композиции будет близко к нормальному.

Это положение в теории вероятностей называется центральной предельной теоремой, которая определяет особую роль нормального распределения в теории вероятностей и надежности.

Критерии согласия. Часто приходится определять, является ли расхождение между эмпирическим законом распределения и предполагаемым, т. е. теоретическим, результатом ограниченного числа наблюдений. Возможно, это расхождение существенно и связано с тем, что действительное распределение случайной величины отличается от предполагаемого. Чтобы ответить на эти вопросы, используют так называемые критерии согласия. Таким образом, критерием согласия называется критерий проверки гипотезы о предполагаемом законе неизвестного распределения.

Наиболее простым критерием проверки гипотезы о виде закона распределения служит критерий λ , предложенный академиком А. Н. Колмогоровым. При использовании этого критерия делают предположение, что распределение статистических данных имеет, например, характер нормального распределения. В качестве параметров распределения принимают соответствующие характеристики выборки.

Приняв параметры теоретического распределения равными параметрам эмпирического распределения, определяют теоретические частоты $m_{i, \text{теор}}$ любого значения x в эмпирическом распределении по формуле:

$$m_{i, \text{теор}} = \frac{\Delta x N}{\sigma} f(x) \text{ или } m_{i, \text{теор}} = \frac{h}{S} N \Phi(t), \quad (3.47)$$

где Δx или h — ширина (цена) интервала или предельная разность размеров внутри интервала.

Значения $f(x)$, вычисленные для различных величин, берутся из таблицы 2 приложения.

По вычисленным частотам строят теоретические кривые распределения в такой последовательности. Из середины интервалов, отклоненных по оси абсцисс, проводят ординаты, равные вычисленным теоретическим частотам. Концы ординат соединяют плавной сплошной линией.

Близость теоретических частот к эмпирическим позволяет ориентировочно утверждать, что эмпирическая

кривая распределения подчиняется закону нормального распределения.

По эмпирическим и возможным теоретическим частотам распределения подсчитывают значения критерия согласия λ , который вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{\left| \sum_1^i m_i - \sum_1^i m_{i,\text{теор}} \right|_{\max}}{N} \sqrt{N} = D_{\max} \sqrt{N}, \quad (3.48)$$

где $\sum_1^i m_i$ — накопленная эмпирическая частота; $\sum_1^i m_{i,\text{теор}}$ — накопленная теоретическая частота; $D_{\max}$ — наибольшая абсолютная разность между накопленными эмпирическими и теоретическими частотами; N — общее число всех наблюдаемых значений (объем выборки).

Под накопленной частотой для заданного значения x понимается сумма всех частот, предшествующих этому значению.

Величины $\frac{\sum_1^i m_i}{N}$ и $\frac{\sum_1^i m_{i,\text{теор}}}{N}$ представляют собой интегральные функции $F_n(x)$ эмпирического и $F(x)$ теоретического распределения, а поэтому выражение для λ можно представить в виде:

$$\lambda = [F_n(x) - F(x)] \sqrt{N}. \quad (3.49)$$

Для вычисления интегральных функций $F(x)$ теоретического распределения можно пользоваться выражением:

$$F(x) = 0,5 + \Phi \left[\frac{x - \bar{X}}{\sigma} \right] = 0,5 + \Phi(t), \quad (3.50)$$

где x — верхняя граница соответствующего интервала.

Критерий согласия λ подчиняется определенному закону распределения, по которому можно вычислить вероятность $P(\lambda)$.

В справочной литературе имеется таблица значения вероятностей $P(\lambda)$ для различных λ (см. табл. 5 прил.).

Если окажется, что вероятность $P(\lambda)$ очень мала (менее 0,05), то по принципу практической невозможности маловероятных событий можно заключить, что эмпирическое распределение не соответствует предполагаемому теоретическому распределению.

В случае если $P(\lambda) > 0,05$, считают, что расхождение между значениями накопленных частот случайно, а установленное теоретическое распределение может быть принято в качестве характеристики исследуемого явления.

Очень часто используют критерий согласия Пирсона, так называемый χ^2 —хи-квадрат. Этот критерий наиболее приемлем при большом числе наблюдений. Он обеспечивает минимальную ошибку принятия неверной гипотезы по сравнению с другими критериями. Критерий Пирсона следует применять в тех случаях, когда теоретические значения параметров функции распределения неизвестны:

$$\chi^2_{\text{табл}} = \sum \frac{|m_i - m_{i,\text{теор}}|^2}{m_{i,\text{теор}}} . \quad (3.51)$$

Найдя χ^2 , следует определить k -число степеней свободы:

$$k = n - r - 1,$$

где n — число сравниваемых частот (число групп или частичных интервалов) выборки; r — число параметров предполагаемого распределения, которые оценены по данным выборки.

В таблице 8 приложения по заданному уровню значимости P и числу степеней свободы k находят критическую точку $\chi^2_{\text{кр}}(P, k)$. Если $\chi^2_{\text{набл}} < \chi^2_{\text{кр}}$, расхождения эмпирических и теоретических частот при данном уровне значимости P незначительные, а следовательно, данные наблюдений согласуются с гипотезой о предполагаемом законе распределения случайных величин. Уровень значимости P должен быть не менее 0,1.

Опытная информация может обрабатываться графическим методом с помощью так называемой вероятностной бумаги или функциональных сеток. О применении вероятностной бумаги подробно написано в [19 и 22]. Функциональная сетка вероятностной бумаги составляется таким образом, чтобы нанесенная на эту бумагу функция распределения была представлена прямой линией.

Это «выпрямление» достигается заменой координат функции распределения $F(x)$ и x , координатами $F'(x)$ и X' , закон изменения которых подобран таким образом, чтобы «выпрямить» функцию заданного закона распределения.

Интервал $(m^* - \delta, m^* + \delta)$ имеет случайные концы, которые называют доверительными границами.

Границы, в которых могут колебаться значения оценочного показателя при заданной надежности α , называются нижней доверительной границей $m_n = m^* - \delta = m_1$ и верхней доверительной границей $m_v = m^* + \delta = m_2$. Доверительные границы сами являются случайными величинами и зависят от величины выборки. Зная доверительные границы, можно найти доверительный интервал:

$$I_\alpha = m_2 - m_1.$$

Доверительные интервалы для оценки математического ожидания нормального распределения могут определяться при известном или неизвестном среднеквадратическом отклонении σ . Если известна величина оценки m^* при известном σ , то верхнюю и нижнюю границы определяют по следующим уравнениям:

$$m_n = m^* - t \frac{\sigma}{\sqrt{n}};$$

$$m_v = m^* + t \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где t — число, которое определяется из равенства $2\Phi(t) = \alpha$ или $\Phi(t) = \alpha/2$ (см. табл. 9 прил. [21]).

С другой стороны, из формулы $\delta = t\sigma/\sqrt{n}$ следует, что при возрастании объема выборки n число δ убывает и, следовательно, точность оценки увеличивается.

Увеличение надежности оценки $\alpha = 2\Phi(t)$ приводит к увеличению t , так как $\Phi(t)$ — функция возрастающая, а следовательно, и к возрастанию δ . Иными словами, увеличение надежности α влечет за собой уменьшение ее точности.

Если потребуется оценить математическое ожидание с наперед заданной точностью δ и надежностью α , то минимальный объем выборки, который обеспечит эту точность, находят по формуле:

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2}.$$

Пример. Случайная величина X имеет нормальное распределение с известным средним квадратическим отклонением $\sigma = 2$. Найти доверительные интервалы для оценки неизвестного математического ожидания, а по выборочным средним $\bar{X}$, если объем выборки $n = 49$ и задана надежность оценки $\alpha = 0,95$.

Решение: Находим t . Из соотношения $2\Phi(t)=0,95$ получим $\Phi(t)=0,475$. По таблице 9 приложения находим $t=1,96$. Находим точность оценки $\delta=t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1,96 \cdot 2}{\sqrt{49}} = 0,56$.

Доверительный интервал таков: $(\bar{X} - 0,56; \bar{X} + 0,56)$.

Например, если $\bar{X}=4,5$, то доверительный интервал имеет следующие доверительные границы: $\bar{X} - 0,56 = 4,5 - 0,56 = 3,94$, $\bar{X} + 0,56 = 4,5 + 0,56 = 5,06$.

Таким образом, значения неизвестного параметра m , согласующиеся с данными выборки, удовлетворяют неравенству $3,94 < m < 5,06$.

Когда значение среднего квадратического отклонения неизвестно, вместо величины $\delta = t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ определяют величину

$$\delta = t_{\gamma} \frac{S}{\sqrt{n}},$$

где t_{γ} — табличный коэффициент, определяемый по таблице 7 приложения для заданной доверительной вероятности α и числу степеней свободы $k=n-1$; S — выборочная характеристика, определяемая по уравнению

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - m^*)^2}.$$

Аналогично при помощи доверительных интервалов производится оценка истинного значения измеряемой величины по среднему арифметическому значению отдельных измерений.

Пример. Количественный признак X генеральной совокупности распределен нормально. При выборке объема 25 найдены выборочная средняя $\bar{X}=18,4$ и эмпирическое среднее квадратическое отклонение $S=0,6$. Требуется дать оценку неизвестному математическому ожиданию при помощи доверительного интервала с надежностью $\alpha=0,95$.

Решение: Пользуясь таблицей 6 приложения, по $\gamma=0,95$ и $k=n-1=25-1=24$ находим $t_{\gamma}=2,064$. Далее находим доверительные границы:

$$\bar{X} - t_{\gamma} \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{18,4 - 2,064 \cdot 0,6}{\sqrt{25}} = 18,15.$$

$$\bar{X} + t_{\gamma} \frac{S}{\sqrt{n}} = 18,4 + \frac{2,064 \cdot 0,6}{\sqrt{25}} = 18,65.$$

Итак, с надежностью 0,95 неизвестный параметр m заключен в доверительном интервале $18,15 < m < 18,65$.

Надежность характеризуют единичные показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

§ 4. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Вероятность безотказной работы — это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Вероятность безотказной работы может применяться как количественный критерий надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов.

Для режимов хранения и транспортирования может применяться аналогичный термин «вероятность невозникновения отказа».

Вероятность безотказной работы выражается в долях единицы или в процентах и изменяется от единицы до нуля. На рисунке 34 до наработки t_1 вероятность безотказной работы равна 1, а при наработке t_4 она равна 0,1.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ представляет собой безусловную вероятность того, что в интервале от 0 до t не наступит отказ, т. е. вероятность того, что отказ наступит в интервале от t до ∞ :

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (3.53)$$

Вероятность безотказной работы — безразмерный показатель, и при его назначении или определении не-

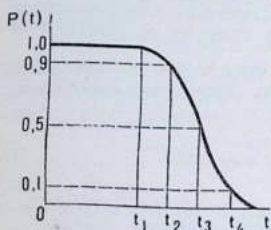


Рис. 34. Функция вероятности безотказной работы в зависимости от наработки объекта.

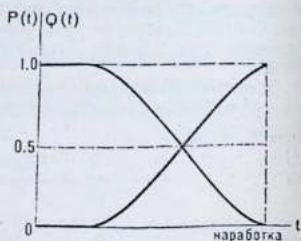


Рис. 35. Графики функций $P(t)$ и $Q(t)$.

обходимо указывать время или наработку, в течение которых его значение должно быть не ниже указываемой величины.

Аналитическое выражение для определения $P(t)$:

$$F_0 \left(\frac{\bar{T}-t}{\sigma} \right),$$

где $\bar{T}$ — среднеарифметическое значение наработки.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (3.54)$$

где $\hat{P}(t)$ — статистическая оценка вероятности безотказной работы; N_0 — число объектов в начале испытания; $n(t)$ — число отказавших объектов за время t .

При большом числе объектов N_0 статистическая оценка $\hat{P}(t)$ практически совпадает с вероятностью безотказной работы $P(t)$.

На практике иногда более удобной характеристикой может стать вероятность отказа.

Вероятность отказа — вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки возникнет хотя бы один отказ.

Вероятность отказа $Q(t)$ при $t=0$ равна нулю, изменяется от 0 до 1 и вычисляется по формуле:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (3.55)$$

Для статистического определения:

$$\hat{Q}(t) = 1 - \hat{P}(t) = 1 - \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (3.56)$$

где $n(t)$ — число отказавших объектов за время t .

Пример. Для группы тракторов, находящихся в эксплуатации после наработки 1000 моточасов, получено $\bar{Q}(t) = 0,05$ или $Q(1000) = 0,05$. Это означает, что 5 % тракторов будут иметь отказ раньше, чем через 1000 моточасов наработки.

Из рисунка 35 (графики функций $P(t)$ и $Q(t)$ и формулы (3.55) видно, что при $P(t) = 0,5$ $Q(t)$ также равна 0,5, и график функции вероятности отказа — зеркальное отображение функции вероятности безотказной работы.

Вероятность безотказной работы машины зависит от числа деталей в машине и их вероятности безотказной работы: $P_m = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t)$ (по теореме умножения вероятностей).

Если $P_1(t) = P_2(t) = \dots P_n(t)$, то $P_m(t) = P_i^n(t)$, что является примером практического применения теории вероятностей и математической статистики в надежности.

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание (среднее значение) наработки до первого отказа. Для восстанавливаемых объектов средняя наработка до первого отказа равнозначна средней наработке до отказа.

Значение средней наработки до отказа T_{cp} находят по уравнению:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (3.57)$$

или

$$T_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (3.58)$$

где t_i — наработка i -го объекта до отказа.

Точность определения средней наработки до отказа зависит от числа объектов, подвергающихся испытаниям на надежность.

Другой способ точного определения этой величины — определение закона распределения наработки до отказа объектов от величины наработки.

Для этого строят график распределения плотности вероятностей появления величины наработки до отказа $f(t)$, а затем с помощью интегрирования по формуле (3.57) определяют среднее время наработки объектов до отказа.

Наиболее распространенные законы распределения наработки до отказа восстанавливаемых изделий: экспоненциальный, Вейбулла — Гнеденко, нормальный и логарифмический нормальный.

Плотность вероятности экспоненциального распределения:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (3.59)$$

где $\lambda = \text{const}$ — параметр распределения; $\lambda = 1/T_{cp} = 1/\bar{T}$, так как интенсивность отказов — это обратная величина средней наработке до отказа.

Вероятность безотказной работы $P(t) = e^{-\lambda t}$:

$$\lambda(t) = \lambda.$$

Математическое ожидание:

$$M(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{T_{\text{ср}}} \int_0^{\infty} t e^{-\frac{t}{T_{\text{ср}}}} dt = T_{\text{ср}}.$$

Значение дисперсии для экспоненциального закона:

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t - T_{\text{ср}})^2 f(t) dt = T_{\text{ср}}^2; \quad D(t) = T_{\text{ср}}^2.$$

Таким образом, экспоненциальный закон распределения характеризуется одним параметром — средней наработкой до отказа.

Плотность вероятности для распределения Вейбулла — Гнеденко определяется из уравнения (3.38).

Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Определение этого термина по ГОСТ базируется на применяемом в теории надежности понятии плотности вероятности отказа в момент t , под которой понимается предел отношения вероятности отказа в интервале времени от t до $t + \Delta t$ к величине интервала Δt при $\Delta t \rightarrow 0$. Физический смысл плотности вероятности отказа — это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени.

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

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

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

Из этого соотношения имеем

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (3.60)$$

Эта формула для аналитического определения $\lambda(t)$ по известному закону распределения наработки до отказа.

Интенсивность отказов может определяться по приближенной статистической формуле как отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, работоспособных в данный момент времени:

$$\hat{\lambda}(t) \approx \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}, \quad (3.61)$$

где $N(t)$ — число объектов, работоспособных к моменту наработки t ; Δt — принятый некоторый достаточно малый интервал времени.

Если Δt достаточно мала, а величина $N(t) - N(t + \Delta t) = \Delta N(\Delta t)$ при этом велика, то

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta N(\Delta t)}{N(t) \Delta t},$$

где $\Delta N(\Delta t)$ — число отказавших объектов за время Δt .

После небольших преобразований можно получить

$$\lambda(t) = \frac{1}{T_{\text{ср}}}.$$

Интенсивность отказов может быть определена и по другой формуле:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \Delta t}, \quad (3.62)$$

где $n(\Delta t)$ — число отказавших объектов в интервале времени от

$$t - \frac{\Delta t}{2} \text{ до } t + \frac{\Delta t}{2}; \quad N_{\text{ср}} = \frac{(N_i + N_{i+1})}{2} -$$

среднее число исправно работающих объектов в интервале Δt ; N_i — число объектов, исправно работающих в начале интервала Δt ; N_{i+1} — число объектов, исправно работающих в конце интервала Δt .

Из уравнений для определения интенсивности отказов следует, что она в момент наработки t равна доле объектов, которые отказывают в единицу наработки после наработки t , причем эта доля относится к числу объектов, которые были работоспособны в момент наработки t , т. е. к $N(t)$.

Поток отказов. Для восстанавливаемых объектов, у которых вероятно многократное появление отказа, наработка на отказ — случайное событие. В этом случае отказавшие элементы заменяют на исправные и рабо-

тоспособность объекта восстанавливается, т. е. наблюдают поток отказов и поток восстановлений.

Поток отказов характеризуется двумя величинами: средним числом отказов $m_{cp}(t)$ и параметром потока отказов $\omega_0(t)$.

Если испытывают или эксплуатируют N восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов и при этом фиксируется число отказов и наработка, при которой они появляются, $m_1(t)$, $m_2(t), \dots, m_i(t)$, тогда общее число отказов будет:

$$m_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N m_i(t).$$

Среднее число отказов до наработки t , приблизительно характеризующее поток отказов (безотказность), определяют по формуле:

$$\hat{m}_{cp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t)}{N} ; \quad (3.63)$$

где N — число восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов, за испытаниями или эксплуатацией которых в заданных условиях проводят наблюдения; $m_i(t)$ — число отказов каждого из этих объектов до наработки t .

Переходя к пределу, получают характеристику потока отказов:

$$H(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} m_{cp}(t).$$

На практике часто бывает так, что после некоторой наработки t_{np} (времени приработки) функция $H(t)$ становится линейной и в некотором интервале времени $(t - t_{np})$ (в период нормальной эксплуатации) приобретает вид:

$$H(t) = H(t_{np}) + \omega(t)(t - t_{np}), \quad (3.64)$$

где $\omega(t)$ — параметр потока отказов (основная характеристика потока отказов).

Параметром потока отказов называют плотность вероятности возникновения отказов восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени или наработки.

Параметр потока отказов точно определяют по уравнению:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}.$$

Для определения параметра потока отказов на основании экспериментальных данных пользуются приближенной формулой:

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t+\Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t)}{N\Delta t} = \\ &= \frac{m_{\text{ср}}(t+\Delta t) - m_{\text{ср}}(t)}{\Delta t}.\end{aligned}\quad (3.65)$$

На основании этой формулы заключаем, что параметр потока отказов — это среднее число отказов восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов в единицу времени, взятое для рассматриваемого достаточно малого промежутка времени Δt . При экспоненциальном распределении наработки между отказами $\omega(t) = \lambda$. В этом случае статистическая оценка параметра потока отказов определяется по формуле:

$$\hat{\omega}(t) = \hat{\lambda}.$$

После периода приработки $\omega(t) = \omega - \text{const}$.

Если обозначить через $Q(t)$ вероятность появления отказа в промежуток наработки от t_1 до t_2 , то параметр потока отказов определяют по формуле: $\omega(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$, т. е. параметр потока отказов за время t равен вероятности отказа объекта в единицу наработки после этой наработки t .

Если объект состоит из нескольких элементов, по которым определены параметры потока отказов, общий параметр потока отказов находят из выражения:

$$\omega_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i \quad (3.66)$$

где N — число элементов в объекте; ω_i — параметр потока отказов i -го элемента.

Уравнение (3.66) выражает очень важное положение, широко используемое в расчетах надежности. Если складывать несколько потоков отказов, то параметр

суммарного потока отказов равен сумме параметров составляющих потоков.

Наработка на отказ T представляет собой среднее значение наработки восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов между отказами и показывает, какая наработка в среднем приходится на один отказ (в часах, моточасах, километрах пробега, циклах включений и т. д. на один отказ). Если наработка выражена в единицах времени, то может применяться термин «среднее время безотказной работы».

Наработка на отказ T (среднее время безотказной работы) — величина, обратная параметру потока отказов $\omega(t)$ для наработки от t_1 до t_2 , определяемая по теоретической или статистической формулам:

$$T = \frac{t_2 - t_1}{H(t_2) - H(t_1)}; \quad (3.67)$$

$$T \approx \frac{t_2 - t_1}{m_{\text{ср}}(t_2) - m_{\text{ср}}(t_1)}. \quad (3.68)$$

Из уравнений (3.67) и (3.68) для периода после приработки получаем

$$T = \frac{1}{\omega} = \text{const}. \quad (3.69)$$

Если при этих условиях при испытании N объектов получено m отказов, то наработка на отказ:

$$\hat{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.70)$$

где t_i — наработка i -го объекта между отказами после периода приработки.

Наработку на отказ статистически определяют отношением суммарной наработки восстанавливаемых объектов к суммарному числу отказов этих объектов. При экспоненциальном распределении наработки между отказами оценки для наработки на отказ определяют формулой:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}.$$

Значение наработки на отказ в общем случае зависит от длительности периода, в течение которого он определяется. Это обусловлено непостоянством характеристики потока отказов.

По ГОСТ наработку на отказ определяют как отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Для режимов хранения и (или) транспортирования можно применять аналогичные показатели безотказности, например среднее время хранения (транспортирования) до отказа, время хранения (транспортирования) на отказ.

§ 5. ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Долговечность количественно оценивается с помощью двух групп показателей: ресурса как показателя, связанного с наработкой объекта, и срока службы. Каждая из них имеет много разновидностей, позволяющих конкретизировать этапы или характер эксплуатации.

Средний ресурс (срок службы) — математическое ожидание ресурса (срока службы).

Назначенный ресурс — суммарная наработка объекта, по достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния. Этот ресурс чаще всего назначают из соображений безопасности или экономичности, например для авиационных двигателей с целью обеспечения безопасности полетов. После отработки назначенного ресурса авиационные двигатели снимают с самолетов и могут использовать их в наземных условиях (например, для сушки зерна, защиты садов от заморозков и т. п.).

Средний ресурс (срок службы) до ремонта $T_{др}$ — средний ресурс (срок службы) от начала эксплуатации объекта до его первого ремонта.

Средний ресурс (срок службы) между ремонтами $T_{мр}$ — средний ресурс (срок службы) между смежными ремонтами объекта.

Средний ресурс (срок службы) до списания $T_{сп}$ — средний ресурс (срок службы) объекта от начала эксплуатации до его списания, обусловленного предельным состоянием.

Гамма-процентный ресурс — наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Гамма-процентный ресурс имеет большое практическое значение, так как в результате неизбежного рассеивания долговечности сельскохозяйственной техники при изменяющихся нагрузках и переменных условиях эксплуатации их долговечность — величина статистическая. Определяется она экспериментально по данным о долговечности большой группы объектов.

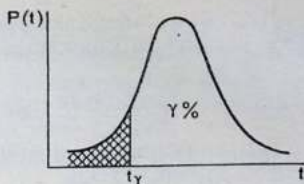


Рис. 36. Гамма-процентный ресурс t_γ при работе объектов.

Гамма-процентный ресурс — ресурс, который имеет и превышает в среднем обусловленное число γ процентов изделий данного типа.

Заданный процент объектов γ — регламентированная вероятность. Например, при $\gamma = 90\%$ соответствующий ресурс называют 90%-ным ресурсом. На рисунке 34 90%-ный ресурс соответствует t_2 .

На рисунке 36 по оси абсцисс кривой распределения показан гамма-процентный ресурс t_γ .

Если ресурс изделий имеет распределение с плотностью вероятности $f(t)$, то гамма-процентный ресурс t_γ находят из уравнения:

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (3.71)$$

Если $\gamma = 50\%$, то это медианный (средний) ресурс t_{Me} ($t_{Me} = t_3$ на рисунке 34).

В случае распределения Вейбулла — Гнеденко уравнение (3.71) принимает вид:

$$\exp\left[-\left(\frac{t_\gamma}{t_0}\right)^b\right] = \frac{\gamma}{100}.$$

Логарифмируя это уравнение, получим

$$\left(\frac{t_\gamma}{t_0}\right)^b = -\ln \frac{\gamma}{100},$$

откуда находим

$$t_\gamma = t_0 \sqrt[b]{-\ln \frac{\gamma}{100}}.$$

Для экспоненциального распределения при $t_0 = T_{\text{ср}}$ и $b = 1$ получим уравнение:

$$t_{\gamma} = t_0 \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right) = T_{\text{ср}} \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right). \quad (3.72)$$

Если, например, $\gamma = 90$, то из уравнения (3.72) получаем $t_{90} = 0,105 T_{\text{ср}}$.

Из рисунка 36 видно, что доля объектов, которые исчерпали свой ресурс до определенной наработки, определяется заштрихованной долей площади под кривой до ординаты данной наработки (при этом вся площадь под кривой принимается за 100 %).

Если наблюдения или испытания вести до тех пор, пока все 100 % объектов исчерпают свой ресурс (достигнут предельного состояния), т. е. до наработки $t_{\gamma} = 0$, то по их результатам легко определить средний ресурс. Продолжительность испытаний (наблюдений) при этом будет максимальной.

Например, средний доремонтный ресурс $T_{\text{др}}$ сельскохозяйственных тракторов и их агрегатов должен достигать 6...8 тыс. моточасов. При этом долговечность отдельных тракторов определенной марки может значительно превышать средний доремонтный ресурс. Это отребует для завершения испытаний (наблюдений) хозяйственных условиях с исчерпанием ресурса у всех наблюдаемых машин пять лет и более.

Гамма-процентный ресурс как оценочный показатель вечности позволяет значительно сократить время испытаний (наблюдений) тракторов или их агрегатов, так как испытания (наблюдения) ведут до исчерпания ресурса у сравнительно небольшого количества (10...20 %) машин. При этом величина гамма-процентного ресурса будет соответственно равна $t_{\gamma_1} = 90 \%$ и $t_{\gamma_2} = 80 \%$ ($\gamma_1 = 90 \%$ и $\gamma_2 = 80 \%$).

Чем больше установленная γ , тем меньше длительность испытаний (наблюдений). Однако для получения оценок ресурса с определенной регламентированной точностью при уменьшении длительности испытаний потребуется увеличить количество испытуемых объектов.

На основании гамма-процентного ресурса оценивают качество новых и отремонтированных машин и их агрегатов.

Для тракторов, комбайнов и другой новой и отремонтированной сельскохозяйственной техники значение γ принято равным 80 % ($t_{\gamma}=80$ %), т. е. у 80 % машин ресурс при испытании или наблюдении должен превышать установленную величину $t_{\gamma}=80$.

Расчет 80%-ного ресурса проводят следующим образом*.

Вычисляют последовательно при каждой наработке t_i значения кривой убыли (вероятности безотказной работы) по формуле:

$$P_i = P(t_i) = \frac{N+1-i}{N+1} \quad (1 \leq i \leq N). \quad (3.73)$$

Если среди значений кривой убыли есть значение P_i , равное 0,8, то оценка 80%-ного ресурса $\hat{t}_{0,8}$ будет равна t_i . В противном случае $\hat{t}_{0,8}$ находят по кривой убыли или методом линейной интерполяции по формуле:

$$\hat{t}_{0,8} = t_{i-1} + (t_i - t_{i-1}) \frac{P_{i-1} - 0,8}{P_{i-1} - P_i}. \quad (3.74)$$

Для расчета оценок долговечности $\hat{t}_{\text{ср}}$, среднего квадратического отклонения ресурса $\hat{S}$ и коэффициента вариации $\hat{v}$ используют соответствующие формулы.

Пример. При испытании 13 двигателей их ресурс был исчерпан при наработках $t_1=3000$, $t_2=3500$, $t_3=3700$, $t_4=4000$, $t_5=4200$, $t_6=4300$, $t_7=4500$, $t_8=4800$, $t_9=4900$, $t_{10}=5100$, $t_{11}=5400$, $t_{12}=5500$, $t_{13}=6000$ моточасов.

Определить количественные оценки характеристик долговечности двигателей.

Находим значение кривой убыли по формуле (3.73):

$$P_1(3000) = \frac{13+1-1}{13+1} \approx 0,9286;$$

$$P_2(3500) = \frac{13+1-2}{13+1} \approx 0,8571;$$

$$P_3(3700) = \frac{13+1-3}{13+1} \approx 0,7857 \text{ и т.д.}$$

По этим данным видим, что $P_2 > 0,8 > P_3$. По формуле (3.74) находим:

$$\hat{t}_{0,8} = 3500 + (3700 - 3500) \cdot \frac{0,8571 - 0,8}{0,8571 - 0,7857} \approx 3660 \text{ моточасов.}$$

* См. Инструкцию по оценке надежности машин. — М.: ГОСНИТИ, 1975. — Прим. автора.

Пользуясь соответствующими формулами, определяем:

$$\hat{t}_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{13} (3000 + 3500 + 3700 + 4000 + 4200 + 4300 +$$

+ 4500 + 4800 + 4900 + 5100 + 5400 + 5500 + 6000) $\approx$ 4530 мото-часов;

$$\hat{S} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{t}_{\text{ср}})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{12} (1530^2 + 1030^2 + 830^2 + 330^2 + 230^2 + 30^2 + 270^2 + 370^2 +$$

+ 570^2 + 870^2 + 970^2 + 1470^2)} $\approx$ 860 мото-часов;

$$\hat{v} = \frac{\hat{S}}{\hat{t}_{\text{ср}}} = \frac{860}{4530} \approx 0,19.$$

Гамма-процентный срок службы — календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

В какой-то мере долговечность характеризуется и такими показателями, как гарантийная наработка (ресурс) и срок гарантии.

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

§ 6. ПОКАЗАТЕЛИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И СОХРАНЯЕМОСТИ

Ремонтопригодность имеет следующие единичные количественные показатели.

Вероятность восстановления в заданное время, или вероятность своевременного восстановления, т. е. вероятность того, что время восстановления (время, затрачиваемое на обнаружение, поиск причины отказа и устранение последствий отказа) не превысит заданного.

Среднее время восстановления, т. е. математическое ожидание времени восстановления работоспособности. При наличии статистических данных о длительностях восстановления для восстанавливаемых (ремонтируемых) объектов среднее время восстановления T_v определяют по формуле:

$$T_v = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{vi}, \quad (3.75)$$

где m — число обнаруженных и устраненных отказов объектов;
 t_{vi} — время восстановления отказа.

Если рассматривать подряд все промежутки t_i (в порядке возрастания индекса i), то эти величины можно рассматривать как поток восстановления, имеющий чаще всего логарифмически нормальное распределение. В первом приближении поток восстановлений можно считать простейшим с параметром $\omega_v = 1/T_v$.

В качестве характеристики рассеивания времени восстановления, как и для других случайных величин, используется также дисперсия и среднее квадратическое отклонение.

При использовании статистических данных значения эмпирической дисперсии и среднего квадратического отклонения определяют по формулам (3.15), (3.16), (3.19) и (3.20).

Сохраняемость количественно оценивается с помощью следующих показателей, измеряемых в годах, месяцах и других единицах.

Средний срок сохраняемости, т. е. математическое ожидание срока сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости, т. е. срок сохраняемости, который будет достигнут объектом с заданной вероятностью γ процентов.

На рисунке 37 90%-ный срок сохраняемости невостанавливаемых (неремонтируемых) объектов составляет τ_1 , а средний срок сохраняемости равен τ_2 . При хранении в течение срока τ_3 выходит из строя 80 %

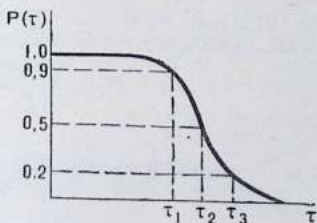


Рис. 37. Гамма-процентный срок сохраняемости τ_1 на кривой убывающей при хранении объектов.

объектов. Эти показатели при необходимости включают-ся в нормативно-техническую документацию, но не за-меняют срок хранения, который также указывают в тех-нических требованиях на объект.

§ 7. КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Показатели обеспечения и оценки на-дежности, предусмотренные ГОСТ, следующие.

Коэффициент готовности K_r показывает ве-роятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается.

Этот коэффициент статистически определяется как отношение суммарного времени пребывания наблюдае-мых объектов в работоспособном состоянии к произве-дению числа этих объектов (N) на продолжительность эксплуатации (за исключением простоев при проведе-нии плановых ремонтов и технического обслуживания):

$$\hat{K}_r = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{NT_{\text{раб}}}, \quad (3.76)$$

где ξ_i — суммарное время пребывания i -го объекта в работос-пособном состоянии ($i=1, 2, \dots, N$); $T_{\text{раб}}$ — продолжительность экс-плуатации работы, состоящей из последовательно чередующихся ин-тервалов времени работы и восстановления (устранения отказов).

При порядке обслуживания, предусматривающем немедленное начало восстановления отказавшего объ-екта, т. е. при установившемся режиме эксплуатации, коэффициент готовности вычисляют по формуле:

$$K_r = \frac{T}{T+T_v} = \frac{1}{1+\frac{T_v}{T}} = \frac{1}{1+\rho}, \quad (3.77)$$

где T — наработка на отказ, характеризующая безотказность; T_v — среднее время восстановления, характеризующее ремонтпри-годность.

T и T_v определяют по формулам (3.70) и (3.75). Таким образом, из формулы (3.77) видно, что коэф-фициент готовности показывает долю, которую состав-ляет время работы от суммарного времени, расходе-

мого на работу и восстановление. Он характеризует одновременно два различных свойства объекта: его безотказность и ремонтпригодность, а поэтому является комплексным показателем.

Коэффициент технического использования $K_{т.и}$ — отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонта за тот же период эксплуатации.

Этот коэффициент статистически определяется как отношение суммарного времени пребывания наблюдаемых объектов в работоспособном состоянии к произведению числа наблюдаемых объектов (N) на заданное время эксплуатации:

$$\hat{K}_{т.и} = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{T_{экспл}}, \quad (3.78)$$

где $T_{экспл}$ — продолжительность эксплуатации, состоящей из интервалов времени работы, технического обслуживания и ремонта.

Если заданное время эксплуатации $T_{экспл}$ различно для каждого объекта, то для подсчета величины $K_{т.и}$ применяется формула:

$$\hat{K}_{т.и} = \frac{t_{сум}}{t_{сум} + t_{рем} + t_{обсл}} = \frac{1}{1 + \frac{t_{рем} + t_{обсл}}{t_{сум}}}, \quad (3.79)$$

где $t_{сум}$ — суммарная наработка всех объектов; $t_{рем}$ — суммарное время простоев из-за планового и внепланового ремонта всех объектов; $t_{обсл}$ — суммарное время простоев из-за планового и внепланового технического обслуживания всех объектов (время простоев по организационным причинам здесь не учитывается).

Если разделить числитель и знаменатель выражения (3.79) на общее количество отказов m , наблюдавшихся в рассматриваемый период времени, то

$$K_{т.и} = \frac{T}{T + T_n + T_p} = \frac{1}{1 + \frac{T_p}{T} + \frac{T_n}{T}} = \frac{1}{\frac{1}{K_r} + \frac{T_p}{T}} = \frac{1}{\frac{1}{K_r} + K_n}, \quad (3.80)$$

где T_n — среднее время, затрачиваемое при техническом обслуживании (профилактике) на один отказ; $K_n = T_n/T = t_{обсл}/t_{сум}$ — коэффициент профилактики.

Таким образом, значение коэффициента $K_{т.п}$ находится в обратной зависимости от отношений $T_{в}/T$ и $T_{ш}/T$ или в прямой зависимости от значения коэффициента K_r .

Коэффициент технического использования $K_{т.п}$ — обобщенный комплексный показатель надежности и более полной характеристики ремонтпригодности, чем коэффициент готовности, так как учитывает все простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом объекта.

Коэффициент оперативной готовности $K_{о.г}$ — вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Под режимом ожидания понимается нахождение объекта при полной или облегченной нагрузке без выполнения основных (рабочих) функций. При этом возможно возникновение отказов, которые должны быть устранены с восстановлением работоспособности объекта для выполнения требуемого задания. Для выполнения задания необходимо также, чтобы в момент возникновения необходимости в использовании объект был работоспособен.

Если вероятность безотказной работы объекта $P(t_p)$ в течение времени t_p не зависит от момента начала работы t , то величину коэффициента оперативной готовности определяют по формуле:

$$K_{о.г} = K_r P(t_p). \quad (3.81)$$

Коэффициент оперативной готовности может характеризовать надежность техники для уборки урожая, кормоприготовительных машин животноводческих комплексов и т. п.

Показатели, учитывающие суммарную и удельную суммарную трудоемкость (стоимость) технического обслуживания и ремонта, предусмотренные ГОСТ как комплексные показатели надежности, следующие.

Средняя суммарная трудоемкость технического обслуживания — математическое ожидание суммарных трудовых затрат на проведение технического обслуживания за определенный период эксплуатации.

Средняя суммарная трудоемкость ремонта — математическое ожидание суммарных затрат на все виды ремонта объекта за определенный период эксплуатации.

Средняя суммарная стоимость технического обслуживания (ремонта) — математическое ожидание суммарных затрат на проведение технического обслуживания (на все виды ремонта) объекта за определенный период эксплуатации.

Для этих показателей наряду с их средними значениями применяют удельные величины, которые определяют как отношение средних суммарных величин к соответствующему математическому ожиданию суммарной наработки объекта за один и тот же период эксплуатации.

Важным показателем является коэффициент восстановления ресурса, равный отношению среднего ресурса капитально отремонтированных объектов $t_{\text{восст}}$ к их среднему ресурсу до первого капитального ремонта (новых объектов) $t_{\text{нов}}$, который должен быть не менее 80 %:

$$K_{\text{в}} = \frac{t_{\text{восст}}}{t_{\text{нов}}} 100\% ; \quad K_{\text{вр}} = \frac{T_{\text{мр}}}{T_{\text{др}}} 100\% , \quad (3.82)$$

где $T_{\text{мр}}$ и $T_{\text{др}}$ — соответственно межремонтный и доремонтный ресурсы.

