

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра ремонта тракторов, автомобилей  
и сельскохозяйственных машин**

## **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Учебно-методический комплекс для студентов специальностей  
74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство  
в сельском хозяйстве», 74 06 06 «Материально-техническое обеспечение  
агропромышленного комплекса»*

**МИНСК  
2008**

УДК 62.192(075.8)  
ББК 34.41я 7  
Н 17

Рассмотрено на заседании научно-методического совета ФТС в АПК БГАТУ.

Протокол № 3 от 01 июня 2007 г.

Составители: д.т.н., профессор *В.С. Ивашко*;  
к.т.н., доцент *В.В. Кураш*;  
инженер *А.В. Кудина*

Рецензенты: д.т.н., профессор, зав. лаб. НИИЛПиЛТ БНТУ *Н.В. Спирidonов*;  
к.т.н., доцент кафедры технологии металлов БГАТУ *Л.Е. Сергеев*

УДК 62.192(075.8)  
ББК 34.41я7

© БГАТУ, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>МОДУЛЬ 1 ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b>	<b>7</b>
1 Основные понятия о качестве и надежности ТС.....	7
1.1 Понятия о качестве и надежности технических систем .....	7
1.2 Термины и определения.....	9
1.3 Надежность и ее составляющие.....	11
2 Инженерно-физические основы надежности.....	13
2.1 Теоретические основы снижения работоспособности машин в процессе эксплуатации .....	13
2.2 Физическая сущность процессов, снижающих надежность трибосистем .....	14
2.3 Механическое истирание трибоповерхностей деталей.....	21
2.4 Старение машин в процессе эксплуатации .....	26
2.5 Разрушения поверхностей и деталей машин.....	28
2.6 Классификация основных видов излома при разрушениях.....	35
3 Лабораторная работа «Выявление причин износа деталей, изнашивание поверхностей».....	38
4 Лабораторная работа «Разрушения деталей технических систем машин и механизмов.....	40
5 Тестовые задания по модулю 1.....	42
<b>МОДУЛЬ 2 КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА.....</b>	<b>48</b>
1 Дефекты и повреждения, снижающие надежность.....	48
1.1 Общие сведения о дефектах.....	48
1.2 Производственно-технологические дефекты.....	48
1.3 Эксплуатационные дефекты и повреждения.....	50
1.4 Отказы и повреждения.....	51
1.5 Методы обнаружения скрытых дефектов.....	53
2 Показатели надежности.....	62
2.1 Классификация и структура показателей надежности.....	62
2.2 Единичные показатели надежности.....	63
2.3 Комплексные показатели надежности.....	66
3 Лабораторная работа «Определение показателей надежности.....	69
4 Лабораторная работа «Диагностирование и выявление скрытых дефектов в деталях машин».....	73
5 Тестовые задания по модулю 2 .....	74

<b>МОДУЛЬ 3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>79</b>
1 Повышение надежности технических систем.....	79
1.1 Методы повышения надежности .....	80
1.2 Резервирование как метод повышения надежности.....	85
1.3 Прогнозирование надежности.....	87
1.4 Прогнозирование остаточного ресурса технических систем.....	91
1.5 Технический контроль качества продукции.....	95
2 Стандартизация и сертификация надежности.....	95
2.1 Роль стандартов в проблеме надежности.....	99
2.2 Системы стандартизации и сертификации надежности.....	102
3 Испытания на надежность.....	102
3.1 Общие организационно-методические принципы испытания техники	104
3.2 Организация и особенности испытаний машин на надежность.....	
3.3 Методы и технические способы ускоренных испытаний узлов и технических систем .....	112
4 Лабораторная работа «Определение остаточного ресурса сопряжений и деталей машин».....	123
5 Лабораторная работа «Влияние материала и способов упрочнения на твердость восстановленной поверхности».....	128
6 Тестовые задания по модулю 3.....	140
Оценка результатов рефератов и тестирования.....	145
Список использованных источников.....	146

## ВВЕДЕНИЕ

**Надежность** – одна из составных частей качества любой технической системы. Проблема обеспечения надежности технических систем возникает в машиностроении, сельском хозяйстве, на транспорте, строительстве и других отраслях промышленности постоянно.

Общая методология составляет предмет теории надежности как общетехнической дисциплины. В применении к сельскохозяйственной технике можно говорить о теории надежности технических систем машин и технологического оборудования.

Современные машины и системы машин содержат большое число немеханических (электрических, электронных, информационных и т.п.) элементов и соединений. Показатели надежности механических элементов и механических систем оценивают на основе физических моделей, в то время как для оценки показателей надежности машин чаще используют модели системной теории надежности.

В теории надежности существуют два направления: системная теория надежности и физическая теория. Объектом системной теории надежности служат системы из элементов, взаимодействующих между собой в смысле сохранения работоспособности по логическим схемам. Отличительная черта физической теории надежности состоит в том, что поддержание работоспособности системы и возможности возникновения отказов рассматривают в ней как результат взаимодействия между системой и внешними воздействиями (эксплуатационными нагрузками, условиями среды и т.п.), а также механическими, физическими и химическими процессами, которые происходят в компонентах системы в процессе ее эксплуатации.

**Надежность** – одна из основных проблем современной техники, которая решается на этапах проектирования, изготовления, испытания, эксплуатации и ремонта машин.

Поддержание работоспособности, восстановление ресурса машины и технологической готовности, повышение ее безотказности – главная задача предприятий, связанных с техническим сервисом.

Повышение надежности сельскохозяйственной техники имеет большое экономическое значение.

В формировании и развитии надежности как науки большой вклад внесли отечественные и зарубежные ученые.

Математическая теория надежности разработана в трудах О.Я. Хинчина, А.М. Колмогорова, Б.В. Гнеденко. Значительный вклад в развития теории надежности внесли А.И.Берг, М.Г. Бруевич, Я.Б. Шор, В.И. Вейбулл и др.

Методику оценки надежности с.-х. техники разработали В.Я. Анилович, В.М. Михлин, М.М. Севернев, Р.В. Кугель, М.М. Тененбаум и др.

Теория надежности относится к инженерным наукам, несмотря на то, что она использует теорию вероятности и математическую статистику.

Инженерный анализ надежности машин дает возможность выявить недостатки в организации технологии технического обслуживания.

Изучение выхода из строя деталей, отдельных единиц, агрегатов и элементов машины позволяет получить необходимые данные для усовершенствования конструкции, эксплуатации и ремонта с/х техники.

Обладание основами надежности технических систем помогает достижению высокой эффективности использования машин, экономии топлива, энергии рабочего времени и стоимости работ.

Курс " Надежность технических систем" очень важен для подготовки специалистов инженерных специальностей т.к. он позволит слушателям приобрести знания о причинах нарушения, методах поддержания и восстановления работоспособности и повышения ресурса машин и оборудования.

Цель курса – научить будущих инженеров обеспечивать эксплуатационные показатели с/х техники на протяжении заданного времени при оптимальных затратах материальных и трудовых ресурсов при проектировании, изготовлении, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте.

Изучающие курс должны овладеть основными понятиями и терминами, инженерно- физическими, математическими основами надежности, методами оценки и принятия оптимальных решений.

Изучение дисциплины должно помочь будущим специалистам квалифицированно выполнять и анализировать причины отказов, проводить испытания и определять количественные показатели надежности машин; разрабатывать и внедрять в производство методы обеспечивающие и повышающие надежность машин; совершенствовать методики проектирования, изготовления, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Надежность техники базируется на основных положениях теории вероятностей и математической статистики, триботехники, теории рабочих процессов машины (с.х. машин, тракторы и автомобили), технологии изготовления машин, техническом обслуживании и ремонте.

Настоящий учебно-методический комплекс по дисциплине «Надежность технических систем» разработан для более глубокого усвоения теории потери и обеспечения работоспособности узлов и деталей механизмов сельскохозяйственной техники и продовольственного оборудования.

Учебно-методический комплекс состоит из 3-х модулей:

Модуль 1. Основы надежности технических систем.

Модуль 2. Качественная и количественная оценка технического состояния объектов.

Модуль 3. Обеспечение надежности технических систем.

Каждый модуль – это структурная часть программы по дисциплине (лекции, лабораторные работы, тестовые задания), которые содержат дидактические условия для реализации технологии модульного обучения.

# МОДУЛЬ 1

## ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О КАЧЕСТВЕ И НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 1.1 Понятия о качестве и надежности технических систем

В результате производственной деятельности промышленных предприятий осуществляется непрерывный процесс создания материальных ценностей, необходимых для удовлетворения потребностей общества. Все многообразие материальных ценностей, рассматриваемых как общественный результат народнохозяйственной деятельности, предназначенный для удовлетворения определенных потребностей следует относить к продукции.

*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 общественного, так и личного характера. Продукция – обобщающееся понятие и бывает двух видов: изделия и продукты.

*Изделие* (как уже отмечалось) – единица промышленной продукции, количество которой, как правило, исчисляется в штуках или экземплярах.

*Продукт* – результат работы предприятия, количество которого характеризуется непрерывной величиной, исчисляемой, например, в килограммах, тоннах, кубических метрах и т. п.

*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.

*Качество* – совокупность свойств объекта, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

Применительно к сельскохозяйственной технике, упомянутая в определении совокупность свойств включает 10 групп показателей качества (рис. 1.)

*ПНЗ (показатели назначения)* – характеризуют свойства объекта, определяющие основные функции, для выполнения которых он предназначен (производительность, мощность, к.п.д. и др.)

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

*ПТ (показатели технологичности)* – характеризуют приспособленность конструкции к ее изготовлению и эксплуатации.

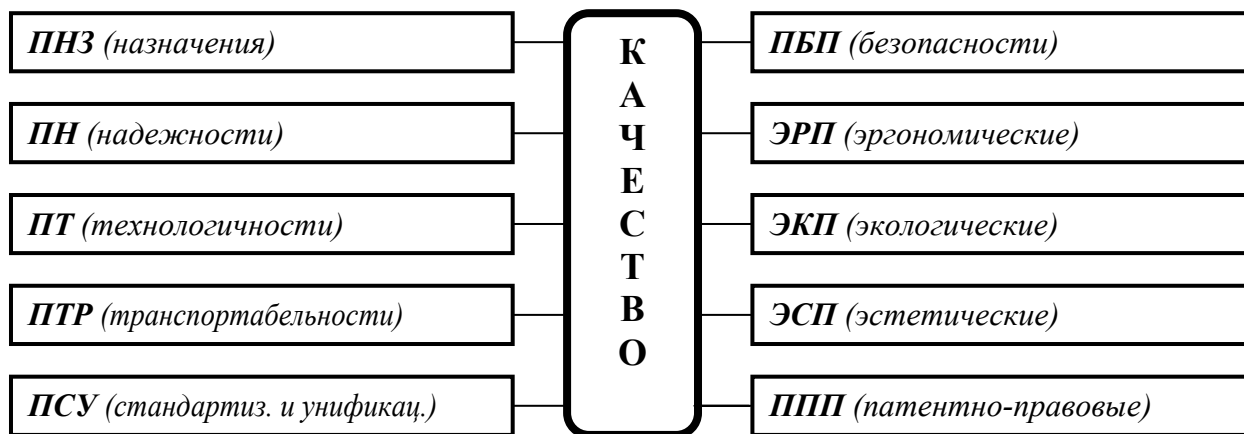


Рисунок 1.1 – Группы показателей качества

**ПТР** (*показатели транспортабельности*) – характеризуют приспособленность объекта к транспортированию, не сопровождающемуся его использованием по прямому назначению (перевозка по ж. д. и т. д.).

**ПСУ** (*показатели стандартизации и унификации*) – характеризуют насыщенность объекта стандартными, унифицированными и оригинальными частями, а также уровень унификации с другими изделиями.

**ПБП** (*показатели безопасности*) – характеризуют особенности конструкции объекта, обуславливающие безопасность обслуживающего персонала при его эксплуатации.