Для сопоставления количественных показателей надежности агрегатов новых и капитально отремонтированных тракторов определяют величину $(T_{\text{у отр}}/T_{\text{у нов}}) 100\%$ (по гамма-процентному ресурсу) или для оценки уровня безотказности делением средней наработки на отказ соответствующей группы сложности капитально отремонтированных агрегатов или систем на соответствующий показатель агрегатов новых машин*. Если известно среднее число отказов по новым и капитально отремонтированным тракторам за одну и ту же установленную наработку, определяют величину

$$\left(m_{\text{ср}}^{\text{нов}} / m_{\text{ср}}^{\text{отр}} \right) \times 100\% .$$

Показатели эксплуатационной технологичности характеризуют затраты времени, труда и средств на под-

* Нормативы надежности капитально отремонтированных тракторов основных классов и порядок проверки их выполнения. — М.: ГОСНИТИ, 1975. — Прим. автора.

готовку сельскохозяйственной техники к эксплуатации, на плановые технические обслуживания в процессе эксплуатации и работы, проводимые после эксплуатации сельскохозяйственной техники (постановка на хранение, консервация и т. п.).

Показатели ремонтной технологичности характеризуют приспособленность конструкции объекта и их составных частей (деталей, сборочных единиц и т. п.) к ремонтным работам, выполняемым для восстановления их работоспособности на ремонтных предприятиях.

К этим показателям относятся: среднее время ремонта, вероятность окончания ремонта в заданное время, средние абсолютные затраты на ремонт данного вида, а также относительные затраты, отнесенные к единице времени нахождения машины в эксплуатации (для деталей, сборочных единиц и т. п.) или к единице произведенной продукции (для станков, машин и т. д.).

Дополнительные показатели ремонтпригодности в сочетании с основными позволили более конкретно формулировать отдельные требования к ремонтпригодности.

Показатели, характеризующие общее техническое совершенство конструкции машины, в том числе и конструктивные решения, — это коэффициент применяемости конструктивных элементов, коэффициент унификации, коэффициент конструктивной преемственности, коэффициент взаимозаменяемости, коэффициент кратности обслуживания и сроков службы конструктивных элементов, коэффициент общей контролепригодности.

Коэффициент применяемости конструктивных элементов — отношение суммы числа наименований типоразмеров стандартизированных, нормализованных, заимствованных и покупных деталей и узлов к общему количеству наименований конструктивных элементов объекта.

Коэффициент применяемости и коэффициент унификации и конструктивной преемственности являются одними из важнейших показателей стандартизации.

Коэффициент унификации показывает, какая доля из использованных в объекте деталей унифицирована. Например, коэффициент унификации двигателей ЯМЗ составляет около 0,9.

Коэффициент конструктивной преемственности — отношение числа наименований ранее

освоенных сборочных единиц и деталей к общему числу наименований конструктивных элементов объектов.

Преимственность позволяет значительно упростить организацию и технологию изготовления машин и более рационально решать вопросы их эксплуатации и ремонта.

Коэффициент взаимозаменяемости определяют как отношение количества взаимозаменяемых элементов к общему количеству конструктивных элементов машины.

Рациональный уровень взаимозаменяемости конструктивных элементов в машине — важное средство снижения затрат времени, труда и средств при устранении отказов в ремонте.

Коэффициент кратности обслуживания и сроков службы конструктивных элементов — отношение соответственно числа элементов машины, периодичности обслуживания и ремонта базового конструктивного элемента к общему количеству наименований конструктивных элементов.

Соблюдение требования и кратности или равной периодичности и сроков службы элементов машины позволяет значительно сократить суммарное время простоя машины и затраты на ее обслуживание и ремонт.

Коэффициент общей контролепригодности — отношение числа конструктивных элементов, приспособленных к контролю различными способами по техническому состоянию машины в процессе эксплуатации, к общему числу элементов машины, контроль которых необходим в процессе эксплуатации.

Показатели, характеризующие приспособленность конструкции машины к проведению профилактических и восстановительных работ, следующие.

Коэффициент удобства поз — отношение общего числа удобных поз при выполнении работ к общему числу возможных поз.

Коэффициент доступности учитывает суммарную трудоемкость балластных работ, которые необходимо выполнить при устранении отказов и техническом обслуживании. К балластным работам обычно относят подготовку машины, необходимые разборочно-сборочные работы и т. п.

Коэффициент веса демонтируемых сборочных единиц характеризует легкосъемность

конструкции машины. Его определяют из отношения числа демонтируемых сборочных единиц, вес которых не превышает установленного предельного значения при демонтаже вручную, к общему числу демонтируемых единиц машины при устранении отказов, техническом обслуживании и ремонте, проводимых в процессе эксплуатации.

§ 8. РАСЧЕТЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

Расчеты объектов на надежность предназначены для определения количественных показателей надежности. Их проводят на этапах разработки, создания и эксплуатации объектов (машин, оборудования и приборов).

Для расчета показателей надежности сельскохозяйственной техники пользуются соответствующими ГОСТ, ОСТ, методическими указаниями и инструкциями по оценке надежности машин.

На этапе проектирования расчет надежности производят с целью прогнозирования ожидаемой надежности разрабатываемого объекта.

При испытаниях и эксплуатации расчеты на надежность проводят для оценки количественных показателей надежности. Результаты расчетов в данном случае показывают, какой надежностью обладали объекты, прошедшие испытания или используемые в определенных условиях эксплуатации. На основании этих расчетов определяют слабые элементы объектов, намечают основные направления по повышению надежности, дается оценка надежности объекта и влияния на нее различных факторов.

При этом задача сводится к определению одной или нескольких количественных характеристик надежности сельскохозяйственной техники. Так, например, на основании расчета машины и ее элементов на надежность определяют вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, коэффициент технического использования и др., а затем указывают пути улучшения полученных показателей надежности. При этом не все показатели надежности можно рассчитывать, некоторые из них, как отмечалось ранее, определяют экспериментально.

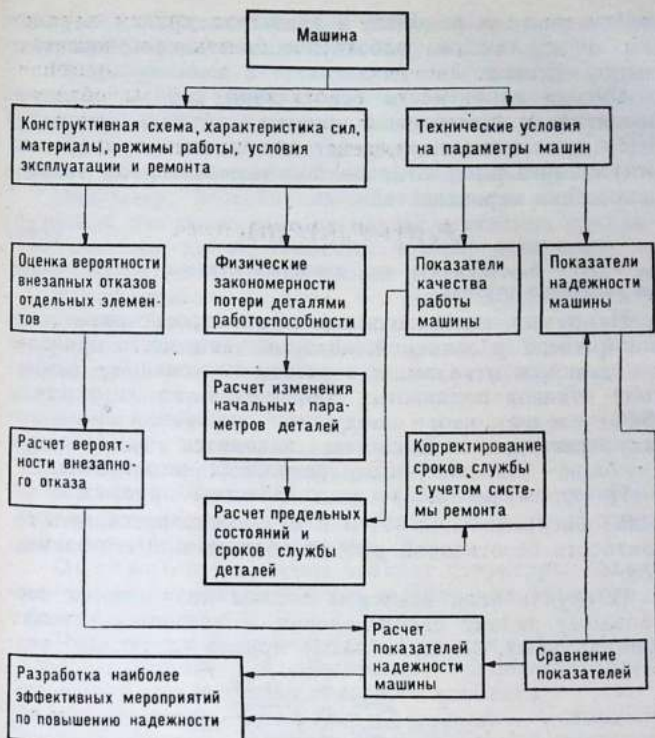


Рис. 38. Общая схема расчета машины на надежность.

Общая схема расчета машины на надежность показана на рисунке 38*. Эта схема дана для случая, когда потеря машиной работоспособности связана как с постепенными (износными), так и с внезапными отказами.

Исходные данные для расчета — это данные по конструкции элементов объектов, характеристике сил, применяемым материалам, режимам работы, условиям

* Предложена профессором А. С. Прониковым. — Прим. автора.

эксплуатации и ремонта, а также по другим параметрам, определяющим работоспособность сельскохозяйственной техники.

Оценка вероятности безотказной работы объектов. Вероятность безотказной работы объекта (машины) $P_o(t)$ при совместном действии постепенных (износных) и внезапных отказов подсчитывается по теореме умножения вероятностей:

$$P_o(t) = P_n(t) P_v(t), \quad (3.83)$$

где $P_n(t)$ — безотказность при износных отказах; $P_v(t)$ — то же, при внезапных отказах.

Например, если рассматривать гидроагрегаты с позиций числа уплотнений, которые чаще всего приводят к внезапным отказам, и с учетом постепенных (износных) отказов подвижных сопряжений, то из формулы (3.83) следует, что в наихудшем положении среди других агрегатов гидросистем находятся гидронасосы, имеющие большое число резиновых уплотнений.

По формуле (3.83), если известны параметры законов распределения ($\bar{T}$, σ и λ), можно рассчитать вероятность безотказной работы объекта или его элементов.

В случае если износные отказы подчиняются нормальному закону распределения, а внезапные — экспоненциальному, формула (3.83) примет следующий вид:

$$P_o(t) = \frac{e^{-\lambda t}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\sigma^2}} dt. \quad (3.84)$$

Как видно из рисунка 39, в начальный период работы объекта основное влияние на $P_o(t)$ оказывают внезапные отказы, а затем все больше влияют износные отказы.

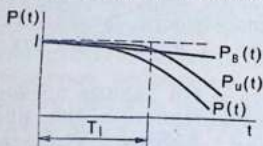


Рис. 39. Вероятность безотказной работы при совместном действии износных и внезапных отказов.

Сельскохозяйственная техника — это сложные объекты (системы), которые состоят из отдельных элементов, находящихся в сложном взаимодействии. Отказ любого элемента отражается на работоспособности объекта, так как она зависит от

работоспособности входящих в него элементов, а также от способа их включения в систему.

Резервирование в технических системах. Резервирование — это метод повышения надежности объекта введением избыточности, т. е. введением дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых, для выполнения объектом заданных функций.

Например, резервированием считается применение пусковых рукояток для двигателей, имеющих специальные системы пуска, запасных частей, резервных комбайнов и автомобилей на уборке урожая.

В зависимости от того, что предусматривается использовать при резервировании: избыточные элементы структуры объекта, избыточное время, избыточную информацию, резервирование бывает структурное, временное и информационное.

Функциональное резервирование предусматривает использование способности элементов выполнять дополнительные функции.

Нагрузочное резервирование предусматривает использование способности объекта воспринимать дополнительные нагрузки.

Основным называют элемент структуры объекта, минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

Резервный элемент (резерв) — элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Кратность резервирования — отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов объекта.

Дублирование — резервирование, кратность которого равна единице.

Резервирование — один из способов значительного повышения надежности объектов. При выходе из строя одного из элементов резервный элемент выполняет его функции и объект не теряет работоспособности.

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

Под последовательным соединением элементов (рис. 40,а) в надежности понимают такое соединение, при котором отказ одного какого-либо элемента влечет за собой отказ всей системы. Этому условию подчиняется большинство приводов и механизмов передач ма-

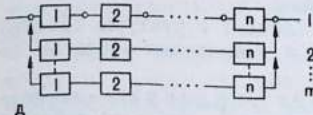
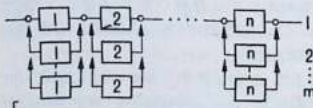
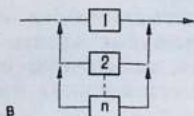
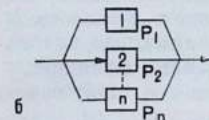
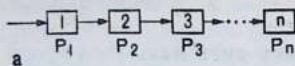


Рис. 40. Схемы различных видов соединений элементов сложных систем:

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

шин, так как выход из строя любой шестерни, подшипника, электродвигателя и т. п. вызывает потерю работоспособности всей системы.

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

Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением

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

$$P_{\text{посл}}(t) = P_1 P_2 \cdots P_n = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (3.85)$$

Вероятность отказа последовательного элемента определяют по выражению:

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

При одинаковой вероятности безотказной работы элементов формула принимает вид:

$$P_{\text{посл}}(t) = P_i^n. \quad (3.86)$$

Так, например, если система состоит из 50 последовательно соединенных элементов ($n=50$) с вероят-

ностью безотказной работы каждого элемента за определенный промежуток времени $P_i=99$, то вероятность безотказной работы всей системы будет:

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

Для случая возникновения внезапных отказов, подчиняющихся экспоненциальному закону распределения $P_1=e^{-\lambda_1 t}$; $P_2=e^{-\lambda_2 t}$; $P_n=e^{-\lambda_n t}$, сделав соответствующие подстановки в формулу (3.85), получим

$$P_{\text{посл}}(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda_0 t}.$$

Вероятность безотказной работы сложной системы в этом случае также подчиняется экспоненциальному закону с параметром

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Вероятность отказа в этом случае:

$$q_{\text{посл}} = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}.$$

При экспоненциальном распределении времени безотказной работы параметр потока отказов и наработка на отказ для восстанавливаемых объектов соответственно:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(t);$$

$$T(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i}},$$

где $\omega_i(t)$ и T_i — соответственно параметр потока отказов и наработка на отказ i -го элемента в течение времени (наработки) t .

В частности, если $\omega_i(t) = \text{const}$, то и $\omega(t) = \text{const}$.
Вероятность безотказной работы при параллельном соединении элементов. Параллельным соединением (рис. 40, б) называется совокупность элементов, работоспособность которой нарушается только при условии отказа всех параллельных элементов, входящих в совокупность.

Параллельное соединение элементов в системе служит основой резервирования.

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

Каждое из указанных включений в отдельности сможет обеспечить лишь частичное резервирование.

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

Чтобы справиться с объемом сельскохозяйственных работ с учетом выхода из строя машин, хозяйства приобретают резервные тракторы, комбайны, сельскохозяйственные машины. Обменный фонд запасных сборочных единиц и агрегатов, запас деталей на складе (а иногда и непосредственно на машине) служат этой же цели, так как позволяют быстро заменить отказавшие элементы объектов исправными.

Резервирование, повышая надежность систем, приводит к их усложнению и удорожанию.

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

Например, автомобиль оснащен двумя тормозами: ручным и ножным, на нем установлены две фары и больше. Если на него в целях резервирования установить два двигателя, две коробки передач и т. д., то он станет неоправданно сложным и громоздким.

При параллельном соединении, показанном на рисунке 40,б, резервные элементы постоянно присоединены к основным, находятся в том же режиме, что и основной элемент, т. е. мы имеем дело с нагруженным

резервом. Если резервные элементы (например, золотники гидрораспределителя для присоединения выносных гидроцилиндров) находятся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент (золотник основного гидроцилиндра), то это будет облегченное резервирование.

В данном случае будет постоянное резервирование, при котором резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными.

Вероятность безотказной работы при нагруженном резервировании может быть подсчитана следующим образом.

Если обозначить $q_1, q_2, \dots, q_n$ вероятности появления отказа каждого из элементов за время t , то отказ системы в этом случае параллельного соединения произойдет при условии отказа всех элементов.

Вероятность совместного появления всех отказов $q(t)$ по формуле умножения вероятностей будет:

$$q_{\text{пар}}(t) = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i.$$

Поэтому безотказность системы с параллельным соединением элементов будет:

$$P_{\text{пар}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (3.87)$$

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

Автомобиль или трактор имеет в системе освещения и сигнализации фары, подфарники и габаритные огни, которые соединены методом резервирования (по два изделия в каждой цепи). Отказ любого одного объекта (например, фары) не вызывает отказа в работе освещения и позволяет продолжить эксплуатацию автомобиля или трактора до возвращения в гараж и устранения отказа. В этом случае вероятность безотказной работы системы освещения и сигнализации определяется по формуле (3.87).

Чтобы определить надежность тормозной системы автомобиля, если известно, что ножной тормоз $P_n =$

$=0,98$, а ручной $P_p=0,97$, можно воспользоваться той же формулой (3.87):

$$q_n = 1 - P_n = 1 - 0,98 = 0,02;$$

$$q_p = 1 - P_p = 1 - 0,97 = 0,03.$$

Вероятность отказа тормозной системы:

$$q_t = q_n q_p = 0,02 \cdot 0,03 = 0,0006.$$

Вероятность безотказной работы:

$$\begin{aligned} P_T &= 1 - q_n q_p = 1 - [(1 - P_n)(1 - P_p)] = \\ &= 1 - [(1 - 0,98)(1 - 0,97)] = 0,9994. \end{aligned}$$

Для частного случая — экспоненциального закона распределения отказов расчетные формулы для параллельного соединения элементов можно представить в следующем виде:

$$P_{\text{пар}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t});$$

$$q_{\text{пар}} = \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}).$$

На практике часто встречаются структурные схемы, состоящие из m параллельных цепей, а каждая цепь имеет n последовательно соединенных элементов. В этом случае вероятность безотказной работы вычисляют с использованием формул для параллельно-последовательных схем.

Пример*. Требуется найти вероятность безотказной работы автомобиля, если вероятность безотказной работы каждого элемента равна 0,9 (рис. 41).

В данном случае автомобиль представлен схемой четырех параллельно соединенных элементов (четыре цилиндра двигателя), последовательно с которыми соединяются два элемента 5 и 6 трансмиссии (например, коробка передач и задний мост).

Двум различным системам торможения соответствуют два параллельных элемента 7 и 8, включенных последовательно с элементами 5 и 6. Последний, последовательно включенный элемент 9, соответствует системе питания.

Решение. Для определения вероятности безотказной работы при параллельном и последовательном соединении элементов, представленном на рисунке 41, воспользуемся формулами (3.87) и (3.85).

* Пример заимствован из сборника задач В. М. Долинского. — Прим. автора.

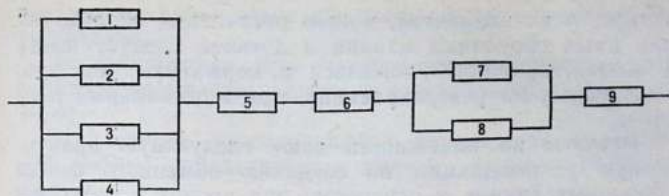


Рис. 41. Структурная схема автомобиля.

В связи с тем что в данном примере вероятности безотказной работы элементов одинаковы, расчет вероятности безотказной работы параллельно соединенных элементов можно вести по формуле:

$$P_{\text{пар}} = 1 - (1 - P_i)^n.$$

Поэтому вероятность безотказной работы двигателя:

$$P_{1-4} = 1 - (1 - P_1)^4.$$

Вероятность безотказной работы систем торможения:

$$P_{7-8} = 1 - (1 - P_7)^2.$$

Таким образом, вероятность безотказной работы автомобиля:

$$\begin{aligned} P_a &= P_{1-4} P_5 P_6 P_{7-8} P_9 = [1 - (1 - P_1)^4] P_5 P_6 [1 - (1 - P_7)^2] P_9 = \\ &= [1 - (1 - 0,9)^4] \cdot 0,9 \cdot 0,9 [1 - (1 - 0,9)^2] \cdot 0,9 = 0,72. \end{aligned}$$

Если бы не было включенных параллельно элементов, то вероятность безотказной работы равнялась бы:

$$P_a = P_1 P_5 P_6 P_7 P_9 = P_1^5 = 0,9^5 \approx 0,6,$$

т. е. значительно ниже.

Ненагруженный резерв (см. рис. 40, в), если резервный элемент (объект) практически не несет нагрузки. В этом случае используется резервирование замещением, при котором функции основного элемента объекта передаются резервному только после отказа основного элемента (объекта).

Резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе, называется скользящим резервированием.

Зная состав машинно-тракторного парка и количественные характеристики надежности машин, входящих

в парк, и их элементов, можно рассчитать, сколько тех или иных сборочных единиц и деталей следует иметь в хозяйстве, чтобы уложиться в нормативы средств, выделенных на резервирование, при минимальных простоях.

Расчеты на надежность дают следующую практическую рекомендацию по созданию обменного фонда сборочных единиц и агрегатов: при прочих равных условиях и ограниченных денежных средствах выгоднее иметь лишь отдельные сборочные единицы сложных агрегатов.

Если в обменном фонде имеется двигатель в сборе, то это позволит пустить в работу только один неработоспособный трактор.

С другой стороны, имея в обменном фонде сборочные единицы двигателя (узлы топливной аппаратуры, головку блока в сборе, муфту сцепления и т. п.), можно восстановить работоспособность нескольких тракторов. Редко бывает, чтобы у всех неисправных тракторов одновременно произошел отказ одних и тех же сборочных единиц.

Расчеты по формулам теории надежности показывают, что один запасной двигатель, расчлененный на отдельные элементы, дает примерно такой же эффект, как и пять запасных двигателей, хранящихся в сборе.

Резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы, называется раздельным резервированием (см. рис. 40, *г*).

При раздельном резервировании имеется возможность включить резервный элемент при выходе из строя любого элемента, что значительно повышает надежность объекта (технической системы).

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из n последовательно соединенных элементов, в этом случае вычисляют по формуле:

$$P_p = \prod_{i=1}^n [1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij})]. \quad (3.88)$$

При равнонадежных элементах, когда $P_{ij} = P$, эта формула примет вид:

$$P_p = [1 - (1 - P)^m]^n.$$

Например, при $n=4$, $m=3$ и $P=0,9$

$$P_p = [1 - (1 - 0,9)^3]^4 = (1 - 0,1^3)^4 = (0,999)^4.$$

что соответствует очень высокому уровню безотказности объекта.

Резервирование, при котором резервируется объект в целом, называется общим резервированием (см. рис. 40, б).

При общем резервировании вероятность безотказной работы определяется с учетом формул (3.85) и (3.87):

$$P_o = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \prod_{i=1}^n P_i), \quad (3.89)$$

где P_i и P_j — соответственно вероятность безотказной работы одного элемента и всей цепи; m и $(m-1)$ — всего цепей и резервных.

Для случая равной надежности всех элементов, когда $P_i = P$, формула (3.89) принимает следующий вид:

$$P_o = 1 - (1 - P^n)^m.$$

Подставив, например, в эту формулу $n=4$, $m=3$ и $P=0,9$, как и в предыдущем примере, получим $P_o = 1 - (1 - 0,9^4)^3 = 0,958$. Вероятность безотказной работы при общем резервировании ниже, чем при раздельном.

Поэтому, например, выгоднее иметь сменный предохранительный клапан в запасе, чем запасной гидрораспределитель в сборе.

Смешанное резервирование предусматривает совмещение различных видов резервирования. Например, на практике может применяться общее резервирование отдельных объектов и раздельное резервирование наиболее ответственных и менее надежных элементов.

Расчеты безотказности при смешанном резервировании ведутся методами, аналогичными описанным выше.

Резерв бывает восстанавливаемый и невосстанавливаемый в зависимости от того, подлежит или не подлежит восстановлению его работоспособность в случае отказа.

Резервированием с восстановлением называется резервирование, при котором работоспособность любого основного и резервного элементов объекта в случаях возникновения их отказов подлежит восстановлению в процессе эксплуатации объекта.

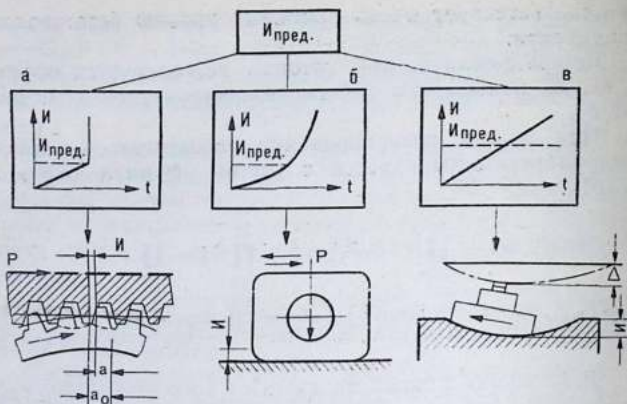


Рис. 42. Критерии предельного износа машины и ее элементов.

В противном случае будет резервирование без восстановления.

Предельные состояния (износы) деталей, сопряжений, сборочных единиц и механизмов машин. Обоснования и расчет предельного состояния позволяют полнее использовать каждую деталь, сопряжение, узел и механизм машины при минимальных затратах средств. При заниженных предельных состояниях ресурс сельскохозяйственной техники используется не полностью, а при завышенных могут возникнуть аварийные отказы, увеличатся простои сельскохозяйственной техники и затраты на ее эксплуатацию и ремонт.

Изменение состояния сопряжений характеризуется главным образом износом деталей, а поэтому предельное состояние сопряжений устанавливается по критериям (признакам) предельного износа.

Рекомендуется рассматривать три критерия* предельного состояния деталей и сопряжений: технический (безотказность, работа без поломок), технологический (качество работы) и экономический.

Критерии предельного износа рекомендуется устанавливать в зависимости от того, какое влияние ока-

* Предложено профессором Г. В. Веденяпиным. — Прим. автора.

зывает износ детали на работу машины*. При этом рассматривается три случая.

В первом случае (рис. 42,а) в результате износа машина не может больше функционировать, т. е. становится неработоспособной. Например, происходит поломка коленчатого вала, задир поверхностей вкладышей шатунных или коренных подшипников, поломка поршневого кольца, заедание зубьев шестерен и т. д.

Во втором случае (рис. 42,б) износ приводит к попаданию в зону интенсивного выхода из строя машины и ее деталей. При этом возникают удары, происходит форсированное изнашивание поверхностей, возрастают вибрации машины, повышается температура узлов. На кривой износа в зависимости от наработки это период аварийного изнашивания.

Этот случай можно проиллюстрировать на примере верхнего поршневого компрессионного кольца, покрытого электролитическим хромом. Предельный износ наступит тогда, когда в результате изнашивания слой хрома будет снят и интенсивность изнашивания сопряжения при этом резко возрастет.

В третьем случае (рис. 42,в) в результате износа характеристики машины выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (снижается точность работы, падает производительность и коэффициент полезного действия, уменьшается коэффициент подачи и т. п.).

Металлорежущий станок, например, не обеспечивает необходимой производительности и получения продукции заданного качества (по точности и шероховатости).

При износе деталей цилиндро-поршневой группы двигателя изменяется мощность, удельный расход топлива, повышается расход смазочного материала, прорыв газов в картер, усиливаются стуки. Двигатель может продолжать работать, но как только состояние его сопряжений будет соответствовать максимально допустимым изменениям его характеристики, это состояние станет предельным.

Насос гидросистемы при предельном состоянии не обеспечивает необходимой подачи.

* Предложено профессором А. С. Проинковым. — *Прим. автора.*

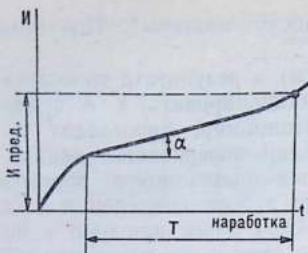


Рис. 43. Зависимость износа от наработки.

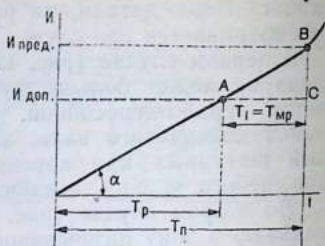


Рис. 44. К расчету допустимого и предельного износа детали.

Предельные износы основных деталей часто устанавливают на основании практических данных эксплуатации и ремонта машин отдельных марок.

Для определения наработки (ресурса) T детали необходимо иметь кривую износа детали в зависимости от наработки (рис. 43) и значение предельного износа $И_{пред}$, так как

$$T = \frac{И_{пред}}{\gamma},$$

где γ — случайная функция, характеризующая скорость изнашивания сопряжения.

С другой стороны, $\gamma = dИ/dt = f(P, v, K_t, K_s)$, т. е. функция, зависящая от нагрузки, скорости скольжения, технологических и эксплуатационных факторов.

Допустимые износы $И_{доп}$ (рис. 44) меньше предельных $И_{пред}$, так как деталь не должна выйти из строя в течение последующей межремонтной наработки T_1 . За период межремонтной наработки износ детали увеличивается на γT_1 .

Отсюда имеем:

$$И_{доп} + \gamma T_1 = И_{пред} \text{ или } И_{доп} = И_{пред} - \gamma T_1.$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} \alpha = \gamma = И_{доп}/T_p$, где T_p — наработка детали до выполняемого в данный момент ремонта, получим:

$$И_{доп} \left(1 + \frac{T_1}{T_p} \right) = И_{пред};$$

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_1}{T_p}}.$$

Если от последнего ремонта данный периодический ремонт, при котором проводится дефектация деталей, будет K , то $T_p = KT_1$.

Тогда формула для подсчета допустимого износа примет вид:

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_1}{KT_1}}; \quad I_{\text{доп}} = \frac{K}{K+1} I_{\text{пред}}. \quad (3.90)$$

Пример. Имеем $I_{\text{пред}} = 0,1$ мм. Определить необходимость восстановления детали, если при третьем периодическом ремонте ее износ оказался равным 0,08 мм.

Подсчитаем $I_{\text{доп}}$ по формуле (3.88)

$$I_{\text{доп}} = \frac{K}{K+1} I_{\text{пред}} = \frac{3}{3+1} \cdot 0,1 = 0,075 \text{ мм.}$$

Следовательно, деталь необходимо восстанавливать, хотя ее износ и меньше, чем $I_{\text{пред}}$ ($0,08 < I_{\text{пред}} = 0,1$); она не может работать до следующего периодического ремонта, так как $I_{\text{доп}} = 0,075$ меньше величины ее фактического износа, равной 0,08 мм.

По значениям $I_{\text{пред}}$ можно определять наработку T_p деталей, заменяемых при периодическом ремонте. Подставляя в формулу значение $I_{\text{доп}} = \gamma T_p$, получаем

$$\gamma T_p = \frac{K}{K+1} I_{\text{пред}},$$

откуда следует

$$T_p = \frac{K}{K+1} I_{\text{пред}} / \gamma \text{ или } T_p = \frac{K}{K+1} T_{\text{п}}.$$

Учитывая, что γ — случайная величина, в значительной мере зависящая от реальных условий эксплуатации, и, кроме того, наблюдается рассеивание величины T_p , на практике пользуются вероятностными показателями T_p , σ и др.

Рассмотрим еще один пример определения предельных и допустимых размеров или других контрольных показателей технического состояния деталей, сопряжений, механизмов, которые необходимы для дефектации ремонтируемых машин.

талей имеет большой ресурс и большой предельный износ без опасности аварии, при ремонте машины можно восстанавливать работоспособность сопряжения заменной одной из деталей (например, детали № 1). В данном случае деталь № 2 будет иметь повышенные предельный и допустимый износы ($I'_{\text{пред.2}}$ и $I'_{\text{доп.2}}$).

Допустимые и предельные износы таких деталей, как шестерни, втулки, пальцы, и многих других и зазоры в основных сопряжениях получены с использованием этого метода.

*Пример**. Трактор ДТ-75 после ремонта имел наработку 2200 моточасов ($T_p = 2200$ моточасов). Измерением толщины зубьев шестерни коробки передач установлено, что $h_{\text{изм}} = 8,76$ мм. Требуется определить остаточный ресурс шестерни и его доверительные границы при $\alpha = 0,80$, если известно из технических условий: начальная толщина зуба $h = 9,35 \pm_{-0,158}^{+0,110}$; предельная толщина зуба $h_{\text{пред}} = 8,34$ мм; допустимая толщина зуба $h_{\text{доп}} = 8,64$ мм.

Расчет ведется следующим образом.

1. Определяется средняя скорость изнашивания зуба шестерни при среднем допуске на изготовление

$$- \left(\frac{0,110 + 0,158}{2} \right) = -0,134$$

по формуле:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{I_{\text{изм}}}{T_p} = \frac{(9,35 - 0,134) - 8,76}{2200} = \\ &= \frac{9,22 - 8,76}{2200} = 0,20 \text{ мкм/моточасов.} \end{aligned}$$

2. Вычисляется средний остаточный ресурс шестерни по уравнению:

$$\begin{aligned} T_{\text{ост}} &= \frac{1}{\gamma} (I_{\text{пред}} - I_{\text{изм}}) = \\ &= \frac{(9,22 - 8,34) - (9,22 - 8,76)}{0,0002} = 2100 \text{ моточасов.} \end{aligned}$$

3. Определяются доверительные границы остаточного ресурса шестерни по формулам для распределения Вейбулла — Гнеденко:

$$T_{\text{ост}}^{\text{н}} = 0,70 T_{\text{ост}} = 0,70 \cdot 2100 = 1470 \text{ моточасов;}$$

$$T_{\text{ост}}^{\text{п}} = 1,35 T_{\text{ост}} = 1,35 \cdot 2100 = 2840 \text{ моточасов.}$$

* Пример взят из [19]. — Прим. автора.

Глава 4

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ*

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ

Цель испытаний и контроля — определение показателей надежности сельскохозяйственной техники и сравнение их с нормативами или с показателями для машин-аналогов. Различают исследовательские (определятельные) и контрольные испытания (рис. 46).

При исследовательских испытаниях определяют количественные показатели надежности и влияние на их значения различных факторов.

При контрольных испытаниях оценивают соответствие показателей надежности данного объекта заданным нормативам. Промежуточное место занимает техническая диагностика.

Такое деление испытаний носит условный характер. Иногда исследовательские испытания могут быть использованы для оценки соответствия объекта техническим условиям, контрольные испытания — для определения количественных показателей надежности и факторов. Однако это деление удобно, так как отличаются математические методы оценки этих видов испытаний.

Исследовательские испытания могут быть стандартными и специальными (см. рис. 46). При стандартных испытаниях обычно объектами являются образцы изделий (испытания на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и т. д.), а результаты испытаний непосредственно не определяют показатели надежности. Этим испытаниям посвящены обширная техническая литература и государственные стандарты. Поэтому здесь они не рассматриваются.

* Глава написана доктором технических наук, профессором В. Я. Апиловичем. — *Прим. ред.*



Рис. 46. Классификация методов испытания и контроля надежности.

Будем рассматривать специальные испытания, которые проводятся для оценки показателей надежности. Специальные испытания могут проводиться на стендах, полигонах и в условиях эксплуатации. Каждый из типов испытаний подразделяется на виды, для которых с учетом их особенностей рассматриваются применяемые средства испытаний, методы оценки показателей надежности и принятия решений.

Следует отметить, что основной вид испытаний машины на надежность в настоящее время — это испытания в хозяйственных условиях. Такие испытания широко используются как контрольные и проводятся на машиноиспытательных станциях (МИС) Госкомсельхозтехники в условиях подконтрольной эксплуатации при соблюдении правил обслуживания и ремонта, с непрерывным хронометражем и т. д. Хозяйственные испыта-

ния также проводят и заводы — изготовители машин. Однако ограниченность агротехнических сроков и сезонность большинства видов работ не всегда позволяют за короткий период оценить надежность машин. Поэтому важно применение методов ускоренной оценки надежности техники и повышение точности получаемых результатов. Для машин серийного производства расширяют объем информации за счет сбора данных в рядовой эксплуатации. Для опытных образцов, имеющих в малых количествах, применяют методы имитационных и ускоренных испытаний на стендах и полигонах.

§ 2. СТЕНДОВЫЕ И ПОЛИГОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Стендовые и полигонные испытания проводят в основном как ускоренные, т. е. такие испытания, при которых информацию о надежности объекта получают в более короткие сроки, чем в условиях эксплуатации.

Ускоренные испытания можно подразделить на два вида: уплотненные (по времени) и ужесточенные (по факторам нагружения). Оба вида могут быть усеченными и полными. При усечении по времени испытания ведут либо до появления достаточной доли отказавших объектов из общего числа поставленных на испытания, либо до выявления закономерности изменения параметров состояния совокупности объектов или одного объекта. Усеченные испытания нельзя рассматривать в отрыве от прогнозирования технического состояния. В результате их устанавливают законы изменения вероятностей состояния (статистическое прогнозирование) или параметров состояния объекта (индивидуальное прогнозирование).

В большей мере, чем при стендовых и полигонных испытаниях, со статистическим прогнозированием приходится встречаться в эксплуатационных испытаниях, поэтому эти вопросы излагаются в § 3 данной главы.

Индивидуальный прогноз требует априорных сведений о закономерностях изменения параметров состояния. Использование априорных данных в задаче распознавания состояния объекта в настоящем и будущем,

по существу, является задачей технической диагностики и рассмотрено в § 4.

В этой связи будут рассмотрены только полные испытания, когда все объекты, поставленные на испытания, доводятся до отказа. В том случае, когда имеет место усечение испытаний, для оценки результатов следует привлекать методы, изложенные в § 3 и § 4.

Уплотненные по времени испытания. Уплотненными по времени будем называть такие испытания, при которых ускоренное получение информации достигается без интенсификации (в сравнении с эксплуатацией) физико-химического процесса разрушения (без увеличения силового, объемного, поверхностного и других нагружений). Уплотнение времени достигается круглосуточными испытаниями, что позволяет увеличить наработку в сравнении с нормальной эксплуатацией, где имеются простои в течение суток; учащенным приложением нагрузки; имитацией воздействия рабочей среды на сельскохозяйственную машину, что позволяет как бы продолжить сезон эксплуатации, который, как правило, короток; воспроизведением неблагоприятного, но реального сочетания конструктивных, производственных, силовых, абразивных, климатических и других факторов (граничные испытания) и т. д.

Большое достоинство уплотненных испытаний — достижение эффекта ускорения без искажения физической картины потери объектом работоспособности.

Опыт использования уплотненных по времени испытаний свидетельствует о возможности получения существенного ускорения получения информации. Так, в научно-исследовательском тракторном институте (НАТИ) при испытаниях несущих систем путем воспроизведения на полигонах только тех нагрузок из многообразного спектра, которые приводят к повреждениям, удалось в несколько десятков раз сократить время разрушения той или иной сборочной единицы. В Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (ЧИМЭСХ) более частым воспроизведением, чем в эксплуатации, процесса переключения передач в зерноуборочном комбайне удалось в несколько раз быстрее вызвать сколы шестерен коробки передач. В Украинском научно-исследовательском институте сельскохозяйственного машиностроения (УкрНИИСХОМ) за 4 месяца непрерывной работы на

стенде, позволяющем нагрузить трансмиссию свеклоуборочного комбайна, удалось воспроизвести шестилетнюю эксплуатацию машины и выявить дефекты, которые при этом возникают. В Харьковском институте механизации и электрификации сельского хозяйства (ХИМЭСХ) путем приложения учащенной вибрационной нагрузки к карданной передаче удалось в 4 раза сократить время испытаний, а при испытаниях стабильности затяжки соединений — в 50 раз. Существенное сокращение сроков испытаний позволяет получить новизну граничных испытаний, при которых воспроизводится неблагоприятное сочетание факторов, проявляющееся не только в начале эксплуатации машины, но и в процессе ее использования.

Известно, что нарушение режимов обслуживания, качества сборки в процессе текущего ремонта и т. д. может приводить к существенному снижению работоспособности объектов. Воспроизводя при стендовых испытаниях неблагоприятные, но возможные нарушения правил эксплуатации и ремонта, можно также ускорить получение информации о времени наступления отказа, не нарушив физическую картину потери работоспособности.

При оценке уплотненных по времени испытаний следует отличать граничные испытания от учащенных в части определения по их результатам действительной надежности объекта в эксплуатации.

Учащенные испытания. Если при учащенных испытаниях известно, что частота приложения нагрузки увеличена в K_n раз или объект реализовал наработку в K_n раз большую за календарное время, чем в эксплуатации, то средний ресурс, полученный при ускоренных испытаниях T_y , пересчитывается на ожидаемый средний ресурс в эксплуатации T_o :

$$T_o = K_n T_y.$$

где K_n — коэффициент перехода (ускорения).

При граничных испытаниях получают минимальный ресурс, возможный с определенной вероятностью в эксплуатации при неблагоприятном сочетании условий. Задача состоит в том, чтобы по этим результатам рассчитать средний гамма-процентный ресурс объектов в эксплуатации.

Рассмотрим сначала случай линейной зависимости параметра v , характеризующего работоспособность объекта от влияющих на него факторов:

$$v = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots, \quad (4.1)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots$ — коэффициенты; $x_1, x_2, \dots$ — факторы.

Эту зависимость выводят на основании расчетов или предварительных исследований. Для конкретности полагаем, что v — скорость изнашивания.

Пусть изменения факторов независимы между собой. Тогда среднее и среднеквадратичное значения параметра v равны:

$$\bar{v} = a_0 + a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2 + \dots, \quad D_v = a_1^2 D_{x_1} + a_2^2 D_{x_2} + \dots$$

Известными методами по первым двум моментам можно построить плотность и функцию распределения параметра v [$f(v)$ и $F(v)$].

Пусть износ определяется так:

$$I = vt^\alpha.$$

Тогда вероятность безотказной работы:

$$\begin{aligned} P(I < I_{\text{пред}}) &= P(vt^\alpha < I_{\text{пред}}) = \\ &= P\left(v < \frac{I_{\text{пред}}}{t^\alpha}\right) = F\left(\frac{I_{\text{пред}}}{t^\alpha}\right) = \gamma, \end{aligned}$$

где $I_{\text{пред}}$ — предельный износ, F — функция распределения параметра v .

Пусть при испытаниях необходимо воспроизвести гамма-процентный ресурс t_γ . Тогда из последнего условия по зависимости $F(v) = \gamma$ находим

$$v_\gamma = \frac{I_{\text{пред}}}{t_\gamma^\alpha}. \quad (4.2)$$

Варьируя параметрами x_1 и x_2 в формуле (4.1), обеспечиваем при испытаниях величину $v = v_\gamma$, при которой экспериментально полученный ресурс должен соответствовать гамма-процентному (4.2). Такие испытания дают возможность оценить и другие характеристики надежности объекта. Например, 50%-ный ресурс равен:

$$t_{\gamma=50} = t_\gamma \sqrt[\alpha]{\frac{v_\gamma}{v_{50}}}.$$

Граничные испытания имеют и самостоятельную ценность. Они могут быть использованы как контрольные (может быть установлен минимальный допустимый ресурс, который должен обеспечить изготовитель продукции). Коэффициент ускорения испытания при граничных испытаниях:

$$K_{\Pi} = \sqrt[a]{\frac{v_{\gamma}}{v_{50}}}.$$

Он может достигать существенных значений: от 2... 3 до 50 и выше, в зависимости от закона распределения ресурса и вида зависимости (4.1). Приведенный метод рассмотрен на примере линейной зависимости (4.1). Это предположение не обязательно.

Естественно, что под v можно понимать не только скорость изнашивания, но и другой параметр состояния: например, изменение длины трещины в раме машины в единицу времени, увеличение площади питтинга на поверхности зуба шестерни в единицу времени, увеличение меры повреждения при усталостном повреждении и т. д.

Пример. Число циклов N резьбового соединения до 50%-ного падения усилия начальной затяжки Q_3 (предельное состояние) связано с параметрами соединения и характеристиками нагрузки зависимостью:

$$N = \left(\frac{F Q_3 \sigma_{\text{пр}}}{K \chi_p P_a^2} \right)^m N_0, \quad (4.3)$$

где F — площадь поперечного сечения болта; $\sigma_{\text{пр}}$ — предел стабильности затяжки; χ_p — расчетный коэффициент основной нагрузки; K — эмпирический коэффициент; P_a — амплитуда циклической нагрузки, действующей на один болт соединения; m — показатель степени; N_0 — базовое число циклов.

Необходимо выбрать режим граничных испытаний и определить коэффициент ускорения.

Введем меру повреждения за один цикл нагружения: $D_1 = 1/N$.

По достижении предельного состояния, т. е. за N циклов, мера повреждения равна единице:

$$D_N = D_1 N = \frac{1}{N} N = 1. \quad (4.4)$$

Определим величину $\tilde{D}$, равную:

$$\begin{aligned} \tilde{D} = \ln D_1 = m \ln \frac{K \chi_p}{F \sigma_{\text{пр}} N_0^{1/m}} + \\ + 2m \ln P_a - m \ln Q_3. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Пусть необходимо испытать соединение с болтами М10, имеющее параметры: $F=0,55 \text{ см}^2$; $K=2,8$; $\chi_p=0,3$; $m=8$; $\sigma_{np}=15 \text{ кг/см}^2$; $N_0=2 \cdot 10^5$ циклов.

Пусть из результатов обследования в условиях эксплуатации известно, что величины P_a и Q_a имеют логарифмически нормальное распределение. При этом $\ln P_a$ и $\ln Q_a$ распределены нормально, следовательно, можно считать, что нормально распределена и величина $\ln D_1$.

Пусть известны средние значения и среднеквадратические отклонения величин P_a и Q_a , которые составляют соответственно $\bar{P}_a=100 \text{ кг}$; $\bar{Q}_a=770 \text{ кг}$, $\sigma_{Pa}=30 \text{ кг}$, $\sigma_{Qa}=154 \text{ кг}$. Тогда параметры нормального распределения a_P и b^2_P (среднее и дисперсия) величины $\ln P_a$ можно определить, используя известные зависимости:

$$\bar{P}_a = e^{a_P + \frac{b^2_P}{2}}; \quad \sigma_{Pa} = \bar{P}_a \sqrt{e^{b^2_P} - 1}.$$

откуда получим $a_P=4,562$ и $b^2_P=0,086$. Аналогично определяют $a_Q=6,627$ и $b^2_Q=0,039$ для величины $\ln Q_a$.

Моменты (средние и дисперсия) распределения величины $\ln D_1$ исходя из (4.5) определяются по формулам:

$$M[\ln D_1] = m \ln \frac{K\chi_p}{F\sigma_{np}N_0^{\frac{1}{m}}} + 2ma_P - ma_Q;$$

$$D[\ln D_1] = 4m^2b^2_P + m^2b^2_Q.$$

Расчет по этим формулам дает:

$$M[\ln D_1] = 8 \ln \frac{2,8 \cdot 0,3}{0,55 \cdot 15 (2 \cdot 10^5)^{0,125}} + 2 \cdot 8 \cdot 4,562 - 8 \cdot 6,627 = -10,503.$$

Соответствующее значение среднего числа циклов рассчитывается с помощью формулы $N_{0,5} = e^{-M(\ln D_1)}$ и равно $N_{0,5}=37000$.

$$D[\ln D_1] = 4 \cdot 8^2 \cdot 0,086 + 8^2 \cdot 0,039 = 24,57.$$

Среднеквадратическое отклонение $\ln D_1$ равно 4,95.

Величину $\ln D_1$, соответствующую $\gamma=0,8$, определим по формуле:

$$\tilde{D}_{0,8} = M[\ln D_1] + I_\gamma \sigma_{\ln D_1},$$

где I_γ — квантиль нормального распределения (при $\gamma=0,8$ $I_{0,8}=0,84$); $\sigma_{\ln D_1}$ — среднеквадратическое отклонение.

Получаем $\tilde{D}_{0,8} = -10,503 + 0,84 \cdot 4,95 = -6,34$.

Соответственно $N_{0,8}=567$ циклов.

Для проведения граничных ускоренных испытаний по оценке 80%-ного ресурса с помощью формулы (4.5), положив в ней $\ln D_1 = -6,34$, можно, например, получить следующие (для различных вероятностей) режимы нагружения:

$$P_{a(0,5)} = \bar{P}_a = 100 \text{ кг и } Q_{a(0,995)} = 449 \text{ кг};$$

$$P_{a(0,8)} = 123 \text{ кг и } Q_{a(0,55)} = 735 \text{ кг}.$$

Второй режим, очевидно, предпочтительнее, так как при этом оба фактора находятся в области наиболее вероятных эксплуатационных значений.

Коэффициент ускорения при испытаниях равен:

$$K_n = \frac{N_{0,5}}{N_{0,8}} = \frac{37.000}{567} = 65.$$

Несмотря на эффективность уплотненных испытаний, они не всегда могут дать достаточное ускорение в получении информации о надежности объекта и приходится прибегать к ужесточению по факторам нагружения.

Ужесточенные по нагружению испытания. Ужесточенными по нагружению испытаниями будем называть такие, при которых ускоренное получение информации достигается с интенсификацией (в сравнении с эксплуатацией) физико-химического процесса разрушения (с увеличением силового — объемного, поверхностного и др. нагружения).

Ужесточенные испытания сокращают время проведения испытаний, однако их следует использовать весьма осторожно, поскольку результаты этих испытаний могут не соответствовать данным эксплуатации. Другими словами, отказы при ускоренных испытаниях могут не повторяться в эксплуатации, и смысл таких ускоренных испытаний теряется. Чтобы обеспечить эффективность ужесточенных испытаний, необходимо соблюсти их подобие с эксплуатационными испытаниями. Подобие испытаний можно сформулировать с двух позиций: физическое и математическое.

Физическое подобие состоит в том, чтобы физическая картина отказа при ужесточенных и эксплуатационных испытаниях была одинакова по характеру и виду разрушения (место разрушения, вид и характер деформированного состояния, температурные режимы, форма изношенной поверхности, вид износа и т. д.). Каждый процесс разрушения имеет свою критическую область, при выходе из этой области происходят качественные его изменения. Режим ускоренных испытаний следует выбирать так, чтобы эта критическая область не была достигнута и, следовательно, качественная сторона процесса разрушения осталась неизменной [25].

Математическое подобие состоит в том, чтобы вероятности безотказной работы объекта при

ужесточенных и эксплуатационных испытаниях были одинаковы (принцип равных вероятностей):

$$R(t_y) = R(t_a).$$

Если ввести, как и ранее, коэффициент перехода от ускоренных испытаний к эксплуатационным $K_{\pi} = T_a/T_y$ и потребовать из условия масштабного подобия [29], чтобы

$$K_{\pi} = \text{const} \quad (4.6)$$

для любого t , то условие равенства вероятностей приведет к равенству коэффициентов вариации времени безотказной работы при ускоренных испытаниях и в эксплуатации [29]:

$$v_y = v_t \quad (4.7)$$

Этот вывод справедлив для любых законов распределения, но одинаковых при ускоренных и эксплуатационных испытаниях. Поскольку средние ресурсы и коэффициенты вариации при испытаниях определяют по конечным выборкам, то математические условия (4.6) и (4.7) должны выполняться в статистическом смысле.

Пусть проведены ускоренные испытания n_y образцов и эксплуатационные n_a образцов. Тогда, принимая в качестве средних полученные из опыта T_a , T_y , σ_a , σ_y , вычислим $K_{\pi} = T_a/T_y$; $v_a = \sigma_a/T_a$; $v_y = \sigma_y/T_y$.

После чего удовлетворение условия (4.7) проверяется выполнением неравенства

$$\frac{|v_a - v_y|}{\sqrt{\frac{v_a^2}{2n_a} + \frac{v_y^2}{2n_y}}} < 3.$$

Если оно удовлетворено, то условие подобия (4.7) выполнено. Более точно условие подобия проверяется по формуле, приведенной в [29].

Пример. Определить коэффициент перехода по результатам испытания ножей свеклокомбайна в условиях стенда (ужесточенные испытания) и эксплуатации и проверить условия подобия. Исходные данные: $n_y = 48$; $n_a = 16$; $T_y = 41,24$ ч; $T_a = 276,4$ ч; $\sigma_y = 13,74$ ч; $\sigma_a = 108$ ч.

Определяем $v_y = \sigma_y/T_y = 13,7/41,2 = 0,331$; $v_a = \sigma_a/T_a = 108/276 = 0,391$; $K_{\pi} = T_a/T_y = 276/41,2 = 6,7$.

Условие подобия имеет вид:

$$\frac{|0,391 - 0,331|}{\sqrt{\frac{0,391^2}{2 \cdot 16} + \frac{0,331^2}{2 \cdot 48}}} = 0,783 < 3$$

и выполняется.

Коэффициент перехода можно выразить не только через средние значения времени до отказа, но и через параметры процесса.

Например, пусть параметр изменяется во времени при ускоренных и эксплуатационных испытаниях в соответствии с зависимостями:

$$И_y = b_y t_y^\alpha; \quad И_э = b_э t_э^\alpha.$$

Предельное значение параметра равно $И_{п.}$ Введем средние значения коэффициентов $\bar{b}_y$ и $\bar{b}_э$ и среднеквадратические их отклонения σ_{b_y} и $\sigma_{b_э}$.

Поскольку коэффициент $K_{п.}$ при соблюдении подобия должен быть одинаков для любых t , то условие подобия в этом случае имеет вид:

$$v_{b_э} = v_{b_y} \cdot a \quad K_{п.} = \left(\frac{\bar{b}_y}{\bar{b}_э} \right)^{1/\alpha}$$

Пример. Определить коэффициент перехода $K_{п.}$ для предыдущего примера при следующих данных: $\bar{b}_y = 0,53$ мм/га; $\sigma_{b_y} = 0,14$ мм/га; $\alpha = 1$; $\bar{b}_э = 0,0796$ мм/га; $\sigma_{b_э} = 0,0247$ мм/га.

Имеем:

$$K_{п.} = \frac{0,53}{0,0796} = 6,65; \quad v_{b_э} = \frac{0,0247}{0,0796} = 0,31; \quad v_{b_y} = \frac{0,14}{0,53} = 0,264.$$

Результаты, как видим, близки к полученным в предыдущем примере. Таким образом, если проведены ускоренные испытания и получены результаты, то, имея величину коэффициента перехода $K_{п.}$, можно легко рассчитать ожидаемую в эксплуатации среднюю долговечность и ее среднеквадратическое отклонение $T_э = K_{п.} T_y$; $\sigma_э = K_{п.} \sigma_y$.

Бывает так, что эксплуатационные испытания проводят недостаточно качественно, данные о долговечности в эксплуатационных условиях неточны или вообще вызывать отказ в эксплуатации нецелесообразно по соображениям экономичности или безопасности, но физическая картина отказа известна. Известны также эксплуатационные нагрузки. В этом случае ожидаемую эксплуатационную долговечность можно получить с помощью ускоренных ступенчатых испытаний.

Ступенчатые испытания проводят следующим образом. Объект испытывают при эксплуатационной нагрузке некоторое заданное время t_a , затем нагрузку увеличивают (ужесточают) и доводят объект до предельного состояния. Нарботку в ужесточенном режиме до предельного состояния обозначим t_y . Затем проводят второй цикл испытаний с другим объектом того же наименования, который состоит в том, что испытания проводятся только в ужесточенном режиме. Нарботку до предельного состояния в этом режиме обозначим T_y .

Теперь можно записать для первого цикла испытания, что повреждение в режиме эксплуатационного режима равно t_a/T_a , где T_a — наработка в эксплуатационном режиме до предельного состояния. Повреждение в ужесточенном режиме в этом цикле испытаний равно t_y/T_y . Поскольку в первом цикле объект разрушился, то суммарное повреждение равно единице $t_a/T_a + t_y/T_y = 1$, где значение наработки T_y может быть взято из второго цикла испытаний. Таким образом, в последнем уравнении остается лишь одна (T_a) неизвестная наработка до предельного состояния в эксплуатационном режиме. Испытания повторяются на нескольких парах образцов, после чего средняя наработка до отказа в эксплуатации определяется по формуле

$$T_a = \frac{t_a}{1 - t_y/T_y}.$$

Как видим, при ступенчатых испытаниях требуется в два раза большее число образцов, чем при испытаниях на одном уровне. Но при этом исключаются эксплуатационные испытания. Ступенчатые испытания можно использовать и таким образом: детали, которые в эксплуатации не имели наработку до предельного состояния, испытать в ужесточенных режимах на стенде и довести до предельного состояния. В этом плане эффективность метода ступенчатых испытаний велика.

Необходимость вычисления коэффициента K_n здесь отпадает, поскольку непосредственно определяют время T_a . Из условия постоянства коэффициента вариации в эксплуатационном и ужесточенном режимах следует:

$$\sigma_{T_a} = \frac{T_a}{T_c} \sigma_{T_y}.$$

Специфичные ужесточенные испытания — вибрационные полигармонические испытания усталостной прочности деталей двигателей. При отказе элемента двигателя в эксплуатации из условия равенства меры повреждения единице [29] запишем:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i \sigma_i^m}{\sigma_{-1}^m N_0} = 1, \quad (4.8)$$

где n_i — число циклов с амплитудой напряжения σ_i , частота цикла которого равна ν_i ; k — число частот в спектре вибрации.

Введем нормировочное число циклов n^* (например, n_1). Тогда предельное значение n^* , то есть долговечность детали в циклах $\left(\alpha_i = \frac{n_i}{n_1}\right)$ из (4.8) равно:

$$n^* = \frac{\sigma_{-1}^m N_0}{\sum_{i=1}^k \alpha_i \sigma_i^m}.$$

При тех же значениях α_i , то есть сохраняя одинаковыми соотношения между n_i в условиях ускоренных и эксплуатационных испытаний, будем иметь:

$$n_y^* = \frac{\sigma_{-1}^m N_0}{\sum_{i=1}^k \alpha_i \sigma_{iy}^m}. \quad (4.9)$$

Коэффициент ускорения (перехода):

$$K_n = \frac{n^*}{n_y^*} = \frac{\sum_{i=1}^k \alpha_i \sigma_{iy}^m}{\sum_{i=1}^k \alpha_i \sigma_i^m}.$$

Если при ускоренных испытаниях пропорционально увеличивать все амплитуды напряжений (изменение масштаба), то

$$\frac{\sigma_{iy}}{\sigma_i} = \eta. \quad (4.10)$$

Теперь коэффициент перехода:

$$K_n = \eta^m.$$

Пример. Выбрать режим ускоренных испытаний детали двигателя (с помощью набора гармонических вибраторов разной частоты).

ты). В эксплуатации средние значения амплитуд напряжений составляют: $\sigma_1=450$ кг/см² при частоте $\nu_1=35$ Гц; $\sigma_2=300$ кг/см² при частоте $\nu_2=52,5$ Гц; $\sigma_3=100$ кг/см² при частоте $\nu_3=70$ Гц.

Предел усталости для детали равен $\sigma_{-1y}=1070$ кг/см², $N_0=10^6$ циклов, $m=6$. Разрушение детали усталостное.

Принимаем число циклов при ускоренных испытаниях $n_y^*=10^6$ циклов (при таком числе циклов разрушение носит усталостный характер, что соответствует характеру разрушения в эксплуатации).

Исключим из (4.9) σ_{iy} с помощью (4.10). Получим

$$n_y^* = \frac{\sigma_{-1}^m N_0}{\eta^m \sum \alpha_i \sigma_i^m} \quad \text{и} \quad \eta = \sigma_{-1} \left(\frac{N_0}{n_y^* \sum_{i=1}^k \alpha_i \sigma_i^m} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

Подсчитаем коэффициент η :

$$\eta = 1070 \left[\frac{10^6}{10^6 [(450)^6 + (300)^6 \cdot 1,5 + (100)^6 \cdot 2]} \right]^{\frac{1}{6}} = 2,34.$$

Коэффициент ускорения (перехода) испытаний: $K_n = \eta^m = (2,34)^6 = 16,6$.

При испытаниях необходимо обеспечить следующий спектр амплитуд напряжений:

$$\sigma_{1,y} = \eta \sigma_1 = 2,34 \cdot 450 = 1053 \text{ кг/см}^2 \text{ (105,3 МН/м}^2\text{);}$$

$$\sigma_{2,y} = \eta \sigma_2 = 2,34 \cdot 300 = 702 \text{ кг/см}^2 \text{ (70,2 МН/м}^2\text{);}$$

$$\sigma_{3,y} = \eta \sigma_3 = 2,34 \cdot 100 = 234 \text{ кг/см}^2 \text{ (23,4 МН/м}^2\text{).}$$

Спектр частот при испытаниях сохраняется эксплуатационным. При проведении испытаний на ресурс 6000 ч время ускоренных испытаний равно:

$$T_y = \frac{6000}{K_n} = \frac{6000}{16,6} = 36 \text{ ч.}$$

Технические средства ускоренных испытаний. Ускоренные испытания обычно проводят на полигонах, треках и стендах [25], [29], [31]. На полигонах достигнута степень ускорения испытаний в 2...5 раз при уплотненных испытаниях и до 30 раз при ужесточении режимов испытаний. Уплотнение и ужесточение испытаний на полигонах и треках достигаются передвижением машины по искусственным неровностям или по гладкой поверхности, но с установкой на колесах машин специальных шипов. Для испытаний несущих систем автомобилей, тракторов, прицепов и других машин получили распространение автополигоны с треками большой протяженности, оборудованными набором специальных пре-

пятствий. Известны также круговые полигоны диаметром 20...50 м. Недостаток полигонов и треков — трудность воспроизведения для всех испытываемых машин всего спектра эксплуатационных нагрузок, а его нарушение приводит к появлению нехарактерных отказов при испытаниях.

Несмотря на недостатки полигонных испытаний, а также на высокую стоимость сооружения и эксплуатации полигонов, этот метод испытаний пригоден для приближенной оценки прочности основных сборочных единиц на ранней стадии создания машин при небольших коэффициентах ускорений [31]. Поэтому широкое распространение получают универсальные приспособления и устройства нагружения и специальные стенды для ускоренных испытаний деталей, сборочных единиц и агрегатов.

Необходимо отметить универсальные устройства фирмы «Шенк» (ФРГ) и MTS (США). Они построены по агрегатному признаку и предназначены для различных видов испытаний материалов, деталей, сборочных единиц и машин в целом. Их можно составлять для самых многообразных испытательных задач. С помощью устройств можно производить статическое, квазистатическое, динамическое, вибрационное нагружение. Протекание нагрузки изменяется электронным управляющим устройством с использованием записи реальной нагрузки на магнитной ленте.

Специфические испытания, используемые для оценки надежности рабочих органов сельскохозяйственных машин — имитационные испытания. Они обычно не дают заметного ускорения. Например, при испытаниях зерноуборочных комбайнов с применением различных заменителей технологических операций (отходов кожи, резиновых технических изделий) коэффициент ускорения близок к единице. При таких испытаниях следует учитывать износ имитатора и изменение свойств и постоянно его обновлять [31].

Наибольшее практическое распространение для ускоренных испытаний тракторов и сельскохозяйственных машин получили специализированные стенды, позволяющие получить высокие коэффициенты ускорения при сохранении физической картины отказа.

Сельскохозяйственные машины содержат большое число специальных деталей, сборочных единиц и рабо-

чих органов. Укрупнение их можно классифицировать на семь групп.

1. Ходовая часть.
2. Несущая система.
3. Механизм привода и трансмиссия.
4. Регулирующие рабочие органы (сошники, подкапывающие лапы, лемехи, плуги, копачи, фрезы, лапы культиваторов, режущие ножи и т. д.).
5. Транспортирующие рабочие органы (транспортеры, шнеки, лапы и т. д.).
6. Системы управления и подъема.
7. Детали и сборочные единицы общего назначения (цепи, звездочки, зубчатые редукторы, муфты, карданные передачи и т. д.).

Схемы стендов и описания их работы приведены в [29].

Примеры стендов для ускоренных испытаний тракторов и их сборочных единиц приведены в [43].

К ним относятся стенды для испытаний двигателей в запыленной среде, вибростенды для топливной аппаратуры, инерционные стенды для сцепления и тормозов, силовые установки для испытания трансмиссии, абразивные ванны для гусеничных цепей, вибростенды для кабин и т. д.

Основные направления совершенствования технических средств ускоренных испытаний состоят в расширении их универсальности, унификации и стандартизировании типовых элементов.

§ 3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Ранее были изложены методы определения показателей надежности по полным выборкам, т. е. когда все объекты, поставленные на испытания, отказали. В условиях реальных испытаний это бывает редко. Погрешности при оценке показателей надежности объектов в результате эксплуатационных испытаний возникают вследствие следующих причин:

- 1) ограниченности объема выборки (статистическая погрешность);
- 2) потери части информации об отказах (систематическая погрешность).

Вид погрешности, как правило, связан с методом получения информации о надежности. На рисунке 47 по-

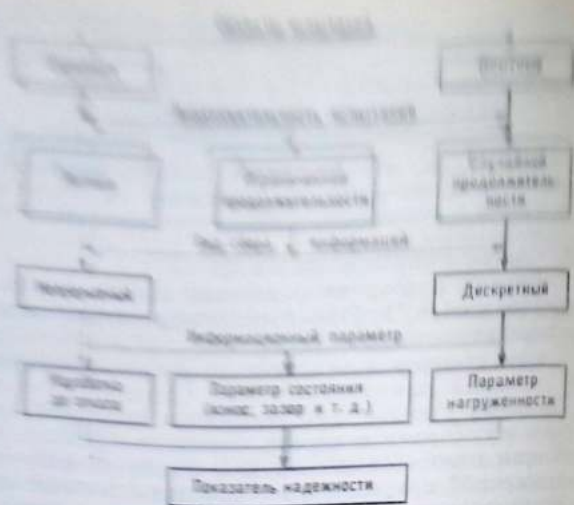


Рис. 47. Схемы методов сбора и обработки информации об эксплуатационной надежности.

линии схема основных методов получения исходной информации для определения показателей надежности сельскохозяйственной техники с помощью эксплуатационных испытаний. Наибольший интерес представляют варианты, показанные на схеме жирными линиями. Рассмотрим для этих схем определение показателей надежности.

Испытания на отказ. Серийные машины, продолжительность испытаний случайная, информационный параметр — наработка до отказа. Вероятность безотказной работы объекта при испытаниях со случайной продолжительностью (многократноусеченная выборка) определяется по выражению:

$$R(t) = \exp \left\{ -P \int_0^t \frac{\tilde{f}_{от}(\tau)}{1 - \tilde{F}_\Sigma(\tau)} d\tau \right\}, \quad (4.11)$$

где P — вероятность отказа объекта при испытаниях со случайной продолжительностью (доля отказавших объектов во всей сово-

вероятности безотказной работы $R(t)$ в момент времени t можно получить, подставив в формулу (4.11) значения $\tilde{F}_1(t)$ и $\tilde{F}_2(t)$, найденные в предыдущих параграфах.

Если, например, требуется определить вероятность безотказной работы рессоры трактора в момент времени t , то вероятность безотказной работы рессоры можно найти по формуле

$$\tilde{F}_1(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right]$$

$$\tilde{F}_2(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{a} \right)^b \right]$$

то вероятность безотказной работы рессоры можно найти по формуле

$$R(t) = \exp \left\{ \frac{P_2}{a_{от} - a^b} \left[1 - \exp \left[\left(\frac{t}{a} \right)^b \right] - \left(\frac{t}{a_{от}} \right)^b \right] \right\} \quad \text{при } t < \infty. \quad (4.12)$$

Воспользоваться формулой (4.12) можно в том случае, если имеется достаточная выборка наработок отказавших объектов. Отметим, что параметры распределения Вейбулла целесообразно определять с помощью вероятностной бумаги.

Пример. Для рессоры трактора по данным о наработках в эксплуатации 50 машин были получены пирамиды распределения наработки отказавших элементов и совокупности наработок до отказа и до приостановки: $a_{от} = 2870$ моточасов; $a = 3780$ моточасов и $b = 2$. Всего было зафиксировано 20 отказов, и доля отказавших рессор составила $P = 20/50 = 0,4$.

Тогда функция вероятности безотказной работы рессоры имеет вид:

$$R(t) = \exp \left\{ \frac{0,4 \cdot 3780^2}{2870^2 - 3780^2} \left[1 - \exp \left(\frac{t}{3780} \right)^2 - \left(\frac{t}{2870} \right)^2 \right] \right\}.$$

Подставляя в эту формулу наработку t в моточасах, будем получать соответствующие значения вероятности безотказной работы рессоры.

При подконтрольных испытаниях серийных машин, несмотря на достаточный объем выборки, часто число отказавших объектов мало. В этом случае необходимо привлечь дополнительную информацию, для чего выра-

зим функцию распределения совокупностей наработок $F_{\Sigma}(t)$ в виде:

$$\tilde{F}(\tau) = P\tilde{F}_{от}(\tau) + (1-P)\tilde{F}_{пр}(\tau), \quad (4.13)$$

где $\tilde{F}_{от}(\tau)$ — функция распределения наработки отказавших объектов; $\tilde{F}_{пр}(\tau)$ — функция распределения наработки до приостановки испытаний объектов в случае, если испытания были прерваны не вследствие отказов, а по другим причинам.

Формула (4.13) позволяет оценивать вероятность безотказной работы, используя различные выборки из генеральной совокупности наработок до отказа и до приостановок. Так, плотность распределения $f_{отк}(t)$ может быть оценена по данным о рекламациях и другим сведениям только об отказавших объектах, которые обычно имеются на заводах-изготовителях. Функция распределения $\tilde{F}_{пр}(t)$ и доля отказавших объектов достаточно точно определяются по результатам испытаний подконтрольной выборки.

Таким образом, удалось избежать построения плотности распределения наработок отказавших объектов, которых в подконтрольной выборке мало. Отметим, что при этом предварительно необходимо проверить статистическую однородность дополнительно привлеченной и основной подконтрольной выборки [32].

В связи с тем что доля отказавших объектов в подконтрольной выборке мала, необходимо вычислить доверительные границы $\bar{P}$ и $\underline{P}$ для вероятности P [32].

Подставляя $\bar{P}$ и $\underline{P}$ в (4.12), (4.13), определяем $R(t)$ и $\tilde{R}(t)$.

Пример. Пусть $N=25$; $r=4$. Тогда при $(1-\alpha)=0,8$ получим, что $\bar{P}=0,295$ и $\underline{P}=0,072$ [32].

Опытные машины, продолжительность испытаний случайная, информационный параметр — наработка до отказа. В этом случае число объектов и отказавших, и приостановленных мало. Вероятность безотказной работы целесообразно вычислять по формуле (4.12), а параметры распределений a , b , $a_{от}$ — с помощью вероятностной бумаги; доверительные границы для b — по формулам [32]. При отсутствии вероятностной бумаги параметр b задается на

основании данных об объекте-аналоге, а параметры a , $a_{от}$ могут быть подсчитаны по формулам:

$$a_{от} = \left[\frac{\sum_{k=1}^r t_k^b + \sum_{k=r+1}^N T_k^b}{r} \right]^{1/b};$$

$$a = \left[\frac{\sum_{k=1}^N \overline{T}_k^b}{N} \right]^{1/b}, \quad (4.14)$$

где t_k и T_k — наработки до отказов и приостановок; $\overline{T}_k$ — наработка совокупности объектов.

При отсутствии отказов в выборке нижняя доверительная граница $a_{от}$ равна:

$$\underline{a}_{от} = \left(- \frac{\sum_{k=1}^N T_k^b}{\ln a} \right)^{1/b}, \quad (4.15)$$

где α — доверительная вероятность.

Естественно, что при малом числе объектов, поставленных на испытания, и при малом числе их отказов точность вычислений невелика. Ее можно повысить, привлекая к анализу данных априорную информацию.

Серийные машины, сбор информации дискретный, информационный параметр — наработка до отказа. Одноразовый дискретный контроль методом опроса удобен при испытаниях сельскохозяйственной техники в условиях рядовой эксплуатации тем, что позволяет получить большой объем данных и оценить влияние рассеивания эксплуатационных воздействий на надежность машины и ее элементов. Такую систему сбора информации правомерно отнести к системам типа «человек—техника». Ранее при сборе информации предполагали абсолютную надежность ее передающего звена — механизатора, работающего на машине. Однако практика контроля надежности методом дискретного опроса показывает, что по объективным и субъективным причинам часть информации, особенно о мелких, легкоустраняемых отказах при этом теряется, что приводит к завышению показателей надежности на 15...20 %.

Определение надежности объекта, работающего в различных режимах. Пусть

объект работает в нескольких режимах: $P_1, P_2, P_3, \dots$ с вероятностями $R(P_1), R(P_2), R(P_3), \dots$.

Пользуясь формулой полной вероятности, определим безусловную вероятность безотказной работы:

$$R(t) = R(P_1)R(t/P_1) + R(P_2)R(t/P_2) + R(P_3)R(t/P_3) + \dots \quad (4.16)$$

Пример. Объект может работать в одном из трех режимов (деталь трактора на одной из трех передач), вероятности которых $R(P_1)=0,4$; $R(P_2)=0,3$; $R(P_3)=0,3$. В режиме P_1 — средняя наработка на отказ 50 моточасов, в режиме P_2 — 75 моточасов, в режиме P_3 — 100 моточасов. Определить вероятность безотказной работы объекта. Закон распределения времени безотказной работы экспоненциальный. Используя (4.16), получим:

$$R(t) = 0,4 e^{-\frac{1}{50}t} + 0,3 e^{-\frac{1}{75}t} + 0,3 e^{-\frac{1}{100}t}.$$

Определение надежности объекта по данным о распределении времени безотказной работы, полученным из разных источников. Пусть из разных источников получены плотности распределения времени безотказной работы объекта (эксплуатационные, стендовые, имитационные испытания и др.): $f_1(t), f_2(t), f_3(t)$.

Необходимо оценить ожидаемую плотность распределения. Пользуясь формулой полной вероятности, получим

$$\hat{f}(t) = \sum_{i=1}^k P_i f_i(t), \quad (4.17)$$

где $P_i = n_i/N$ — весовые коэффициенты; $N = \sum_{i=1}^k n_i$ — общее число испытанных объектов; n_i — число объектов, испытанных при каждом испытании.

Пользуясь приведенной формулой, можно аналогично записать выражение для среднего времени безотказной работы и дисперсии:

$$T = \sum_{i=1}^k P_i T_i; \quad D = \sum_{i=1}^k P_i^2 D_i. \quad (4.18)$$

Пример. Пусть по результатам стендовых испытаний (коэффициент ускорения равен 20, $n_1=3$) получено: $T_1=200$ ч, $D_1=225$ ч²; при имитационных (коэффициент ускорения равен 2, $n_2=2$) — $T_2=1500$ ч, $D_2=9 \cdot 10^4$ ч²; при эксплуатационных испытаниях ($n_3=5$) — $T_3=4000$ ч, $D_3=144 \cdot 10^4$ ч².

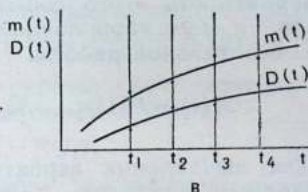
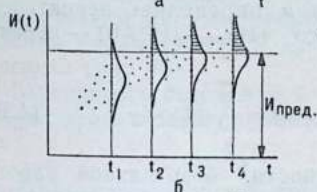
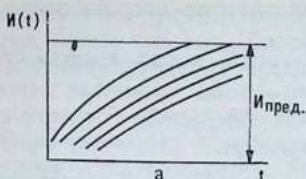


Рис. 48. Схемы к обработке данных испытаний «по параметру состояния»:

a — реализации параметров; b — значения параметров при различной наработке; π — аппроксимация моментных функций $m(t)$ и $D(t)$.

Подсчитаем ожидаемый средний ресурс, среднее квадратичное отклонение ресурса и коэффициент вариации $P_1=0,3$; $P_2=0,2$; $P_3=0,5$:

$$T=0,3 \cdot 200 \cdot 20 + 0,2 \cdot 1500 \cdot 2 + 0,5 \cdot 4000 = 3800 \text{ ч};$$

$$D=0,09 \cdot 225 \cdot 400 + 0,04 \cdot 9 \cdot 10^4 \cdot 4 + 0,25 \cdot 144 \cdot 10^4 = 620 \text{ ч}^2;$$

$$\sigma = \sqrt{D} = 620 \text{ ч}; \quad v = \frac{\sigma}{T} = 0,16.$$

Испытания по параметру состояния. Пусть в процессе испытаний удастся измерить в каждом конкретном образце изменение некоторого параметра во времени (износ, зазор, температура и т. п.), то есть построить реализации процессов (рис. 48,а). Пусть также каждая реализация описывается аналитическим выражением вида:

$$I = a + bt^v, \quad (4.19)$$

где a, b — определенные для каждой реализации значения, в совокупности представляющие собой случайные числа, по конкретным значениям которых можно построить плотности распределений $f(a)$, $f(b)$, определить математические ожидания $\bar{a}$, $\bar{b}$ и дисперсии $D(a)$ и $D(b)$; v — постоянный параметр, характерный для данного вида объекта (см. § 4).