**ЭРП** (*эргономические показатели*) – характеризуют не отдельный объект, а систему человек-машина с точки зрения удобства и комфорта эксплуатации конкретного изделия.

**ЭКП** (*экологические показатели*) – характеризуют еще более сложную систему человек-машина-среда с точки зрения уровня вредных воздействий на природу, возникающих в процессе эксплуатации машины.

**ЭСП** (*эстетические показатели*) – характеризуют рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения изделия.

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

Уровень качества по перечисленным показателям контролируют путем сравнения значений показателей качества оцениваемой продукции с базовыми значениями соответствующих показателей, определяемых техническими требованиями на новые машины или их ремонт.

Кроме сравнения значений показателей при оценке уровня качества отремонтированных изделий допускается использование показателя дефектности отремонтированных изделий. Этот показатель характеризуется коэффициентом дефектности продукции и его определяют как среднее взвешенное число дефектов, приходящихся на единицу продукции, т.е.



$$K_{\bar{a}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a m_i \zeta_i, \quad (1.1)$$

где  $N$  – число единиц изделий (выборка);

$a$  – число видов дефектов;

$m_i$  – число дефектов данного вида;

$\zeta_i$  – коэффициент весомости каждого дефекта, определяемый экспериментальным путем или по стоимости устранения дефекта данного вида.

Таким образом, надежность – один из основных показателей качества продукции. Без высокой надежности не может быть и продукции высокого качества.

## 1.2 Термины и определения

Установлена достаточно четкая терминология надежности, выпущен ряд стандартов, которые дают однозначные толкования и определения понятиям, относящимся к качеству продукции вообще и надежности в частности.

Термины, которые относятся к надежности в технике, можно объединить в отдельные группы: объекты, состояния, дефекты, повреждения, отказы и др.

### Объекты

**Объект** – предмет определенного целевого назначения. В теории надежности рассматриваются следующие обобщенные объекты:

*изделие* – единица продукции, выпускаемая данным предприятием, цехом и т. д., например, подшипник, ремень, станок, автомобиль;

*элемент* – простейшая при данном рассмотрении составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей;

*система* – совокупность совместно действующих элементов, предназначенных для самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятия *элемента* и *системы* трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Машина, например, при установлении ее собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т. д., а при изучении надежности автоматической линии – как элемент.

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

*Ремонтируемый объект* – объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной или конструкторской документацией.

*Неремонтируемый объект* – объект, ремонт которого невозможен или не предусмотрен нормативно-технической, ремонтной или конструкторской документацией.

Объекты могут рассматриваться как ремонтируемые и неремонтируемые в зависимости от принятой системы эксплуатации и ремонта. Например, подшипники качения в процессе эксплуатации просто заменяют, однако их ремонт возможен на специализированных заводах; клиновой ремень практически невозможно отремонтировать по техническим причинам, а вкладыши подшипников обычно невыгодно ремонтировать из-за значительных затрат, превышающих стоимость

нового вкладыша. В связи с этим вводятся понятия о восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектах.

*Восстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической или конструкторской документации

*Невосстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической или конструкторской документации.

**Состояния.** В соответствии с теорией надежности объект может находиться в исправном и неисправном, работоспособном и неработоспособном состоянии, а также в предельном состоянии.

*Исправное состояние* – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической или конструкторской документации.

*Неисправное состояние* – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической или конструкторской документации.

*Работоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют всем требованиям нормативно-технической или конструкторской документации.

*Неработоспособное состояние* – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической или конструкторской документации.

*Предельное состояние* – это состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или не целесообразна, либо восстановление его работоспособности невозможно или нецелесообразно.

Надежность технических систем *изучает качественные и количественные закономерности изменения технического состояния объектов, возникновения отказов и на основании этого определяет пути их предупреждения и устранения, обеспечивающие с наименьшими затратами труда и средств необходимую продолжительность их надежной работы.*

Надежность изделия закладывается при проектировании, обеспечивается в процессе изготовления, поддерживается и восстанавливается в ходе эксплуатации. В связи с этим на уровень надежности влияет множество факторов. Для объективного и достоверного анализа этих факторов наука о надежности базируется на фундаментальных и прикладных науках. Это прежде всего теория вероятностей и математическая статистика, теория симметрии, учение об объемной и поверхностной прочности материалов деталей машин. Широко используются в теоретических основах надежности достижения таких наук, как физика твердого тела, химия и т.п., которые служат теоретической основой современного металловедения, а также других наук.

Взаимосвязь теории и практики прикладных наук, связанных с обеспечением надежности машин, представлена на следующей схеме (рис.1. 2).



Рисунок 1.2 – Взаимосвязи дисциплин, связанных с обеспечением надежности сельскохозяйственной техники

### 1.3 Надежность и ее составляющие

Понятие надежности, а также методы прогнозирования, оценки, нормирования и обеспечения надежности применяют к любым техническим объектам – машинам, изделиям, сооружениям и системам, а также их подсистемам – деталям, сборочным единицам и т.п. При необходимости в понятие *объект* может быть включена информация или ее носитель, а также человеческий фактор (например, при рассмотрении системы машина-оператор). Важнейший показатель качества машины – ее надежность.

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

Надежность – это комплексное или, как выражаются, интегральное свойство объекта. Оно обуславливается его безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью. Таким образом, надежность характеризуется свойствами, которые проявляются в эксплуатации и позволяют судить о том, насколько изделие оправдывает надежды его изготовителей и потребителей.

**Свойства надежности:**

**Безотказность** – это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Этим свойством обладает объект как в период его использования, так и в период хранения и транспортирования. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с перерывами в работе большого комплекса машин, с остановкой автоматизированного производства или браком дорогого изделия.

**Долговечность** – это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. Для неремонтируемых изделий свойства безотказности и долговечности практически совпадают, так как их предельным состоянием является первый отказ. Ремонтируемое изделие после отказа может быть восстановлено, если это экономически целесообразно.

**Ремонтопригодность** – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. От ремонтнопригодности зависит трудоемкость технического обслуживания и ремонта, а также размер убытков из-за простоев машины в связи с проведением этих работ.

**Сохраняемость** – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтнопригодности в течение и после хранения и транспортирования. Сохраняемость объекта характеризует его способность противостоять отрицательному влиянию условий хранения и транспортирования на безотказность и долговечность. Роль этого свойства особенно велика для сельскохозяйственной техники, работающей сезонно. Например, комбайны КТП 50% времени находятся в состоянии хранения. Поэтому для них определяющим будет способность противостоять коррозии, воздействию окружающей среды, старению и деформациям, а также сохранение стабильности регулировок. Комбайны зерноуборочные и силосоуборочные работают только 10% времени, остальное – хранение. В связи с этим сохраняемость можно рассматривать как безотказность в режиме хранения.

## 2 ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1 Теоретические основы снижения работоспособности машин в процессе эксплуатации

Основная причина снижения работоспособности машин в процессе эксплуатации – механическое истирание (изнашивание) поверхностей деталей технических систем.

Для объяснения природы механического истирания существуют три теории, дополняющие и уточняющие друг друга. Их исходные положения сводятся, в основном, к механическому, молекулярному и молекулярно-механическому взаимодействию между контактирующими поверхностями деталей технических систем.

**Механическая теория.** Механическое истирание представляет собой процесс деформации и разрушения поверхностных слоев, происходящих в результате механического взаимодействия микронеровностей при скольжении одного тела по поверхности другого.

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

Важно отметить, что трущиеся детали соприкасаются не всей видимой поверхностью, а лишь микровыступами, пятнами касания.

По подсчетам английского ученого Боудена, фактическая площадь касания составляет 0,01.....0,001 видимой поверхности ( в зависимости от класса шероховатости). В силу этого удельные нагрузки на отдельные микровыступы достигают больших значений. Так, если в подшипниках коленвалов автотракторных двигателей среднее расчетное давление составляет 4 МПа, то фактическое давление на микровыступах может достигать 400....4000 МПа. При таком давлении в контактных точках возникают температурные всплески локального характера ( $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ) и происходит сваривание микровыступов с почти мгновенным разрывом мостиков сварки.

Такой характер механического истирания и износа проявляется в виде задиров и наплывов на трущихся поверхностях.

**Молекулярная теория.** Эта теория исходит из допущения существования молекулярных сил взаимодействия между контактирующими микровыступами. Факт существования молекулярной адгезии установлен Кулоном

$$F = A + \mu N, \quad (1.2)$$

где  $F$  – сила трения;

$A$  – молекулярная составляющая силы трения;

$\mu$  – коэффициент трения;

$N$  – нормальная нагрузка.

Из этой формулы следует, что даже при  $N = 0$  сила трения все равно существует.

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

**Молекулярно-механическая теория.** Эта теория предложенная И.В. Крагельским, более полно отражает физическую сущность явлений трения и механического истирания и исходит из того, что трение имеет двойственную природу и обусловлено как взаимным внедрением микровыступов трущихся поверхностей, так и силами молекулярного взаимодействия. Молекулярное взаимодействие поверхностей трения невозможно без их тесного сближения. При этом неизбежны внедрение и разрушение микровыступов.

К наиболее изученной разновидности молекулярно-механического механизма изнашивания относится *схватывание* – явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении.

## 2.2 Физическая сущность процессов, снижающих надежность трибосистем

Каждый технический объект, система или изделие в течение их эксплуатации, хранения и транспортирования постоянно взаимодействует с окружающей средой. Это взаимодействие приводит к постоянной потере технических характеристик, свойств и параметров элементов, т.е. снижаются показатели качества технических систем вследствие износа.

**Износ** – изменение размеров, формы, массы технического объекта или состояния его поверхности вследствие остаточных деформаций от постоянно действующих нагрузок, либо из-за разрушения поверхностного слоя при трении.

Снижение показателей качества в результате износа может быть абсолютным и относительным.

Абсолютное снижение показателей качества (ухудшение выходных параметров) называется физическим старением (износом) объекта. Это обусловлено влиянием различных процессов, которые действуют на объект и вызывают изменения свойств или состояния материалов и деталей объекта, системы изделия. Относительное снижение показателей качества связано с появлением новых усовершенствованных объектов, выходные параметры которых превосходят соответствующие параметры рассматриваемого объекта. Такое изменение показателей качества, обусловленное отставанием от научно-технического прогресса называют моральным старением (износом).

В надежности изучаются процессы, которые приводят к снижению абсолютных показателей качества, т.е. процессы физического старения.

От начала эксплуатации в хозяйстве и до момента списания машина выполняет большой объем полезной работы при непрерывном воздействии на нее не-

благоприятных внешних и внутренних факторов (засоренность воздуха, тяжелые атмосферные условия, многочисленные пусковые периоды, неравномерные силовые и температурные режимы работы и др.). Причем эти факторы, находясь в тесной и сложной зависимости друг от друга, воздействуют на машину не изолировано, а комплексно. Поэтому ее техническое состояние неизбежно ухудшается или, как принято говорить, машина стареет.

В большинстве случаев одна и та же техническая система, деталь или сопряжение подвержены одновременному воздействию нескольких факторов, но ведущим будет, как правило, один из них.

Кроме множества факторов, возникающих под действием внешних воздействий, детали машин приобретают 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 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.

Все процессы изменяющие свойства или состояние материала деталей подразделяются на обратимые и необратимые.

**Обратимые процессы** – процессы, которые вызывают временные изменения параметров элементов, систем объекта в определенных границах без тенденции прогрессивного ухудшения и потери работоспособности. Характерный пример – пружина сжатия.

**Необратимые процессы** – процессы в результате которых с течением времени происходит прогрессивное снижение параметров, которые характеризуют работоспособность объекта и, как следствие, нарушение работоспособности – отказ.

К необратимым процессам технических систем относятся изнашивание, разрушение, старение.

Рабочие поверхности деталей трибомеханических систем постоянно находятся в активном состоянии. Трущиеся поверхности деталей контактируют по единичным микровыступам, которые под воздействием приложенных давлений могут расплющиваться, взаимно внедряться и подвергаться различным физическим эффектам. Это приводит к необратимому изменению рельефа контактных поверхностей – износу.

Износ трущихся тел следует рассматривать как суммарный результат одновременного протекания элементарных актов разрушения и изменения свойств материала, природа которых разнообразна. Эти действия определяют многообразие видов механического истирания, имеющих место на одной и той же контактной площадке в любой заданный момент времени. Однако для каждой конкретной пары трения и выбранных режимов нагружения характерен ведущий (доминирую-

щий) вид истирания ( изнашивания ), определяющий интенсивность протекания процесса. Наряду с ведущим имеют место сопутствующие виды .

Математическое описание процесса механического истирания базируется, как правило, на одном из физических явлений. Это явление может быть основным, однако в реальных узлах оно не определяет полностью сопротивление сопрягаемых материалов изнашиванию. Поэтому, чаще всего, не происходит полное совпадение расчетных значений интенсивности изнашивания с данными, полученными экспериментально для реальных узлов трения. Многообразие причин износа трущихся тел привело к разработке большого числа классификаций видов изнашивания, каждая из которых различается принципом, положенным в ее основу.

В узлах и механизмах машин изнашивание является причиной снижения их кинематической точности, возникновения дополнительных динамических нагрузок, потери прочности и разрушения отдельных элементов.

Основной причиной изнашивания рабочих поверхностей деталей машин при трении являются воздействия на них различных видов энергии (механической, тепловой, химической, электромагнитной и пр.), различных физических полей и сред, а также различных внешних и внутренних факторов технических систем. Детали изнашиваются и повреждаются от высоких нагрузок и скоростей, кислот и щелочей, микроорганизмов и продуктов их метаболизма, физических полей и элементарных частиц.

В большинстве случаев одна и та же деталь ( сопряжение) подвержены одновременному воздействию нескольких факторов, но ведущим будет, как правило, один из них.

Кроме множества внешних факторов, возникающих под действием внешних нагрузок и сред, детали машин интенсивно изнашиваются под действием внутренних факторов. К ним относятся: усталость материала вследствие перераспределения внутренних напряжений, возникших в процессе структуро- и формообразования деталей, а также коррозия: газовая, межкристаллитная, подповерхностная и пр.

Эти факторы возникают в процессе естественного старения, то есть стремления материалов возвратиться в равновесное состояние, избавиться от технологической <<наследственности>>. Они приводят к короблению детали, образованию трещин, изменению макро- и микроразмеров отдельных поверхностей, ускоряющих изнашивание, а также к полному разрушению трибоповерхностей.

Трущиеся поверхности деталей контактируют по единичным микровыступам, которые под воздействием приложенных давлений могут расплющиваться, взаимно внедряться и подвергаться различным физическим эффектам. Это приводит к обратимому или необратимому изменению, рельефа контактных поверхностей.

Практически для всех материалов контактирование при трении по микровыступам приводит к возникновению на пятнах контакта адгезионных процессов и образованию так называемых мостиков микросварки. Известно, что при трении атомы и молекулы поверхностного слоя находятся в



неуравновешенном высокоэнергетическом состоянии и по этой причине способны к активному взаимодействию с атомами материала выступов контртела, с молекулами газовой или жидкой окружающей среды, а также с находящимися в окружающей среде микроорганизмами. В первом случае адгезионные эффекты взаимодействия будут более значительными, чем во втором. С позиций кинетики трения и процессов изнашивания определяющим является характер разрушения возникшей адгезионной связи на пятне контакта. Если происходит разрушение этих связей и мостиков микросварки, то повреждаемость микроконтакта осуществляется по усталостным механизмам при постоянном структурном разрыхлении активного слоя. Процесс трения в этом случае следует считать стационарным. Если же разрушение связи происходит на некоторой глубине материала, то изнашивание реализуется, катастрофическим механизмом формирования частиц износа, а процесс трения является уже нестационарным.

На фактических пятнах контакта поверхностей реализуются весьма высокие давления, сопоставимые с пределами текучести или даже прочности материалов. Эти силовые взаимодействия имеют периодический характер, причем допускается продолжительность соприкосновения микроконтактов от  $10^{-7}$  до  $15^{-5}$  с. Деформационно-адгезионные точечные взаимодействия обуславливают разогрев материала контактов на некоторой активной глубине и на трущейся поверхности. Сочетание высоких контактных давлений и температур с активной окружающей средой приводит к активации повреждения слоя с существенным изменением его физико-механических свойств. В первом случае активируются субструктурные эффекты и процессы фазовых переходов, происходит развитие дефектов кристаллической структуры (точечных, линейных, а также поверхностных), изменение ориентации зерен и макродефектов, формирование объемных несовершенств (скопление вакансий, полостей разрыва материала). В то же время изменяется фазовое строение, происходят полиморфные превращения, образование и растворение частиц химических соединений, диффузия элементов из одного тела в другое и т.п. Процессы второго направления отражают создание адсорбционных пленок и химических соединений из окружающей среды, формирование микрозон трибохимической биохимической активности частиц материала, переносимого на поверхность контртела.

Анализ результатов исследований изнашивания трибоповерхностей, эффектов трансформации структуры, формирования свойств в активном слое материалов позволяет установить определенную взаимосвязь этих процессов. Эта связь (кинетика изнашивания) выражается определенной последовательностью: поверхностное взаимодействие, структурное разупрочнение, повреждаемость и механизм изнашивания.

Кинетика изнашивания поверхностей деталей машин и механизмов представлена на рис. 1.3.

Высокие микроконтактные давления в сочетании с температурными градиентами, явления адсорбции и адгезии, трибохимических и биохимических превращений определяют следующие процессы разупрочнения (разрыхления) материала активного слоя: механические, тепловые, адсорбционные, трибохимические

и биохимические, реализуемые для всего комплекса вариантов состояния трибо-технических систем.

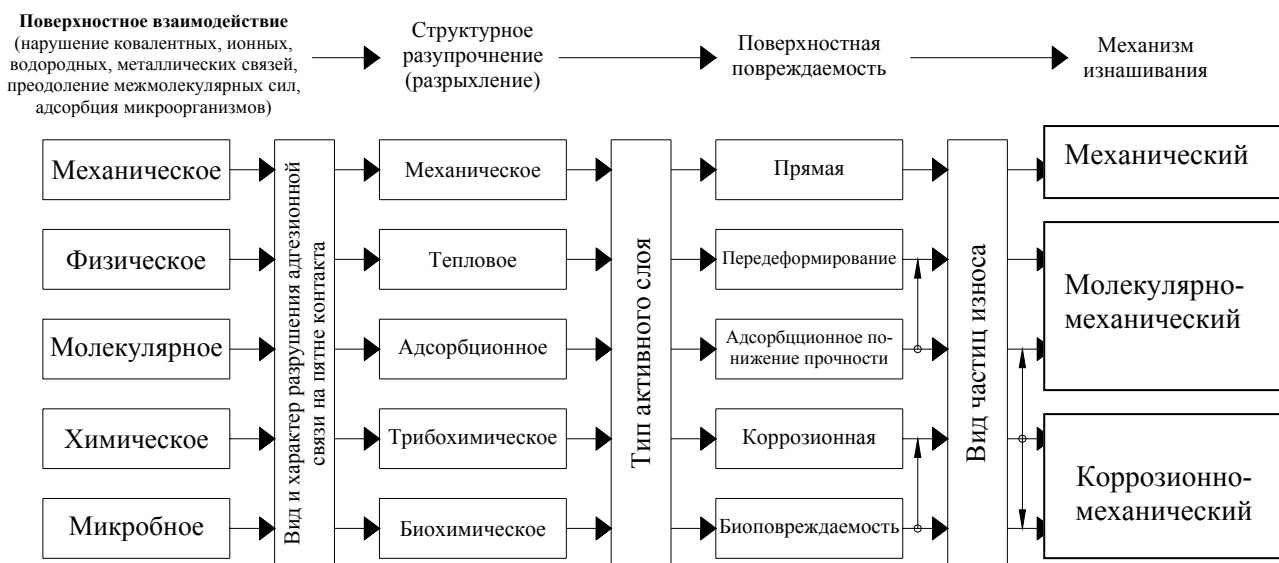


Рисунок 1.3 – Кинетика изнашивания поверхностей деталей

Представляется перспективной с позиций оценки восприимчивости трущихся материалов к условиям трения различать 3 этапа в состоянии активных слоев изнашивающихся материалов при формировании механизма изнашивания.

Подобная классификация позволяет учитывать все действующие процессы предварительной структурной подготовки активного слоя, а значит и направление изменения его свойств. Это дает возможность корректно оценивать работоспособность пар трения и получать достоверные расчетные модели для оценки их долговечности.

*Механическое разупрочнение* возникает в системе трущихся слоев, в первую очередь, от упругопластической деформации материала микроконтактов, активируемой дополнительно тепловыми напряжениями. Этот вид разупрочнения обуславливает формирование дефектов структуры различного уровня и повышения остаточных напряжений. С наибольшей вероятностью при трении происходит образование малоэнергетических точечных дефектов и, в первую очередь, вакансий. Центрами образования вакансий являются активированные атомы на поверхности материала и на границах фрагментов и зерен. Концентрация вакансий в повреждающемся слое может быть на 2...3 порядка выше, чем при обычных равновесных условиях. Неравномерное распределение вакансий по глубине поверхностного слоя ослабляет адгезионные связи при сохранении уровня когезионных. Это оказывает позитивное влияние на трение. С другой стороны, коагуляция дефектов в процессе их диффузий способствует образованию полостей и пор, снижающих поверхностную прочность материала. При механическом разупрочнении дислокации играют решающую роль в формировании трения и образовании типа активного слоя. Наиболее мощные дислокационные скопления локализуются на некотором расстоянии от

поверхности, при этом закритические плотности дислокаций приводят к формированию микропустот, слияние которых путем роста или сдвига формирует подповерхностные параллельные трещины. Как правило, механическое разупрочнение структуры поверхностного слоя протекает одновременно с процессами разрушения, в большей или меньшей степени активируя их.

*Тепловое разупрочнение* протекает под действием генерируемой при трении на микроконтактах теплоты или теплоты от внешнего источника. Этот вид разупрочнения связан с изменением физического состояния фаз гетерогенных материалов или их структуры и определяет вид механизма поверхностной повреждаемости. Наиболее существенными физическими явлениями в динамической структуре материала являются при этом частичное разупрочнение кристаллического строения активного слоя и полиморфные превращения. При этом отмечается уменьшение силы трения при переходе структуры в неупорядоченное состояние. В результате этого уменьшается поверхностная энергия, что дополнительно снижает когезионные связи. Возможные при тепловом разупрочнении полиморфные превращения влияют на характер взаимодействия трущихся поверхностей. Изменение фазового состояния в активных слоях протекает соответственно заданным температурно-силовым условиям и зависит от активности диффузионных процессов. Температурное разупрочнение способствует формированию полей внутренних напряжений термической или структурной природы. Действующие напряжения могут замедлять или активизировать поверхностную повреждаемость в зависимости от их знака и температурных градиентов.

*Трибохимическое разупрочнение* характеризуется образованием тонких пассивирующих пленок на поверхности трения в результате трибохимического взаимодействия активного слоя с внешней газовой или жидкой средой. Этот вид разупрочнения характерен для всех режимов трения и наиболее ярко выражен в случае наличия смазочного материала на контактах. Трибохимическая пленка предохраняет приповерхностные сечения активного слоя от механического разупрочнения, а также экранирует адгезионное взаимодействие трущихся поверхностей. Формирование плёнок протекает в две характерные стадии. На начальной стадии в результате взаимодействия адсорбированных атомов кислорода с металлической поверхностью формируется окисел толщиной 3...5 нанометров; на завершающей стадии трения в результате протекания процессов встречной диффузии атомов, дрейфа вакансий и перемещения электронов и катионов происходит дальнейшее утолщение пленки. Экранирующая роль плёнки будет возрастать, если ее твердость сопоставима с твердостью основного материала. С утолщением активного слоя, как правило, уменьшается его прочность и возрастает вероятность хрупкого разрушения. Кинетика подобных процессов предопределяется химическим сродством металлов (базовых) и составляющих компонентов окружающей среды (например, Fe, W имеют химическое сродство с O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, а Cu и Al – только с O<sub>2</sub>).