При $v=1$ коэффициент b — скорость изменения параметра (износа) I и каждое его значение определяют по одному измерению:

$$b_i = \frac{I_i}{t_i} \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

Реализации такого вида достаточно широко распространены в практике.

Отказ объекта наступает тогда, когда выполняется неравенство:

$$I > I_{\text{пред}} : y = I - I_{\text{пред}} > 0,$$

где $I_{\text{пред}}$ — предельное значение параметра.

Вероятность этого события определяет вероятность отказа, а противоположного ($I_{\text{пред}} - I > 0$) — вероятность безотказной работы.

$$R(t) = P(I_{\text{пред}} - I > 0) = \int_0^{\infty} f(y) dy. \quad (4.20)$$

Для вычисления вероятности безотказной работы необходимо вычислить плотность распределения параметра y . Будем считать, что предельное значение $I_{\text{пред}}$ — величина случайная, I — также величина случайная. Положим, что обе эти величины распределены по нормальному закону. Тогда параметр y также распределен нормально.

Параметры этого нормального распределения (математическое ожидание и дисперсия) равны соответственно разности математических ожиданий и сумме дисперсий параметров I и $I_{\text{пред}}$:

$$M(y) = M(I_{\text{пред}}) - M(I); D(y) = D(I_{\text{пред}}) + D(I). \quad (4.21)$$

Определим $M(I)$ и $D(I)$. Если в выражении (4.19) a и b независимы и распределены по нормальному закону, то

$$M(I) = M(a) + M(b)t^v; D(I) = D(a) + D(b)t^{2v}.$$

Вероятность безотказной работы при $D(I_{\text{пред}}) = 0$, $M(I_{\text{пред}}) = I_{\text{п}}$ определяется по формуле [29]:

$$R(t) = F_0 \left[\frac{I_{\text{пред}} - M(a) - M(b)t^v}{\sqrt{D(a) + D(b)t^{2v}}} \right], \quad (4.22)$$

где $F_0[z]$ — функция Лапласа.

Задавая различные значения t , строим функцию $R(t)$, из которой можно легко определить все остальные характеристики надежности (средний ресурс, гамма-процентный ресурс и т. д.).

Не всегда удастся определить характеристики реализации параметра, поскольку это требует непрерывных

измерений во времени достаточно большого числа объектов. Более простой способ состоит в том, чтобы разово измерить значения параметров большой выборки объектов с различной наработкой (рис. 48,б), а затем, выбрав моменты времени $t_1, t_2, t_3 \dots$ наибольшего сосредоточения исходных данных, а остальные данные экстраполируя и интерполируя на эти сечения, построить по эмпирическим данным теоретические плотности распределения параметров $I(t_1), I(t_2), I(t_3), I(t_4)$, в этих сечениях (рис. 48).

Вероятность безотказной работы, как и ранее, определяют вероятностью неравенства $I-I(t) > 0$.

$$R(t_i) = 1 - F(t_i),$$

где $F(t_i)$ — площадь кривой плотности распределения в сечении t_i над уровнем $I_{пред}$ (заштрихована на рис. 48,б), а R_{ti} — под уровнем $I_{пред}$.

Расчет таким методом можно выполнить и не переходя к теоретическим плотностям распределения, пользуясь только эмпирическими распределениями, если в наличии имеется большой экспериментальный материал. Если закон распределения параметра $I(t)$ в каждом сечении нормальный, то вероятность безотказной работы изделия может быть определена так называемым методом моментов. В соответствии с этим методом в каждом сечении t_i рассчитывают математические ожидания $M(I_{*i})$ и дисперсии параметров $D(t_i)$ и строятся точечные значения $M(I_*)$ и $D(I_*)$. Точечные значения аппроксимируются подходящими аналитическими выражениями (рис. 48,в). Пусть $m(t)$ и $D(t)$ можно аппроксимировать функциями вида:

$$M(I_*) = M(a_*) + M(b_*)t^v \text{ и } D(I_*) = D(a_*) + D(b_*)t^{2v}.$$

Тогда вероятность безотказной работы по аналогии с (4.22):

$$R(t) = F_0 \left(\frac{I_{пред} - M(a_*) - M(b_*)t^v}{\sqrt{D(a_*) + D(b_*)t^{2v}}} \right). \quad (4.23)$$

По внешнему виду это выражение совпадает с тем, которое получено в методе реализации, но, по существу, оно отличается.

Пример. В результате сбора эксплуатационных данных об износе карданных шарниров трактора была получена информация об износе при различных значениях наработки трактора.

Аналитические выражения, аппроксимирующие зависимости математического ожидания и дисперсии износа от наработки, имеют вид: $m(t) = 0,127 \cdot 10^{-3}t$, $D(t) = 0,15 \cdot 10^{-8}t^2$. Тогда при $I_{\text{пред}} = 0,4$ мм вероятность безотказной работы определяют по формуле

$$R(t) = F_0 \left(\frac{0,4 - 0,127 \cdot 10^{-3}t}{0,0000387t^2} \right).$$

Отсюда следует, в частности, что медианный ресурс (ресурс, соответствующий значению вероятности безотказной работы 0,5) карданного шарнира равен 3150 мото часам.

Большой информативный материал имеется на ремонтных предприятиях, где производится отбраковка деталей машин, поступивших в ремонт. При этом, как правило, имеется информация о значениях износа деталей и о наработке машин, поступивших в ремонт. Информация эта имеет статистический характер, то есть представляет собой выборки значений износа и наработки.

Особенность здесь заключается в том, что неизвестно, каким наработкам соответствуют величины измеренных износов. Обработав такую информацию, можно получить только сведения о законах и параметрах распределений износа и наработки деталей. Совместные и условные законы распределения при этом неизвестны. Покажем, как, применяя достаточно общие предположения, можно по данным ремонтных предприятий определять показатели надежности деталей. Обозначим символом t_k наработку деталей до поступления машины в капитальный ремонт, а символом I_k — износ такой детали. Обе эти величины случайные.

Пусть износ детали и время связаны соотношением:

$$I = bt^v,$$

где b — случайный коэффициент; v — неслучайный и постоянный для определенной детали показатель степени.

Обозначим $t_k^v = \tau_k$. Выборка значений t_k легко пересчитывается в выборку значений τ_k . Тогда

$$I_k = b\tau_k. \quad (4.24)$$

Будем рассматривать оценку надежности деталей, долговечность которых не лимитирует ресурс машины в целом. В противном случае распределение их ресурсов совпадает с распределением времени поступления машин в ремонт. При этих предположениях случайные ве-

личины b и τ независимы. Соотношения между математическими ожиданиями и дисперсиями величин I , b , τ [20] на основании (4.24) имеют вид:

$$m_{II} = m_b m_\tau; \sigma_{II}^2 = \sigma_b^2 \sigma_\tau^2 + m_b^2 \sigma_\tau^2 + m_\tau^2 \sigma_b^2,$$

где m_b , σ_b — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение коэффициента b .

Если известны моменты распределений величин I и τ , то

$$m_b = \frac{m_{II}}{m_\tau}; \sigma_b = \sqrt{\frac{m_\tau^2 \sigma_{II}^2 - m_{II}^2 \sigma_\tau^2}{m_\tau^2 (\sigma_\tau^2 + m_\tau^2)}}.$$

Из очевидного условия $\sigma_b^2 > 0$ следует, что должно выполняться неравенство между коэффициентами вариации:

$$v_{II} = \frac{\sigma_{II}}{m_{II}} \geq \frac{\sigma_\tau}{m_\tau} = v_\tau.$$

Если это условие не выполняется, то вместо выражения (4.24) следует использовать формулу:

$$I = \frac{\tau}{b_1}, \quad (4.25)$$

где b_1 — случайный коэффициент.

Полагая I и b_1 независимыми случайными величинами, получим формулу для определения первых двух моментов величины b_1 :

$$m_{b_1} = \frac{m_\tau}{m_{II}}; \sigma_{b_1} = \sqrt{\frac{m_{II}^2 \sigma_\tau^2 - m_\tau^2 \sigma_{II}^2}{m_{II}^2 (\sigma_{II}^2 + m_{II}^2)}}.$$

Вероятность безотказной работы в первом случае (если b распределено нормально):

$$P(I < I_{\text{пред}}) = R(t) = F_0 \left(\frac{I_{\text{пред}} - m(b)\tau}{\sigma_b \tau} \right).$$

Во втором случае следует выписать сначала цепочку неравенств:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(I < I_{\text{пред}}) = P\left(\frac{\tau}{b_1} < I_{\text{пред}}\right) = \\ &= P\left(\frac{\tau}{I_{\text{пред}}} < b_1\right) = P\left(b_1 > \frac{\tau}{I_{\text{пред}}}\right). \end{aligned}$$

Если b_1 распределено нормально, то

$$R(t) = F_0 \left(\frac{m(b_1) - \frac{\tau}{I_{\text{пред}}}}{\sigma_{b_1}} \right).$$

Пример. По данным об износах выбракованных шлицевых валов И и наработок t тракторов, поступающих в капитальный ремонт, установлено, что $m_I = 1,45$ мм, $m_t = 4545$ моточасов, $\sigma_I = 0,33$ мм, $\sigma_t = 1440$ моточасов, $v = 1$. Вычисляем коэффициенты вариации:

$$v_I = \frac{\sigma_I}{m_I} = 0,228; \quad v_t = \frac{\sigma_t}{m_t} = \frac{\sigma_t}{m_t} = 0,317,$$

откуда видно, что $v_t > v_I$. Поэтому следует пользоваться зависимостью (4.25). Вычисляем m_{b_1} и σ_{b_1} :

$$m_{b_1} = \frac{4545}{1,45} = 3134 \text{ моточасов/мм};$$

$$\sigma_{b_1} = \sqrt{\frac{(1,45)^2 \cdot 1440^2 - 4545^2 \cdot 0,33^2}{1,45^2 (0,33^2 + 1,45^2)}} = 674 \text{ моточасов/мм}.$$

Графики вероятности безотказной работы при трех значениях предельного износа: 0,7; 1,45 и 1,78 мм (кривые 1, 2, 3) приведены на рисунке 49.

Испытания по параметру нагруженности. При испытаниях машин зачастую измеряют нагруженность деталей, то есть тем или другим способом [31] фиксируют действующие переменные нагрузки в функции времени работы. Эти данные обычно используют для оценки усталостной прочности деталей. Как известно, усталость — это процесс накопления повреждений под действием переменных напряжений. Переменные напряжения характеризуются циклами. Типовые циклы нагружений показаны на рисунке 50, а. К ним приводят действительные сложные изменения напряжений в деталях

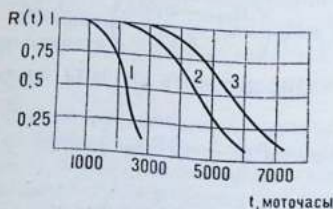
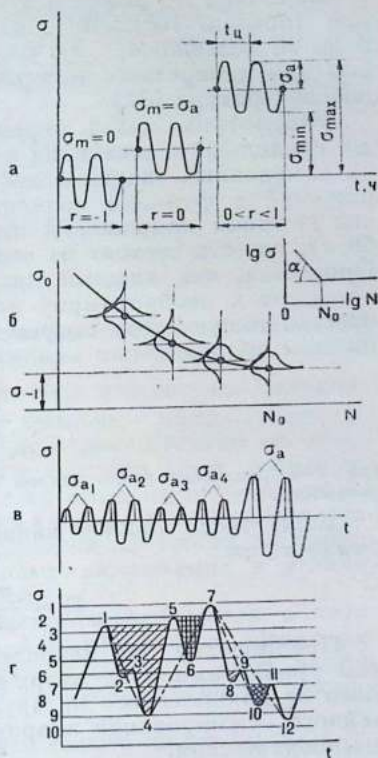


Рис. 49. Вероятности безотказной работы для шлицевых валов при:
1 — $I_{\text{пред}} = 0,7$ мм; 2 —
 $I_{\text{пред}} = 1,45$ мм; 3 —
 $I_{\text{пред}} = 1,78$ мм.

Рис. 50. Схемы к обработке данных испытаний «по параметру нагруженности»:

а — типовые циклы нагружения; б — кривая усталости в простых и логарифмических координатах; в — простейший цикл нагружения; г — приведение реального цикла к простейшему.



машин. Основные характеристики цикла: σ_a , $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, σ_m , $2\sigma_a$, r (амплитуда, максимальное, минимальное, среднее значения, размах, коэффициент асимметрии напряжения цикла r), $t_{\text{ц}}$ — период одного цикла [37].

Различают симметричный цикл ($r=1$), пульсирующий цикл ($r=0$), асимметричный цикл ($0 < r < 1$). Асимметричный цикл напряжений наиболее характерен для деталей сельскохозяйственной техники. В качестве основных характеристик сопротивления усталости принимают кривые усталости (рис. 50, б), параметры которых определяют или экспериментальным методом, или путем испытания детали в натуральной величину, или путем испытания стандартных образцов.

Усталостные кривые в пределах левой (ниспадающей) ветви хорошо описываются уравнениями вида:

$$\sigma_{ai}^m N_i = \sigma_{-1}^m N_0 = \text{const},$$

где σ_{ai} и N_i — соответственно текущие значения амплитуд напряжений и числа циклов; m — безразмерный коэффициент, равный котангенсу угла α наклона кривой усталости в логарифмических координатах; N_0 — базовое число циклов, соответствующее пределу усталости.

Величина N_0 лежит в пределах от 10^6 до $25 \cdot 10^7$ циклов (обычно $10^6 \dots 10^7$), величина m — в пределах от 3 до 20 (обычно $4 \dots 8$). Величины указанных параметров для конкретных материалов приведены в справочной литературе [37].

Рассмотрим метод определения наработки объекта до предельного состояния с помощью экспериментально замеренных значений действующих переменных напряжений в функции времени. Предположим сначала, что графики напряжений имеют простейший вид (рис. 50, в), то есть состоят из набора симметричных циклов. Принимая, что каждый цикл изменения напряжений приводит к необратимому повреждению детали, вводим относительную меру повреждения, наносимого одним циклом напряжения с амплитудой σ_a :

$$D = \frac{1}{N}, \quad (4.26)$$

где N — предельное число циклов при σ_a , определяемое по кривой усталости.

Если число циклов напряжений с амплитудой $\sigma_{a,i}$ равно n_i , то

$$D_i = \frac{n_i}{N_i}.$$

Предполагая, что накопление повреждений на каждом уровне амплитуд напряжений K протекает независимо от накопленного на других уровнях (гипотеза линейного суммирования напряжений), просуммируем меры повреждения:

$$D_{n_{\text{сум}}} = \sum_{i=1}^h D_i = \sum_{i=1}^h \frac{n_i}{N_i};$$

$$n_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^h n_i.$$

Пользуясь уравнением для кривой усталости исключим N_i и получим

$$D_{n_{\text{сум}}} = \frac{\sum_{i=1}^h n_i \sigma_{a,i}^m}{\sigma_{a,-1}^m N}.$$

Введем плотность распределения амплитуд $f(\sigma_{ai})$

$$f(\sigma_{ai}) = \frac{n_i}{n_{\text{сум}} d\sigma_{ai}}.$$

тогда

$$D_{n_{\text{сум}}} = \frac{n_{\text{сум}} \sum_{i=1}^k \sigma_{ai}^m f(\sigma_{ai}) d\sigma_{ai}}{\sigma_{-1}^m N_0} =$$

$$= \frac{n_{\text{сум}} \int_{\sigma_{a \min}}^{\sigma_{a \max}} \sigma_a^m f(\sigma_a) d\sigma_a}{\sigma_{-1}^m N_0} \quad (\text{при } d\sigma_{ai} \rightarrow 0; k \rightarrow \infty). \quad (4.27)$$

В формуле (4.27) учитываются амплитуды напряжений $\sigma_a \geq 0,5\sigma_{-1}$, поскольку меньшие напряжения не оказывают повреждающего действия. Расчеты по полученным формулам позволяют получать меру повреждения за $n_{\text{сум}}$ число циклов, и их выполняют путем обработки (измерения амплитуды каждого цикла, числа циклов данной амплитуды, построения плотности распределения амплитуд) осциллограмм напряжений в детали, полученных при эксперименте.

Осциллограммы напряжений записываются в течение некоторого времени $t_{\text{зап}} \ll T$, где T — наработка детали до предельного состояния. Поэтому мера напряжения $D_{n_{\text{сум}}}$ — выборочная величина, точность получения которой следует оценить.

Обозначим средний период одного цикла $t_{\text{ц}} = t_{\text{зап}} / n_{\text{сум}}$ и введем меру повреждения в единицу времени:

$$b_1 = \frac{D_{n_{\text{сум}}}}{t_{\text{зап}}} = \frac{\int_{\sigma_{a \min}}^{\sigma_{a \max}} \sigma_a^m f(\sigma_a) d\sigma_a}{t_{\text{ц}} \sigma_{-1}^m N_0}. \quad (4.28)$$

Для дальнейшего обозначим так:

$$b_1 = \frac{b}{\sigma_{-1}^m}. \quad (4.29)$$

За время t мера повреждения равна $D_t = b_1 t$. Из этого следует, что при $D_t = 1$ произойдет разрушение

детали. Следовательно, вероятность безотказной работы детали равна вероятности выполнения неравенства

$$\begin{aligned} R(t) &= P(D_t < 1) = P(b_1 t < 1) = P\left[\frac{b}{\sigma_{-1}^m} t < 1\right] = \\ &= P(bt < \sigma_{-1}^m) = P[(bt)^{1/m} < \sigma_{-1}] = \\ &= P[\sigma_{-1} - (bt)^{1/m} > 0]. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Предел усталости, как следует из предыдущего (рис. 50, б) — величина случайная. Пусть она распределена по усеченному нормальному закону:

$$f(\sigma_{-1}) = \frac{C}{\sqrt{2\pi}D_{\sigma_{-1}}} \exp\left[-(\sigma_{-1} - \bar{\sigma}_{-1})^2 / 2D_{\sigma_{-1}}\right];$$

$$\text{при } \sigma_{-1} \geq \sigma'_{-1} \quad f(\sigma_{-1}) = 0; \quad \text{при } \sigma_{-1} < \sigma'_{-1},$$

где σ'_{-1} — минимальное значение предела усталости,

$$C = \frac{1}{1 - F_0\left(\frac{\sigma'_{-1} - \bar{\sigma}_{-1}}{\sqrt{D_{\sigma_{-1}}}}\right)},$$

где F_0 — табулированная функция Лапласа [20].

Пусть из-за конечности выборки амплитуд напряжений величина $b^{1/m}$ распределена по нормальному закону с параметрами $M(b^{1/m})$ и $D(b^{1/m})$. Отметим, что увеличением времени записи процесса нагружения можно существенно уменьшить дисперсию $D(b^{1/m})$. Основная трудность при этом возникает при обработке осциллограмм. Однако если этот процесс автоматизирован, то, выбрав достаточное время записи, при котором число амплитуд напряжений лежит, как показывает опыт, в пределах 300...400 значений, можно считать параметр b постоянной величиной.

Теперь, пользуясь формулой (4.20) с учетом (4.30) и полагая в ней $I_{\text{пред}} = \sigma_{-1}$; $I = (bt)^{1/m}$, получим

$$R(t) = CF_0\left[\frac{\bar{\sigma}_{-1} - (bt)^{1/m}}{\sqrt{D_{\sigma_{-1}}}}\right]. \quad (4.31)$$

Если деталь установлена в машине, которая работает в различных режимах нагружения (пахота, культивация, транспортировка и т. д.), при вычислении па-

раметра b следует рассчитывать смешанную плотность распределения амплитуд:

$$f(\sigma_{a,см}) = \sum_{i=1}^{n_y} t_{отн.i} f(\sigma_{a,i}),$$

где n_y — количество отличающихся условий работы; $t_{отн.i}$ — доля времени работы машины в $i=x$ условиях; $f(\sigma_{a,i})$ — плотность распределения амплитуд напряжений в i -х условиях.

Неточность формулы для $R(t)$ теперь зависит лишь от того, насколько измеренный процесс изменения напряжений на участке времени $t_{зап}$ характеризует процесс нагружения за весь период работы объекта в данных условиях до предельного состояния, то есть от стационарности (однородности протекания во времени) процесса нагружения. Эту погрешность можно уменьшить, проводя повторные измерения нагрузок при различных наработках машины. Тогда по каждому изменению b при наработке t_i можно вычислить математическое ожидание и дисперсию величины $b^{1/m}$:

$$M(b^{1/m}) = \frac{\sum_{i=1}^n b_i^{1/m}}{n}; \quad D(b^{1/m}) = \frac{\sum_{i=1}^n [b_i^{1/m} - M(b^{1/m})]^2}{n-1},$$

и пользоваться общей формулой (4.31).

Все приведенные расчеты выполнены для простейшего процесса нагружения (рис. 50, в). Покажем, как к этому процессу привести процесс нагружения общего вида (рис. 50, г). Существует ряд методов приведения. Наиболее точный из них — метод полных циклов.

Приведение (его обычно называют систематизация) нагрузок по этому методу производится следующим образом. Рабочий диапазон изменения напряжений разбивают на несколько разрядов и нумеруют все экстремумы процесса (в нашем случае 12). Первоначально выделяют простые промежуточные циклы с минимальным размахом (двойная амплитуда) — это циклы с номерами 2, 3, 8, 9. Подсчитывают число этих циклов и исключают их из рассмотрения, в результате приходят к процессу, изображенному на рисунке 50, г пунктиром. Далее выделяют циклы, размах которых лежит в пре-

делах от одного до двух разрядов (цикл 10, 11). После исключения этого цикла приходят к процессу, изображенному штрихпунктирной линией на участке 7—12. Затем исключают цикл 5—6 и получают процесс, изображенный линией со звездочкой на участке 4—7. Затем исключают цикл 1—4, и остается один цикл 7—12.

Таким образом, устанавливают зависимость между уровнем амплитуд (половина размаха) напряжений и числом циклов их действия. По этим данным возможно определить плотность распределения амплитуд напряжений. Однако легко видеть, что выделенные каждый раз циклы напряжения имеют различные значения среднего напряжения цикла, то есть каждый выделенный цикл не симметричен, а асимметричен. Наличие асимметрии цикла можно учесть, прибавив к каждой амплитуде цикла слагаемое $\psi\sigma_{mi}$, где ψ — коэффициент влияния асимметрии цикла на усталостную прочность. Кроме того, следует учесть, что на усталостное разрушение детали влияют концентрация напряжений, масштабы детали и состояние поверхности. Все эти факторы учитывают умножением амплитуды напряжений на коэффициент K_{σ_d} . В результате приведения амплитуда напряжений:

$$\sigma_{a,пр,i} = \sigma_{ai} K_{\sigma_d} + \psi \sigma_{mi}.$$

Приведенная амплитуда может рассматриваться как амплитуда напряжений симметричного цикла, действующего в детали. Плотность распределения приведенных амплитуд $\sigma_{a,пр,i}$ теперь уже может использоваться для расчетов долговечности детали, вероятности безотказной работы и т. д.

Если деталь нагружена так, что в ней возникают нормальные и касательные напряжения, то есть имеет место плоское напряженное состояние, то по осциллограммам напряжений $\sigma(t)$ и $\tau(t)$ для каждого t рассчитывают процессы изменения приведенных напряжений

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2(t) + 3\tau^2(t)};$$

а затем проводится уже систематизация для σ по правилам, изложенным выше.

Пример. Пусть по результатам измерения нагруженности элемента (вала рычагов) механизма навески трактора при различных

режимах работы путем схематизации с приведением амплитуд определена величина $b = 234 \cdot 10^8$.

Среднее значение предела усталости σ_{-1} материала вала $\sigma_{-1} = 3500$ кг/см², а среднеквадратическое отклонение $\sqrt{D_{\sigma_{-1}}} = 350$ кг/см². Показатель степени кривой усталости $m = 4$.

Вероятность безотказной работы вала, считая, что предел усталости распределен нормально и $C = 1$, будет определяться из выражения:

$$R(t) = F_0 \left[\frac{3500 - (234 \cdot 10^8 t)^{1/4}}{350} \right] = \\ = F_0 \left[\frac{3500 - 391 t^{0,25}}{350} \right].$$

Медианный ресурс вала, определенный с помощью этой формулы, составляет 6420 ч.

До сих пор рассматривалось определение усталостной долговечности по результатам измерения нагруженности. Однако в некоторых случаях результаты измерения нагруженности можно использовать и для расчета износов деталей.

Пусть скорость изнашивания детали b — некоторая функция от случайных параметров нагружения и характеристик детали $b = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

В общем случае функция $\varphi(x)$ нелинейна. Полагая, что отклонения переменных невелики в сравнении с номинальными параметрами $(\bar{x}_i)$, разложим $\varphi(x)$ в ряд Тейлора и ограничимся первыми членами разложения. Получим

$$b = \varphi(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)_{\Delta x_i=0} \Delta x_i.$$

Учитывая, что $\Delta \bar{x}_i = 0$, $D(\Delta x_i) = D_{x_i}$, определим среднее значение и дисперсию скорости изнашивания:

$$b = \varphi(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n); \quad D(b) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right)^2 D_{x_i}.$$

Коэффициент вариации скорости изнашивания получим, деля второе равенство в степени $1/2$ на первое:

$$v(b) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right]^2 D_{x_i}}}{b} =$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\bar{x}_i}{\bar{b}} \right)^2 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}_i} \right)^2} v^2 x_i.$$

Полученные зависимости могут быть использованы следующим образом. Пусть в результате лабораторных испытаний установлена зависимость $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ и некоторые параметры этой зависимости могут быть изучены в лабораторных условиях. Тогда, измерив экспериментально характеристики эксплуатационных условий, можно расчетным путем определить рассеивание скорости изнашивания, тем самым существенно сократив время и объем испытаний.

Пример. Известно, что скорость абразивного изнашивания деталей определяется зависимостью:

$$b = K \frac{q}{\text{HB}},$$

где K — случайный коэффициент, определяемый в лабораторных условиях; q — удельное давление, определяемое по действующим силам, измеренным в эксплуатации; HB — твердость поверхности детали, определяемая на натуральных образцах.

Среднее значение скорости изнашивания:

$$\bar{b} = \bar{K} \frac{\bar{q}}{\text{HB}}.$$

Дисперсия скорости изнашивания:

$$D(b) = \left(\frac{\bar{q}}{\text{HB}} \right)^2 D_K + \left(\frac{\bar{K}}{\text{HB}} \right)^2 D_q + \left(\frac{\bar{K}\bar{q}}{\text{HB}^2} \right) D_{\text{HB}}.$$

Коэффициент вариации:

$$v(b) = \sqrt{v_K^2 + v_q^2 + v_{\text{HB}}^2}.$$

Как видим, для определения характеристик случайной скорости изнашивания при известных данных о коэффициенте K достаточно измерить средние и дисперсии усилий, действующих на деталь, и твердости ее поверхности. Формула для коэффициента вариации показывает вклад каждой составляющей в рассеивание скорости изнашивания.

§ 4. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Техническая диагностика машин — это научная дисциплина, обеспечивающая разработку методов и средств для получения достоверной инфор-

мации о настоящем и будущем техническом состоянии конкретной машины и ее составных частей. Она позволяет своевременно выявлять и предотвращать отказы и, следовательно, повышать надежность и эффективность эксплуатации, создавать предпосылки к переходу в эксплуатации технических систем от планово-предупредительной системы обслуживания к обслуживанию и ремонту по состоянию. При обслуживании по состоянию каждый экземпляр эксплуатируется до предельного состояния в соответствии с рекомендациями системы технической диагностики.

В настоящее время серийно изготавливают и повсеместно используют простые и достаточно надежные диагностические средства в виде передвижных установок, оборудования стационарных постов, комплектов переносных приборов и устройств. Правильное применение этих средств показало высокую технико-экономическую эффективность: например, уменьшение простоев тракторов в 2...2,5 раза, сокращение числа их ремонтов в 1,3...1,5 раза, увеличение фактической межремонтной наработки на 500 моточасов и др. [35].

Основные определения и задачи диагностики. Основные термины и определения технической диагностики регламентированы ГОСТ. Приведем некоторые из них в сокращенном варианте.

Техническое состояние — совокупность свойств объекта, характеризующая в определенный момент времени признаками (параметрами) состояния.

Диагностический признак (параметр) — признак (параметр), используемый для определения технического состояния объекта, косвенно характеризующий его работоспособность (температура, шум, вибрация, расход топлива, масла и др.).

Структурный параметр — параметр, непосредственно характеризующий работоспособность объекта (износ, размер детали, зазор, натяг в сопряжении и др.).

Реализация параметра — непрерывное изменение параметра состояния конкретного объекта диагностирования.

Обобщенный параметр — диагностический параметр, характеризующий техническое состояние нескольких составных частей машины.

Номинальное значение параметра — значение параметра, определяемое его функциональным назначением и служащее началом отсчета отклонений.

Допускаемое значение параметра — граничное значение параметра, с которым составную часть еще допускают к эксплуатации после контроля без операции технического обслуживания и ремонта, обеспечивающее надежную работу элемента до следующего планового контроля.

Предельное значение параметра — наибольшее или наименьшее значение параметра, которое может иметь работоспособная составная часть.

Алгоритм диагностирования — совокупность предписаний о проведении диагностирования.

Термин «диагностика» происходит от греческого слова диагнозис, что означает распознавание. В процессе технического диагностирования устанавливают диагноз, то есть определяют (распознают) состояние технической системы для принятия решения о необходимости профилактических или ремонтных работ. Основная особенность технической диагностики состоит в том, что распознавание состояния происходит в условиях ограниченной информации. Действительно, распознавая состояние индивидуального объекта, обычно пользуются безразборным методом, в противном случае это приводит к лишним затратам, если разборка выполнена преждевременно.

При безразборном диагностировании могут быть определены лишь диагностические, подчас обобщенные, а не конкретные структурные признаки (параметры) объекта. Вместе с тем работоспособность объекта характеризуется структурными параметрами. Поэтому, чтобы диагностировать состояние машины или ее составной части, необходимо установить связи (детерминированные или вероятностные) между диагностическими и структурными параметрами. Поскольку при диагностировании к распознаванию состояния предъявляют на момент диагностирования один образец, то эти связи принципиально можно установить лишь путем предварительного анализа аналогичных образцов диагностируемого объекта.

Таким образом, первая принципиальная отличительная особенность диагностики технического состояния — наличие предварительной (априорной) информации о

связях между диагностическими и структурными параметрами объекта в фиксированный момент времени.

Однако задача диагностики состоит в том, чтобы не только установить техническое состояние объекта, но и принять решение, является ли оно приемлемым для дальнейшей эксплуатации изделия или требуется применение профилактических и ремонтных работ.

Если параметры состояния достигли предельных значений, то решение очевидно, если же нет, то необходимо установить, когда это произойдет. В противном случае возникает потребность непрерывно определять техническое состояние изделия. Это возможно, и существует так называемая встроенная система диагностирования, которая непрерывно выдает информацию о техническом состоянии объекта. Она применяется либо в том случае, когда практическая ее реализация возможна простыми средствами (замер давления масла, температуры и др.), либо в особо ответственных случаях.

В большинстве случаев необходимо знать предполагаемую функциональную временную зависимость для диагностических параметров. Такую зависимость можно получить двумя способами: либо изучать предысторию для данного диагностируемого объекта, что снова требует встроенной системы диагностирования; либо предварительно собрать информацию о совокупности временных диагностических реализаций для аналогичных объектов и, сравнив их с результатами диагностики объекта в данный момент, принять ту или иную гипотезу о дальнейшем поведении параметров объекта диагностирования. Эту задачу обычно называют задачей индивидуального прогнозирования состояния объекта. Она тесно связана и с задачей определения оптимальной периодичности проведения диагностики.

Итак, вторая принципиальная отличительная особенность при дискретном (в отдельные моменты времени эксплуатации) диагностировании—необходимость иметь предварительные данные (априорную информацию) о реализациях диагностических параметров для аналогичных образцов.

Объединяя обе отличительные особенности, можно утверждать, что для диагностирования объекта необходимо иметь в общем случае априорную информацию о

диагностических параметрах (признаках) в пространстве параметров (признаков) и во времени.

Очевидно, что теоретически возможны и частные случаи. Если диагностический параметр и параметры состояния совпадают, то необходимость в априорном определении связей между ними отпадает и остается лишь априорная информация во времени. Если реализации диагностических параметров не имеют рассеивания от объекта к объекту, то априорная информация требуется в минимальном количестве и это позволяет достаточно строго предвидеть момент наступления предельного состояния, а значит, потребность в диагностировании во времени отпадает и остается лишь диагностика в пространстве параметров (признаков) для целенаправленного проведения профилактических и ремонтных работ.

Практически в «чистом» виде ни один из случаев не встречается.

На рисунке 51,а, изложенные ранее принципиально отличительные особенности диагностики технического состояния иллюстрируются в графической форме на примере двух параметров. Пусть x_1 и x_2 — диагностические параметры, характеризующие техническое состояние объекта, а t — время его эксплуатации. Области D_1, D_2 — соответственно заведомо исправное и неисправное состояние объекта. Между ними область неопределенного состояния. При $t=0$ объект находится в исправном состоянии ($A_0 \in D_1$).

Структурные параметры A_{10}, A_{20}, A_{30} не достигли предельных значений либо лежат в неопределенной зоне. При $t=t_d$, где t_d — момент диагностирования, диагностический параметр может находиться в области неопределенного состояния. Необходимо провести определение всех структурных параметров (A_{11}, A_{21}, A_{31}) и распознать изменение во времени реализаций диагностического параметра $A_0 \rightarrow A_1(t_d) \rightarrow A'_2(t)$ или $A_0 \rightarrow A_1(t_d) \rightarrow A''_2(t)$ и т. д.

Удобство расчленения диагностики технического состояния на две составляющие: диагностика в пространстве признаков и во времени (индивидуальное прогнозирование) состоит в том, что применяемые математические методы здесь различны. В первом случае — вероятностные, во втором — вероятностно-детерминированные.

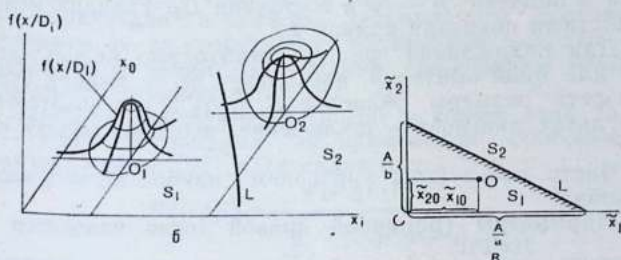
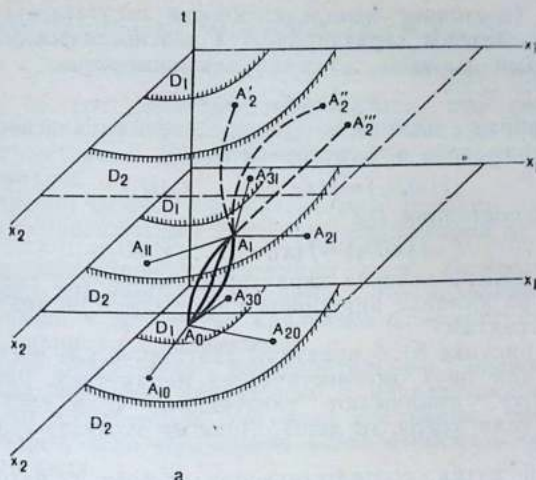


Рис. 51. Схемы, иллюстрирующие изменения диагностических параметров:

a — в пространстве признаков во времени; $б$ — в пространстве признаков; $в$ — в областях исправного и неисправного состояния.

Вероятностные методы диагностирования. Первая задача, возникающая при диагностировании в пространстве признаков, состоит в том, чтобы после измерения диагностических параметров установить, находится ли объект в исправном или неисправном состояниях. Решим ее. Будем считать, что объект может иметь только два состояния: исправное D_1 и неисправ-

ное D_2 (состояние неопределенности отсутствует). Состояние системы характеризуется диагностическими параметрами $x_1, x_2, \dots, x_n$ или вектором x :

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

Условная плотность распределения диагностических параметров для состояния D_1 :

$$f(x/D_1) = f(x_1, x_2, \dots, x_n/D_1).$$

Для состояния D_2 :

$$f(x/D_2) = f(x_1, x_2, \dots, x_n/D_2).$$

Эти статистические характеристики можно получить только из анализа априорной информации по аналогичным объектам.

На рисунке 51,б показаны статистические распределения для двух диагностических параметров. Решение (диагноз) принимают следующим: если $x \in S_1$, то $x \in D_1$; если $x \in S_2$, то $x \in D_2$. Знак $\in$ означает «принадлежит».

Если точка, соответствующая вектору x , находится в области S_1 , то объект относится к состоянию D_1 ; если в области S_2 — то в состоянии D_2 . Граница между областями показана кривой L .

Для нахождения границы необходимо использовать тот или иной критерий, поскольку от ее выбора будут зависеть размеры областей S_1 и S_2 и, следовательно, результат диагноза — заключение: исправен объект или нет.

Часто пользуются критерием наибольшего правдоподобия.

Параметры граничной кривой тогда находятся из условия $\frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} = 1$, а правило решения о принадлежности объекта к исправному или неисправному состоянию имеет вид:

$$\text{если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} > 1, \text{ то } x \in D_1; \quad (4.32)$$

$$\text{если } \frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)} < 1, \text{ то } x \in D_2. \quad (4.33)$$

Для двух нормально распределенных независимых параметров x_1 и x_2 граничная линия и области S_1 и S_2 показаны на рисунке 51,в. Например, если при диаг-

ности определены параметры x_{10} и x_{20} , то, отметив точку с координатами $\tilde{x}_{10}$ и $\tilde{x}_{20}$ в системе координат $\tilde{x}_1$ и $\tilde{x}_2$ (см. рис. 51, в), убеждаемся, что состояние объекта исправное. Если бы точка попала в область S_2 , то состояние объекта диагностировалось бы как неисправное.

Отметим важное обстоятельство: решение принимают не по абсолютным значениям параметров x_1 и x_2 , а по их безразмерным значениям $\tilde{x}_1$, $\tilde{x}_2$ (отнесенным к среднеквадратичным значениям), что позволяет рассматривать пространство признаков (параметров) различной природы и размерности.