*Адсорбционное разупрочнение* проявляется как молекулярное взаимодействие при высокой нагруженности сопряжений, как правило, с жидкой средой.

Молекулярные силы при наличии либо отсутствии промежуточной вязкой прослойки (влаги, загрязнения, смазочного материала т.п.) вызывают на пятне контакта адгезию. Она возможна между металлами и пленками окислов. Адгезия может быть обусловлена и действием электростатических сил. Силы адгезии, как и молекулярные силы, прямо пропорциональны площади фактического контакта. Для жестких режимов трения без смазочного материала или с ним, когда развиваются высокие температуры, адгезия играет существенную роль в развитии процессов изнашивания и предопределяет эффективный массоперенос в трибосистеме.

Первым признаком адсорбционного разупрочнения и дестабилизации структуры и свойств материала является снижение твердости и уменьшение работы диспергирования материала в его поверхностно-активном слое. Деформация в значительной степени активизируется в результате адсорбционного понижения прочности. Адсорбированные из внешней среды атомы диффундируют в поверхность к формирующимся при разрыхлении микротрещинам. Внутренний и внешний адсорбционные эффекты приводят к снижению поверхностной энергии, что вызывает резкий перепад свойств материала по глубине покрытия и обличию выхода дислокаций на поверхность. Поверхностные слои теряют твердость при сохранении исходной пластичности, что определяет ускорение процессов структурного поверхностного разупрочнения-разрыхления.

*Биохимическое разупрочнение* активного слоя связано с процессами химического взаимодействия поверхностных слоев деталей с микроорганизмами и продуктами их метаболизма. При попадании техногенной среды с микроорганизмами на металл в застойных зонах (микровпадинах) создаются зоны биокоррозионной активности, в которых скорость протекания реакций во многом определяется химическим составом окружающей среды, активностью микроорганизмов и продуктов их метаболизма.

Материал в зонах фактического контакта подвергается импульсному воздействию тепловых и механических нагрузок. Их влияние и локализация в малых объемах вызывает ряд процессов, приводящих к структурным преобразованиям. Тончайший поверхностный слой в зонах контакта насыщается продуктами биохимических превращений, деструкции и метаболизма микроорганизмов. Повышается подвижность макромолекул, происходит разрыв атомных и молекулярных связей и образование активных центров – реакционно способных макрорадикалов, которые взаимодействуют с окружающей средой. Взаимодействуя с металлом и биосредой, они образуют новые структуры отличающиеся от исходной степенью кристалличности и структурирования.

При дальнейшем взаимодействии и нагружении трибоповерхностей происходит фрагментация поверхностного слоя, перераспределение дислокаций (они концентрируются в отдельных микрообъемах, преимущественно на границах зерен) и образование микропустот.

Взаимодействие дислокаций в местах достижения их критической плотности активизирует биокоррозионные процессы, а также проникновение в образовавшиеся микропустоты продуктов поверхностного взаимодействия и биогенной среды. Поверхность трения претерпевает структурные изменения, что создаёт

благоприятные условия для образования субмикротрещин и микротрещин в структуре поверхностного слоя. Происходит разупрочнение трущихся слоев деталей механических систем.

Структурное разупрочнение активных слоев поверхностей при трении под воздействием высоких контактных давлений и температур, процессов адгезии и адсорбции, трибохимических и биохимических взаимодействий приводит к определенной разновидности их повреждаемости: прямой, передоформированию, адсорбционному понижению прочности, коррозионной, биоповреждаемости. Формируется вид частиц износа, которые способствуют стабилизации процесса истирания поверхностей, развитию и интенсификации того или иного механизма изнашивания: механического, молекулярно-механического и коррозионно-механического.

Характер и кинетика механизма механического истирания определяют физические закономерности его и формируют определенный вид изнашивания поверхностей трения.

### 2.3 Механическое истирание трибоповерхностей деталей

Одной из основных причин выхода из строя изделий являются отказы вследствие износа деталей, возникающего при различных видах трения сопряженных поверхностей при механическом истирании (изнашивании).

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 (ГОСТ 23.002–78).

Трение и изнашивание – это две стороны одного и того же явления – взаимодействия соприкасающихся поверхностей под действием сжимающей нагрузки в момент их относительного перемещения в плоскости касания. Трение включает в себя силовую характеристику, а изнашивание – характеристику разрушения поверхности под действием силы трения.

Классификация видов изнашивания представлена на рис. 1.4.

**Молекулярно-механический механизм изнашивания** вызывается одновременным воздействием молекулярных и механических сил. Его характерными признаками являются схватывания, задиры, а также перенос частичек металла с одной из сопрягаемых поверхностей на другую.

К наиболее изученной разновидности молекулярно-механического механизма изнашивания относится *схватывание* – явление местного соединения двух твердых тел, происходящего вследствие действия молекулярных сил при трении. Необходимым условием для схватывания металлов является непосредственный контакт чистых, так называемых «ювенильных» поверхностей, возникающий в процессе совместного пластического деформирования. В результате схватывания происходит местное сваривание деталей, нарушается подвижность соединения, т. е. происходит заедание. При значительных усилиях происходит разрушение возникшей связи с глубинным вырыванием материала, образованием задигов.

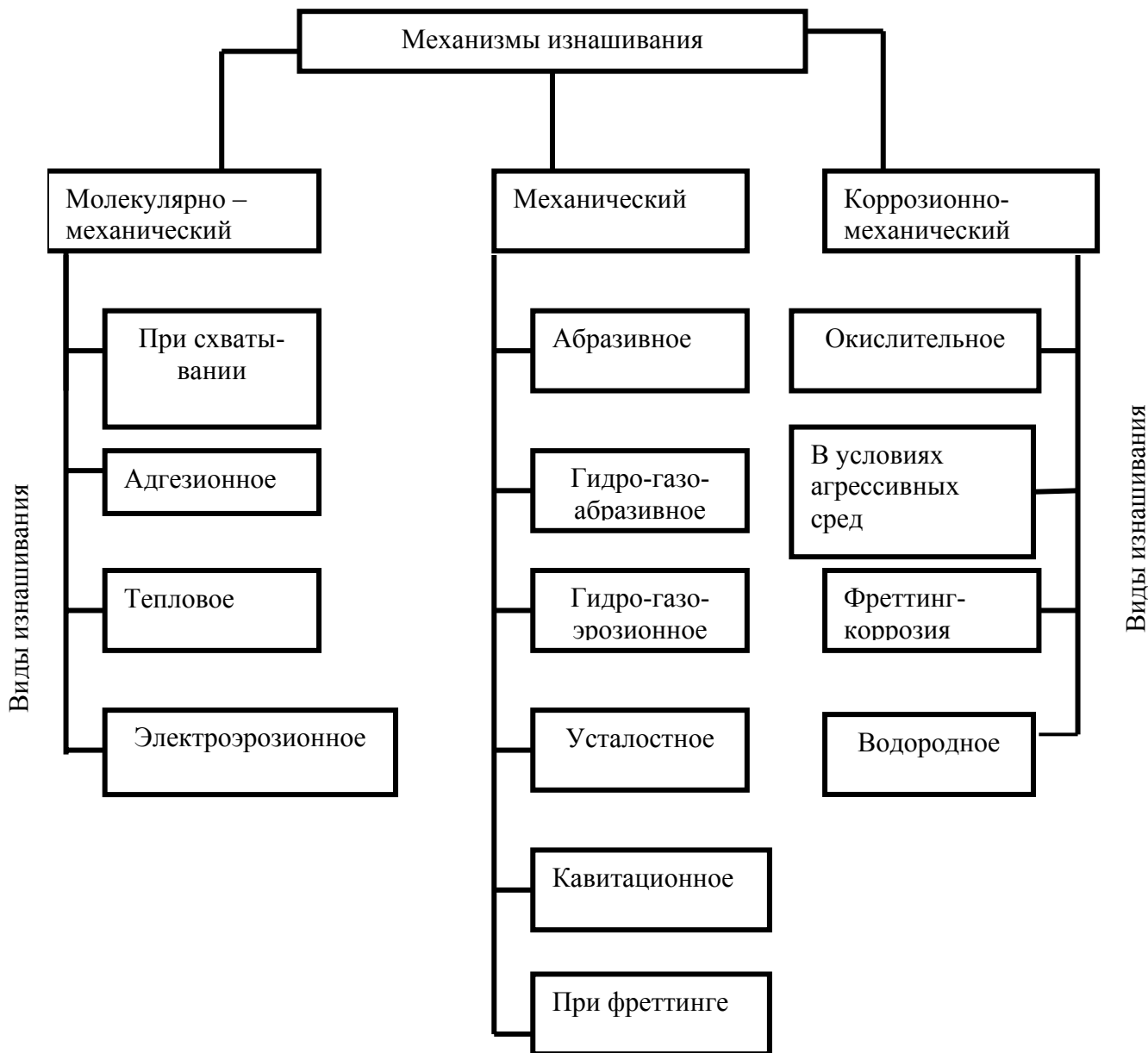


Рисунок 1.4 – Классификация видов изнашивания деталей машин

Характерным примером этого вида изнашивания является схватывание шеек коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания с вкладышами при нарушении подачи смазки. В результате этого часто проворачиваются вкладыши в своих постелях.

Обязательным условием схватывания является отсутствие на соприкасающихся поверхностях всякого рода пленок и загрязнений, что способствует образованию прочной связи между металлами в холодном состоянии. Схватывание, как правило, происходит на достаточно большой контактной площади поверхностей при расстоянии порядка межатомного, одинаковой ориентации кристаллов поверхностных слоев и отсутствие переходной зоны из пленок и загрязнений.

Схватывание между металлами, покрытыми пленками окислов или другими химическими соединениями и адсорбированными пленками без полной очистки поверхностей возможно при наличии условий для удаления пленок на достаточном числе участков и при сближении поверхностей на этих участках на межатом-

ное расстояние. Такие условия возникают в результате пластической деформации при действии одной только нормальной нагрузки в зависимости соотношения механических свойств пленки и металла. Если сопротивление пленки деформированию значительно больше, чем сопротивление металла (твердость пленки выше твердости металла), то при достаточной нагрузке металл пластически деформируется. Пленка при этом не растекается, а разрывается на отдельные части, связанные с металлом, почти не изменяя общую площадь. Происходит выход основного металла в промежутки между частями пленки и проявляются эффекты схватывания на чисто вновь образованных поверхностях металла. Если твердость пленки меньше твердости металла, то пленка деформируется вместе с металлом, не разрушаясь и схватывание не возникает.

Схватывание материалов проявляется в следующих основных формах:

**Натир** – участок поверхности трения, отличающийся по цвету от прилегающих участков и испытывающий наибольшее давление. *Светлый натир* – результат сглаживания микронеровностей поверхности или образования мельчайших рисок в направлении скольжения. *Темный натир* – результат местного повышения температуры и образования окисных пленок.

**Задир** – образование в результате схватывания различной невооруженным глазом борозды с оттеснением материала как в стороны, так и по направлению скольжения.

Более сложной разновидностью молекулярно-механического механизма изнашивания является *адгезионное*, состоящее в схватывании микронеровностей поверхностей трения, разрушении мест схватывания с отделением частиц металла и в последующем новым схватывании этих частиц с поверхностным слоем металла. В результате этого также образуются натир и задиры поверхностей, перенос частичек металла с одной поверхности на другую.

При трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения и значительными удельными давлениями, обуславливающими высокий температурный градиент, термическую пластичность и интенсивный рост температуры в поверхностных слоях металлов, интенсифицируются процессы схватывания, происходит так называемое *тепловое* изнашивание. Такого рода изнашивание проявляется в виде задиров стенок цилиндров, на стержнях и направляющих втулках клапанов, тарелках толкателей, кулачках и опорных шейках распределительных валов.

*Электроэрозионное изнашивание* – эрозионное разрушение поверхности электропроводящих материалов в результате воздействия искровых разрядов при прохождении электрического тока. Электроэрозионному изнашиванию подвергаются электроды свечей, контакты электрических приборов (прерыватели, магнето, распределители, реле-регуляторы и др.), а также щетки и коллекторы генераторов и стартеров.

**Механическое изнашивание** разделяется на абразивное, гидрогазоабразивное, гидрогазоэрозионное, усталостное, кавитационное и при фрейтинге.

**Абразивное изнашивание** в машинах возникает в результате действия абразивной среды на поверхности трения. Абразивные частицы, попавшие из окружаю-

шей среды на поверхности трения или являющиеся продуктами износа, имеют высокую твердость.

Происходящие в этом случае процессы похожи на явления резания металлов. Абразивному изнашиванию подвержены детали, работающие в абразивной среде (ходовая часть гусеничных тракторов, рабочие органы почвообрабатывающих машин и др.).

Абразивное изнашивание в большинстве случаев сопровождает работу ряда деталей автотракторных двигателей. В этом случае между трущимися поверхностями деталей неизбежно оказываются абразивные частицы, поступающие вместе с загрязненным воздухом, или смазочным материалом, или топливом и продуктами износа. Эти частицы, имеющие большую твердость, чем поверхности трения, начинают нарушать слой смазочного материала, пластически деформируют одну или обе поверхности, образуя на них различной глубины и ширины риски, царапины и даже участки выкрашивания. Абразивное изнашивание является доминирующим для гильз цилиндров, поршневых колец, поршней, подшипников скольжения.

**Гидро-газоабразивное изнашивание** вызывается абразивными частицами, перемещающимися потоком жидкости или газа. Этому виду изнашивания подвержены детали водяных, масляных и топливных насосов, гидросилителей, гидроприводов, тормозных и других систем.

**Гидро-газоэрозионное изнашивание** – представляет собой механическое изнашивание в результате воздействия потока жидкости или газа, отделяющего с поверхности деталей частицы металла. Такому изнашиванию подвергаются головки поршней, рабочие поверхности выпускных клапанов и их седла, шлицы вторичного вала коробки передач и др.

**Усталостное изнашивание** происходит под действием периодических переменных нагрузок. Его характерным признаком является возникновение микротрещин и выкрашивания, именуемого питтингом. Механизм его проявляется в том, что в результате повторного деформирования микрообъемов материала вначале на поверхности трения образуются усталостные субмикротрещины. Попадающая в них смазка способствует расклиниванию и выкрашиванию частиц металла. Этот вид изнашивания является типичным для элементов подшипников качения, зубчатых колес, кулачков и толкателей и им подобных деталей по условиям работы. Зачастую ему подвергаются вкладыши подшипников коленчатого вала.

**Кавитационное изнашивание** вызывается гидравлическими микроударами, образующимися при относительном перемещении жидкости и твердого тела. При этом образующиеся в движущейся жидкости пузырьки газа (пара) захлопываются вблизи поверхности, что создает местное повышение давления и температуры, вследствие чего образуются каверны, язвы и сплошная перфорация детали. Этому виду изнашивания подвержены поверхности цилиндров и водяных рубашек, лопастей водяных насосов и другие детали.

**Коррозионно-механический механизм изнашивания.** Ему подвержены поверхности, непосредственно вступающие в химическое и микробное взаимодействие с окружающей средой. К коррозионно-механическому относится механиче-



ское изнашивание, усиленное явлениями коррозии. Его подразделяют на окислительное изнашивание, изнашивание в условиях агрессивного действия внешней среды и изнашивание при фреттинг-коррозии.

**Окислительное изнашивание** характеризуется разрушением и удалением мельчайших твердых частиц металла и его хрупких окислов вследствие проникновения кислорода воздуха к трущимся поверхностям. Оно происходит при одновременно протекающих процессах: микропластической деформации поверхностных слоев и диффузии кислорода в деформируемые объемы металла. Кислород вступает во взаимодействие с металлом и на поверхности образуется окисная пленка, защищающая поверхность трения от непосредственного контакта. Такие окисные пленки при достаточной их прочности препятствуют возникновению схватывания металлов. При трении, однако, окисные пленки постепенно истираются, но впоследствии образуются вновь, что делает процесс возобновления окисных пленок непрерывным. Данному виду изнашивания подвержены гильзы цилиндров, поршневые кольца, пальцы, шейки коленчатого вала и другие детали.

**Изнашивание в условиях агрессивного действия внешней среды** характерно для деталей машин, работающих с удобрениями, ядохимикатами, кислотами и щелочами и другими химически активными элементами. Механизм его аналогичен окислительному изнашиванию, однако образуются не окислы, а соли, которые механически удаляются при трении. Этому виду изнашивания также подвержены гильзы цилиндров и поршневые кольца под влиянием соединений серы, находящихся в моторном масле и дизельном топливе.

**Изнашивание при фреттинг-коррозии** возникает в случае трения скольжения с очень малыми возвратно-поступательными перемещениями в условиях динамической нагрузки. Такое движение может быть вызвано вибрациями. При трении в этих условиях создаются мелкие окисные пленки, отделяющиеся с поверхностей, которые не удаляются за пределы контакта и создают условия абразивного изнашивания. Фреттинг-коррозия встречается в соединениях корпусных деталей, например, в местах прилегания фланцев блока цилиндров и картера сцепления. Этому изнашиванию подвергаются посадочные поверхности подшипников качения и шестерен, болтовые и заклепочные соединения рам и другие детали.

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

## 2.4 Старение машин в процессе эксплуатации

Процесс старения начинается задолго до того, как детали механизмов, машин сходят с заводского конвейера, и продолжается на протяжении всего амортизаци-

онного срока. Старение нередко отождествляют с изнашиванием, но это не идентичные понятия.

**Старением материалов** называются процессы изменения их физико-механических свойств во времени в условиях длительного хранения или эксплуатации. Различают физическое и моральное старение машин.

**Физическое старение машин** – результат изменения начальных свойств, нарушения конструктивных связей и нормального функционирования их элементов. В связи с износом ухудшаются эксплуатационные и эргономические характеристики машин, они теряют работоспособность и перестают отвечать своему назначению. Физическое старение происходит как при работе машин, так и при их бездействии, т. е. оно бывает двоякого рода:

**физическое старение первого рода** представляет собой постепенное изменение размеров, формы и других параметров макро- и микрогеометрии отдельных деталей в результате изнашивания, что приводит к изменению технико-экономических показателей всей машины;

**физическое старение второго рода** происходит под влиянием рабочих процессов и сил природы и, вызывая общий износ машины, возникает в отдельных сборочных единицах и деталях. Оно происходит при бездействии машины: металлические части подвергаются коррозии, а детали из пластмасс, резины стареют в результате воздействия света, температуры и других факторов. Степень этого старения зависит от соблюдения правил и времени хранения машин.

Экономическим показателем физического старения машины являются затраты на ее ремонт. Степень старения можно оценить по формуле

$$\alpha_{\phi} = \frac{C_p}{C_s} + \Delta, \quad (1.3)$$

где  $\alpha_{\phi}$  – относительная экономическая мера физического старения машины;

$C_p$  – сметная стоимость ремонта машины;

$C_s$  – стоимость полного воспроизводства машины на момент определения критерия (стоимость изготовления такой же новой машины);

$\Delta$  – относительная величина остаточного износа после ремонта машины (обычно послеремонтный ресурс не равен ресурсу новой машины).

Значение  $(1 - \alpha_{\phi})$  является относительной остаточной стоимостью машины в результате физического старения.

Следует иметь в виду, что стоимость воспроизводства машины с момента постановки ее на производство постепенно снижается в результате совершенствования технологии изготовления и роста производительности труда. Ориентировочно ее можно определить по формуле академика С. Г. Струмилина:

$$C_s = \frac{C_o}{(1 + P)^t}, \quad (1.4)$$

где  $C_o$  – начальная стоимость машины (в момент постановки на производство);

$P$  – среднегодовой прирост производительности труда,  $P \approx 0,02$ ;

$t$  – число лет, прошедшее с момента постановки машины на производство.

**Моральное старение машин** – это уменьшение стоимости действующей техники под влиянием технического прогресса. Оно также проявляется в двух формах.

**Моральное старение первой формы** – это обесценивание техники ввиду постоянного роста производительности труда в отраслях, производящих машины, и в отраслях, поставляющих материалы для изготовления машин.

Потерю стоимости машины  $\Delta C_{м1}$  в связи с моральным старением первой формы можно определить по формуле:

$$\Delta C_{м1} = C_o - C_в. \quad (1.5)$$

**Моральное старение второй формы** происходит при появлении новой техники того же назначения, но более совершенной, чем старая. Поскольку стоимость старых машин падает пропорционально относительному снижению их эффективности, потерю стоимости машины  $\Delta C_{м2}$  в связи с моральным старением второй формы можно найти по формуле:

$$\Delta C_{м2} = C_в - k C_в = C_в(1 - k), \quad (1.6)$$

где  $k$  – коэффициент относительного снижения эффективности использования старой машины в связи с появлением более совершенных машин.

Тогда стоимость действующей машины  $C_m$  с учетом морального старения первой и второй формы будет равна:

$$C_m = C_o - (\Delta C_{м1} + \Delta C_{м2}) = C_o - [(C_o - C_в) + (C_в - k C_в)] = k C_в. \quad (1.7)$$

Критерием морального старения машины (по А. С. Консону) служит коэффициент снижения ее стоимости вследствие технического прогресса:

$$\alpha_m = \frac{C_o - C_m}{C_o} = 1 - \frac{C_m}{C_o} = 1 - k \frac{C_в}{C_o}. \quad (1.8)$$

Общий критерий старения машины (физического и морального) может быть определен из выражения

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_\phi)(1 - \alpha_m). \quad (1.9)$$

Моральное старение, как и физическое, нарастает постепенно, но наступает одновременно и проявляется в равной мере у всей совокупности машин данной конструкции, в то время как физическое старение отражает индивидуальные свойства и состояние конкретного объекта.

Моральное старение первой формы не снижает эффективности используемых машин, поскольку снижение их первоначальной стоимости возмещается экономией на приобретение более дешевых аналогичных средств труда.

Моральное старение второй формы, подобно физическому старению, снижает потребительскую ценность и эффективность машин, ограничивает экономически целесообразные сроки их применения.

## 2.5 Разрушение поверхностей и деталей машин

Современные машины состоят из множества взаимодействующих деталей, узлов, механизмов, аппаратов и приборов.

С течением времени в любой машине происходят изменения, приводящие к потере ею работоспособности. Эти изменения происходят под воздействием различных видов энергии, которые, воздействуя на машину изменяют значения параметров отдельных деталей, узлов, механизмов и машины в целом. В основе этих изменений лежат сложные физико-химические процессы и явления, приводящие к деформациям, изнашиванию, коррозии, разрушениям и другим видам повреждений, которые влекут за собой изменения выходных параметров машины, зачастую приводящим к отказу.

Физика твердого тела рассматривает разрушение материала как постепенный кинетический термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряженном материале с момента приложения нагрузки любой величины. Скорость процессов механического разрушения деталей зависит от структуры и свойства материала, геометрической формы и состояния поверхности, от напряжения, вызываемого нагрузкой и температурой.

Механизм разрушения и долговечность материала определяются постепенным накоплением локальных дефектов – деформаций и трещин в материале. Локальные дефекты материала, создавая локальные напряжения, становятся центрами разрушения. Разрушения, как правило, определяется двумя процессами:

- разрывом межатомных связей под действием физических и тепловых полей;
- направленной диффузией вакансий кристаллической решетки к трещинам: (Вакансии – узлы, в которых отсутствует атом или ион.

При разрушении объектов (деталей) образуется поверхность раздела, называемая **изломом**.