Итак, используя предварительную информацию относительно связи параметров с исправным и неисправным состояниями, получили граничные значения параметров, после чего можно диагностировать объекты данного вида.

Вторая задача, возникающая при диагностировании, состоит в том, чтобы при выходе диагностических параметров в область неисправного состояния определить те из структурных параметров, которые являются источниками (причинами) полученного результата диагностирования.

Наиболее эффективный способ решения этой задачи — способ, основанный на применении обобщенной формулы Байеса [20]. Она имеет вид:

$$P(D_i/K) = \frac{P(D_i)P(K/D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K/D_s)},$$

где $K(K_1, K_2, \dots, K_v)$ — вектор признаков; D_i — состояния, определяемые структурными параметрами.

Для независимых признаков

$$P(K/D_i) = P(K_1/D_i)P(K_2/D_i) \dots P(K_v/D_i),$$

где $P(D_i)$ — априорная вероятность состояния объекта (по структурным параметрам); $P(K_v/D_i)$ — априорная вероятность появления признака K_v при состоянии D_i .

Априорные вероятности определяют по результатам обработки информации об объектах вида, подлежащего диагностированию с помощью расчетных формул:

$$P(D_i) = N_i/N,$$

где N — общее число обследованных объектов; N_i — число объектов из общего числа, у которых было состояние D_i .

$$P(K_v/D_i) = \frac{N_{iv}}{N_i},$$

где N_{iv} — число объектов среди имевших состояние D_i , у которых появился признак K_v ; $P(D_i/K)$ — вероятность состояния D_i после появления комплекса признаков K .

Эта вероятность названа апостериорной (послеопытной) вероятностью состояния D_i . По ее величине судят о выходе структурных параметров объекта за допустимые значения.

Вероятностно-детерминированные методы диагностики. Реальный процесс изменения во времени физических параметров состояния элементов машин носит случайный характер, который обусловлен наличием значительного числа факторов. Их можно классифицировать на две группы: внутренние (качество изготовления, сборки, обкатки и др.) и внешние (почвенно-климатические, рельеф местности, нагрузки, качество проведения обслуживания, ремонта и т. д.).

В результате для одноименных элементов параметры состояния представляют собой совокупность ломаных возрастающих (убывающих) кривых, отличающихся друг от друга скоростью изменения параметра (рис. 52,а). Ломаные кривые обычно усредняют, получая совокупность плановых кривых. Скорость изменения параметра обуславливает случайную природу наступления отказа элемента машины. В реальных условиях эксплуатации она имеет значительное рассеивание (рис. 52,б). В зависимости же от структуры элемента меняется характер изменения самой реализации параметра состояния.

По достижении параметром состояния предельной величины наступает отказ элемента. При этом часто предполагают, что существует полное соответствие, жесткая связь между объективной потерей работоспособности элемента и моментом достижения его параметром предельной величины. В действительности это не так.

Связь между предельным отклонением параметра и отказом имеет вероятностный характер, то есть имеется зона (или область) предельных значений, в которой элемент отказывает (ранее она обозначалась: неисправное состояние D_2 , в отличие от исправного D_1). На ри-

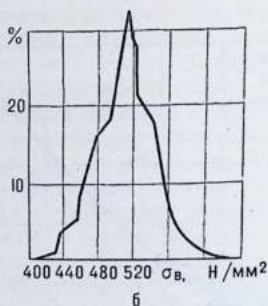


Рис. 53. Распределение предельных значений параметров состояния:

а — зазоров подшипников 11206; б — пределов прочности углеродистой стали.

чайное изменение параметров состояния функцией вида:

$$I(t) = V_c t^\alpha + Z + I_1,$$

где I_1 — величина, характеризующая приработку элемента, численно равная значению параметра при $t=0$, обеспечивающая хорошую аппроксимацию изменения параметров состояния от конца приработки до момента достижения величины $I_{\text{пред}}$ (предельное значение параметров); α — показатель степени, определяющий характер изменения параметра состояния (для одного вида элемента величина постоянная); V_c — случайная величина для одного вида элемента, характеризующая (при $t=1$) случайную скорость изменения параметра состояния для этого вида элемента; Z — откло-

нение величины И под воздействием внешних случайных факторов (непрерывная случайная величина).

Показатели V_c , α , Z , И определяют на основании обработки предшествующей информации об изменениях реализаций параметров состояния (или диагностических параметров) для одного вида элементов машин. Накопление такой информации для различных видов элементов машин позволяет в последующем их диагностировать. Методика обработки экспериментальных данных для определения указанных выше показателей изложена в [34], [35].

Обработав ряд реализаций, можно получить набор значений V_{c_k} и α_k ($k=1, 2, \dots, m$). По ним определяют законы распределения α , V_c , их средние значения и среднеквадратические отклонения. Обычно, как указывалось, среднеквадратические отклонения α для элемента одного наименования малы и этот параметр принимается не случайным (от 0,5 до 2 в зависимости от типа элемента [35]). Случайностью V_c пренебречь нельзя. Варьируя значениями V_c в пределах полученного закона распределения, можно построить семейство реализаций параметров состояния одного вида элементов.

Задача диагностики технического состояния состоит в том, чтобы распознать, какая из реализаций, полученных по предшествующей информации, отвечает данному конкретному диагностируемому объекту. С этой целью проводится одноразовое измерение параметров в момент $t=t_m$, после чего определяется параметр V_{c_m} (α известно):

$$\overline{V_{c_m}} = \frac{I(t_m) - I_1}{t_m}.$$

Теперь

$$I(t) = [I(t_m) - I_1] \left[\frac{t}{t_m} \right]^\alpha.$$

Полагая $I(t) = I_1 + I_{пред}$, определим наработку до предельного состояния:

$$T = t_m \left[\frac{I_1 + I_{пред}}{-I_1 \quad I(t_m)} \right]^{1/\alpha}.$$

Остаточный ресурс, то есть ресурс до предельного состояния, отсчитанный от момента диагностирования,

$$t_{\text{ост}} = T - t_{\text{м}} = t'_{\text{м}} \left[\left(\frac{I_1 + I_{\text{пред}}}{I(t_{\text{м}}) - I_1} \right)^{1/\alpha} - 1 \right].$$

Индивидуальное прогнозирование можно использовать для построения методики диагностирования по допустимому параметру.

Пусть назначено время проведения диагностики при наработке $t_{\text{м}}$. Требуется определить $\bar{I}(t_{\text{м}})$ — такое значение диагностического параметра (допустимое значение параметра), при котором объект еще проработает до предельного состояния наработки $\bar{t}_{\text{ост}}$.

Подставляя в последнюю формулу $t_{\text{ост}} = \bar{t}_{\text{ост}}$; $I(t_{\text{м}}) = \bar{I}(t_{\text{м}})$, и решая относительно $I(t_{\text{м}})$, получим

$$\bar{I}(t_{\text{м}}) = I_1 + (I_1 + I_{\text{пред}}) \left[\frac{t_{\text{м}}}{t_{\text{м}} + t_{\text{ост}}} \right]^{\alpha}.$$

При $\bar{I}(t_{\text{м}}) > I(t_{\text{м}})$ элемент выбраковывается, при $I(t_{\text{м}}) < \bar{I}(t_{\text{м}})$ остается в эксплуатации.

Важный вопрос индивидуального прогноза — точность прогнозирования. Действительно, если в момент $t_{\text{м}}$ параметр состояния при диагностике определен с ошибкой Z относительно истинного значения, то с ошибкой будет определен и параметр $V_{\text{с}}$ (рис. 52, а), и прогноз будет осуществляться по «ложной» реализации, и с ошибкой будет определен и ресурс до предельного состояния, и остаточный ресурс. Пусть по предшествующим исследованиям определена среднеквадратичная ошибка нормального отклонения опытных данных от аппроксимирующего выражения реализации параметра:

$$\sigma_{\text{И}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{10}(t_i) - V_{\text{с}}^{\alpha})^2}{n-1}}.$$

Тогда минимальная наработка до предельного состояния, соответствующая вероятности β ,

$$\min(T_{\beta}) = t_{\text{м}} \left(\frac{I_1 + I_{\text{пред}}}{I(t_{\text{м}}) + t_{\beta} \sigma_{\text{пред}} - I_1} \right)^{1/\alpha}.$$

Минимальный остаточный ресурс, соответствующий вероятности β , будет:

$$\min(t_{\text{ост}, \beta}) = t_m \left[\left(\frac{I_1 + I_{\text{пред}}}{I(t_m) + l_{\beta} \sigma_n - I_1 t} \right) \right]^{1/\alpha} - 1 \Big].$$

Здесь l_{β} — двухсторонняя квантиль нормального распределения.

Пример. В процессе диагностирования установлен износ детали 0,4 мм после наработки 2,5 тыс. моточасов. Предельный износ детали составляет 0,7 мм. На основании предшествующей информации известно, что $\alpha=1,3$, $\sigma_n=0,028$ мм, $I_1=0$. Определить средний и 90%-ный остаточные ресурсы:

$$t_{\text{ост}} = 2500 \left[\left(\frac{0,7}{0,4} \right) \right]^{\frac{1}{1,3}} - 1 \Big] = 1350 \text{ ч};$$

$$\min(t_{\text{ост}, \beta}) = 2500 \left[\left(\frac{0,7}{0,4 + 1,64 \cdot 0,028} \right) \right]^{\frac{1}{1,3}} - 1 \Big] = 1036 \text{ ч}.$$

Как видим, несмотря на малое рассеивание износа относительно аппроксимирующей функции (коэффициент вариации при $t_m=2500$ ч равен $v_n=0,07$), остаточный ресурс уменьшился на 23%. В этом проявляется неточность прогноза. Необходимо также отметить и то, что с уменьшением отношения t_m/T точность прогноза уменьшается, поскольку вклад слагаемого $l_{\beta} \sigma_n$ в сравнении с $I(t_m)$ увеличивается. Пользуясь полученной зависимостью, можно устанавливать и время диагностирования t_m , при котором обеспечивается приемлемая точность прогнозов.

До сих пор были рассмотрены методы диагностирования, основанные на соображениях точности получения результатов. Однако большее значение для задач диагностики имеют и экономические соображения. Рекомендации с их учетом приведены в [34, 35].

Практика технической диагностики. Диагностирование представляет собой один из важнейших элементов технического обслуживания и должно проводиться при всех видах обслуживания и текущем ремонте. Задачи диагностирования при техническом обслуживании состоят в том, чтобы установить:

а) причины отказа машины при работе;

б) необходимость регулировки или замены отдельных сопряжений, деталей, материалов при проведении очередного технического обслуживания;

в) необходимость отправки сборочных единиц, агрегатов и машин в целом на специализированное ремонтное предприятие для проведения капитального ремонта или в мастерские общего назначения для проведения текущего ремонта.

Задача диагностирования при ремонте машин в мастерских общего назначения или на станции технического обслуживания состоит в определении деталей и сборочных единиц, подлежащих замене, а также в оценке качества работ.

Задача диагностирования на специализированном ремонтном предприятии заключается в оценке качества ремонтных работ.

Диагностирование проводят специально подготовленные мастера-слесари-диагносты или мастера-наладчики.

В бригадах хозяйств, как правило, проводят общее диагностирование по обобщенным параметрам (мощность двигателя, производительность, экономичность, качество работы машины, ее сборочных единиц и агрегатов), с тем чтобы регулировками восстановить их номинальные значения.

На станциях технического обслуживания и в центральных мастерских проводят как общее, так и поэлементное (углубленное) диагностирование для оценки и более полного использования межремонтного ресурса сборочных единиц и агрегатов машины. Общее и поэлементное диагностирование следует проводить в определенной последовательности, что обеспечивает резкое уменьшение трудоемкости работ. Очередность поиска станавливают в соответствии с невозрастающей последовательностью отношений:

$$\frac{P_1}{B_1} \geq \frac{P_2}{B_2} \geq \dots \geq \frac{P_n}{B_n},$$

где P_i и B_i — вероятность отказа и стоимость (трудоемкость) проверки i -го элемента.

Для диагностирования разрабатывают систему диагностических средств — комплекс измерительных и вспомогательных устройств.

Развитие диагностических средств идет в следующем направлении [35]: субъективные методы диагностирования — приборы на основе механических средств измерения — комплект приборов на основе механических и электронных средств измерения — комплект диагностических датчиков с универсальным измерительным устройством — автоматизированная система диагностирования — автоматическая система диагностирования.

§ 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Контроль качества и надежности техники при изготовлении и ремонте — один из основных методов обеспечения ее работоспособности в эксплуатации.

В процессе производства действуют факторы, которые приводят к понижению надежности изготовленных объектов. Эти факторы можно условно подразделить на две группы. Первая группа — грубые нарушения норм технологического процесса, выражающиеся в виде ошибок монтажа, скрытых дефектов в комплектующих изделиях. Вторая группа — непредусмотренные частичные изменения первоначальных свойств элементов и материалов, понижающих их надежность.

Дефекты первой группы обнаруживают путем полной проверки системы на соответствие ее параметров требованиям технических условий (ТУ). Контроль дефектов второй группы — это контроль надежности системы, и он во многих случаях связан с существенной выработкой ресурса или даже с разрушением контролируемых изделий.

Если контроль прост и стоимость его невелика, то используют так называемый сплошной контроль (проверяют все изделия). В результате контроля изделие не разрушается. Обычно при контроле надежности применяют так называемый выборочный (статистический) контроль, поскольку требуется разрушение изделия. При выборочном контроле проверяют часть из партии изделий (выборка), и по ней принимается заключение о надежности всей партии.

Различают два вида статистического выборочного контроля надежности: контроль по альтернативному признаку и контроль по количественному признаку.



Рис. 54. Структурная схема контроля надежности.

При контроле по альтернативному признаку все изделия в выборке разбиваются на две группы: годные и дефектные. Оценку надежности партии проводят по доле дефектных изделий в общем числе проверенных изделий. Испытания проводят в течение заданного времени, при этом фиксируют только число изделий, отказавших за это время. Отказавшие изделия считаются дефектными, не отказавшие — годными.

При контроле по количественному признаку у каждого изделия при испытаниях определяют один или несколько параметров и оценку партии проводят по статистическим характеристикам распределения этих параметров. При испытаниях, например, на долговечность

все изделия выборки доводят до отказа, фиксируют наработку каждого из них, а затем, анализируя статистические характеристики наработки, устанавливают соответствие всей партии нормативам надежности.

Контроль по альтернативному признаку и по количественным показателям можно выполнять несколькими методами (рис. 54): однократной выборкой, многократной выборкой и последовательным контролем. Ниже рассмотрим контроль по альтернативному признаку методом однократной выборки, а по количественному признаку однократной выборкой и последовательным контролем (жирные стрелки на рисунке 54).

Контроль по альтернативному признаку. Основная характеристика контролируемой партии — доля дефектных изделий в партии:

$$q = \frac{M}{N}$$

где M — число дефектных изделий в партии; N — общее число изделий в партии.

Рассмотрим случай одноступенчатого выборочного контроля. План контроля характеризуется объемом выборки n и приемочным числом c , то есть из партии отбирается случайная выборка, состоящая из n изделий, и если в этой выборке обнаружено m дефектных изделий, то партию принимают при условии, что m меньше или равно c , в противном случае партию бракуют.

Вероятность приемки партии по выборке зависит от доли q дефектных изделий в партии. Чем меньше q , тем вероятность приемки партии выше и, наоборот, с увеличением q вероятность приемки партии уменьшается. Зависимость $P(q)$ называют оперативной характеристикой контроля (рис. 55, а). По определению

$$P(q) = P(m \leq c),$$

где $P(m \leq c)$ — вероятность того, что в выборке n число дефектных изделий m меньше c .

Зададим границы вероятности приемки партии: верхний уровень $(1-\alpha)$ и нижний уровень β (см. рис. 55, а), которым соответствуют доли дефектных изделий:

$$P(q_0) = 1 - \alpha;$$

$$P(q_m) = \beta.$$

Величина q_0 называется приемочным уровнем качества, а q_m — браковочным уровнем качества.

Поскольку $(1-\alpha)$ — вероятность приемки, то α — вероятность забраковать партию с приемочным уровнем

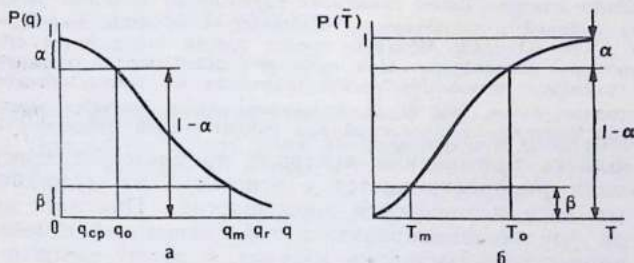


Рис. 55. Оперативные характеристики контроля:

а — по альтернативному признаку; б — по количественному показателю.

качества q_0 . Эта вероятность называется риском изготовителя. Тогда β — вероятность принять партию с браковочным уровнем качества q_m называют риском потребителя.

Вероятности α и β обычно выбирают малыми ($\alpha \approx \beta \approx 0,1$), q_0 и q_m должны удовлетворять условиям (см. рис. 55, а):

$$q_0 \geq q_{\text{ср}}; \quad q_m \leq q_r,$$

где $q_{\text{ср}}$ — средняя доля дефектных изделий в нормально изготовленной партии; q_r — предельное значение.

Для малых выборок ($n < 0,1 N$) и малых долей дефектных изделий в партии ($q \leq 0,1$) вероятность $P(q) = e^{-nq}$.

Теперь $P(q_0) = e^{-nq_0} = 1 - \alpha$; $P(q_m) = e^{-nq_m} = \beta$.

Задавая риск изготовителя α и риск потребителя β , можно рассчитать при заданном q_m необходимый объем выборки n изделий, которые следует испытать в заданное время и не получить ни одного отказа, а также приемочный уровень q_0 .

Пример. Дано $\alpha = \beta = 0,1$. Тогда $nq_0 = 0,105$, $nq_m = 2,3$. Ориентируясь на браковочный уровень $q_m = 0,2$, получим

$$n_m = \frac{2,3}{0,2} = 11,5.$$

При этом обеспечивается приемочный уровень

$$q_0 = \frac{0,105}{11,5} = 0,01.$$

Итак, при контроле надежности следует испытать в течение гарантированного ресурса 11...12 изделий и не иметь при этом ни одного отказа. Такие испытания гарантируют 80%-ный ресурс партии изделий в эксплуатации в количестве не менее $\bar{N} = n/0,1 = 110...120$ изделий. Верхний предел партии определяется стабильностью производства. При высокой стабильности и однократности выборки результаты распространяются на партию объемом существенно выше, чем N . В противном случае требуется периодический контроль выпускаемой или ремонтируемой продукции.

Область применения контроля по альтернативному признаку распространяется в основном на малогабаритные детали массового производства. При этом на те, где трудно фиксировать в ходе испытаний изменения параметров состояния изделия, и проще контролировать непосредственно отказ. К таким деталям относятся пружины, сальники, подшипники, прокладки и т. д.

Контроль по количественному признаку. Рассмотрим случай, когда у каждого контролируемого изделия выборки n определяют один параметр, например наработку до отказа T_i . В качестве контролируемого параметра партии изделий служит средняя наработка до отказа $\bar{T}$. Закон распределения наработки до отказа полагаем нормальным с параметрами:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}.$$

Среднеквадратическое отклонение средней выборочной наработки до отказа [29]:

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Обозначим через T_0 величину средней наработки до отказа, при которой партия должна приниматься с вероятностью $1-\alpha$, а через T_m соответственно с вероятностью β . При этом $T_0 > T_m$. Для контроля необходимо определить объем выборки n и приемочный норматив T^* . Если $\bar{T} \geq T^*$, то партия принимается, в противном случае бракуется. Вероятность приемки партии в соответствии с оперативной характеристикой (рис. 55, б):

$$P(T) = P(\bar{T} > T^*).$$

Риск изготовителя и потребителя:

$$1 - \alpha = P(T_0); \\ \beta = P(T_m).$$

Для нормального закона

$$P(\bar{T} > T^*) = F_0 \left(\frac{\bar{T} - T^*}{\sigma/\sqrt{n}} \right),$$

где F_0 — табулированная функция Лапласа [20].

Определим теперь риск изготовителя α и потребителя β . Из рисунка 55, б имеем:

$$1 - \alpha = F_0 \left(\frac{T_0 - T^*}{\sigma/\sqrt{n}} \right);$$

$$\beta = F_0 \left(\frac{T_m - T^*}{\sigma/\sqrt{n}} \right).$$

Введя квантили нормального распределения $I_{1-\alpha}$ и $I_{1-\beta}$, получим объем выборки:

$$n = \frac{\bar{\sigma}^2}{(T_0 - T_m)^2} [I_{1-\alpha} + I_{1-\beta}]^2.$$

Приемочный норматив определим из условия превышения минимального допустимого уровня средней нагрузки до отказа, при котором партия должна приниматься с вероятностью, не большей β :

$$\bar{T} \geq T^* = T_m + I_{1-\beta} \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}.$$

Приведенные формулы справедливы для $n \geq 15 \dots 20$. При малом числе объектов выборки следует уточнить величины квантилей.

Пример. Дано $T_m = 0,8 T_0$; $\bar{\sigma} = 0,3 T_0$; $\alpha = \beta = 0,1$. Определить n и T^* . Имеем $I_{0,9} = 1,28$;

$$n = \frac{0,09}{(1 - 0,8)^2} [2,56]^2 = 15; \quad T^* = 0,8 T_0 + 1,28 \frac{0,3 T_0}{\sqrt{15}} = 0,9 T_0.$$

Если найденное по 15 наблюдениям среднее время до отказа $\bar{T} > T^*$, то партию принимают с вероятностью $\beta = 0,1$.

Пусть $T_0 = 5000$ ч. Тогда $T_m = 4000$ ч. $T^* = 4500$ ч.

При этом длительность испытаний должна быть $(1,5 \dots 2) T_0$, если они проводятся до отказа всех 15 изделий.

Последовательный контроль. Метод последовательного контроля не устанавливает заранее число изделий, которые следует поставить на испытания, а их берется столько, сколько требуется для принятия решения: удовлетворяет партия объектов техническим условиям или нет. Метод основан на применении формулы Байеса для двух состояний [20].

Пусть состояние D_1 — удовлетворение техническим условиям, а состояние D_2 — неудовлетворение им. Тогда если после проведения некоторых испытаний и появления комплекса признаков имеет место неравенство:

$$\frac{P(K/D_2)}{P(K/D_1)} > \frac{1-\beta}{\alpha}. \quad (4.34)$$

Объект относится к состоянию D_2 , то есть не удовлетворяет требованиям; при

$$\frac{P(K/D_2)}{P(K/D_1)} < \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (4.35)$$

объект относится к состоянию D_1 , то есть удовлетворяет требованиям.

Если

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \frac{P(K/D_2)}{P(K/D_1)} < \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (4.36)$$

то решение принять нельзя: признаков (опытов) проведено недостаточно, испытания следует продолжить, α, β — риски изготовителя и потребителя.

Запишем расчетные формулы метода последовательного анализа для контроля объекта по среднему времени работы до отказа ($\bar{T}$). При этом полагаем, что распределение времени до отказа каждого элемента выборки подчиняется нормальному закону.

Введем параметры законов $\bar{T}_1, \sigma_1, \bar{T}_2, \sigma_2$, отвечающие двум граничным случаям: удовлетворение ТУ (индекс 1) и неудовлетворение (индекс 2). Признак один — наработка до отказа, но испытываются объекты последовательно один за другим, так что в результате получим значения $T_1, T_2, \dots$

Условие продолжения испытаний:

$$\ln \frac{\beta}{1-\alpha} < n \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_i - \bar{T}_1}{\sigma_1} \right)^2 - \left(\frac{T_i - \bar{T}_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] < \ln \frac{1-\beta}{\alpha}.$$

Условие неудовлетворение ТУ имеет вид:

$$n \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_i - \bar{T}_1}{\sigma_1} \right)^2 - \left(\frac{T_i - \bar{T}_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] > \ln \frac{1-\beta}{\alpha}.$$

Условие удовлетворение ТУ будет:

$$n \ln \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_i - \bar{T}_1}{\sigma_1} \right)^2 - \left(\frac{T_i - \bar{T}_2}{\sigma_2} \right)^2 \right] < \ln \frac{\beta}{1-\alpha}.$$

Метод последовательного контроля существенно сокращает число объектов испытаний, так как позволяет в процессе контроля принимать решение о прекращении испытаний.

С помощью полученных формул последовательного контроля можно проводить контроль не только по сред-

ней наработке изделия, но и по другим параметрам, например, по средней скорости износа.

Пример. Заданы параметры нормального распределения скоростей изнашивания детали при ускоренных испытаниях для удовлетворения и неудовлетворения ТУ.

$$\alpha = \beta = 0,1.$$

$$V_1 = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}; \quad \sigma_1 = 0,18 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}.$$

$$V_2 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}; \quad \sigma_2 = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}.$$

$$\text{Вычислим границы} \quad \ln \frac{1-\beta}{\alpha} = 2,2; \quad \ln \frac{\beta}{1-\alpha} = -2,2.$$

Проведено две серии опытов (для двух партий). В первой серии (для первой партии) имеем $V_1^{(1)} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}$.

Подсчитаем отношение правдоподобия для

$$\ln \frac{0,18}{0,6} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2,1-1,04}{0,18} \right)^2 - \left(\frac{2,1-5,4}{0,6} \right)^2 \right] = 1,01,$$

следовательно $-2,2 < 1,01 < 2,2$.

Испытания следует продолжить. Результат следующего испытания $V_2^{(1)} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}$.

Подсчитаем отношение правдоподобия в этом случае:

$$\begin{aligned} & 2 \ln \frac{0,18}{0,6} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2,1-1,04}{0,18} \right)^2 - \left(\frac{2,1-5,4}{0,6} \right)^2 \right] + \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{2,2-1,04}{0,18} \right)^2 - \left(\frac{2,2-5,4}{0,6} \right)^2 \right] = 6,35 > 2,2. \end{aligned}$$

Партия бракуется.

Для второй партии результаты первого опыта были $V_1^{(2)} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}$, то есть также требовалось продолжить испытания. Второй опыт дал результат $V_2^{(2)} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ мм/ч}$.

Отношение правдоподобия для двух опытов равно $(-5,69) < (-2,2)$, то есть партия удовлетворяет ТУ.

Глава 5

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

§ 1. ТРЕБОВАНИЯ К РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Несмотря на то что в области тракторного и сельскохозяйственного машиностроения проведен целый комплекс конструкторско-технологических мероприятий по повышению технического уровня выпускаемой сельскохозяйственной техники, особенно в части ее безотказности и долговечности, для многих новых машин промышленностью еще недостаточно решаются такие элементы надежности, как ремонтпригодность и сохраняемость. Особенно велики еще затраты времени на техническое обслуживание.

По основным показателям надежности — безотказности и долговечности машины, подвергнутые ремонту, резко отличаются от новых. Так, межремонтные сроки службы многих тракторов после ремонта иногда составляют в среднем всего 40...60 % новых, а иногда 80 %.

Если учесть, что в составе машинно-тракторного парка совхозов, колхозов и других сельскохозяйственных предприятий отремонтированные машины занимают 75...80 %, ремонтпригодность как составная часть качества и надежности машин должна рассматриваться как одно из важнейших требований к современной технике.

Улучшение ремонтпригодности сельскохозяйственной техники в общем плане решается следующими приемами: сокращением многомарочности машин: обеспечением конструктивной законченности и отделимости агрегатов в машинах и сборочных единиц в агрегатах; максимальной унификацией деталей и сборочных единиц; обеспечением быстроизнашивающихся поверхностей (особенно в базовых деталях) легкоосъемными и

сменными деталями (кольцами, втулками, стаканами); обеспечением возможно большей равнопрочности деталей в сборочных единицах, сборочных единиц в агрегатах, агрегатов в машинах; возможностью и доступностью технической диагностики агрегатов без снятия их с машин и полной разборки; всемерным сокращением потребности машин в техническом обслуживании (особенно в части смазки, регулировки и др.); улучшением приспособленности машин к техническому обслуживанию, хранению и др.

Конкретные требования ремонтпригодности к тракторам и другим сельскохозяйственным машинам разработаны ГОСНИТИ. Подготовлен проект Государственного стандарта на ремонтпригодность. Каждая новая конструкция трактора (машины) обязательно подлежит оценке на ремонтпригодность.

В качестве конкретных требований ремонтпригодности, предъявляемых к сельскохозяйственной технике, приведем следующие.

Требования при хранении и транспортировке: минимум затрат труда и средств на подготовку к хранению и к работе (после хранения); сопровождение машины перечнем операций, необходимых при подготовке к хранению и транспортировке; обеспечение машин необходимыми подставками, подъемными устройствами и др.; создание условий, предупреждающих коррозию резьбовых соединений деталей и скопление на них влаги, рабочих отходов, пыли и т. д.; предупреждение разрушения при хранении (транспортировке) электропроводки, приборов и других устройств; возможность легкого демонтажа агрегатов, сборочных единиц и деталей, которые при транспортировке (хранении) могут повреждаться; длительная сохраняемость на машинах инструктивных указаний, таблиц смазки и др.

Конкретными оценочными показателями приспособленности сельскохозяйственной техники к хранению (транспортировке) служат время (ч) и трудоемкость (чел.-ч) подготовки трактора (машины) или его агрегатов к хранению (транспортировке), а также количество крепежных соединений, которые могут подвергаться коррозии.

Требования при техническом обслуживании и смазывании: обеспеченность машины инструкциями об операциях технического обслуживания, сроках их выполне-

ния и технологической последовательности; доступность для сельскохозяйственного производства и минимум марок топлив и смазочных материалов; применение одноразовых смазок; ограниченное количество мест смазки и доступность их при техническом обслуживании; возможно более длительная периодичность и кратность проведения плановых технических обслуживаний и смены смазки, минимальный интервал между заправками (смазками); доступность и удобство проведения регулировок и подтяжки креплений с выполнением их простейшими и долговечными инструментами, входящими в комплект машины; легкосъемность масляных и топливных фильтров для промывки или замены, а также и других недолговечных элементов; удобство снятия и установки на дизельных двигателях топливной аппаратуры и контроля момента начала впрыска топлива в цилиндр; возможность применения типовых средств технического обслуживания и выполнения всех операций планового технического обслуживания непосредственно в хозяйствах и механизаторах.

Основные конкретные оценочные показатели приспособленности сельскохозяйственной техники к техническому обслуживанию: удельная стоимость технического обслуживания (руб./моточас или руб./у.э.га) и удельная трудоемкость проведения технического обслуживания (чел.-ч, моточаса или чел.-ч/у.э.га), а также продолжительность ежесменного технического обслуживания (мин), количество мест смазки (при ЕТО и плановом ТО) или количество регулировок; количество применяемых масел и смазок и их расход (по массе) на 1000 ч работы трактора и другие показатели.

Требования при техническом диагностировании: возможность и доступность безразборной проверки (подключения приборов) технического состояния основного и пускового двигателей, топливного насоса, тракта очистки воздуха, агрегатов и сборочных единиц трансмиссии, гидросистемы и др.

Конкретные оценочные параметры для данного случая: число параметров технического состояния машины, при которых требуется периодический контроль; качество точек для съема диагностической информации с применением приборов; число параметров, контролируемых с места оператора, и др.

Требования при устранении отказов, замене агрегатов и сборочных единиц; текущих и капитальных ремонтах: доступность к местам возможного возникновения отказов и минимум затрат времени на их устранение и замену недолговечных элементов; конструктивная законченность и легкая отделимость агрегатов в машине и сборочных единиц в агрегате; наличие специальных устройств для захвата агрегатов и деталей при снятии грузоподъемными средствами; сохраняемость в процессе эксплуатации установочных и опорных поверхностей у агрегатов и обеспечение надежности их установки при замене; исключение возможности неправильной сборки соединительных устройств (силовых передач, гидравлических систем, электропроводки, топливopодачи и др.); наличие у агрегатов и сборочных единиц баз на опорных поверхностях для надежного крепления их к стендам при разборочно-сборочных работах, а у парных и взаимнорасполагаемых деталей установочных мест, клемм и др.; возможность удобной и быстрой разборки (сборки) агрегатов; обеспечение быстрой изнашиваемых поверхностей в корпусных деталях и на валах легкоъемными стаканами (втулками, кольцами); возможность применения съемников и других устройств при демонтаже деталей с прессовыми (переходными) посадками; сохраняемость установочных баз у деталей, обрабатываемых при их восстановлении (центров у коленчатых валов, опорных поверхностей (центров у цилиндров и т. д.); свободный доступ к различным крепежным и фиксирующим устройствам и др.

Конкретные оценочные параметры приспособленности сельскохозяйственной техники к ремонтным воздействиям следующие: время (ч) и трудоемкость (чел.-ч) выполнения разборочно-сборочных работ (на специализированном ремонтном предприятии); время (ч) и трудоемкость (чел.-ч) замены агрегатов и сборочных единиц; потребность в технологической оснастке и оборудовании для ремонта и др.

Требования и показатели уровня унификации: степень унификации сборочных единиц; повторяемости подшипников качения и крепежных изделий; унификации деталей, подвергаемых восстановлению и замене (запасных частей); унификации штуцеров, шлангов, масленок и др.

§ 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Повышение надежности тракторов и других сельскохозяйственных машин при их конструировании ведется по следующим основным направлениям.

Выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в парах трения. Детали современных тракторов и других сельскохозяйственных машин в зависимости от назначения изготавливают из конструкционных, износостойких, антифрикционных, фрикционных, антикоррозионных и других материалов. В современных тракторах наиболее широко используются: качественная конструкционная сталь (19...51 %), низколегированная сталь (29...63 %), серый чугун (18...29 %), а также сплавы на основе алюминия, ковкий чугун и др.

Из качественных конструкционных сталей наиболее широкое распространение получила сталь 45; из низколегированных — стали 12ХНЗА, 18ХГТ, 20ХНЗА, 25ХГТ, 30ХГТ, 40Х и др.; из серых чугунов — СЧ 15-32, СЧ 18-36 и СЧ 21-40.

Материалы деталей и рациональные их сочетания подбирают на основе двух главных требований: получения нужной долговечности и невысокой их стоимости.

Для каждой конкретной детали (сопряжения) учитывают условия работы, вид изнашивания, применение термической, химико-термической и других видов упрочняющей обработки, требования точности изготовления и т. д. Долговечность большинства деталей (сопряжений) сельскохозяйственной техники определяют сопротивляемостью их изнашиванию и главным образом в сочетании с воздействием абразивных частиц. Большая группа деталей (коленчатые валы, коленчатые оси, поворотные цапфы и др.) в работе подвергается воздействию циклических и динамических нагрузок, в связи с чем к материалам этих деталей наряду с износостойкостью предъявляются дополнительные требования — высокая усталостная прочность и ударная вязкость. К материалам таких деталей, как шестерни, подшипники скольжения и качения, кулачковые валы, крестовины карданных валов и дифференциалов и другие, предъяв-

ляются еще и требования высокой контактной усталостной прочности.

Перспективными материалами для деталей сельскохозяйственной техники считаются: низколегированные (для гильз и блоков цилиндров) и модифицированные (для коленчатых валов) чугуны; низколегированные цементуемые стали 25ХГТ, 20ХСНТ, 18ХНТФ (для шестерен и шлицевых валов), среднеуглеродистые низколегированные закаливаемые стали 39ХГСА, 45ХНМФА, 45ХМФА, 50ГСШ, 50ХФАШ (для подшипников скольжения); сплавы на основе алюминия (для головок и блоков цилиндров, кожухов сцепления, корпусов гидронасосов); полимерные материалы (для втулок, подшипников скольжения, сальников, шестерен, крышек, ручек, деталей тормозных устройств и др.) и материалы из резины (для уплотнений).

Обеспечение нормальных условий работы деталей при наименьших потерях на трение. Для длительной и надежной работы деталей прежде всего расчетами определяют рациональные размеры трущихся (контактирующих) поверхностей, их геометрическую форму и другие параметры. Например, поверхности подшипников скольжения рассчитывают на удельные нагрузки; поверхности шлицев и опор валов — на смятие; фрикционные пары — на нагрев; рессоры — на усталость и т. д.

Во многих случаях конструктор стремится вместо подшипников скольжения применить наиболее долговечные и дешевые подшипники качения, обеспечить минимальные потери на трение в трущихся парах. Переход на подшипники качения повышает их надежность, уменьшает расход цветных металлов, значительно снижает пусковые моменты, упрощает обслуживание. Вместе с тем необходимо помнить, что подшипники качения выдерживают меньшие скорости и нагрузки, требуют увеличения размеров деталей, обеспечивают меньшую точность работы механизмов, вызывают шум в передачах и снижают сопротивляемость их вибрациям.

Снижение концентрации напряжений при выборе формы и размеров деталей. Особое внимание необходимо обратить на это в местах галтелей, надрезов, канавок и других поверхностей, особенно деталей, подверженных динамическим и циклическим нагрузкам.

Создание оптимальных температурных режимов работы сопряжений деталей, сборочных единиц и агрега-

тов в современных форсированных машинах играет весьма важную роль в повышении их долговечности. Ранее отмечено, что температурные условия процесса прежде всего оказывают влияние на износ деталей и форму его проявления. Регулировать температуру в узлах трения и нагрев деталей вообще в двигателях можно за счет охлаждения воды (воздуха) и картерного масла, а также применением таких конструкторских решений, как создание теплоизолирующих прорезей (в головках блока и на поршнях), установка в бобышках поршней пластинок из инвара, заполнение пустотелых впускных клапанов металлическим натрием и др.

Обесечение хороших условий смазывания трущихся поверхностей деталей. За последние годы значительно повышено качество смазочных материалов, применяемых для сельскохозяйственной техники, за счет использования различных присадок к маслам (рассматриваются ниже). У современных двигателей все основные сопряжения, как правило, смазывают под давлением. Подачу смазки под давлением и ее фильтрацию все шире применяют в условиях трения деталей трансмиссии. Ряд сборочных единиц ходовой части гусеничных тракторов переведен с консистентной смазки на жидкостную (втулки цапф рам, подшипники опорных катков и др.).