Микростроение излома отражает характер действующих напряжений, степень перегрузки, расположение и характер очага разрушения, постоянство или изменение кинетики и фронта развития трещины, влияния остаточных напряжений, внешней среды и т.д. Расположение очага разрушения позволяет судить: о степени влияния конструктивных, технологических и структурных концентраторов напряжений; о дефектах металла.

Микростроение изломов раскрывает механизмы развития трещин, глубинные причины воздействия различных факторов (условий нагружения, свойств материала).

В зависимости от физики и кинетики процессов разрушающих материалы, последние можно разделить на четыре вида:

- усталостное;
- трещинообразование;
- водородное растрескивание;
- коррозия.

Под разрушением понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части.

Кинетика развития трещины состоит из четырех стадий: инкубационного периода, зарождения, медленного роста и быстрого развития трещины.

Разрушение принято классифицировать с учетом величины пластической деформации, предшествовавшей разрушению, а также с учетом характера распространения трещины в металле.

Если разрушению предшествовала значительная пластическая деформация, разрушение называется **вязким**, если же деформация составляла менее 1...2 %, разрушение считается **хрупким**.

С точки зрения микроструктуры существуют два вида разрушения – **транскристаллитное и интеркристаллитное**. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по телу зерна, а при интеркристаллитном она проходит по границам зерен.

Все концентраторы напряжений способствуют хрупкому разрушению. Хрупкие разрушения обычно связывают с наличием дефектов. Они могут быть внутренними, поверхностными и служат источниками концентрации напряжений. Дефекты могут быть в виде пор, шлаковых включений, горячих и холодных трещин, микротрещин, непроваров и т.п. С увеличением остроты и размеров дефектов склонность к хрупкому разрушению возрастает. Чем выше скорость деформации, тем больше склонность металла к хрупкому разрушению. При хрупком разрушении величина пластической зоны в устье трещины мала. Скорость распространения хрупкой трещины весьма велика. Для стали скорость роста трещины достигает 2500 м/с. Понижение температуры способствует переходу от вязкого разрушения к хрупкому. Это явление получило название **хладоломкости**.

При вязком разрушении величина пластической зоны, идущей впереди распространяющейся трещины велика, а сама трещина защемляется у своей вершины. Вязкое разрушение может развиваться различными способами, каждому из которых соответствуют характерные картины всей поверхности разрушения или некоторой ее части.

В условиях воздействия нагрузок возникают, как правило, следующие дефекты, вызывающие образования трещин: трещины однократного нагружения (хрупкие, вязкие); трещины замедленного разрушения; трещины ползучести; отслаивание и пластическое деформирование.

**Трещины однократного нагружения**, как правило, образуются в материале деталей при воздействии на них нагрузок, превышающих прочность детали. Трещина называется трещиной вязкого разрушения, если предшествующая образованию трещины деформация происходила в объеме, соизмеримом с объемом детали. Если в зоне образования трещины отсутствуют видимые следы макропластической деформации, трещина называется хрупкой.

**Трещины замедленного разрушения**. Замедленным (задержанным разрушением принято называть хрупкое разрушение, наступающее с течением времени под воздействием статической нагрузки при напряжениях меньших предела прочности материала без влияния повышенной температуры и коррозионных активных сред.

**Трещины ползучести**. Разрушение деталей после пластического течения их материала под действием постоянного напряжения при относительно высоких

температурах называется разрушением от ползучести. Для ползучести характерным является множественное трещинообразование.

Как при статическом, так и при переменном нагружении металла особую опасность вызывает такой дефект, как коррозионное поражение.

**Отслаивание.** Возникает в результате развития подповерхностных трещин, растущих параллельно поверхности трения. В отделяемом такой трещиной от основного материала поверхностном слое после многократного нагружения могут образовываться трещины, плоскость которых перпендикулярна поверхности трения. При их слиянии с подповерхностной трещиной образуется частица износа. Последняя может быть также результатом выхода подповерхностной трещины на поверхность.

**Пластическое деформирование** – деформация, остающаяся после удаления нагрузки. Под влиянием деформации может происходить растяжение, сжатие, сдвиг, изменение вида объекта. Основными параметрами пластического деформирования является относительное остаточное удлинение, величина уменьшения площади поперечного сечения.

Механизм разрушения материала определяется постепенным накоплением локальных дефектов – деформации и трещин в материале. Локальные дефекты материала, создавая местные напряжения, становятся центрами разрушения. Разрушения, как правило, определяются двумя процессами:

- разрывом механических связей под действием физических и тепловых полей;
- направленной диффузией вакансий кристаллической решетки к трещинам (вакансии – узлы кристаллической решетки, в которых отсутствует атом или ион).

В зависимости от условий и характера протекания процессы разрушения, они могут подразделяться на следующие виды:

- трещинообразование (терморастрескивание, образование трещин от перенаклепа, разрушение при контактных нагрузках );
- водородное растрескивание;
- коррозия;
- усталостное разрушение.

**Терморастрескивание.** Растрескивание поверхностей трения в результате термического воздействия наблюдается на чугунных барабанах тормозов и сопряженных с ним тормозных колодках, а также в плоских антифрикционных парах с кольцевой рабочей поверхностью.

Образование трещины повышает износ поверхностей трения; острой кромки производят режущие действие, а вблизи кромок происходит выкрашивание металла. Трещины со временем забиваются продуктами изнашивания, действующими как абразив.

В некоторых случаях трещинообразование вызывается термической усталостью материала.

Мерой борьбы с терморастрескиванием является выбор материала. Чем выше теплопроводимость материала, чем меньше температурное расширение, чем пластичнее материал, тем меньше вероятность образования в нем трещин. Высокая точность обработки поверхностей – дополнительное средство борьбы с растрескиванием.

**Образование трещин от перенаклепа.** Такое разрушение встречается в условиях трения качения, когда твердость поверхности не настолько низка, чтобы произошла заметная пластическая деформация, и не настолько высока, чтобы предупредить микропластическую деформацию в пределах всей рабочей поверхности.

**Разрушение при контактных нагрузках.** Стали и сплавы представляют собой конгломерат (механическое соединение, скопление разнообразных частей и предметов) кристаллических зерен, имеющих, как правило, случайную ориентацию кристаллографических осей. В зернах неблагоприятно ориентированных относительно статически приложенной силы, уже при очень малой ее величине происходит пластическое деформирование, структурно обнаруживаемое в виде полос скольжения, и возникают остаточные напряжения.

**Водородное растрескивание** – результат наводороживания и охрупчивания сталей водородом.

Наводороживание металла называют процесс адсорбции им водорода из жидкой или газовой водородосодержащей воды, а также результат этого процесса. Наводороживание характеризуется более высокой диффузионной подвижностью водорода и резким отрицательным влиянием поглощенного водорода на механические свойства металла.

Наводороживание поверхностей наиболее часто происходит в газо- и нефтепроводах, а также в машинах, узлах и механизмах, работающих с водородосодержащими техногенными средами.

Образование трещин на поверхностях трения при смазывании углеводородными жидкостями (масла, гидрожидкости, топлива) происходит при тяжелых режимах работы в результате концентрации в зоне контакта водорода, который охрупчивает стальную и чугунную поверхности.

**Коррозия** – самопроизвольное разрушение твердых тел, вызванное химическими и электрохимическими процессами, развивающимися на поверхности тела при его взаимодействии с внешней средой.

Согласно действующего стандарта различают 2-а типа коррозии: электрохимическая и химическая, которые подразделяются на виды. Для сельскохозяйственных объектов техники наиболее характерны следующие виды.

1. Газовая коррозия
2. Атмосферная коррозия
3. Коррозия при полном погружении
4. Подводная коррозия
5. Коррозия при переменном погружении
6. Подземная коррозия
7. Коррозия при трении
8. Биокоррозия
9. Фреттинг-коррозия
10. Сплошная коррозия
11. Равномерная коррозия
12. Неравномерная коррозия
13. Подповерхностная коррозия

14. Точечная коррозия (питтинговая)
15. Коррозия пятнами
16. Межкристаллическая коррозия
17. Щелевая коррозия
18. Ножевая коррозия
19. Коррозия язвами (язвенная коррозия)
20. Коррозионное растрескивание

Методы защиты от коррозии условно разделяются на методы воздействия на металл и методы воздействия на среду. К первым относятся: легирование металлов, обработка поверхностей, нанесение защитных покрытий, ко вторым – электрохимическая защита, герметизация, осушка воздуха и создание искусственных сред. При применении одних и вторых методов защиты, а также метода рационального конструирования – они относятся к комбинированным методам защиты.

**Усталостное разрушение** – явление разрушения материала при упругих деформациях и действии переменных напряжений меньших, чем предел прочности  $\sigma_B$  называется усталостью материала. Для каждого материала существует такое максимальное значение нормального напряжения, при котором изделия выдерживает практически неограниченное число перемен усилий не разрушаясь. Это напряжение  $\sigma_K$  называется пределом выносливости или пределом усталости материала. Для катанного и кованого материала при симметричном цикле нагружения и изгибе  $\sigma_K = 0,4 \dots 0,6 \sigma_B$ , для цветных металлов  $\sigma_K = 0,3 \dots 0,5 \sigma_B$ .

Характерной чертой усталостного разрушения является отсутствие деформаций в районе разрушения, даже в таких материалах, как мягкие стали, которые высокопластичны при статическом разрушении. Усталостные трещины обычно мягкие и их трудно обнаружить пока они не достигнут макроскопического размера, после чего они быстро распределяются и вызывают полное разрушение за короткий промежуток времени.

Одним из критериев оценки сопротивления металла усталостному разрушению является предел выносливости (усталости).

Другим критерием сопротивления усталостному разрушению является циклическая прочность – число циклов напряжения, вызывающее разрушение в данных условиях работы объекта.

Признаки усталостного разрушения деталей: почти нет остаточных деформаций и на поверхности излома видны зона развития трещины с гладкой поверхностью и зона поломки с шероховатой поверхностью.

Периоды усталости металла:

- накопление необратимых изменений вследствие многократных локальных (местных) микродеформаций, образующих зародыш трещины (субмикротрещину);
- развитие (подростание) трещины.

Сопротивление деталей усталостному разрушению повышают конструкторскими и технологическими мероприятиями.

Многие детали (коленчатые валы и оси, поворотные цапфы, листы рессор, пружины, торсионные валы и др.) в работе подвергаются воздействию перемен-



ных нагрузок. Конструкторы учитывают, что материалы этих деталей должны иметь высокую усталостную прочность и ударную вязкость. Концентрацию напряжений снижают оптимальной формой и размерами деталей. Особое внимание уделяют галтелям, надрезам, канавкам.

Чем меньше шероховатость поверхности деталей, тем лучше они сопротивляются переменным нагрузкам. Наилучшей является поверхность, полученная не разанием, а смятием микронеровностей при поверхностном пластическом деформировании: обкатывании, раскатывании, дорновании, алмазном выглаживании и виброобкатывании алмазными или твердосплавными наконечниками. Повышение сопротивления усталости при этом происходит вследствие надрезов, царапин, впадин малого радиуса. С этой же целью пружины, листы рессор, шестерни, шатуны и др. детали подвергают дробеструйной обработке.

Упрочнение деталей термической, химико-термической и термомеханической обработками значительно повышает их циклическую прочность. Например, закалка с нагревом токами высокой частоты (поверхностная закалка) повышает усталостную прочность стали 45 в два раза.

Коррозия нарушает гладкость поверхности, резко разупрочняет поверхностный слой детали, образуя пятна, язвы, коррозионное растрескивание. Эти дефекты способствуют возникновению микротрещин и усталостному разрушению. Поэтому защита металлов от коррозии также значительно повышает сопротивление деталей усталостному разрушению.

Усталостные изломы имеют ряд характерных признаков, позволяющих их отличить от других видов излома. Обычно на поверхности излома можно различить пять характерных зон (рисунок 1.5)

Фокус излома и очаг разрушения 1 (рис. 1.5) – это наибольшая зона, которая возникает в местах концентрации напряжений или поверхностных (внутренних) дефектов. При больших напряжениях может быть несколько очагов разрушения. На поверхности излома эта зона имеет наибольшие блеск и гладкость. Усталостные линии обычно отсутствуют.

Зона развившейся усталостной трещины содержит характерные усталостные линии 3 (рис. 1.5), волнообразно расходящиеся от очага разрушения.

Зона ускоренного развития трещины 4 (рис. 1.5). Это переходная зона между участками усталостного развития трещины и зоной доламывания, образуется в течение нескольких циклов, предшествующих окончательному разрушению.

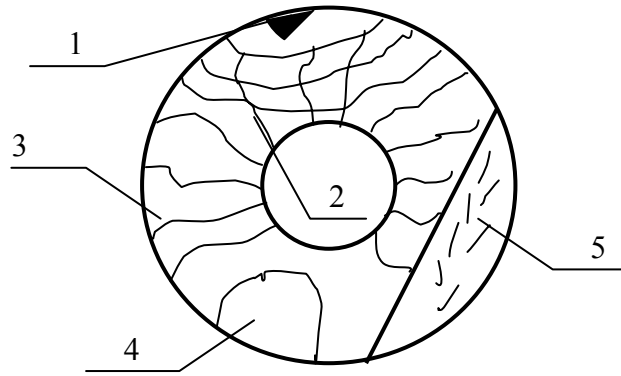


Рисунок 1.5 – Схема усталостного излома деталей:

1 – фокус излома и очаг разрушения; 2 – вторичные ступеньки и рубцы;  
3 – усталостные линии; 4 – зона ускоренного развития трещины; 5 – зона доламыывания

Зона доламыывания 5 (рис. 1.5) характеризуется признаками макрохрупкого разрушения.

Сталь 45 в нормализованном и закаленном (нагрев ТВЧ) состоянии обеспечивает пределы выносливости соответственно 220...265 и 510 Н/см<sup>2</sup>. Наплавка по стали 45(при всех видах) снижает сопротивление усталости до 50%. Особенно при механизированных наплавках в потоке воздуха (140 Н/см<sup>2</sup>), порошковыми проволоками (240...280 Н/см<sup>2</sup>) в углекислом газе (160...190 Н/см<sup>2</sup>).

Причины снижения предела выносливости: наличие в наплавленном металле концентраторов напряжений (пор, трещин, оксидов, раковин), особенно при плохой защите сварочной дуги и расплавленного металла, а также при значительном легировании наплавляемого металла и нестабильности процесса. В наплавленном металле возникают металлургические дефекты: поры, трещины, высокие внутренние напряжения, растяжения.

Трещины усталости зарождаются на поверхности образцов и в их глубине, то есть в наплавленном металле и зоне его сплавления с основным металлом. Место зарождения трещины зависит от качества наплавленного металла и его сплошности. При отсутствии пор и других дефектов, трещины усталости зарождаются в зоне сплавления и распространяются в основном металле. В наплавленном металле с металлургическими дефектами трещины возникают на поверхности или в наплавленном слое, в ряде случаев – в нескольких местах одновременно. Места изломов образцов непостоянны по их длине, что указывает на решающее влияние концентраторов напряжений (сварочных дефектов) на усталостную прочность. Поэтому для ответственных деталей, подвергаемых в эксплуатации повторно-переменным нагрузкам, после наплавки необходима упрочняющая обработка. Последующее упрочнение наплавленного металла ППД и ЭМО увеличивает предел усталости "закрытием" дефектов и созданием в поверхностном слое напряжений сжатия.

Упрочнение наплавленных поверхностей закалкой с нагревом ТВЧ создает в упрочняемом слое значительные внутренние напряжения сжатия при полном снятии внутренних напряжений растяжения, возникающих при наплавке из-за нагрева до 600<sup>0</sup>С и более.

Наиболее высокая усталостная долговечность обеспечивается при восстановлении коленчатых валов наплавкой НП – 30ХГСА в СО<sub>2</sub> с полной термической обработкой (нормализация, закалка с нагрева ТВЧ, низкий отпуск) и упрочнением галтелей ППД (101,7...95,6% новых).

Наименьшие значения предела выносливости как по разрушению, так и по началу образования трещины имеют место при восстановлении коленчатых валов наплавкой под керамическими флюсами ЖСН-1 и АНК-18.

Возникновение трещин усталости в нескольких местах связано с наличием в наплавленном металле дефектов металлургического характера (трещин, раковин, шлаковых включений), а также с высокой внутренней напряженностью легированного металла (наплавки под керамическими флюсами и порошковыми проволокой).

## 2.6 Классификация основных видов излома при разрушениях

Все изломы подразделяются на 2-е группы: хрупкие и вязкие. В зависимости от приложенных нагрузок изломы подразделяются на динамические, усталостные, изломы от превышения предела прочности, изломы при изгибающих и скручивающих нагрузках. К динамическим относятся изломы, происходящие внезапно под действием нагрузок или удара. К усталостным относятся изломы под действием переменных нагрузок в области упругих деформаций. Изломы, вызванные превышением предела прочности, характеризуются большой поверхностью зоны доламывания, а также наличием на поверхности излома отдельных, приходящих на больших расстояниях линии нагрузки или уступов. По направлению излома можно судить о том, какая перегрузка вызвала разрушение (растяжение, изгиб, кручение).

### **По макрогеометрии излома:**

*Однородный излом* – излом, характеризующийся морфологически единой поверхностью разрушения (кристаллический, волокнистый изломы);

*Неоднородный излом* – излом, характеризующийся наличием зон, отличающихся по макрорельефу. Различные зоны могут соответствовать различным стадиям разрушения. Граница между зонами на макроуровне может быть выделена по изменению цвета и шероховатости излома от одной зоны к другой. Характерными видами неоднородного излома является:

- излом звездочкой – поверхность разрушения разрывного образца с наклонными площадками в виде радиальных лучей (имеет место при разрушении материалов с пониженными пластическими свойствами в поперечном направлении);

- чашечный излом – поверхность разрушения, характеризующаяся наличием центрального участка с шероховатой матовой поверхностью, перпендикулярного направлению растяжения и наклоненных под углом 30-60° скосов со сглажен-

ной и блестящей поверхностью;

*Шевронный излом* – поверхность разрушения, характеризующаяся наличием системы ступенек, имеющих гиперболическую конфигурацию и в совокупности образующих рисунок "елочки" или шеврона. Данный излом является признаком малой пластической деформации при разрушении. Он образуется при растяжении с изгибом образцов и деталей прямоугольного сечения, а также в зоне нестабильного роста усталостной трещины.

#### **По морфологии поверхности разрушения:**

*Кристаллический излом* – поверхность разрушения, состоящая из блестящих плоских участков (граней). Является признаками хрупкого разрушения. Подразделяется на:

- фарфоровидный излом – сглаженная, с трудно различимой кристаллическостью строения поверхности разрушения светло-серого цвета, похожая на поверхность разрушенного фарфора;
- бархатистый излом – гладкая, с мелкокристаллическим строением, трудно различаемым визуально, поверхность разрушения серого цвета с тусклым металлическим отливом, напоминающая бархат.

Оба вида излома встречаются у закаленных инструментальных сталей, высокопрочных, низкоотпущенных конструкционных сталей с мелкозернистой структурой в литом и деформированном состоянии.

*Волокнистый излом* – матовая, шероховатая поверхность разрушения с признаками пластической деформации (утяжка, расходящиеся рубцы). Является признаком вязкого разрушения. Такой излом встречается в различных видах:

- волокнисто-полосчатый излом – поверхность разрушения, характеризующаяся наличием слоистости;
- волокнисто-чешуйчатый излом – поверхность разрушения, характеризующаяся наличием гладких участков в виде чешуек.

*Дендритный излом* – неоднородная поверхность разрушения, характеризующаяся наличием столбчатых кристаллов с четко выраженным рельефом элементов дендритного строения металлов. Характерен для литых материалов. Может носить вязкий или хрупкий характер. При вязком – поверхность серого цвета, матовая; при хрупком – светлая и блестящая.

*Каплевидный излом* – однородная поверхность разрушения, характеризующаяся глубокозернистым строением; зерна представляются как бы оплавленными. Имеет место у перегретых материалов.

*Нафталинистый излом* – однородная поверхность разрушения, характеризующаяся наличием крупных, гладких, плоских участков с характерным блеском, напоминающим блеск нафталина. Характерен для литых и перегретых деформированных сталей.

#### **По характеру силового воздействия:**

*Изломы кратковременного однократного статического и динамического погружения* – возникают под воздействием изменяющейся монотонно нагрузки; при этом продолжительность стадии постоянной нагрузки либо равна нулю, либо весьма мала по сравнению с общей продолжительностью процесса нагружения.

*Изломы длительного статического нагружения* возникают под действием изменяющейся монотонно нагрузки; при этом продолжительность стадии неменяющейся нагрузки соизмерима с продолжительностью стадии процесса развития повреждений, приводящих к разрушению. Различают:

- изломы замедленного разрушения. Возникают в результате длительного статического нагружения при комнатной температуре и без воздействия агрессивных сред; при напряжениях, меньших предела текучести с существенным влиянием на разрушение окружающей среды; при действии внутренних растягивающих напряжений. К характерным признакам относятся наличие на поверхности разрушения двух зон: зоны медленного разрушения (блестящая, имеющая зернистое строение) и зоны долома с кристаллическим или волокнистым строением;

- изломы ползучести. Возникают в результате длительного статического нагружения при различных температурах и при неуставленном влиянии на разрушение окружающей среды. Отличительная черта изломов – зернистое макростроение. На поверхности межзеренных фасеток мелкоямочного рельефа и следов сдвиговой деформации;

- изломы коррозионного растрескивания. Возникают в результате длительного статического нагружения при воздействии коррозионной среды. Характеризуются многоочаговым характером разрушения, сильной шероховатостью и большим количеством трещин, выходящих на поверхность разрушения;

- изломы динамического нагружения (усталостные изломы). Возникают в результате действия нагрузки, периодически и многократно изменяющейся в процессе нагружения и разрушения. Различают:

- многоцикловые усталостные изломы. Разрушение происходит, в основном, при упругом деформировании. Зоны излома рассмотрены ранее;

- малоцикловые усталостные изломы. Разрушение происходит при упруго-пластическом деформировании. На изломе увеличена доля рельефа, имеющая признаки статического разрушения;

- коррозионно-усталостные изломы. Разрушение происходит при воздействии коррозионной среды. Особенности строения: большое количество очагов разрушения; наличие продуктов коррозии на поверхности разрушения; большое количество трещин;

- термоусталостные изломы. Образуются под действием переменных напряжений, возникающих при температурных изменениях тела. Характерные признаки: не наблюдается зон с резко очерченными границами; множество очагов разрушения; интенсивное окисление поверхности разрушения.

**По микрорельефу излома и механизму разрушения различают:** хрупкий; квазихрупкий; вязкий; усталостный.

**По энергии разрушения различают:** хрупкий (характеризуется условно малой работой разрушения); квазихрупкий (средняя работа разрушения); вязкий (высокая работа разрушения).

### **3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ. ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ»**

#### **Цель лабораторной работы**

Дать студентам знания и практические навыки в области понимания физической сущности причин износа деталей соединений трибомеханических систем; научить по характеру износа определять процессы механического истирания поверхностей деталей машин. Правильно находить способы защиты от интенсивного износа.

#### **Указания по выполнению работы**

Перед выполнением лабораторной работы студенты должны:

- изучить теоретический материал к настоящей работе.
- пройти инструктаж по технике безопасности при проведении работ в лаборатории.
- ознакомиться с приборами и инструментом, представленным для выполнения работы.
- получить у лаборанта необходимые данные на детали, подлежащие паспортизации.
- к выполнению работы приступить после глубокого изучения теоретического материала.
- выполнять работу со строгим соблюдением правил техники безопасности и производственной санитарии.
- составить паспорт на деталь с изношенной рабочей поверхностью.