Создание эффективных устройств для очистки воздуха, топлива, смазки. Эффективными мероприятиями по улучшению очистки воздуха, топлива и смазки в современных двигателях стали следующие: по очистке воздуха — применение новых конструкций циклонных и комбинированных воздухоочистителей; по двойной очистке топлива — использование фильтров грубой и тонкой очистки с новыми фильтрующими бумажными элементами БФДТ; по очистке масла — создание полнопоточных масляных центрифуг, применение центробежной очистки масла в полостях шатунных шеек коленчатых валов, установка в картерах магнитных пробок, применение фильтров для фильтрации масла в трансмиссиях, использование подшипников с одноразовой смазкой (полуоси задних колес и шарниры рулевых тяг трактора МТЗ-80 и др.).

Улучшение конструкции и материалов уплотнительных устройств и герметизация сборочных единиц и агрегатов для сельскохозяйственной техники имеют большое значение в деле повышения ее долговечности, по-

сколько тракторы и другие машины длительный период времени работают в атмосфере, насыщенной абразивными частицами. Наиболее широко распространены резиновые радиальные самоподжимные каркасные уплотнения типа АСК. Для улучшения герметизации сборочных единиц и агрегатов заводы-изготовители используют специальные прокладочные материалы и герметизирующие пасты.

Обеспечение достаточной жесткости базовых деталей машин и устойчивости их к вибрациям. Базовые детали (рамы, блоки цилиндров, корпуса коробок перемены передач и задних мостов) определяют работоспособность других деталей и обеспечивают для них достаточную жесткость, устойчивость и стабильность размеров, особенно взаимного расположения рабочих поверхностей.

Примером положительного решения в рассматриваемом плане может быть конструкция блоков цилиндров двигателей ЯМЗ, Д-50, а также изготовление в одном блоке корпуса коробки перемены передач и заднего моста трактора ДТ-75.

Крайне недостаточную жесткость имеют блоки цилиндров двигателя СМД-14, что вызвало необходимость изменения их конструкции и установки гильзы цилиндров на трех (вместо двух) опорах.

Другие мероприятия: применение двойных силовых пружин для сцепления (двигатели типа СМД), использование распределительных валов с безударным профилем кулачков (двигатель Д-240), гидравлическое натяжение гусениц и защитных устройств для них (тракторы Т-150, Т-130); повышение качества крепежа; увеличение жесткости трансмиссий тракторов, использование поддерживающих роликов с резиновыми бандажами; повышение надежности пружин подвески; применение двухслойных пальцев гусениц (со слоем из стали Х12Ф1) и измененной конструкции звеньев гусениц, обеспечивающих безударную работу опорных катков и лучший контакт со звездочкой в зацеплении (трактор Т-150); введение гидротрансмиссии (трактора МТЗ-80, Т-150 и др.); использование новой конструкции тормозных лент с легкообъемными элементами их фрикционных материалов высокой долговечности (трактор ДТ-75С); введение торцовых металлических уплотнений на цапфах (трактор ДТ-75С); ужесточение допусков на подбор деталей цилиндро-поршневой группы по массе

(двигатель Д-240); ведение динамической балансировки деталей двигателя, сцепления, карданных валов; применение сменных стаканов под подшипники качения в корпусных деталях трансмиссий.

§ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Производства высококачественных деталей для сельскохозяйственной техники конструкторы добиваются в тесном контакте с технологами путем выполнения следующих основных технологических (чаще конструктивно-технологических) мероприятий.

Обеспечение необходимой точности и качества изготовления деталей, применяемых в тракторах, автомобилях и других сельскохозяйственных машинах, зависит от уровня используемого обрабатывающего оборудования и точности размеров рабочих поверхностей деталей, а также от точности взаимного расположения этих поверхностей.

С повышением точности изготовления деталей уменьшаются начальные зазоры в подвижных сопряжениях и более жестко регламентируются натяги в неподвижных соединениях, что значительно повышает долговечность машин, их доремонтный ресурс.

Машиностроительное производство постоянно стремится к повышению качества рабочих поверхностей деталей (уменьшению их шероховатости и искажений макрогеометрии). В зависимости от условий эксплуатации машин в трущихся парах устанавливается определенная шероховатость, которую и необходимо соблюдать при производстве техники. Эта оптимальная шероховатость должна задаваться и для поверхностей деталей с неподвижными посадками. Чем меньше шероховатость, тем больше сопротивляемость поверхностей деталей к коррозионным износам. Существенное влияние оказывает шероховатость поверхности на циклическую, а также на динамическую прочность деталей машин.

Достижение высоких геометрических характеристик качества поверхности возможно при использовании ряда принципиально различных методов и оснастки, а именно: срезание неровностей поверхности путем тонкого шлифования, хонингования, суперфиниша (сверхдоводки) и полирования, особенно с применением синтети-

ческих алмазов (паст, брусков, лент); смятия поверхностей за счет поверхностного пластического деформирования обкатывания, раскатывания, дорнования, алмазного выглаживания и виброобкатывания алмазными или твердосплавными наконечниками; создания нового микропрофиля поверхности применением электрических методов обработки: электрохимической, электромеханической, обработкой в магнитном поле и др.

Отклонения геометрической формы (макрогеометрия) оказывают определенное влияние на значение и равномерность зазора (натяга) в сопряжении, условия контактирования, смазки и, таким образом, в значительной мере определяют эксплуатационную надежность узлов машин.

Учитывая, что геометрические параметры качества поверхности и особенно шероховатость существенно влияют на долговечность деталей, значительное внимание уделяют вопросам оценки качества поверхностей деталей и разработке средств и методов его улучшения.

За критерий оценки качества поверхности пока принимают такие не регламентированные ГОСТ параметры, как величина опорной поверхности, поверхность фактического контакта, радиусы закругления вершин и впадин микронеровностей, углы наклона образующих неровностей при основании, отношение радиуса закругления вершин микронеровностей к их максимальной высоте, среднее квадратическое отклонение высот микронеровностей, то есть критерии, определяющие форму микронеровностей, их направление, и другие показатели.

Выбор наиболее рационального вида обработки для различных групп деталей и их рабочих поверхностей требует научно-производственной проверки. Особенно перспективно вибронакатывание (рис. 56). Износ деталей при этом значительно снижается (рис. 57). Отдельные операции необходимы не только для улучшения шероховатости, но и для удаления тонкого дефектного поверхностного слоя со сниженными обычно физико-механическими свойствами.

Применение упрочнения деталей и их рабочих поверхностей термической и химико-термической обработками — основной метод, используемый в автотракторостроении для значительного повышения износостойкости, статистической и циклической прочности наиболее ответственных деталей.

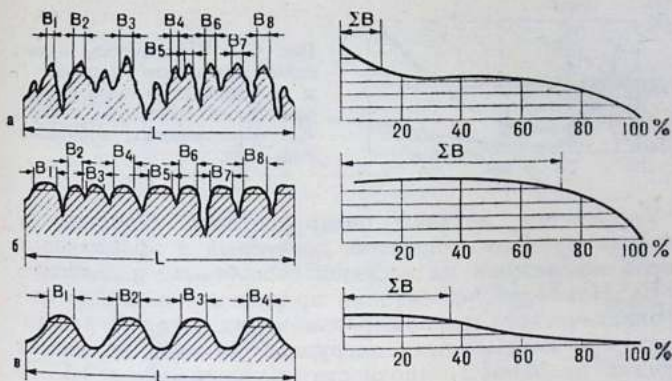


Рис. 56. Профиллограммы и кривые опорных поверхностей при различных способах обработки:
 а — точение; б — обкатывание; в — вибрационное обкатывание.

Используются следующие виды термической обработки: улучшение+объемная закалка+высокий отпуск, объемная закалка+средний отпуск, поверхностная закалка с нагревом т.в.ч.+низкий отпуск, изотермическая закалка. Для стабилизации свойств и структуры деталей в автотракторостроении широко применяется нормализация и высокий отпуск деталей.

Улучшению, часто с предварительной нормализацией, подвергают стальные коленчатые валы тракторных двигателей, коленчатые оси тракторов, шатуны автотракторных двигателей и другие детали.

Поверхностной закалкой с нагревом т.в.ч. упрочняются детали, предварительно подвергнутые нормализации, улучшению, цементации и нитроцементации. Закаленные с нагревом т.в.ч. детали имеют твердость HRC 54...62 и отличаются высокой износостойкостью. Закалка с нагревом т.в.ч. оказывает положительное влияние на усталостную прочность, которая для стали 45 повышается в 2 раза.

Из всех видов химико-термической обработки для упрочнения автотракторных деталей наибольшее применение получили цементация, нитроцементация и цианирование.

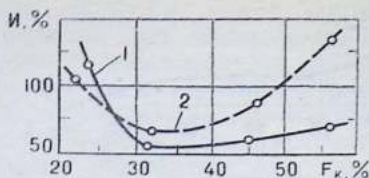


Рис. 57. Зависимость износа гильз цилиндров (кривая 1) и поршневых колец (кривая 2) от площади канавок F_k , образованных вибронактыванием.

Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием — простой, доступный и эффективный способ повышения их несущей способности и долговечности. Наиболее эффективно применение поверхностного пластического деформирования для деталей, работающих при переменных нагрузках, так как во многих случаях их запасы прочности повышаются в 1,5...2 раза и более, увеличивая тем самым сроки службы деталей. Повышение сопротивления усталости в этом случае обусловлено возникновением благоприятных остаточных напряжений. Вместе с тем в результате наклепа повышается твердость рабочих поверхностей и сопротивляемость их износу и коррозии, уменьшается шероховатость поверхностей. Величина упрочнения и степень повышения твердости при обработке поверхностным пластическим деформированием для различных материалов и их структурных состояний различны (рис. 58). Стальные детали больше всего упрочняются, если со-

держат феррито-перлитные и тростито-мартенситные структуры.

В различных формах выполнения поверхностное пластическое деформирование успешно применяется для повышения долговечности автотракторных деталей.



Рис. 58. Величина упрочнения $\frac{\Delta HV}{HV}$ % при поверхностном пластическом деформировании углеродистых и легированных сталей в различных структурных состояниях при степени деформации $\frac{d}{D} = 0,5$.

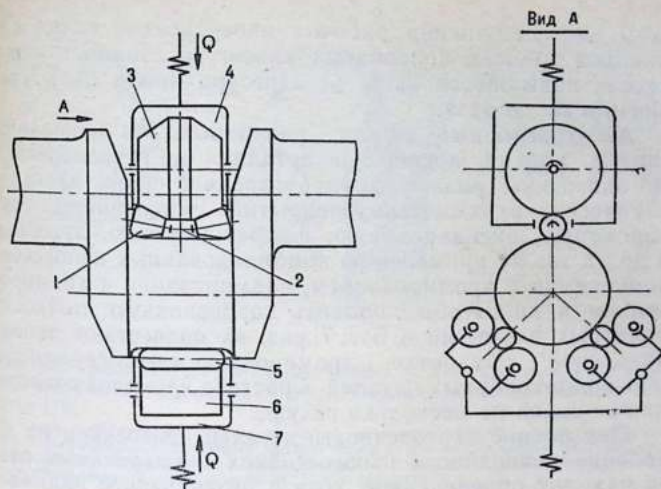


Рис. 59. Схема устройства для упрочнения галтелей коленчатых валов:

1 — деформирующие конические ролики; 2 — сепаратор; 3 — опорный конус; 4 — корпус; 5 — поддерживающие ролики; 6 — роликоподшипники; 7 — нижняя головка.

Пружины, рессоры, шестерни, шатуны и другие детали подвергаются дробеструйной обработке. Коленчатые валы тракторных двигателей и поворотные цапфы (по галтелям), другие валы, оси и полуоси эффективно упрочняют обкаткой шариками и роликами. Схема устройства для упрочнения галтелей коленчатых валов показана на рисунке 59.

Рабочие поверхности втулок верхних головок шатунов, гильз, цилиндров, отверстий в корпусах коробок передач и задних мостов, балансиров обрабатываются раскаткой и дорнованием.

Повышение долговечности деталей нанесением на их поверхности износостойких и коррозионностойких покрытий различными способами весьма эффективно. Так, пористое хромирование успешно используется для упрочнения верхних поршневых колец двигателей, которые хорошо работают в паре с чугунными гильзами. Срок службы указанной пары в результате этого повышен более чем в 1,5...2 раза. Если хромирование использо-

вать для упрочнения рабочих поверхностей гильз цилиндров и шеек коленчатых валов, то стоимость двигателя повышается на 4 %, а ресурс может быть увеличен в 2...3 раза.

Автотракторные детали различных наименований (вилки, кольца, крепежные детали и др.) подвергают нанесению различных коррозионностойких электролитических и химических покрытий: цинкованию, никелированию, оксидированию; фосфатированию, лужению и др., а также применению комбинированных процессов: цинкования с хромированием, кадмирования с хромированием и др. Чтобы повысить коррозионную стойкость цинковых покрытий в 5...7 раз, их подвергают дополнительной обработке хромированием — погружением свежеоцинкованных деталей в раствор хромовой кислоты или ее солей на несколько секунд.

Повышение долговечности деталей нанесением на их рабочие поверхности износостойких наплавленных слоев находит определенное, хотя и ограниченное применение. Индукционная наплавка твердыми сплавами успешно используется для повышения износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин (лемехов, лап культиваторов), сроки службы которых повышаются в 2...3 раза.

Наплавка плазменной дугой тарелок клапанов автомобильных двигателей значительно (в 4...10 раз) увеличивает срок их службы. Твердыми сплавами, легированными сталями и специальными чугунами упрочняют при наплавке торцы стержней клапанов, толкателей, клапанных гнезд. Особенно эффективно использование самофлюсующихся сплавов с высоким содержанием никеля ПГ-ХН80СРЧ и другие, сплавов ЭП-616 и ЭП-616А. Наплавку широко применяют при восстановлении и упрочнении изношенных деталей.

Другие мероприятия конструктивно-технологического характера, направленные на повышение надежности, следующие: термомеханические упрочнения; применение при изготовлении деталей кованных заготовок и профилей; изготовление шестерен, шлицевых валов, других деталей методом обкатывания (вместо нарезания заготовок в нагретом и холодном состоянии); армирование деталей и упрочнение их быстроснашиваемых поверхностей постановкой втулок, колец, вставок из высоколегированных и износостойких материалов и сплавов.

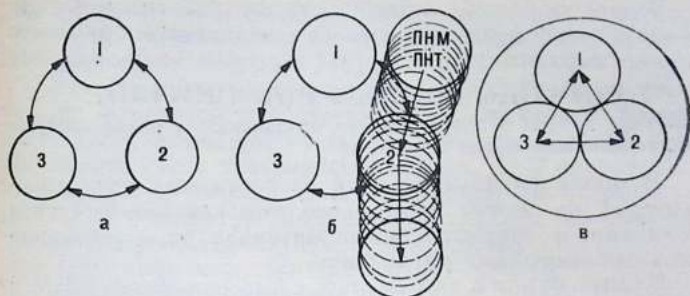


Рис. 60. Схема структурно-следственных связей звеньев комплексной системы производства и использования высоконадежной техники [15]:

а — связи действующие, необходимые, но недостаточные; *б* — связи необходимые и достаточные при условии замены звена 2; *в* — комплексная система производства и использования высоконадежной техники; 1 — конструирование; 2 — изготовление; 3 — использование (эксплуатация).

ведение шлицевых соединений повышенной твердости; проведение статистической и динамической балансировки деталей (особенно в связи с форсированием машин); обеспечение стабильности свойств материалов деталей применением искусственного старения для деталей из чугуна (блоки цилиндров, головки цилиндров, картеров трансмиссий и др.) и дополнительной обработки холодом закаленных сталей; повышение точности и качества сборки и окраски узлов, агрегатов и машин в целом, введение новых методов соединения деталей, особенно комбинированных, а также применение многих других мероприятий и повышение технологической дисциплины в целом. Этот комплекс мероприятий позволит машиностроителям добиться значительного повышения доремонтного технического ресурса машин.

Традиционные конструктивные материалы и способы их упрочнения по поверхностям трения в большинстве своем себя исчерпали. Надежность современных машин в смысле повышения поверхностной прочности деталей и пар трения в настоящее время может быть решена только применением принципиально новых материалов (ПНМ) и принципиально новой технологии (ПНТ) упрочнения поверхностей трения, как это показано на рисунке 60.

Таким образом, надежность по работоспособности современных и машин самого недалекого будущего можно выразить так:

$$P(t) - \text{ПНМ} + \text{ПНТ} \text{ или } P(t) = \text{ПНМ} \cdot \text{ПНТ},$$

где ПНМ и ПНТ — соответственно принципиально новый материал и принципиально новая технология.

В обоих случаях каждый из слагаемых или сомножителей не может быть менее, так как все берется в сравнении с существующими материалами и технологическими способами упрочнения.

Сумма будет в том случае, когда наложение ПНМ и ПНТ дает только суммарный новый эффект, а произведение — в том случае, когда каждый из сомножителей увеличивает друг друга не только в несколько раз, но и на порядок, два и более [15].

Следует отметить, что статистический анализ износов деталей из традиционных материалов, который ведется весьма интенсивно, на данном этапе не нужен хотя бы потому, что по основным сопряжениям для основных машин он предостаточно полно приведен в работе ГОСНИТИ, выполненной под руководством Ю. Н. Артемьева. Сейчас целесообразно исследование процессов изнашивания принципиально новых материалов и технологических способов упрочнения поверхностей трения на современном этапе.

История создания практически безызносных деталей и пар трения берет свое начало в СССР. Сюда следует отнести прежде всего открытие явления избирательного переноса (ИП) в закрытых парах трения Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским, затем открытие эффекта аномально низкого трения (АНТ) для случая космического пространства группой советских ученых (Е. А. Духовский, В. С. Онищенко, А. Н. Пономарев, А. А. Силин, В. Л. Тальрозе). Этот эффект заключается в снижении коэффициента сухого трения в вакууме до величины 10^{-3} при бомбардировке одного из элементов пары трения (например, молибдена или полиэтилена) потоком частиц (электронов, атомов гелия и др.), разогнанных до энергии порядка 1 кэВ. Эффект наступает по достижении чрезвычайно высокой (порядка 10^{12} эрг/г) интегральной дозы облучения и сохраняется в дальнейшем в течение всего времени облучения в широком диапазоне нагрузок и скоростей. Изучение этого эффекта

показало, что имеет место сильная ориентация кристаллитов молибденита как на его поверхности, так и на металлическом контроле [15].

Исследования, проведенные во ВНИИ оптико-физических измерений и в Институте химической физики АН СССР, позволили не только выявить условия формирования таких поверхностей трения, но и разработать технологию их стабилизации в широком диапазоне скоростей и температур. Коэффициент трения скольжения таких поверхностей находится в пределах $(1 \dots 5) \cdot 10^{-3}$, что достижимо лишь при жидкостном трении.

Возможность управления поверхностной активностью твердых тел в вакууме путем радиационного воздействия позволяет не только повысить эффективность твердых смазок путем их радиационной модификации, но и разработать новые способы управления поверхностными свойствами твердых тел, что может быть применимо и для обычного машиностроения.

Для целей сухой смазки, резко снижающей износ, могут с успехом применяться новые дисульфидмолибденовые покрытия диффузионного типа. Наряду с известными М-8Р1-димолит (химически чистый MoS_2 на молибденовых деталях) созданы новые варианты: М-802-1 (покрытие $\text{MoS}_2 - \text{Pb}$), имеющее по сравнению с М-801 существенно более высокую несущую способность и долговечность при тяжело нагруженном трении, и М-802-2 (покрытие $\text{MoS}_2 - \text{ZnS}$), отличающееся высокой твердостью ($3,2 \dots 4,5 \cdot 10^9$ Па), повышенной износостойкостью и долговечностью при умеренных скоростях, температурах и нагрузках, что также может быть с успехом применено в обычном машиностроении [15].

Несомненный интерес представляет разработанная профессором Б. И. Костецким и его школой структурная приспособляемость материалов (СП) пар трения на стадии их приработки и изнашивания, когда в поверхностных слоях толщиной $10^{-9} \dots 10^{-8}$ м, имеющих аморфное строение, добиваются теоретической прочности и в ряде случаев обеспечивают безызносность узла трения.

Прекрасные результаты дает применение так называемых «вечных подшипников», разработанных лабораторией ферромагнитных жидкостей Ивановского энергетического института им. В. И. Ленина, в которых металлические тела вращения заменены жидкими кристаллами.

Для создания практически безызносных деталей трения необходимо исключить всякую деформацию поверхностного слоя (для определенных значений параметров физического поля с определенным коэффициентом запаса износостойкости), чего можно достичь обработкой материала (например, шеек коленчатых валов) мощным лучом лазера, обеспечивая нагрев детали до жидкого состояния и перевод слоя толщиной 10...15 мкм в аморфное строение за счет резкого охлаждения ($v_{\text{охл}} = 1\,000\,000$ К/с), вследствие чего атомы не успевают перестроиться в кристаллические решетки. Такой слой, обладая прочностью, близкой к теоретической, не подвержен разрушению от действий не только физического, но и химического поля (агрессивной среды).

Большие возможности в части повышения износостойкости деталей и пар трения заложены в применении так называемых «булатов», разработанных Харьковским физико-техническим институтом АН УССР, с помощью которых можно напылять в глубоком вакууме соединения TiN, WC, TaN и другие толщиной 5...15 мкм. Долговечность таких деталей повышается в 5...15 раз и более [15].

Весьма перспективны такие виды упрочнения, как плазменное напыление порошков, детонационное напыление, термообработка лучом лазера и др.

Износа практически можно избежать, если подвижное механическое сопряжение заменить электронными устройствами, но это возможно в весьма и весьма ограниченных случаях. Надо полагать, что в ближайшее время для борьбы с износом деталей машин будет предложен огромный арсенал способов создания практически безызносных деталей и пар трения современных машин и механизмов [15].

§ 4. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Условия эксплуатации машин решающе влияют на показатели их надежности и могут свести на нет любые достижения конструкторов и технологов. В связи с этим выполнению эксплуатационных мероприятий, повышающих доремонтные и межремонтные сроки службы машин, должно уделяться огромное внимание.

Долговечность и безотказность машин в эксплуатации зависят от целого ряда мероприятий, которые необходимо соблюдать всем инженерно-техническим работникам, механизаторам хозяйств и рабочим ремонтных предприятий.

Обкатка новых (отремонтированных) машин в хозяйствах фактически закладывает основы длительной и безотказной работы машин и должна проводиться в течение 50...60 ч при постепенном повышении нагрузки в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей или ремонтных предприятий.

Обкатка тракторов включает в себя: опробование работы двигателя без нагрузки и обкатку трактора с постепенным повышением нагрузки при выполнении полезных сельскохозяйственных и транспортных работ, не требующих значительных тяговых усилий. Легкие транспортные работы особенно рекомендуются для тракторов в первые 20...25 ч обкатки. Во время обкатки постоянно ведут контроль за работой двигателя и всех агрегатов с целью выявления повышенного нагрева, шумов и стуков, утечки масла и др. Тщательно выполняют все операции ежедневного ТО. По завершении обкатки проводится плановое ТО-1 трактора с заменой смазки в двигателе и во всех агрегатах и сборочных единицах трансмиссии и ходовой части. За период производственной обкатки рекомендуется трижды менять смазку, а ограничение мощности снимать через 120 ч работы двигателя. Это позволит лучше приработать трущиеся поверхности и подготовить их к нормальному нагружению.

Изменение микрогеометрии гильз цилиндров в процессе приработки на различных маслах показано на рисунке 61.

При обкатке трактора в зимнее время рекомендуется применять смесь определенных для данной машины картерных масел с дизельным топливом. На трактор, прошедший обкатку, составляют акт, делают отметку об этом в техническом паспорте и

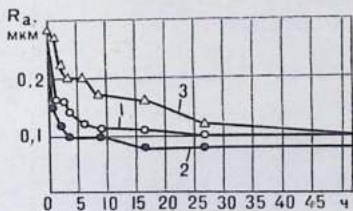


Рис. 61. Изменение шероховатости гильз цилиндров в процессе приработки при обкатке:

1 — на свежем дизельном масле; 2 — на работавшем дизельном масле; 3 — на специальном обкаточном масле.

сдают машину в эксплуатацию. Первые 50...60 ч эксплуатации после обкатки трактор должен находиться под особым наблюдением механика (помощника бригадира по технике).

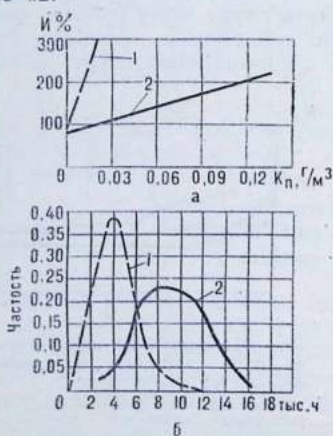
Организация технического обслуживания и создание для его проведения необходимой базы — основные условия обеспечения надежной и экономичной работы машинно-тракторного парка.

Система технического обслуживания сельскохозяйственной техники предусматривает проведение ежедневных (через 8...10 ч), сезонных (2 раза в год) и плановых технических обслуживаний.

Периодичность проведения технических обслуживаний машин необходимо строго соблюдать независимо от загрузки их различными сельскохозяйственными работами. Работа на машинах без проведения установленных технических обслуживаний запрещается.

Наиболее прогрессивная форма учета продолжительности работы тракторов и определения конкретных сроков проведения плановых технических обслуживаний — жетонная система, основанная на учете израсходованного топлива, успешно используемая во многих передовых хозяйствах страны.

Влияние качества технического обслуживания на износ и ресурс деталей двигателя показано на рисунке 62.



Уровень проведения технических обслуживаний машин в значительной мере зависит от средств и места их проведения и квалификации обслуживающего персонала. Наиболее высокой эффективности использования

Рис. 62. Влияние качества технического обслуживания:

а — на интенсивность изнашивания верхних поршневых колец тракторного двигателя: 1 — при подсосе неочищенного воздуха; 2 — без подсоса; И — износ; K_p — концентрация пыли в воздухе; б — на ресурс гильз тракторного двигателя: 1 — при несоблюдении правил ТО; 2 — при соблюдении правил ТО.

машинно-тракторного парка и обеспечения его надежной работы добились хозяйства, в которых организованы стационарные пункты технического обслуживания, созданы звенья мастеров-наладчиков и широко используются необходимое моечное, смазочное, регулировочное, диагностическое оборудования, приборы и оснастка, средства механизации работ. Хозяйства, не имеющие необходимой технической базы, принимаются на комплексное техническое обслуживание предприятиями «Сельхозтехника», на которые также возложено и проведение периодического технического обслуживания автомобилей, оборудования ферм и комплексов.

Проведение периодических технических осмотров и технического диагностирования состояния машин, сборочных единиц и агрегатов. Периодические технические осмотры — составная часть общей системы технического обслуживания машин. Их проводят один-два раза в год представители Госсельтехнадзора автомобильной инспекции с целью контроля за уровнем эксплуатации и хранением машин, выборочной проверки их технического состояния (особенно с применением средств технической диагностики), организации и деятельности инженерной службы в хозяйстве, ведения технической документации и др. Проведение технических осмотров машин в значительной мере улучшает деятельность технических служб хозяйств и повышает надежность используемой ими сельскохозяйственной техники.

Обеспечение нормального режима работы машин, особенно в зимнее время, повышает их долговечность. Перегрузка машин (по нагрузке и скорости), неправильные регулировки зазоров в подшипниках, шестернях и других соединениях вызывают нарушения температурного режима работы трущихся поверхностей деталей, условий смазывания, что приводит к форсированному их износу.

Наиболее высокие удельные нагрузки на детали машин и крайне ухудшенные условия их смазывания наблюдаются при начальных запусках двигателей и включении агрегатов трансмиссий в холодное время года (при температуре ниже 5 °С). Несколько минут такой работы вызывают износы (которые могли бы появиться за десятки и даже сотни часов нормальной эксплуатации) и часто приводят к авариям.

Мероприятиями, обеспечивающими установленный тепловой режим работы двигателей (температура воды и масла 75...95 °С) и нормальные условия зимней эксплуатации машин, являются: организация теплых стоянок; использование электрических подогревателей масла; применение системы воздушного подогрева машин, хранящихся на открытых площадках, с помощью теплогенераторов, газовых горелок; подача подогретой воды непосредственно к машинам; использование антифризов и др.

На работу машин отрицательно влияет перегрев двигателей, который наблюдается в жаркие месяцы при ухудшении работы сборочных единиц системы охлаждения и образовании в ней накипи, вследствие перегрузок, нарушения работы топливной системы, неправильных регулировок и других причин; перегрев двигателей вызывает (так же как и охлаждение при низких температурах) форсированный износ деталей, особенно цилиндро-поршневой группы, газораспределительного и кривошипно-шатунного механизмов, а в ряде случаев может привести к аварийным дефектам (обрыву клапанов, трещинам в головках и блоках цилиндров и др.). Ряд заводов-изготовителей запрещает при перегреве масла останавливать двигатель до установления в нем нормальной температуры. Чтобы предотвратить перегрев масла, необходимо устранить причины, вызывающие этот дефект.

Запуск основного двигателя без воды приводит к задирам поршней пускового двигателя и трещинам в головке блока основного двигателя. Перед запуском двигателей в холодное время года во избежание задиров подшипников необходимо предварительно прокручивать коленчатый вал.

При низких температурах поверхности цилиндров могут также подвергаться ускоренному износу из-за ухудшения условий их смазывания и коррозионного изнашивания. Изменение содержания железа в масле двигателя в зависимости от его теплового состояния показано на рисунке 63, а изменение износа двигателя — на рисунке 64.

Соблюдение установленных правил хранения машин. Основные эксплуатационные мероприятия, обеспечивающие высокую сохраняемость сельскохозяйственной техники, особенно в периоды, свободные от работы, и в

осенне-зимнее время, следующие: организация специальных помещений и площадок с твердым покрытием, использование различных подставок и подкладок, очистка деталей от технологических загрязнений и почвы, нанесение на неокрашиваемые рабочие и другие поверхности защитных смазок (НГ-203, НГ-204, ЦИАТИМ-202, СХК), своевременное восстановление нарушенных лакокрасочных покрытий, хранение в закрытых помещениях электрооборудования, резины, приборов, рабочих органов машин и др.

Строгое соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей по применению топлива, картерных масел и других смазок. Не нарушать за период эксплуатации установленные для машины сроки смены масел и смазок. Для снижения износов деталей топливной аппаратуры и цилиндро-поршневой группы перед заправкой следует отстоявать (не менее 40 ч) и фильтровать топливо.

В зависимости от условий эксплуатации (зима, лето) и износа деталей машин рекомендуется применять масла и топливо различных сортов и марок. При низких температурах (от -20° до -35°C и ниже) к дизельному топливу рекомендуется добавлять керосин (10 %), а к дизельному маслу — дизельное топливо (до 40 %).

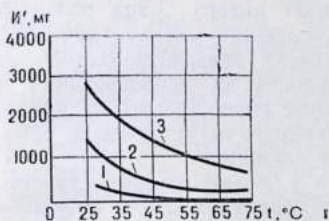


Рис. 63. Изменение содержания железа в картерном масле двигателя ГАЗ-53 в зависимости от его теплового состояния:

1 — $N_e = 0$, $n = 1200$ об/мин; 2 — $N_e = 14,7$ кВт, $n = 1600$ об/мин; 3 — $N_e = 29,4$ кВт, $n = 2000$ об/мин; I' — износ двигателя за 10 ч в миллиграммах железа; $t^{\circ}\text{C}$ — температура.

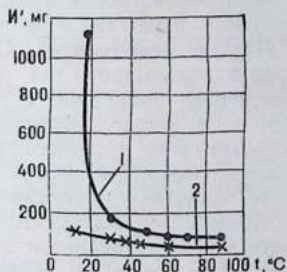


Рис. 64. Изменение интенсивности износа двигателя от температуры охлаждающей воды:

1 — топливо с содержанием серы 1,5 %; 2 — то же, серы 0,08 %.

—личения срока службы масла и снижения ско-
—го старения в него добавляют противокисли-
—е присадки, а с целью снижения отложений на-
лаков на деталях — моющие присадки.
—онтроль и постоянное соблюдение требуемой гер-
—ации агрегатов, сборочных единиц и систем машин
—ях предупреждения попадания в них абразива для
—скохозяйственной техники — важный фактор повы-
—ия долговечности. Герметичность в большинстве слу-
—в нарушается вследствие ослабления креплений кры-
—к под действием вибраций, из-за низкого качества
—окладочного материала, износа, несвоевременной за-
—ены сальниковых уплотнителей, короблений корпусных
—еталей и их плоскостей разъемов и из-за других при-
—чин.

Так как в процессе эксплуатации машин внутри их агрегатов температура повышается до $70 \dots 90^\circ\text{C}$ и в результате температурного перепада из окружающей атмосферы во внутренние полости агрегатов засасывается воздух, обильно содержащий абразивные частицы (особенно на таких работах, как культивация, боронование и др.), герметизации узлов и агрегатов следует уделять особое внимание. При эксплуатации машин в тяжелых условиях (повышенная запыленность воздуха, высокая температура окружающего воздуха и др.) рекомендуются воздухоочистители промывать через $25 \dots 30$ ч, а цетрифуги — через 120 ч работы.

Другие мероприятия. Опыт целого ряда областей страны показывает, что повышение эксплуатационной надежности тракторов и других сельскохозяйственных машин, а также эффективности их использования и сохраняемости в значительной мере зависит от квалификации механизаторских кадров, организации работ в хозяйствах инженерной службы.

Необходимо воспитывать у механизаторов высокую ответственность за сохраняемость и бережное отношение к машине; разъяснять им причины, вызывающие ускоренный износ деталей машин; обеспечить все необходимые условия для своевременного и качественного их технического обслуживания; повышать квалификацию механизаторов, при освоении тракторов и сельскохозяйственных машин новых марок. Опыт передовых хозяйств работников показывает, что инженерно-техническая сл-

зяйствах должна быть расширена и организованы специализированные звенья: заправки машин топливо-смазочными материалами и водой, технического обслуживания, полевого ремонта, хранения техники, технического диагностирования машин, текущего ремонта сельскохозяйственных машин.

Капитальный ремонт тракторов, автомобилей, комбайнов и других сложных машин, а также их агрегатов должен выполняться на специализированных ремонтных предприятиях Госкомсельхозтехники СССР.

Использование, обслуживание и ремонт сельскохозяйственной техники значительно осложняются при многомарочности машин, в результате чего снижается их надежность. В связи с этим необходимо в каждом хозяйстве, районе и области стремиться к всемерному сокращению числа марок используемых машин, особенно тракторов и автомобилей.

§ 5. РЕМОНТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Ремонт машин — самоцель, а представляет собой весьма важное звено в общей системе поддержания машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии. При ремонте машин одновременно возможны их модернизация и проведение мероприятий по повышению долговечности. Основные пути решения этой задачи следующие.

Обеспечение сохраняемости ремонтного фонда поступающего на ремонтные предприятия. Достигается организацией соответствующих складов и площадок с хранением различных подставок и подкладок, амортизационных смазок и других средств. Особое внимание следует уделять защите от коррозии ремонтных деталей машин, поступающих для восстановления, которые при неудовлетворительном хранении быстро превращаются в металлолом.

Выполнение разборочных работ при устранении повреждений, включающих повреждение деталей и разукрупнение пар. При разборочных работах рекомендуется внимание уделять использованию средств (особенно гидравлических станций, прессов), позволяющих печивающих небольшой процент повреждений (особенно подшипников качения), а так

контейнеров для сохранения комплектов деталей соответствующих узлов и агрегатов. Запрещается раскомплектовывать блоки цилиндров, крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары шестерен конечных и других передач и т. п.

Внедрение на ремонтных предприятиях эффективной мойки и очистки деталей от различных загрязнений — одно из наиболее решающих условий обеспечения высокого послеремонтного ресурса машин. Удаление нагара, смолистых отложений, накали и других загрязнений — специфический ремонтный процесс, отличающийся определенными трудностями и требующий большого внимания, а также использования современных моечных машин и установок, новых комплексных моечных препаратов, содержащих поверхностно-активные компоненты, и обеспечения заданных режимов мойки, особенно поддержания температуры моечных ванн (75...90 °C).

Наиболее эффективные моющие средства — комплексные препараты МЛ-51 (для мойки деталей), МЛ-52, АМ-15 и «Эмульсин» (для удаления смолистых отложений), а также новые синтетические препараты МС-5, МС-6, МС-8*.

Контроль и дефектация изношенных деталей машин в значительной мере определяют сроки их службы. Учитывая, что 80 % деталей тракторов подвергаются износу до 0,2 мм, а также принимая во внимание высокую точность изготовления автотракторных деталей (1, 2, 3-го класса) и новые (ужесточенные) технические условия на ремонт машин с повышенным ресурсом, на ремонтных предприятиях следует расширить номенклатуру деталей, подвергаемых сплошному контролю, применение предельных (пробки, калибры, скобы), универсальных (индикаторы, микрометры, миниметры) измерительных инструментов и средств пневматического контроля, обеспечивающих повышение точности измерений размеров (геометрии) до 0,01...0,001 мм. Такие детали машин, как коленчатые валы, шатуны, коленчатые оси и поворотные цапфы, блоки и гильзы цилиндров и другие, в целях повышения надежности отремонтированных машин должны обязательно быть проверены на отсутствие скрытых дефектов (особенно трещин) методами, широко

* Разработаны доктором технических наук Н. Ф. Тельновым. —
Прим. авторов.

используемыми в машиностроении на передовых ремонтных предприятиях (магнитная, люминесцентная, ультразвуковая и рентгеновская дефектоскопия, гидравлическая опрессовка и др.).

Сплошной контроль размеров и геометрии рабочих поверхностей базовых деталей машин, поступающих в ремонт, а также точности их взаимного расположения. За время эксплуатации на машинах в этих деталях в результате старения материала, износов, а также воздействия различных нагрузок и перераспределения внутренних напряжений происходят изменения размеров, геометрии и взаимного расположения рабочих поверхностей, которые должны быть устранены. Это обеспечивает высокую работоспособность не только самой базовой детали, но и всего агрегата. Восстановлением и стабилизацией размеров базовой детали ремонтные предприятия имеют возможность повышать ресурс отремонтированных машин даже по сравнению с новыми, детали которых не подвергались искусственному старению.

Внедрение на ремонтных предприятиях входного контроля, особенно новых деталей, диктуется необходимостью в связи с тем, что многочисленными проверками установлены значительные отклонения их размеров и геометрии от заданных значений по рабочим чертежам.

Тщательный весовой и размерный подбор деталей цилиндро-поршневой группы. В связи с форсированием современных двигателей по оборотам и нагрузке необходим тщательный подбор по массе деталей цилиндро-поршневой группы. Особенно это важно для ремонтных предприятий, так как в результате износов ослабевают их прочность и жесткость ряда деталей, наблюдаются их раскомплектовка и замена, а также другие отклонения. В качестве примера можно указать, что для отремонтированных двигателей СМД-14 разность в массе комплекта поршней не должна превышать 7 г, а шатунов — 12 г.

Динамическая балансировка коленчатых и карданных валов, маховиков, муфт сцепления и других узлов и деталей. Для динамической балансировки деталей ремонтные предприятия оснащаются специальными машинами БМ-У4.

Обеспечение регламентированных посадок, усилий затяжки и сборки резьбовых соединений и других требований при сборке агрегатов машин, особенно авто-

тракторных двигателей, — ответственное мероприятие, границы которого для каждой машины определены типовой технологией сборки.

Обеспечение хорошей герметизации агрегатов и сборочных единиц при их ремонте определяется не только заменой сальниковых уплотнений, но и устранением постоянно возникающих короблений плоскостей разъемов деталей, а также восстановлением изношенных резьбовых креплений, применением специального прокладочного материала ЛАСП, прокладок из паронита и герметизирующих паст У-20А, УН-25, УН-01 (рекомендации ГОСНИТИ). Необходима проверка качества сборки и герметизации сборочных единиц (агрегатов).

Стендовая обкатка и испытания — ответственный начальный период работы смонтированных сборочных единиц и агрегатов машин. Поэтому в условиях ремонтных предприятий они должны выполняться и совершенствоваться: введением обкатки под нагрузкой (не только двигателей, но и агрегатов трансмиссий машин), применением осерненных и новых обкаточных масел (ОМ-2) и присадок (АЛП-2) к топливу, тщательной очисткой, охлаждением и централизованной подачей масла, а также топлива и воды.

В процессе стендовой обкатки и испытаний необходим тщательный контроль с целью выявления посторонних шумов и стуков, повышенного нагрева, течи масла, воды и топлива, нарушения регулировок и др. После обкатки проводится контрольный осмотр двигателей и агрегатов, повторное испытание (при необходимости), замена смазки и промывка агрегатов дизельным топливом, а также очистка и замена фильтрующих элементов. Особое внимание при этом обращают на состояние, герметичность и нормальную работу воздухоочистителей.

Повышение качества окраски ремонтируемых машин, а следовательно, их сопротивляемости коррозии в условиях ремонтных предприятий выполняется следующими приемами: снятием старой окраски в горячих щелочных ваннах, применением эффективных грунтов и эмалей, окраской отдельно агрегатов (до общей сборки машин) и машин в целом (после обкатки и испытаний) с применением новых методов окраски (в электростатическом поле, гидродинамическим распылением и др.).

Благодаря проведению комплексов рассмотренных и других мероприятий многие ремонтные предприятия в нашей стране и за рубежом добиваются не только восстановления, но и повышения послеремонтного ресурса отремонтированных машин по сравнению с новыми.

§ 6. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Подготовка и выполнение восстановительных процессов, используемых для «возрождения» изношенных деталей машин, оказывают решающее влияние на их послеремонтный ресурс в целом. Это происходит потому, что восстановлению подлежат обычно быстроизнашивающиеся детали, и работоспособность любой машины в первую очередь зависит от качества деталей, устанавливаемых в нее при ремонте.

В связи с повышением ресурса ремонтируемых машин (не менее 80 % новых) увеличивается количество выбракованных деталей (примерно в 2 раза) и резко возрастают требования к качеству новых, а прежде всего восстанавливаемых деталей. Цехи (участки) восстановления изношенных деталей становятся наиболее важным, сложным энергонасыщенным и дорогим производством ремонтных предприятий.

Качество и долговечность восстанавливаемых деталей зависят главным образом от выбора рационального способа восстановления, применения упрочняющей технологии и получения заданного качества поверхности, особенно на стадии финишных операций обработки и упрочнения восстанавливаемых деталей.

Применяя различные технологические процессы восстановления, особенно металлопокрытия, и упрочняющую технологию, можно не только восстанавливать потерянные размеры деталей и первоначальные служебные свойства, но и значительно их повысить.

Примером этому может служить создание биметаллических поверхностей у новых деталей и значительное повышение их долговечности (хромированные поршневые кольца, наплавленные клапаны двигателей, рабочие органы сельскохозяйственных машин и др.).

Анализ конструктивно-технологических характеристик, условий работы и износа деталей эксплуатируемых, а особенно перспективных тракторов, показывает,

что сельскохозяйственное ремонтное производство должно применять следующие способы восстановления деталей, обеспечивающих им высокие показатели долговечности.

Восстановление и повышение долговечности деталей наплавкой. Наиболее перспективные виды механизированной наплавки — это наплавка в газовых средах (CO_2 , смесях $\text{CO}_2 + \text{Ar}$, $\text{CO}_2 + \text{O}_2$), порошковыми проволоками (особенно с внутренней защитой), под легированными керамическими флюсами, плазменной дугой, с помощью т. в. ч., электрошлаковым способом. Наплавка в газовых средах рекомендуется для восстановления деталей трансмиссии и ходовой части тракторов, особенно в сочетании с упрочняющей технологией.

Наплавка в среде углекислого газа в сочетании с упрочнением используется для восстановления с высокой надежностью таких деталей: стальных коленчатых валов, коленчатых осей, цапф балансиров, валов муфт сцепления и коробок перемены передач, шкивов тормозов, балансиров подвесок, осей опорных катков, осей поддерживающих роликов и других деталей.

В качестве электродной проволоки рекомендуется Нп-ЗОХГСА диаметром 1,6 и 1,2 мм. После наплавки получается твердость HB 300...350, а после упрочнения закалкой с нагревом т. в. ч. или электромеханической обработки ее значения повышаются до HB 560...570.

Совершенствование электродуговой наплавки в среде CO_2 ведется по следующим основным направлениям.

1. Введение принудительных колебаний (вибрация, поперечные колебания) электрода.

2. Применение направленного охлаждения наплавляемого слоя жидкостью (сразу после наплавки получается высокая твердость наплавленного металла).

3. Использование в процессе наплавки термомеханического упрочнения, способствующего образованию более плотного металла с мелкозернистой структурой.

4. Применение газовых защитных сред на основе аргона с использованием смесей газов или подачей газовых компонентов отдельными струями и др. На рисунке 65 показана горелка для комбинированной защиты дуги.

Механизированная наплавка в газовых средах на основе аргона применяет-

ся для восстановления ответственных автотракторных деталей, к механическим и эксплуатационным свойствам поверхности которых предъявляются повышенные требования надежности. Сюда входят коленчатые и кулачковые валы двигателей, коленчатые оси поворотных цапф, крестовин дифференциалов и карданов, шлицевых валов и других автотракторных деталей.

Наплавка порошковыми проволоками с внутренней защитой позволяет в широких пределах легировать наплавляемый металл и устраняет неудобства, связанные с применением специальных защитных сред (флюсов, газов, жидкостей и т. п.).

Кроме того, этот вид наплавки дает возможность получать сравнительно небольшую глубину проплавления основного металла и отличается другими преимуществами.

Проволоки марок ПП-3Х5Г2М-0 и ПП-25ХФМС-0 и ПП-ТН500 чаще всего рекомендуются для восстановления и повышения долговечности деталей высокой твердости (HRC 50 и более), то есть коленчатых валов, коленчатых осей, цапф балансиров; марок ПП-ТН250-0, ПП-ТН350-0 — для деталей средней твердости (до HB 300), то есть тормозных шкивов, различных осей и валов (по шейкам), марок ПП-АН105 (ПП-Г13Н4) и ПП-АН124 (ПП-У25Х17Т-0) — для деталей, подверженных абразивному изнашиванию; твердость после наплавки проволокой ПП-АН105—HB 250, после наклепа — HB 400—450.

Эффективность восстановления некоторых деталей наплавкой порошковыми проволоками с внутренней защитой показана в таблице 4.

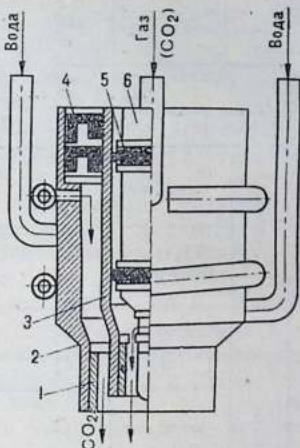


Рис. 65. Горелка для комбинированной защиты сварочной дуги при наплавке:

1 — сменное кольцо; 2 — наружное сопло; 3 — внутреннее сопло; 4 — сальник СК 30×52×9; 5 — уплотнительное кольцо; 6 — токоподвод.

Таблица 4. Технико-эксплуатационные показатели и режимы наплавки деталей тракторов ДТ-75 порошковым
электродом с внутренней защитой

Наплавляемые детали	Восстанавли- ваемая поверхность	Марка порошковой проводки	Режим наплавки				Твердость		Цена новой детали, руб.	Средняя стоимость часо- стояния, руб.
			В напряжении,	ток, А	подача, мм	частота вращения, об/мин	по техничес- ким условиям	после нап- лавки		
Колесная ось	Под под- шипник	ПП-ТН-250-0, 3,0 мм	24...26	220...240	30	3,3...4,0	210...250	550	9,00	3,25
	Под втулку	ПП-25ХФМС-0 (ПП-3Х5Г2М-0), 2,6 мм	24...26	220...240	26	4,0...5,0	520	580	—	—
Цепля рамы	"	ПП-25ХФМС-0 (ПП-3Х5Г2М-0), 2,6 мм	24...26	240...260	26	5,0	540	540...550	4,28	3,48
	"	"	25...27	400...420	30	5,0	240	261	5,35	2,47
Шкиф остано- вочного тормоза	Наружная поверхность	ПП-ТН-250-0, 3,0 мм	25...27	400...420	30	5,0	240	261	5,35	2,47

Упрочнение деталей, восстановленных наплавкой и сваркой. У деталей, восстановленных наплавкой, как правило, снижены значения динамической и циклической прочности. В наплавленном металле, особенно легированном, возможно появление трещин.

Повышение эксплуатационных свойств, безотказности и долговечности деталей, восстановленных наплавкой и сваркой, может быть достигнуто следующими приемами:

- 1) поверхностной закалкой с нагревом т. в. ч., газовым пламенем или плазменной дугой;
- 2) поверхностным пластическим деформированием;
- 3) электромеханической обработкой;
- 4) химико-термической обработкой;
- 5) термомеханической обработкой, проводимой в процессе наплавки.

Поверхностная закалка (особенно с нагревом т. в. ч.) и термомеханическая обработка — наиболее эффективные методы, значительно повышающие твердость, износостойкость и усталостную прочность деталей, восстановленных наплавкой. Твердость и износостойкость наплавленных деталей в этом случае повышаются в среднем в 2 раза.

Упрочнение деталей, восстановленных наплавкой с поверхностным пластическим деформированием, значительно увеличивает сопротивляемость наплавленного металла усталости, а также износу благодаря повышению твердости (на 15...35 %), улучшению качества поверхности (на два-три класса чистоты) и созданию благоприятных сжимающих напряжений.

Оптимальный режим упрочнения (обкатка шариками и роликами): сила давления инструмента 200...400 Н, скорость обкатки 15...125 м/мин, продольная подача 0,1...0,25 мм/об, диаметр шарика 10...15 мм, диаметр ролика 70 мм, диаметр ролика с профильным радиусом 10...15 мм, исходная шероховатость четвертого-пятого класса, число проходов 1...2.

Электромеханическое упрочнение на 50...70 % повышает усталостную прочность наплавленных деталей. Глубина упрочнения составляет 0,1...0,3 мм и действие его подобно обработке т. в. ч. Оптимальный режим электромеханического упрочнения: постоянный, прямой полярности ток силой 500 А, напря-

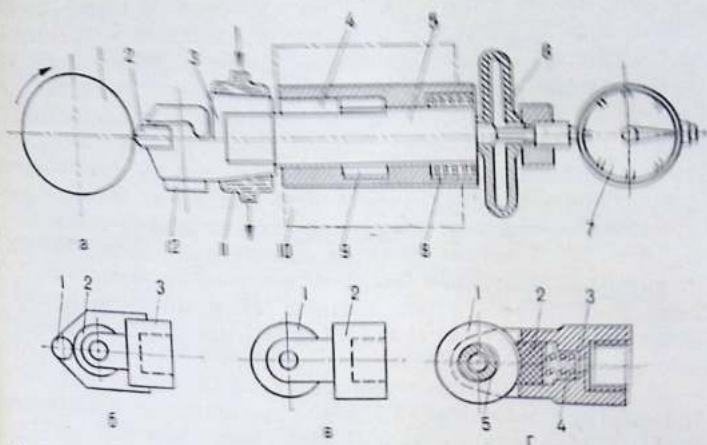


Рис. 66. Схема универсальной оправки для упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием и электрохимическим упрочнением:

а — общий вид: 1 — деталь; 2 — инструмент; 3 — ролик для зажатия инструмента; 4 — шпонка; 5 — шток; 6 — упругий элемент; 7 — индикатор; 8 — пружина; 9 — втулка корпуса; 10 — суппорт станка; 11 — охлаждающий корпус; 12 — наконечник токопровода; б — шариковая головка; в — шарик; г — шариковый подшипник; 3 — вилка головки; 6 — роликовая головка; 1 — ролик; 2 — вилка головки; 2 — роликовая головка для ЭМУ; 1 — ролик из твердого сплава; 2 — меднографитовая щетка; 3 — вилка головки; 4 — пружина; 5 — ось ролика.

жение 2 В, усилие 300 Н, скорость вращения детали 10 м/мин, продольная подача 0,2 мм/об, рабочий диаметр инструмента — пластина из сплава Т30К4 с горизонтальным радиусом 10 мм и вертикальным 5 мм.

Динамометрическая оправка (конструкции ЛСХИ) показана на рисунке 66. Ее применяют для поверхностного деформирования и электрохимического упрочнения деталей, восстановленных металлопокрытиями.

Химико-термическая обработка (цементация, азотирование и др.) — весьма эффективный метод упрочнения поверхностных слоев наплавленного металла. Применение химико-термической обработки (цементации) деталей, наплавленных проволокой Св-08Г2С в углекислом газе, значительно повышает их контактную и усталостную прочность, значения которых достигают уровня новых деталей, изготовляемых из легированных сталей.

Термомеханическое упрочнение восстанавливаемых деталей в процессе наплавки на менее эффективный технологический прием улучшения структуры наплавленного металла, уменьшения качества дефектов в нем, повышения его прочности, снижения припусков на последующую обработку. При сочетании наплавки вибрирующим электродом с термомеханическим упрочнением статистическая прочность металлопокрытия повышается в 3...5 раз, а усталостная прочность — на 16...52 %. Значительное повышение качества металла, наплавляемого легированными проволоками в среде углекислого газа, достигается комплексным применением высокотемпературного и низкотемпературного упрочнения.

На рисунке 67 показана схема проведения термомеханического упрочнения (ТМУ) в процессе наплавки деталей. Наплавку ТМУ целесообразно проводить деталей диаметром до 50 мм проволоками аустенитного класса и проволоками, поддающимися закалке. Оптимальный режим наплавки: постоянный ток обратной полярности 120...150 А, напряжение 18...20 В, ско-

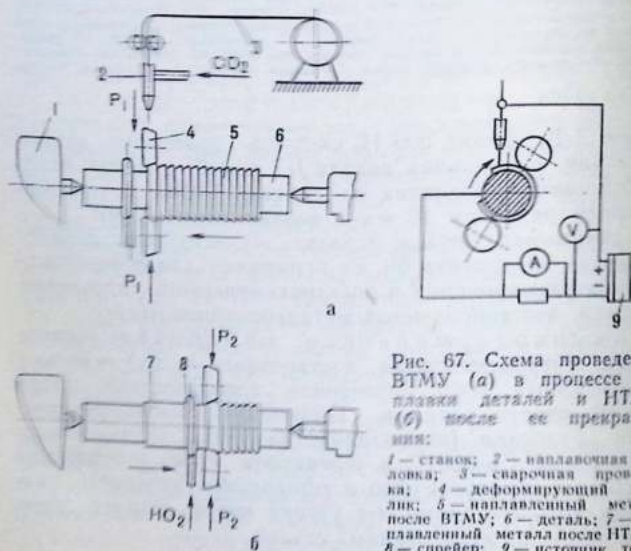


Рис. 67. Схема проведения ВТМУ (а) в процессе наплавки деталей и ИТМУ (б) после ее прекращения:

1 — станок; 2 — наплавочная головка; 3 — сварочная проволока; 4 — деформирующий ролик; 5 — наплавленный металл после ВТМУ; 6 — деталь; 7 — наплавленный металл после ИТМУ; 8 — спрейер; 9 — источник тока.

рость подачи проволоки 1,95 м/мин, вылет электрода 7...10 мм, расход углекислоты 8...10 л/мин, шаг плавки 1,5...5,5 мм/об (для $\varnothing$ 15...50 мм), частота вращения детали 3...12 об/мин, расход охлаждающей жидкости 1,0...1,5 л/мин (3%-ый раствор кальцинированной соды и 10%-ый раствор технического глицерина в воде), усилие деформирования при ТМУ 1000...5000 Н, при НТМУ 9000...10 000 Н, частота вращения детали 400...600 об/мин, подача проволоки 0,6...1,0 мм/об.

При ТМУ металлопокрытия производительность изготовления деталей увеличивается на 14...40 %, уменьшается расход проволоки на 25 %, повышается долговечность деталей на 30 % и более [15].

Восстановление и упрочнение деталей гальваническими покрытиями. Ремонтные предприятия сельского хозяйства успешно применяют износостойкое хромирование для восстановления и упрочнения деталей топливной аппаратуры и гидросистем, толкателей, поршневых пальцев автотракторных двигателей, крестовин карданных валов и дифференциалов и других, а также железнение (осталивание) и другие способы. Разработан ряд разновидностей этих процессов: хромирование в осмотрегулирующихся электродах, реверсивное хромирование, холодное хромирование в тетрахроматном электролите, хромирование в ультразвуковом поле, железнение на асимметричном токе, нанесение гальваническим путем различных сплавов.

Область применения прогрессивных гальванических процессов для восстановления и упрочнения изношенных деталей расширяется с проведением их в селективных, так и в прочных ваннах.

Гальванические покрытия многократными сплавами на основе железа, никеля и кобальта повышают долговечность восстанавливаемых деталей в 3—6 раз. Процесс рекомендуется вести при таких условиях: плотность тока $\Phi_k = 25...30$ А/дм², $t = 45...50$ °С; состав ванны: хлористое железо 150...200 г/л, сернистой кислоты 15...20 г/л, хлористый кобальт 5...10 г/л, хлористый никель 0,5...1,0 г/л.

Восстановление деталей полимерными материалами используют для:

1) заделки трещин и пробоин применением мастики следующего и других составов: 100 весовых частей

(в. ч.) эпоксидной смолы ЭД-6, 15 в. ч. дибутилфталата, 7 в. ч. полиэтиленполиамина (отвердитель), 150 в. ч. наполнителя (чугунная или алюминиевая стружка, смола, цемент, асбест, стеклоткань и др.);

2) приклеивания фрикционных накладок с помощью клея ВС-10Т при 180 °С и давлении 0,1...0,3 МПа в течение 45 мин;

3) газопламенного напыления поверхностей кабин и оперения машин на установках УПН-6 (УПН-7) полимерными порошками ПНФ-12 и ПТФ-37;

4) восстановления отверстий в корпусных деталях с помощью композиций состава: 100 весовых частей смолы ЭД-6, 120 в. ч. железного порошка, 50 ... 60 в. ч. цемента, 30 в. ч. низкомолекулярного полиамида (олигоамид Л-19).

Другие способы восстановления и упрочнения деталей, из которых наиболее распространены следующие.

Электроконтактная наплавка может осуществляться путем приварки на изношенные поверхности деталей лент или проволок, а также напекания на них металлических порошков. Способ отличается высокой производительностью и универсальностью, так как позволяет приваривать к поверхностям стальных и чугунных деталей различной формы ленты из высокоуглеродистых и легированных сталей толщиной 0,1...0,3 мм и более. При этом основной металл детали почти не нагревается.

Разновидности контактных способов — электроимпульсное и электронискровое наращивание тонких покрытий на рабочие поверхности различных валов и шеек, которые работают в неподвижных сопряжениях.

Электроимпульсное наращивание. Процесс протекает в струе воды (расход 0,2...0,5 л/мин) при напряжении холостого хода 8...9,5 В и периодическом контактировании электрода (сталь ХВГ) с деталью. Возможно нанесение слоя с высокой твердостью (HRC 45 ... 50) и износостойкостью толщиной до 0,7...1,0 мм, при этом производительность достигает 60 см²/мин при сплошном покрытии до 85 %. Электроимпульсным способом на установках УМН-5 успешно восстанавливают оси катков и опорных роликов тракторов и других деталей.

Электронискровое наращивание (например, твердых сплавов) может быть использовано для

восстановления изношенных деталей по поверхностям неподвижных сопряжений (мест под подшипники качения на валах и осях). Процесс ведется переносом материала электрода (анода) на деталь (катод) при электронском разряде в газовой среде. Производительность установки ЭФИ-46 и ЭФИ-25М составляет 2...3 см²/мин, толщина наносимого покрытия достигает 0,07...0,3 мм.

Армирование твердыми сплавами позволяет создавать сверхизносостойкие поверхности на изношенных и новых деталях. Их износостойкость в 20...30 раз выше, чем у закаленной стали.

Заливка жидким металлом используется для восстановления и повышения долговечности крупногабаритных деталей ходовой части тракторов класса 30 кН с большими износами опорных катков и звеньев гусениц.

§ 7. КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РЕМОНТА

Система управления качеством, являясь составным элементом общей системы управления, на любом уровне должна способствовать выявлению и изучению главных проблем качества, выбору наиболее эффективных путей их реализации и повышения эффективности контроля. Основные факторы, влияющие на качество отремонтированной техники, приведены на рисунке 68.

В последние годы предприятия Госкомсельхозтехники СССР стали применять так называемую Львовскую систему управления качеством продукции. Главное преимущество этой системы состоит в том, что она позволяет оценить результаты работы каждой службы, каждого члена коллектива и действительно применять метод их материального стимулирования. Для оценки качества труда вводится балльная система. За каждую ошибку (дефект) оценка снижается в соответствии со шкалой, разработанной для каждой категории работников.

Система управления качеством ремонта в объединении Госкомсельхозтехники СССР включает следующие подсистемы.

Подсистема планирования повышения качества ремонта должна включать: составление и утверждение

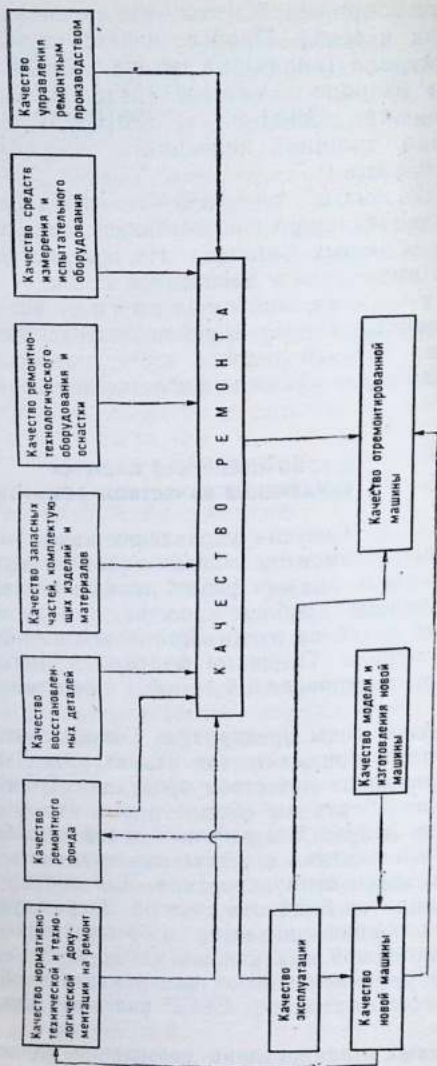


Рис. 68. Факторы, влияющие на качество ремонта.

перспективных, годовых и тематических планов организационно-технических мероприятий по повышению качества продукции, корректировку планов и контроль за их выполнением, а также оценку эффективности мероприятий по повышению качества продукции, причем наиболее важные из них должны ежегодно включаться в план научно-технического прогресса. Эти задания должны быть увязаны с заданиями, предусмотренными в других разделах техпромфинплана предприятия, и обеспечены необходимыми материалами, трудовыми и финансовыми ресурсами.

Основные задачи подсистемы управления качеством технологической подготовки производства: составление планов-графиков подготовки производства и контроль за их выполнением, контроль качества разрабатываемой технологической документации, приемка технологических процессов от разработчиков, усиленный контроль качества продукции в период освоения технологического процесса, проведение заводских ускоренных испытаний, организация подконтрольной эксплуатации продукции, отремонтированной с использованием нового технологического процесса.

Подсистема метрологического обеспечения качества ремонта предусматривает: приемку средств измерения и испытательного оборудования от поставщиков и из ремонта; составление и контроль за выполнением планов-графиков проверки, регламентированного ремонта и аттестации; инспекционный контроль правильности применения и хранения средств измерения и испытательного оборудования; сбор, обобщение; анализ информации и принятие соответствующих мер по устранению отказов этих средств в эксплуатации; обучение производственного персонала и аппарата ОТК правилам эксплуатации контрольных средств; разработку и реализацию предложений по совершенствованию метрологического обеспечения, внедрению новых методов и средств измерений.

Подсистема управления качеством запасных частей, материалов и комплектующих изделий. В ее функции входят: разработка (получение), учет и обеспечение исполнителей технической документацией, устанавливающей требования к качеству покупных изделий; определение методов и средств контроля качества; приемка покупных изделий по качеству, рекламация и изоляция

некачественных изделий; сбор и обобщение информации по результатам входного контроля; представление ее руководству предприятия; организация связи с поставщиками покупных изделий и органами Госстандарта; разработка и реализация предложений по совершенствованию входного контроля.

Подсистема обеспечения точности и стабильности технологических процессов. Основные задачи подсистемы: составление и контроль за выполнением графиков планово-предупредительного ремонта (ППР) технологического оборудования; приемка технологического оборудования из ремонта; составление графиков и установление регламента обслуживания оборудования; разработка графиков и проведение проверки оборудования на технологическую точность; установление норм точности, методов и средств проверки; обучение производственного персонала правилам эксплуатации оборудования; учет и контроль за соблюдением периодичности, а также организация принудительной замены оснастки и инструмента; периодическая проверка и испытания энергетического оборудования, контрольно-измерительных приборов и объектов котлонадзора.

Подсистема управления качеством ремонтного фонда включает следующие функции: приемку изделий (объектов) в ремонт в соответствии с требованиями отраслевой нормативно-технической документации на ремонт и договорами с хозяйствами; сбор, обобщение и представление руководству предприятия информации о комплектности сдаваемых в ремонт объектов (изделий); организацию воздействий на заказчиков, нарушающих установленный порядок сдачи в ремонт; контроль правильности хранения ремонтного фонда; периодическую проверку обоснованности направления объекта (изделия) в ремонт.

Подсистема обеспечения технологической дисциплины. Ее основные задачи: плановый и оперативный контроль соблюдения технологической дисциплины, разработка и реализация мероприятий по результатам контроля за соблюдением технологической дисциплины, целевые проверки технологических процессов, разработка и реализация мероприятий по случаям массового брака и рекламациям потребителей, организация технической учебы, аттестация рабочих на право выполнения

специальных и сложных работ, проверка культуры производства.

Подсистема контроля качества и испытаний отремонтированных объектов (изделий). На нее возлагают следующие основные задачи: составление планов контроля качества; операционный контроль качества отремонтированных узлов, наиболее ответственных деталей и технологических операций; приемку продукции от исполнителей и учет ее сдачи с первого и последующих предъявлений; предотвращение направления бракованной продукции потребителю; приемочный контроль и испытания готовой продукции; сбор и анализ информации о дефектах и отказах отремонтированных объектов (изделий) при обкатке и испытаниях, а также анализ рекламаций; инспекционный контроль качества работы контролеров; техническую учебу аппарата отдела технического контроля; разработку и реализацию мероприятий по совершенствованию контроля качества продукции.

Подсистема управления качеством труда, стимулирование качества продукции предусматривает: установление требований и показателей качества труда (дифференцированно для различных категорий работающих); разработку положений о премировании работников в зависимости от качества труда; сбор оперативной информации и оценку качества труда работников по установленным показателям; подготовку и повышение квалификации работников по вопросам управления качеством продукции; аттестацию руководящих и инженерно-технических работников; моральное и материальное стимулирование по результатам социалистического соревнования за высокое качество труда и выпускаемой продукции; установление номенклатуры узлов, деталей и технологических процессов, подлежащих заводской аттестации, а также условий аттестации, планирование, подготовку и проведение заводской аттестации; контроль за качеством продукции и технологических процессов, удостоенных заводского аттестата качества (в дополнение к обычным видам контроля); моральное и материальное стимулирование по результатам аттестации.

Подсистема сбора, обработки и использования информации о надежности отремонтированной техники предусматривает: сбор и обобщение информации о на-

дежности объектов (изделий) в период гарантийного срока, а также о результатах эксплуатации в опорных хозяйствах; анализ информации о надежности; выявление причин поступления объектов (изделий) в ремонт, характерных, повторяющихся отказов; разработку планов и реализацию мероприятий по повышению надежности и устранению повторяющихся отказов.

Подсистема обеспечения качества эксплуатации отремонтированных объектов (изделий) включает: организацию гарантийного ремонта; оказание технической помощи в организации технического обслуживания и текущего ремонта техники в хозяйствах; оказание технической помощи в организации предремонтного диагностирования технического состояния машин, их сборочных единиц и агрегатов; техническую консультацию для повышения квалификации механизаторов; сбор и анализ замечаний и пожеланий хозяйств по вопросам качества отремонтированной техники и принятие по ним соответствующих мер; проведение совместно с представителями заказчика конференции по качеству продукции.

Подсистема организации научно-технической информации по качеству продукции предусматривает систематическое получение и накопление информации по вопросам технологии, организации ремонта техники и повышения качества продукции; абонементное регулярное обеспечение специалистов информацией по профилю работы; организацию изучения передового опыта на предприятиях Госсельхозтехники СССР и отраслей промышленности; обеспечение системы технической учебы необходимой литературой.

Подсистема внедрения и контроля за соблюдением стандартов и нормативно-технической документации должна обеспечивать: получение, размножение, учет, хранение и обеспечение подразделений предприятия ГОСТ, ОСТ, отраслевыми документами на ремонт и стандартами предприятия; планирование внедрения ГОСТ, ОСТ, отраслевой нормативно-технической документации на ремонт, разработку, внедрение и пересмотр стандартов предприятия. Контроль за выполнением плана работ по стандартизации и надзор за соблюдением стандартов.

При разработке мероприятий по внедрению комплексной системы управления качеством ремонта следу-

ет пользоваться «Основными положениями по разработке и внедрению на ремонтных предприятиях системы Госкомсельхозтехники СССР комплексных систем управления качеством продукции на базе стандартизации» [40].

§ 8. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Таким образом, из ранее сказанного следует, что качество и надежность отремонтированных машин в значительной степени зависят не только от уровня технологии и организации ремонтных работ и восстановления изношенных деталей непосредственно на ремонтных предприятиях, но и от системы организации ремонта машин в целом, а также от уровня работы предприятий тракторного, сельскохозяйственного и других производств, обеспечивающих поставку ремонтным предприятиям запасных частей, оборудования, ремонтно-эксплуатационных материалов. Решающее влияние на качество ремонта машин оказывает степень конструктивной и технологической доработанности, ремонтно-пригодности и долговечности новых машин, их агрегатов и сборочных единиц. Это наглядно подтверждается опытом Ярославского моторостроительного и Кременчугского автомобильного заводов, одобренным ЦК КПСС, по доведению доремонтного ресурса машин до 10 тыс. моточасов.

Система организации ремонта машин в целом совершенствуется в направлениях, которые значительно повысят долговечность машин и резко снижат затраты на их ремонт.

1. Установление более тесной связи ремонтных предприятий с аналогичными автомобильными, тракторными, моторными и другими заводами, а также создание ремонтных предприятий как филиалов этих заводов.

2. Ликвидация межведомственных барьеров и межобластной разобщенности ремонтных предприятий.

3. Специализация и концентрация ремонтного производства с созданием следующих оптимальных мощностей: по ремонту автомобилей 10...20 тыс., тракторов 2...6 тыс., комбайнов 0,5...1,5 тыс., тракторных двигателей 15...60 тыс., сборочных единиц топливной

аппаратуры и гидросистем по 40...60 тыс. комплектов в год.

4. Кооперирование между ремонтными и другими предприятиями.

Значительное повышение надежности отремонтированных машин может быть достигнуто введением в систему ремонта стендовых и полигонных ускоренных испытаний деталей, сборочных узлов, агрегатов и машин в целом, а также более широкими эксплуатационными испытаниями отремонтированных машин в хозяйствах (на завершающем этапе) и МИС.

§ 9. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО ДЕТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

В качестве примера приведем здесь экономическую эффективность от внедрения в производство некоторых деталей и пар трения топливного насоса повышенной надежности.

Благодаря термодиффузионному хромированию некоторых деталей топливного насоса и его регулятора ресурс насоса до капитального ремонта повысился с 50 000 до 600 000 ч [15].

Экономика в сфере производства в данном случае достигается вследствие сокращения числа деталей толкателя (исключена втулка ролика толкателя), стоимость которых больше, чем затраты, связанные с введением дополнительного технологического процесса по упрочнению деталей.

1. Себестоимость комплекта втулок для одного насоса 0,20 руб.

2. Сокращение затрат вследствие изменения конструкции толкателя при программе производства 175 000 насосов в год $0,20 \cdot 175\,000 = 35\,000$ руб.

3. Дополнительные затраты, связанные с введением технологического процесса упрочнения деталей:
для комплекта деталей одного насоса 0,062 руб.;
для программы $0,062 \cdot 175\,000 = 10\,850$ руб.;

4. Экономия в сфере производства составила $35\,000 - 10\,850 = 24\,150$ руб.

5. Экономия в сфере эксплуатации определяют в таком порядке.

При ремонте:

- 1) годовая загрузка трактора — 2000 га;
- 2) число ремонтов в год;
до повышения ресурса — 0,40;
после повышения ресурса — 0,33;
- 3) затраты на один ремонт — 28,80 руб.;
- 4) программа выпуска насосов — 175 000;
- 5) экономический эффект от повышения ресурса —
 $(0,40 - 0,33) \cdot 28,80 \cdot 17\,500 = 352\,000$ руб.;
- 6) доля экономического эффекта, приходящаяся на
группу упрочняемых деталей (70 %), $352\,000 \cdot 0,7 =$
 $= 246\,000$ руб.

При техническом обслуживании:

- 1) межрегулировочный период до повышения ресурса — 1920 ч.;
 - 2) число регулировок в год:
до повышения ресурса — 1;
после повышения ресурса — нет;
 - 3) затраты по заработной плате для выполнения одной регулировки топливного насоса — 1,387 руб., в том числе по операциям;
снятие насоса с двигателя и установка его на двигатель $0,8 \cdot 0,451 = 0,3608$ руб.;
 - проверка и регулировка угла начала подачи топлива $0,7 \cdot 0,525 = 0,3675$ руб.; регулировка насоса $1,08 \cdot 0,61 = 0,6588$ руб.
- (в приведенном расчете затраты представляют собой произведение нормы времени на часовую тарифную ставку);
- 4) экономический эффект при техническом обслуживании $1,387 \cdot 175\,000 = 242\,725$ руб.

Таким образом, экономический эффект в процессе эксплуатации составил $246\,000 + 242\,725 = 488\,725$ руб. Общий годовой экономический эффект при производстве и эксплуатации равен $24150 + 488\,725 = 512\,875$ руб.

§ 10. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЯ

Технико-экономическая оценка способов восстановления изношенных деталей складывается из анализа безотказности, долговечности и стоимости. Безотказность восстановленных деталей определяется

главным образом усталостной прочностью металлопокрытия и прочностью сцепления его с основным металлом.

При восстановлении деталей необходимо применять способы, обеспечивающие показатели усталостной прочности не ниже новых деталей. Нами произведено сравнение следующих видов наплавки деталей: без термомеханической обработки, с высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО) и с низкотемпературной термомеханической обработкой (НТМО). Условия рациональности восстановления деталей определяются по зависимости:

$$C_1 i_1 \leq C_2 i_2,$$

где C_1 — себестоимость восстановления предлагаемым способом; C_2 — себестоимость восстановления способом, с которым ведется сравнение, i_1 и i_2 — интенсивность износа при соответствующих способах восстановления.

Для сравнения нескольких вариантов восстановления удобен показатель относительной себестоимости восстановления (C_0):

$$C_0 = \frac{C_p}{k},$$

где C_p — себестоимость восстановления рассматриваемым способом; k — коэффициент долговечности восстановленной детали.

Таблица 9. Техничко-экономическая эффективность восстановления деталей механизированной наплавкой

Показатели наплавки	Виды наплавки		
	без ТМО	с ВТМО	с НТМО
Производительность, $\text{дм}^2/\text{мин}$	0,37	0,43	0,46
Затраты, коп.:			
на электроэнергию	0,45	0,28	0,31
на материалы	7,84	4,90	3,17
на оплату труда при наплавке	3,00	2,65	2,71
на оплату труда при механической обработке	3,15	2,60	2,10
Накладные расходы, коп.	15,16	10,98	8,47
Себестоимость восстановления 1 дм^2 поверхности	29,30	21,44	16,54
Коэффициент долговечности	1,00	1,09	1,30
Относительная себестоимость восстановления, коп.	29,30	19,5	12,8

Результаты расчетов приведены в таблице 9.

При производстве расчетов были использованы также нормативные и методические материалы ГОСНИТИ. Проведенные расчеты показывают, что благодаря увеличению числа оборотов и шага при наплавке с ТМО можно повысить производительность восстановления деталей, уменьшить расход наплавочных материалов и улучшить условия механической обработки.

Применение такого способа восстановления деталей с термомеханической обработкой металлопокрытия и внедренного в Пересечанской ремонтной мастерской Госкомсельхозтехники позволило получить годовой экономический эффект более 20 000 руб.

§ 11. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ПРИРАБОТКИ ПАР ТРЕНИЯ В ЗАВОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Тракторы и другие машины необходимо обкатать в заводских условиях, а уже в хозяйствах они должны использоваться с полной нагрузкой со дня приобретения. Это дает возможность устранить потерю рабочего времени (около 30 ч), которые обычно расходуют на обкатку машины. Таким образом, годовая загрузка трактора, например Т-74, составляет $2000 - 30 = 1970$ ч (базовый вариант), в проектируемом (предлагаемом) варианте — 2000 ч [15].

В данном случае при расчете эксплуатационных затрат будем рассматривать только изменяющиеся в проектируемом варианте составляющие. Такими затратами будут отчисления на реновацию и заработная плата. Отчисления на реновацию составляют 12,5 % от балансовой стоимости [41] и в расчете на 1 ч работы составляют:

$$R = \frac{B_c r}{100T}, \quad (5.1)$$

где B_c — балансовая стоимость трактора Т-74 (составляет 2360 руб.); r — процент отчислений на реновацию (равен 12,5 %); T — годовая нагрузка в часах (равна 2000 ч) [42].

Тогда по базовому варианту $R_0 = 0,150$ руб./ч, по проектному $R_0 = 0,147$ руб./ч.

Для тракториста 3-го класса IV разряда при обкатке трактора в течение 3 ч заработная плата составит 0,74 руб/ч.

Экономия эксплуатационных затрат составит:

$$\mathcal{E} = (R_0 + 3r_0 + R_1) T_{\text{обк}}, \quad (5.2)$$

где $T_{\text{обк}}$ — время обкатки (равно 30 ч).

Подставив данные в формулу (5.2), получим, что экономия равна 22,29 руб.

Годовой экономический эффект определяют по формуле:

$$\mathcal{E}_г = \mathcal{E} + E_n (K_{y_0} + K_{y_1}) T_{\text{обк}}, \quad (5.3)$$

где E_n — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, равный 0,15; K_{y_0} , K_{y_1} — удельные капиталовложения в расчете на 1 ч работы соответственно по базовому и проектируемому вариантам.

$$K_{y_1} = \frac{2360}{2000} = 1,180 \text{ руб/ч}; \quad K_{y_0} = \frac{2360}{1970} = 1,200 \text{ руб/ч}.$$

Подставляя данные в формулу (5.3) и произведя вычисления, находим, что в расчете на один условный трактор Т-74 годовой экономический эффект потребителя составит 23,2 руб.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Значения нормальной функции распределения:

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}t^2} dt$$

t	Φ(t)	Δ	t	Φ(t)	Δ
-0,00	0,5000	40	-0,43	3336	36
-0,01	4960	40	-0,44	3300	36
-0,02	4920	40	-0,45	3264	36
-0,03	4880	40	-0,46	3228	36
-0,04	4840	39	-0,47	3192	36
-0,05	4801	40	-0,48	3156	35
-0,06	4761	40	-0,49	3121	36
-0,07	4721	40	-0,50	0,3085	35
-0,08	4681	40	-0,51	3050	35
-0,09	4641	39	-0,52	3015	34
-0,10	0,4602	40	-0,53	2981	35
-0,11	4562	40	-0,54	2946	34
-0,12	4522	39	-0,55	2912	35
-0,13	4483	40	-0,56	2877	34
-0,14	4443	39	-0,57	2843	33
-0,15	4404	40	-0,58	2810	34
-0,16	4364	39	-0,59	2776	33
-0,17	4325	39	-0,60	0,2743	34
-0,18	4286	39	-0,61	2709	33
-0,19	4247	40	-0,62	2676	33
-0,20	0,4207	39	-0,63	2643	32
-0,21	4168	39	-0,64	2611	33
-0,22	4129	39	-0,65	2578	32
-0,23	4090	38	-0,66	2546	32
-0,24	4052	39	-0,67	2514	31
-0,25	4013	39	-0,68	2483	32
-0,26	3974	38	-0,69	2451	31
-0,27	3936	39	-0,70	0,2420	31
-0,28	3897	38	-0,71	2389	31
-0,29	3859	38	-0,72	2358	3
-0,30	0,3821	38	-0,73	2327	3
-0,31	3783	38	-0,74	2297	3
-0,32	3745	38	-0,75	2266	30
-0,33	3707	38	-0,76	2236	30
-0,34	3669	37	-0,77	2206	29
-0,35	3632	38	-0,78	2177	29
-0,36	3594	37	-0,79	2148	29
-0,37	3557	37	-0,80	0,2119	29
-0,38	3520	37	-0,81	2090	29
-0,39	3483	37	-0,82	2061	28
-0,40	0,3446	37	-0,83	2033	28
-0,41	3409	37	-0,84	2005	28
-0,42	3372	36	-0,85	1977	28

t	$\Phi(t)$	Δ	t	$\Phi(t)$	Δ
-0,86	1949	27	-1,35	0885	16
-0,87	1922	28	-1,36	0869	16
-0,88	1894	27	-1,37	0853	15
-0,89	1867	26	-1,38	0838	15
-0,90	0,1841	27	-1,39	0823	15
-0,91	1814	26	-1,40	0,0808	15
-0,92	1788	26	-1,41	0793	15
-0,93	1762	26	-1,42	0778	14
-0,94	1736	25	-1,43	0764	15
-0,95	1711	26	-1,44	0749	14
-0,96	1685	25	-1,45	0735	14
-0,97	1660	25	-1,46	0721	13
-0,98	1635	24	-1,47	0708	14
-0,99	1611	24	-1,48	0694	13
-1,00	0,1587	24	-1,49	0681	13
-1,01	1563	24	-1,50	0,0668	13
-1,02	1539	24	-1,51	0655	12
-1,03	1515	23	-1,52	0643	13
-1,04	1492	23	-1,53	0630	12
-1,05	1469	23	-1,54	0618	12
-1,06	1446	23	-1,55	0606	12
-1,07	1423	22	-1,56	0594	12
-1,08	1401	22	-1,57	0582	11
-1,09	1379	22	-1,58	0571	12
-1,10	0,1357	22	-1,59	0559	11
-1,11	1335	21	-1,60	0,0548	11
-1,12	1314	22	-1,61	0537	11
-1,13	1292	21	-1,62	0526	10
-1,14	1271	20	-1,63	0516	11
-1,15	1251	21	-1,64	0505	10
-1,16	1230	20	-1,65	0495	10
-1,17	1210	20	-1,66	0485	10
-1,18	1190	20	-1,67	0475	10
-1,19	1170	19	-1,68	0465	10
-1,20	0,1151	20	-1,69	0455	9
-1,21	1131	19	-1,70	0,0446	10
-1,22	1112	19	-1,71	0436	9
-1,23	1093	18	-1,72	0427	9
-1,24	1075	18	-1,73	0418	9
-1,25	1056	19	-1,74	0409	8
-1,26	1038	18	-1,75	0401	9
-1,27	1020	17	-1,76	0392	8
-1,28	1003	18	-1,77	0384	9
-1,29	0985	17	-1,78	0375	8
-1,30	0,0968	17	-1,79	0367	8
-1,31	0951	17	-1,80	0,0359	8
-1,32	0934	16	-1,81	0351	7
-1,33	0918	17	-1,82	0344	8
-1,34	0901	16	-1,83	0336	7

t	$\Phi(t)$	Δ	t	$\Phi(t)$	Δ
-1,84	0329	7	0,13	5517	40
-1,85	0322	8	0,14	5557	39
-1,86	0314	7	0,15	5596	40
-1,87	0307	6	0,16	5636	39
-1,88	0301	7	0,17	5675	39
-1,89	0294	6	0,18	5714	39
-1,90	0,0288	7	0,19	5753	40
-1,91	0281	7	0,20	0,5793	39
-1,92	0274	6	0,21	5832	39
-1,93	0268	6	0,22	5871	39
-1,94	0262	6	0,23	5910	38
-1,95	0256	6	0,24	5948	39
-1,96	0250	6	0,25	5987	39
-1,97	0244	5	0,26	6026	38
-1,98	0239	6	0,27	6064	39
-1,99	0233	5	0,28	6103	38
-2,00	0,0228	49	0,29	6141	38
-2,10	0179	40	0,30	0,6179	38
-2,20	0139	32	0,31	6217	38
-2,30	0107	25	0,32	6255	38
-2,40	0082	20	0,33	6293	38
-2,50	0062	15	0,34	6331	37
-2,60	0047	12	0,35	6368	38
-2,70	0035	9	0,36	6406	37
-2,80	0026	7	0,37	6443	37
-2,90	0019	5	0,38	6480	37
-3,00	0,0014	4	0,39	6517	37
-3,10	0010	3	0,40	0,6554	37
-3,20	0007	2	0,41	6591	37
-3,30	0005	2	0,42	6628	36
-3,40	0003	1	0,43	6664	36
-3,50	0002	0	0,44	6700	36
-3,60	0002	1	0,45	6736	36
-3,70	0001	0	0,46	6772	36
-3,80	0001	1	0,47	6808	36
-3,90	0000		0,48	6844	35
0,00	0,5000	40	0,49	6879	36
0,01	5040	40	0,50	0,6915	35
0,02	5080	40	0,51	6950	35
0,03	5120	40	0,52	6985	34
0,04	5160	39	0,53	7019	35
0,05	5199	40	0,54	7054	34
0,06	5239	40	0,55	7088	35
0,07	5279	40	0,56	7123	34
0,08	5319	40	0,57	7157	33
0,09	5359	39	0,58	7190	34
0,10	0,5398	40	0,59	7224	33
0,11	5438	40	0,60	0,7257	33
0,12	5478	39	0,61	7291	33

t	$\Phi(t)$	Δ	t	$\Phi(t)$	Δ
0,62	7324	33	1,11	8665	21
0,63	7357	32	1,12	8686	22
0,64	7389	33	1,13	8708	21
0,65	7422	32	1,14	8729	20
0,66	7454	32	1,15	8749	21
0,67	7486	31	1,16	8770	20
0,68	7517	32	1,17	8790	20
0,69	7549	31	1,18	8810	20
0,70	0,7580	31	1,19	8830	19
0,71	7611	31	1,20	0,8849	20
0,72	7642	31	1,21	8869	19
0,73	7673	30	1,22	8888	19
0,74	7703	31	1,23	8907	18
0,75	7734	30	1,24	8925	19
0,76	7764	30	1,25	8944	18
0,77	7794	29	1,26	8962	18
0,78	7823	29	1,27	8980	17
0,79	7852	29	1,28	8997	18
0,80	0,7881	29	1,29	9015	17
0,81	7910	29	1,30	0,9032	17
0,82	7939	28	1,31	9049	17
0,83	7967	28	1,32	9066	16
0,84	7995	28	1,33	9082	17
0,85	8023	28	1,34	9099	16
0,86	8051	27	1,35	9115	16
0,87	8078	28	1,36	9131	16
0,88	8106	27	1,37	9147	15
0,89	8133	26	1,38	9162	15
0,90	0,8159	27	1,39	9177	15
0,91	8186	26	1,40	0,9192	15
0,92	8212	26	1,41	9207	15
0,93	8238	26	1,42	9222	14
0,94	8264	25	1,43	9236	15
0,95	8289	26	1,44	9251	14
0,96	8315	25	1,45	9265	14
0,97	8340	25	1,46	9279	13
0,98	8365	24	1,47	9292	14
0,99	8389	24	1,48	9306	13
1,00	0,8413	24	1,49	9319	13
1,01	8437	24	1,50	0,9332	13
1,02	8461	24	1,51	9345	12
1,03	8485	23	1,52	9357	13
1,04	8508	23	1,53	9370	12
1,05	8531	23	1,54	9382	12
1,06	8554	23	1,55	9394	12
1,07	8577	22	1,56	9406	12
1,08	8599	22	1,57	9418	11
1,09	8621	22	1,58	9429	12
1,10	0,8643	22	1,59	9441	11

t	$\Phi(t)$	Δ	t	$\Phi(t)$	Δ
1,60	0,9452	11	1,90	0,9713	6
1,61	9463	11	1,91	9719	7
1,62	9474	10	1,92	9726	6
1,63	9484	11	1,93	9732	6
1,64	9495	10	1,94	9738	6
1,65	9505	10	1,95	9744	6
1,66	9515	10	1,96	9750	6
1,67	9525	10	1,97	9756	5
1,68	9535	10	1,98	9761	6
1,69	9545	9	1,99	9767	5
1,70	0,9554	10	2,00	0,9772	49
1,71	9564	9	2,10	9821	40
1,72	9573	9	2,20	9861	32
1,73	9582	9	2,30	9893	25
1,74	9591	8	2,40	9918	20
1,75	9599	9	2,50	9938	15
1,76	9608	8	2,60	9953	12
1,77	9616	9	2,70	9965	9
1,78	9625	8	2,80	9974	7
1,79	9633	8	2,90	9981	5
1,80	0,9641	8	3,00	0,9986	4
1,81	9649	7	3,10	9990	3
1,82	9656	8	3,20	9993	2
1,83	9664	7	3,30	9995	2
1,84	9671	7	3,40	9997	1
1,85	9678	8	3,50	9998	0
1,86	9686	7	3,60	9998	1
1,87	9693	6	3,70	9999	0
1,88	9699	7	3,80	9999	1
1,89	9706	7	3,90	1,0000	

Таблица 2. Значения функции $f(x) = f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	x
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973	0,0
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918	0,1
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3825	0,2
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697	0,3
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538	0,4
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352	0,5
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144	0,6
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920	0,7
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685	0,8
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444	0,9
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203	1,0

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	x
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965	1,1
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736	1,2
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518	1,3
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315	1,4
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127	1,5
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957	1,6
1,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804	1,7
1,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669	1,8
1,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551	1,9
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449	2,0
2,1	0440	0431	0422	0413	0404	0396	0388	0379	0371	0363	2,1
2,2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290	2,2
2,3	0283	0277	0270	0264	0258	0222	0246	0241	0235	0229	2,3
2,4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180	2,4
2,5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139	2,5
2,6	0136	0132	0129	0126	0122	0119	0116	0113	0110	0107	2,6
2,7	0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081	2,7
2,8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061	2,8
2,9	0060	0058	0056	0055	0053	0051	0050	0048	0047	0046	2,9
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	0038	0037	0036	0035	0034	3,0
3,1	0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0026	0025	0025	3,1
3,2	0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018	0018	3,2
3,3	0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013	0013	3,3
3,4	0012	0012	0012	0011	0011	0010	0010	0010	0009	0009	3,4
3,5	0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007	0006	3,5
3,6	0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005	0005	0004	3,6
3,7	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003	0003	0003	5,7
3,8	0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002	3,8
3,9	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001	3,9

Таблица 3. Значения квантилей U_{α} функции $F_0(x)$

$F_0(x)=\alpha$	U_{α}	$F_0(x)=\alpha$	U_{α}	$F_0(x)=\alpha$	U_{α}	$F_0(x)=\alpha$	U_{α}
0,50	0	0,65	0,385	0,80	0,842	0,95	1,645
0,51	0,025	0,66	0,412	0,81	0,878	0,96	1,751
0,52	0,050	0,67	0,440	0,82	0,915	0,97	1,881
0,53	0,075	0,68	0,468	0,83	0,954	0,98	2,054
0,54	0,100	0,69	0,496	0,84	0,994	0,99	2,326
0,55	0,126	0,70	0,524	0,85	1,036	0,991	2,366
0,56	0,151	0,71	0,553	0,86	1,080	0,992	2,409
0,57	0,176	0,72	0,583	0,87	1,126	0,993	2,457
0,58	0,202	0,73	0,613	0,88	1,175	0,994	2,512
0,59	0,228	0,74	0,643	0,89	1,227	0,995	2,576
0,60	0,253	0,75	0,674	0,90	1,282	0,996	2,652
0,61	0,279	0,76	0,706	0,91	1,341	0,997	2,748
0,62	0,305	0,77	0,739	0,92	1,405	0,998	2,878
0,63	0,332	0,78	0,772	0,93	1,476	0,999	3,090
0,64	0,358	0,79	0,806	0,94	1,555	0,999	3,719

Таблица 4. Значения $P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}$ распределения Пуассона

m	$a=0,1$	$a=0,2$	$a=0,3$	$a=0,4$	$a=0,5$	$a=0,6$	$a=0,7$	$a=0,8$	$a=0,9$
0	0,9318	0,8187	0,7403	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1	0,0905	0,1638	0,2222	0,2681	0,3033	0,3293	0,3476	0,3593	0,3659
2	0,0015	0,0164	0,0333	0,0536	0,0758	0,0988	0,1217	0,1438	0,1647
3	0,0002	0,0019	0,0033	0,0072	0,0126	0,0193	0,0284	0,0383	0,0494
4		0,0001	0,0002	0,0007	0,0016	0,0030	0,0050	0,0077	0,0111
5				0,0001	0,0002	0,0004	0,0007	0,0012	0,0020
6							0,0001	0,0002	0,0003

Таблица 5. Значения $P(\lambda)$ критерия Колмогорова

λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$	λ	$P(\lambda)$
0,0	1,000	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,000	0,8	0,544	1,5	0,022
0,2	1,000	0,9	0,393	1,6	0,012
0,3	1,000	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,967	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

Таблица 6. Таблица значений $t_\gamma = t(\gamma, n)$

n	γ			n	γ		
	0,95	0,99	0,999		0,95	0,99	0,999
5	2,78	4,60	8,61	20	2,093	2,861	3,883
6	2,57	4,03	6,86	25	2,064	2,797	3,745
7	2,45	3,71	5,96	30	2,045	2,756	3,659
8	2,37	3,50	5,41	35	2,032	2,720	3,600
9	2,31	3,36	5,04	40	2,023	2,708	3,558
10	2,26	3,25	4,78	45	2,016	2,692	3,527
11	2,23	3,17	4,59	50	2,009	2,679	3,502
12	2,20	3,11	4,44	60	2,001	2,662	3,464
13	2,18	3,06	4,32	70	1,996	2,649	3,439
14	2,16	3,01	4,22	80	1,001	2,640	3,418
15	2,15	2,98	4,14	90	1,987	2,633	3,403
16	2,13	2,95	4,07	100	1,984	2,627	3,392
17	2,12	2,92	4,02	120	1,980	2,617	3,374
18	2,11	2,90	3,97	∞	1,960	2,576	3,291
19	2,10	2,88	3,92				

Таблица 7. Значения функции e^{-x}

x	e^{-x}	Δ	x	e^{-x}	Δ	x	e^{-x}	Δ	x	e^{-x}	Δ
0,00	1,000	10	0,40	0,670	7	0,80	0,449	4	3,00	0,050	5
0,01	0,990	10	0,41	0,664	7	0,81	0,445	5	3,10	0,045	4
02	980	10	42	657	7	82	440	4	3,20	41	4
03	970	9	43	650	6	83	436	4	3,30	37	4
04	961	10	44	644	6	84	432	5	3,40	33	3
05	951	9	45	638	7	85	427	4	3,50	30	3
06	942	10	46	631	6	86	423	4	3,60	27	2
07	932	9	47	625	6	87	419	4	3,70	25	3
08	923	9	48	619	6	88	415	4	3,80	22	2
09	914	9	49	613	7	89	411	4	3,90	20	2
0,10	0,905	9	0,50	0,606	6	0,90	0,407	4	4,00	0,0183	17
11	896	9	51	600	5	91	403	4	4,10	166	16
12	887	9	52	595	6	92	399	4	4,20	150	14
13	878	9	53	589	6	93	395	4	4,30	136	13
14	869	8	54	583	6	94	391	4	4,40	123	12
15	861	9	55	577	6	95	387	4	4,50	111	10
16	852	8	56	571	6	96	383	4	4,60	101	10
17	844	9	57	565	5	97	379	4	4,70	0,0091	9
18	835	8	58	560	6	98	375	3	4,80	82	8
19	827	8	59	554	5	99	372	4	4,90	74	7
0,20	0,819	8	0,60	0,549	6	1,00	0,368	35	5,00	0,0067	6
21	811	8	61	543	5	1,10	333	31	5,10	61	6
22	803	8	62	538	5	1,20	302	29	5,20	55	5
23	795	8	63	533	6	1,30	273	26	5,30	50	5
24	787	8	64	527	5	1,40	247	24	5,40	45	4
25	779	8	65	522	5	1,50	223	21	5,50	41	4
26	771	8	66	517	5	1,60	202	19	5,60	37	4
27	763	7	67	512	5	1,70	183	18	5,70	33	3
28	756	8	68	507	5	1,80	165	15	5,80	30	3
29	748	7	69	502	5	1,90	150	15	5,90	27	2
0,30	0,741	8	0,70	0,497	5	2,00	0,135	13	6,00	0,0025	3
31	733	7	71	492	5	2,10	122	11	6,10	22	2
32	726	7	72	487	5	2,20	111	11	6,20	20	2
33	719	7	73	482	5	2,30	100	9	6,30	18	1
34	712	7	74	477	5	2,40	0,091	9	6,40	17	2
35	705	7	75	472	5	2,50	82	8	6,50	15	1
36	698	7	76	468	5	2,60	74	7	6,60	14	2
37	691	7	77	463	5	2,70	67	6	6,70	12	1
38	684	7	78	458	4	2,80	61	6	6,80	11	1
39	677	7	79	454	5	2,90	55	5	6,90	10	1
0,40	0,670		0,80	0,449		3,00	0,050		7,00	0,0009	

Таблица 8. Значения критерия согласия χ^2 в зависимости от k и P

k/P	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,57	0,37	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,000	0,001	0,004	0,016	0,064	0,143	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84	5,41	6,64	1,83
2	0,020	0,010	0,033	0,111	0,446	0,713	1,336	2,41	3,42	4,60	5,99	7,32	9,21	13,2
3	0,057	0,035	0,082	0,216	0,878	1,424	2,37	3,60	4,64	6,25	7,82	9,34	11,34	16,27
4	0,101	0,071	0,161	0,377	1,489	2,20	3,35	4,87	5,99	7,78	9,49	11,67	13,28	18,47
5	0,154	0,107	0,233	0,542	2,071	2,70	4,35	6,05	6,29	9,21	11,07	13,39	15,09	20,5
6	0,205	0,141	0,312	0,715	2,700	3,43	5,33	7,23	8,56	10,64	11,59	15,03	16,81	22,5
7	0,254	0,178	0,393	0,900	3,267	4,07	6,35	8,38	9,60	12,02	14,07	16,62	18,43	24,3
8	0,301	0,213	0,474	1,093	3,859	4,73	7,24	9,52	11,03	13,36	15,51	18,17	20,1	27,1
9	0,346	0,250	0,555	1,294	4,499	5,43	8,34	10,66	12,24	14,8	16,92	19,68	21,7	29,9
10	0,389	0,286	0,636	1,503	5,193	6,18	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	21,2	23,2	29,7
11	0,431	0,321	0,717	1,719	5,941	6,99	10,31	12,90	14,63	17,28	19,68	22,6	24,7	31,3
12	0,472	0,357	0,799	1,943	6,734	7,81	11,31	14,01	15,81	18,55	21,0	24,1	26,2	32,9
13	0,512	0,392	0,882	2,175	7,571	8,63	12,31	15,12	16,98	19,81	22,4	25,5	27,7	34,6
14	0,552	0,427	0,965	2,415	8,451	9,47	13,34	16,22	18,13	21,1	23,7	26,9	29,1	36,1
15	0,591	0,461	1,048	2,662	9,374	10,31	14,34	17,32	19,31	22,3	25,0	28,3	30,6	37,7
16	0,629	0,495	1,131	2,916	10,339	11,15	15,34	18,42	20,5	23,5	26,3	29,6	32,0	39,3
17	0,666	0,528	1,214	3,175	11,364	12,02	16,34	19,51	21,6	24,8	27,6	31,0	33,4	40,8
18	0,702	0,561	1,297	3,439	12,400	12,86	17,34	20,6	22,8	26,0	28,9	32,3	34,8	42,3
19	0,737	0,594	1,380	3,707	13,446	13,72	18,34	21,7	23,9	27,2	30,1	33,7	36,2	43,8
20	0,771	0,627	1,463	3,979	14,502	14,58	19,31	22,8	25,0	28,4	31,4	35,0	37,6	45,3
21	0,805	0,659	1,546	4,255	15,568	15,44	20,3	23,9	26,2	29,6	32,7	36,3	38,9	46,8
22	0,838	0,691	1,629	4,537	16,644	16,31	21,3	24,9	27,3	30,8	33,9	37,7	40,3	48,3
23	0,871	0,723	1,712	4,822	17,730	17,18	22,3	25,9	28,4	32,0	35,2	39,0	41,6	49,7
24	0,904	0,755	1,795	5,109	18,826	18,04	23,3	27,1	29,6	33,2	36,4	40,3	43,0	51,2
25	0,937	0,787	1,878	5,398	19,932	18,94	24,3	28,2	30,7	34,4	37,7	41,7	44,3	52,6
26	0,969	0,819	1,961	5,689	21,047	19,82	25,3	29,2	31,8	35,6	38,9	42,9	45,6	54,1
27	0,999	0,851	2,044	5,982	22,171	20,7	26,3	30,3	32,9	36,7	40,1	44,1	47,0	55,5
28	1,029	0,883	2,127	6,277	23,304	21,6	27,3	31,4	34,0	37,9	41,3	45,4	48,3	56,9
29	1,058	0,915	2,210	6,573	24,446	22,5	28,3	32,5	35,1	39,1	42,6	46,7	49,6	58,3
30	1,087	0,947	2,293	6,870	25,597	23,5	29,3	33,5	36,2	40,3	43,8	48,0	50,9	59,7

Таблица 9. Значения функции

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt$$

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
0,10	0,0398	1,00	0,3413	1,45	0,4265	2,30	0,4893
0,12	0,0478	1,01	0,3438	1,46	0,4279	2,32	0,4898
0,14	0,0557	1,02	0,3461	1,47	0,4292	2,34	0,4904
0,16	0,0636	1,03	0,3485	1,48	0,4306	2,36	0,4909
0,18	0,0714	1,04	0,3508	1,49	0,4319	2,38	0,4913
0,20	0,0793	1,05	0,3531	1,50	0,4332	2,40	0,4918
0,22	0,0871	1,06	0,3554	1,52	0,4357	2,42	0,4922
0,24	0,0948	1,07	0,3574	1,54	0,4382	2,44	0,4927
0,26	0,1026	1,08	0,3599	1,56	0,4406	2,46	0,4931
0,28	0,1103	1,09	0,3621	1,58	0,4429	2,48	0,4934
0,30	0,1179	1,10	0,3643	1,60	0,4452	2,50	0,4938
0,32	0,1255	1,11	0,3665	1,62	0,4474	2,52	0,4941
0,34	0,1331	1,12	0,3686	1,64	0,4495	2,54	0,4945
0,36	0,1406	1,13	0,3708	1,66	0,4515	2,56	0,4948
0,38	0,1480	1,14	0,3729	1,68	0,4535	2,58	0,4951
0,40	0,1554	1,15	0,3749	1,70	0,4554	2,60	0,4953
0,42	0,1628	1,16	0,3770	1,72	0,4573	2,62	0,4956
0,44	0,1700	1,17	0,3790	1,74	0,4591	2,64	0,4959
0,46	0,1772	1,18	0,3810	1,76	0,4608	2,66	0,4961
0,48	0,1844	1,19	0,3830	1,78	0,4625	2,68	0,4963
0,50	0,1915	1,20	0,3849	1,80	0,4641	2,70	0,4965
0,52	0,1985	1,21	0,3869	1,82	0,4656	2,72	0,4967
0,54	0,2054	1,22	0,3883	1,84	0,4671	2,74	0,4969
0,56	0,2123	1,23	0,3907	1,86	0,4686	2,76	0,4971
0,58	0,2190	1,24	0,3925	1,88	0,4699	2,78	0,4973
0,60	0,2257	1,25	0,3944	1,90	0,4713	2,80	0,4974
0,62	0,2324	1,26	0,3962	1,92	0,4726	2,82	0,4976
0,64	0,2389	1,27	0,3980	1,94	0,4738	2,84	0,4977
0,66	0,2454	1,28	0,3997	1,96	0,4750	2,86	0,4979
0,68	0,2517	1,29	0,4015	1,98	0,4761	2,88	0,4980
0,70	0,2580	1,30	0,4032	2,00	0,4772	2,90	0,4981
0,72	0,2642	1,31	0,4049	2,02	0,4783	2,92	0,4982
0,74	0,2703	1,32	0,4066	2,04	0,4793	2,94	0,4984
0,76	0,2764	1,33	0,4082	2,06	0,4803	2,96	0,4985
0,78	0,2823	1,34	0,4099	2,08	0,4812	2,98	0,4986
0,80	0,2881	1,35	0,4115	2,10	0,4821	3,00	0,49865
0,82	0,2939	1,36	0,4131	2,12	0,4830	3,20	0,49931
0,84	0,2995	1,37	0,4147	2,14	0,4838	3,40	0,49966
0,86	0,3051	1,38	0,4162	2,16	0,4846	3,60	0,499841
0,88	0,3106	1,39	0,4177	2,18	0,4854	3,80	0,499928
0,90	0,3159	1,40	0,4192	2,20	0,4861	4,00	0,499968
0,92	0,3212	1,41	0,4207	2,22	0,4868	4,50	0,449997
0,94	0,3264	1,42	0,4222	2,24	0,4875	5,00	0,499997
0,96	0,3315	1,43	0,4236	2,26	0,4881		
0,98	0,3365	1,44	0,4251	2,28	0,4887		

ЛИТЕРАТУРА

1. Энгельс Ф. Диалектика природы.— М.: Политиздат, 1969.
2. ГОСТ 15467—79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.— М.: Издательство стандартов, 1979.
3. ГОСТ 13377—75. Надежность в технике. Термины.— М.: Издательство стандартов, 1975.
4. ГОСТ 18322—78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения.— М.: Издательство стандартов, 1978.
5. ГОСТ 23.002—78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.— М.: Издательство стандартов, 1978.
6. ОСТ 70/23.2.8. Тракторы и машины сельскохозяйственные. Надежность. Сбор и обработка информации.— М.: Издат. отдел ЦНИИТЭИ, 1974.
7. Рабинович А. Ш. и др. Методические указания по классификации и шифровке отказов тракторов.— М.: ГОСНИТИ, 1976.
8. Шлугер М. А., Ажогин Ф. Ф., Ефимов Е. А. Коррозия и защита металлов.— М.: Металлургия, 1981.
9. Вейль Г. Симметрия. Перевод с английского Б. В. Бирюкова и Ю. А. Данилова. Под редакцией Б. А. Розенфельда.— М.: Наука, 1968.
10. Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. Том первый. Симметрия кристаллов. Методы структурной кристаллографии.— М.: Наука, 1979.
11. Хрушов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание.— М.: Наука, 1970.
12. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию.— М.: Машиностроение, 1976.
13. Костецкий Б. И. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. Под общей редакцией Б. И. Костецкого.— Киев: Техника, 1976.
14. Крагельский И. В., Алисин В. В. Расчет интенсивности изнашивания материалов. Трение, изнашивание и смазка. Справочник, кн. 1. Под редакцией И. В. Крагельского, В. А. Алисина.— М.: Машиностроение, 1978.
15. Ермолов Л. С. Повышение надежности сельскохозяйственной техники (Основы теории и практики).— М.: Колос, 1979.
16. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение.— М.: Машиностроение, 1980.

17. Кобаско Н. И. Закалка стали в жидких средах под давлением. — Киев: Наукова думка, 1980.
18. Ермолов Л. С., Кряжков В. М., Черкун В. Е. Основы надежности сельскохозяйственной техники. Изд. 1-е. — М.: Колос, 1974.
19. Селиванов А. И., Артемьев Ю. Н. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники. — М.: Колос, 1978.
20. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.
21. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Изд. 5-е. — М.: Наука, 1977.
22. Артемьев Ю. Н. Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве. — М.: Колос, 1981.
23. Ломоносов Ю. Н. Основы надежности сельскохозяйственной техники. — Челябинск: 1980.
24. Косточкин В. В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. — М.: Машиностроение, 1976.
25. Проников А. С. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1978.
26. Ремонтпригодность машин. Под редакцией П. Н. Волкова. — М.: Машиностроение, 1975.
27. Статистические методы обработки эмпирических данных. — М.: Издательство стандартов, 1978.
28. Шор Я. Б., Кузьмин Ф. И. Таблицы для анализа и контроля надежности. — М.: Советское радио, 1968.
29. Анилович В. Я. и др. Эксплуатационная надежность с.х. машин. — Минск: Ураджай, 1974.
30. Ермолов Л. С. и др. Основы надежности сельскохозяйственной техники. — М.: Колос, 1974.
31. Кардашевский С. В. и др. Испытания сельскохозяйственной техники. — М.: Машиностроение, 1979.
32. Гнеденко Б. В. и др. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965.
33. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. — М.: Советское радио, 1962.
34. Методические указания по оценке, прогнозированию и нормированию ресурса и безотказности сельскохозяйственной техники. — М.: ГОСНИТИ, 1975.
35. Техническая диагностика тракторов и зерноуборочных комбайнов. Под редакцией В. М. Михлина — М.: Колос, 1978.
36. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин, т. 4 — М.: Машиностроение, 1969.
37. Елизаветин М. А., Сатель Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. Повышение эксплуатационных свойств на надежности работы деталей машин. Изд. 2-е, перераб. и дополн. — М.: Машиностроение, 1969.
38. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин. (Технологические основы повышения надежности машин). Изд. 2-е, перераб. и допол. — М.: Машиностроение, 1973.
39. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники механизированной наплавкой с применением упрочняющей технологии. Под редакцией В. М. Кряжкова. — М.: ОНТИ — ГОСНИТИ, 1972.

40. Швыдько В. М. Экономика и организация производственно-технического обслуживания колхозов и совхозов. — М.: Колос, 1978.
41. Нормативы амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства. — М.: Госплан, 1974.
42. Методика определения экономической эффективности модернизированных и новых конструкций тракторов и их агрегатов. — М.: ОНТИНАТИ, 1972.
43. Анилович В. Я., Литвиненко В. Л. Основы надежности сельскохозяйственной техники. Учебное пособие по дипломному проектированию. — М.: МИИСП, 1975.

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i>	3
Глава 1. Основные понятия и положения	7
§ 1. Основные понятия, терминология и определения	7
§ 2. Объекты, рассматриваемые в надежности	13
§ 3. Понятие о качестве машин и оборудования	13
§ 4. Качество и надежность	15
Глава 2. Физические основы надежности	17
§ 1. Классификация отказов сельскохозяйственных машин	17
§ 2. Внешние и внутренние факторы, снижающие надежность объектов	19
§ 3. Механо-физико-химическая природа внешнего трения твердых тел	40
§ 4. Виды и закономерности изнашивания деталей машин	49
§ 5. Основные направления формирования износостойких структур деталей машин	63
Глава 3. Математические методы определения показателей надежности	72
§ 1. Случайность отказов объектов	72
§ 2. Понятие о количественных показателях качества продукции и надежности	91
§ 3. Сбор и обработка информации о надежности	94
§ 4. Показатели безотказности	112
§ 5. Показатели долговечности	120
§ 6. Показатели ремонтпригодности и сохраняемости	124
§ 7. Комплексные показатели надежности	126
§ 8. Расчеты показателей надежности	132
Глава 4. Методы испытаний и контроля надежности сельскохозяйственной техники	150
§ 1. Классификация методов испытаний и контроля надежности	150
§ 2. Стендовые и полигонные испытания	152
§ 3. Эксплуатационные испытания	165
§ 4. Техническая диагностика	184
§ 5. Контрольные испытания на надежность	199
Глава 5. Основные направления повышения надежности сельскохозяйственной техники	207
§ 1. Требования к ремонтпригодности машин и оборудования	207
§ 2. Конструктивные мероприятия повышения надежности	211

§ 3.	Технологические мероприятия повышения надежности	215
§ 4.	Эксплуатационные мероприятия повышения надежности	224
§ 5.	Ремонтные мероприятия повышения надежности	231
§ 6.	Мероприятия по повышению долговечности	235
§ 7.	Комплексная система управления качеством ремонта	245
§ 8.	Перспективы развития организации ремонта сельскохозяйственной техники	251
§ 9.	Технико-экономическая эффективность от внедрения в производство деталей повышенной надежности	252
§ 10.	Технико-экономическая эффективность термомеханического упрочнения металлопокрытия	253
§ 11.	Технико-экономическая эффективность повышения надежности при управлении процессом приработки пар трения в заводских условиях	255
Приложение		257
Литература		267

Областная типография управления издательства,
полиграфии и книжной торговли Иванковского
облисполкома, 153628, г. Иваново,
ул. Типографская, 6.





Одно из основных направлений науки и практики о надежности изделий базируется на теории прочности и износостойкости деталей и материалов. И если расчет деталей машин на прочность в инженерной практике не представляет особой проблемы, то расчет долговечности деталей с учетом главного критерия — износостойкости в теории надежности машин представляет большую трудность.

Изучение закономерностей различных видов изнашивания — ключ к резкому повышению надежности машин.