#### **Порядок выполнения работы**

После инструктажа по технике безопасности изучения методических указаний, ознакомления с приборами и инструментом для выполнения работ, их устройством и принципом работы (при необходимости) приступить к выполнению практической части лабораторной работы в следующем порядке:

1. Получить у лаборанта детали, подлежащие изучению и паспортизации, необходимые приборы и инструмент.
2. Внимательно изучить рабочую поверхность детали и выявить характерные признаки изнашивания и повреждений поверхности.
3. Визуально осмотреть и проверить с помощью оптического прибора (устройства) состояние поверхностей.
4. Установить дефекты, виды и причины изнашивания детали.
5. Оформить паспорт на изношенную деталь.
6. Убрать за собой и сдать рабочее место.

## Паспорт изношенной детали

1. Наименование детали;
2. Условия работы детали:
  - нагрузка(статическая и динамическая);
  - вид трения ( по наличию движения и наличию смазочного материала )
  - рабочая среда .
3. Геометрическая характеристика изношенной поверхности:
  - эскиз изношенной детали и поверхности;
  - макрогеометрия и твердость изношенной и неизношенной поверхности.
4. Вид изнашивания детали:
  - ведущий;
  - сопутствующий.
5. Причины изнашивания.
6. Методы борьбы с изнашиванием детали:
  - конструкторско-технологические;
  - эксплуатационные мероприятия;
  - ремонтные мероприятия.

Выполнил студент \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_

Принял преподаватель \_\_\_\_\_

## **4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ»**

### **Цель лабораторной работы**

Дать студентам знания и практические навыки в области понимания физической сущности причин отказов технических систем, машин и механизмов; научить по характеру разрушенных поверхностей объектов устанавливать причины, тип и вид разрушений деталей; правильно находить пути и методы повышения надежности одноименных деталей в заданных условиях эксплуатации.

### **Указания по выполнению работы**

Перед выполнением лабораторной работы студенты должны:

1. Изучить теоретический материал методического указания к настоящей работе.
2. Пройти инструктаж по технике безопасности при проведении работ в лаборатории.
3. Ознакомиться с приборами и инструментом, представленным для выполнения работы.
4. Получить у лаборанта необходимые данные на детали, подлежащие паспортизации.
5. К выполнению работы приступить после глубокого изучения теоретического материала.
6. Выполнять работу с строгим соблюдением правил техники безопасности и производственной санитарии.
7. Составить паспорт на разрушенную деталь.

### **Порядок выполнения работы**

После инструктажа по технике безопасности изучения методических указаний, ознакомления с приборами и инструментом для выполнения работ, их устройством и принципом работы (при необходимости) приступить к выполнению практической части лабораторной работы в следующем порядке:

1. Получить у лаборанта детали, подлежащие изучению и паспортизации, необходимые приборы и инструмент.
2. Внимательно изучить рабочую поверхность детали и поверхность излома, выявить характерные признаки и характер излома.
3. Визуально осмотреть и проверить с помощью оптического прибора (устройства) состояние рабочих и разрушенных поверхностей.
4. Установить дефекты, вид и причины разрушения детали.
5. Оформить паспорт на разрушенную деталь.
6. Убрать за собой и сдать рабочее место.

### **Паспорт разрушенной детали**



1. Наименование детали;
2. Эскиз детали. Характеристика рабочей поверхности (качество обработки);
3. Условия работы детали (нагрузка, рабочая среда, смазка и др.) и причина отказа;
4. Характеристика поверхности излома, деформированного участка и участков с коррозионными разрушениями (эскизы и описание дефектов);
5. Вид разрушения детали;
6. Причины разрушения;
7. Пути повышения надежности одноименных деталей;
  - а) конструкторско-технологические;
  - б) эксплуатационные;
  - в) ремонтные мероприятия.

Выполнил студент \_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_

Принял преподаватель \_\_\_\_\_

## 5 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО МОДУЛЮ 1

**Укажите номер правильного ответа**

1. *К показателям качества продукции относятся:*

1. Назначения, надежности, технологичности, транспортабельности, стандартизации и унификации, безопасности, эргономические, экологические, эстетические, патентно-правовые.
2. Назначения, надежности, технологичности, транспортабельности, стандартизации и унификации.
3. Безопасности, эргономические, стандартизации и унификации, экологические.

2. *Показатели назначения продукции характеризуют:*

1. Свойства объекта, определяющие основные его функции.
2. Надежность системы.
3. Приспособленность конструкции.
4. Рациональность формы, целостность композиции.

3. *Показатели надежности определяют:*

1. Свойство объекта сохранять и восстанавливать его работоспособность в процессе эксплуатации.
2. Качество объекта.
3. Безопасность объекта и его технологичность.
4. Степень стандартизации.
5. Безопасность эксплуатации и транспортирования.

4. *Технологичность продукции характеризуют:*

1. Основные функции объекта.
2. Свойства объекта.
3. Приспособленность конструкции к ее изготовлению и эксплуатации.
4. Особенности конструкции объекта.
5. Рациональность формы объекта.

5. *Транспортабельность объекта характеризуют:*

1. Свойства объекта к его использованию.
2. Приспособленность объекта к транспортированию.
3. Приспособленность объекта к существующим условиям.
4. Приспособленность объекта к условиям демонтажа.
5. Приспособленность объекта к новым условиям работы.

6. *Стандартизация и унификация объекта – это:*

1. Применение оригинальных узлов и деталей.
2. Разработка с применением стандартизированных узлов и механизмов.
3. Насыщенность объекта стандартными узлами и унификация с другими изделиями.

4. Унификация узлов и механизмов.
5. Полная стандартизация и унификация узлов.

*7. Показатели безопасности продукции характеризуют:*

1. Влияние на жизнедеятельность объекта.
2. Связь объекта в системе человек-машина.
3. Влияние объекта на живую природу (окружающая среда, человек).
4. Особенности конструкции объекта, обуславливающие безопасность обслуживающего персонала при его эксплуатации.

*8. Эргономические показатели продукции характеризуют:*

1. Эргономические свойства объекта в системе производства.
2. Систему человек-машина с точки зрения удобства и комфорта эксплуатации конкретного изделия.
3. Удобство эксплуатации объекта.
4. Экономические показатели объекта.
5. Приспособленность объекта к условиям эксплуатации.

*9. Экологические показатели продукции характеризуют:*

1. Взаимодействие системы машина-природа.
2. Взаимодействие системы человек-машина-среда с точки зрения уровня вредных воздействий на природу.
3. Воздействие природы на объект
4. Воздействие объекта на человека.
5. Воздействие объекта на атмосферу.

*10. Эстетические показатели продукции характеризуют:*

1. Способность объекта для представления к демонстрации.
2. Рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения.
3. Сочетание форм и композиций в современном стиле.
4. Способность объекта быть признанным внутри субъекта хозяйствования.

*11. Патентно-правовые показатели продукции характеризуют:*

1. Использование в разработках известных патентов и изобретений.
2. Степень обновления технических решений, использованных в объекте, их патентная защита и реализация за рубежом.
3. Правовая защита объекта за рубежом.
4. Защита чистоты технических решений объекта.
5. Защита объекта в судебных инстанциях.

**Укажите номера всех правильных ответов.**

*1. Обобщенными объектами в теории надежности являются:*

1. Изделие, элемент, система.
2. Деталь, механизм, узел, агрегат.
3. Машина, механизм, система узлов и механизмов.
4. Деталь, выработавшая технологический ресурс.
5. Машина, выработавшая свой полный ресурс.

*2. Объект может находиться в следующих состояниях:*

1. Исправном и неисправном.
2. Исправном, неисправном, работоспособном, неработоспособном и предельном.
3. Рабочем, дефектном, поломанном.
4. В рабочем и непригодном.
5. В ремонтном и предельном.

*3. Старение – это:*

1. Следствие изнашивания во времени, его последствие.
2. Изменение физико-механических свойств объекта во времени при хранении и эксплуатации.
3. Следствие износа.
4. Амортизационный срок объекта.
5. Преждевременная выработка ресурса объекта.

*4. Надежность объекта, технической системы – это:*

1. Безотказность объекта при заданном ресурсе.
2. Сохраняемость объекта в течение заданного времени.
3. Свойство объекта сохранять во времени свои параметры.
4. Свойства объекта сохранять установленные параметры при применении.
5. Свойство объекта сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров в заданных режимах и условиях применения.

*5. Свойствами надежности являются:*

1. Работоспособность, ремонтируемость, безопасность, выносливость.
2. Прочность, износостойкость, качество.
3. Безотказность, долговечность, сохраняемость.
4. Долговечность, ремонтпригодность, безотказность.
5. Сохраняемость, работоспособность, безопасность, восстанавливаемость.

*6. Основные процессы, изменяющие свойства или состояние материала:*

1. Внешние и внутренние.
2. Физические, химические и микробиологические.
3. Обратимые и необратимые.
4. Трения и изнашивания.
5. Механические, физические молекулярные, химические и микробиологические.

7. Видами поверхностного взаимодействия трибоповерхностей являются:

1. Механическое, физическое, молекулярное.
2. Статическое, динамическое вибрационное.
3. Химическое, микробное.
4. Концентрационное, точечное, локальное и сплошное.
5. Магнитное, тепловое, биохимическое и трибохимическое.

8. Виды структурного разупрочнения (разрыхления) поверхностей, с точки зрения молекулярно-механической теории трения:

1. Химическое, физическое, молекулярное, механическое, микробиологическое.
2. Механическое, тепловое, адгезионное, микробиологическое.
3. Механическое, тепловое, адсорбционное.
4. Адгезионное, адсорбционное, биологическое, динамическое, молекулярное.
5. Трибохимическое, биохимическое.

9. Виды поверхностной повреждаемости с точки зрения молекулярно-механической теории трения:

1. Царапины, изломы, вмятины, износы.
2. Прямая, передеформирование, адсорбционное понижение прочности.
3. Прямая, обратная, зависимая и независимая.
4. Коррозионная, биоповреждаемость.

10. При разрушении образуется излом, который характеризуется:

1. По макрогеометрии и морфологии излома.
2. По формированию кристаллов и зерен структуры.
3. По характеру силового воздействия. Микрорельефу и энергии разрушения.
4. По однородности и разрыхленности.

**Дополните:**

1. Понятие «качество объекта» включает в себя (.....) групп показателей качества продукции.

2. Разрушение объекта характеризуется зарождением и образованием (.....).

3. Согласно молекулярно-механической теории изнашивания существуют три механизма изнашивания: механический (.....).

4. Молекулярно-механическое изнашивание подразделяют на следующие виды: (.....).

5. Коррозионно-механическое изнашивание бывает следующих видов: (.....).

6. Механическое изнашивание классифицируется на следующие виды: (.....).
7. Изломом называется (.....).
8. Разрушение характеризуется следующими пятью видами: (.....).
9. Известны следующие четыре вида излома: (.....).
10. Разрушение – это процесс зарождения, образования и (.....) с последующим (.....) изделия на части.

**Установите соответствие:**

*1. Свойства объекта:*

- |   |                  |
|---|------------------|
| 1) Свойства объекта, обуславливающие его пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с назначением –                             | а) Безотказность |
| 2) Свойства объекта сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции – | б) Качество      |
|   | в) Надежность    |
|   | г) Сохраняемость |

1 – .....; 2 – .....

*2. Свойство надежности:*

- |  |                      |
|--|----------------------|
| 1) Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени .....                    | а) Сохраняемость     |
| 2) Свойство объекта сохранять свойства надежности при хранении и транспортировании .....                                 | б) Долговечность     |
| 3) Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния .....                       | в) Ремонтпригодность |
| 4) Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов ..... | г) Безотказность     |
|  | д) Надежность        |

1 - .....; 2 - .....; 3 - .....; 4 - .....

*3. Изнашивание:*

- |   |                      |
|---|----------------------|
| 1) Наружная поверхность гильз цилиндров ДВС подвергается .....изнашиванию.        | а) адгезионному      |
| 2) Рабочие органы землеобрабатывающих сельхозмашин подвергаются .....изнашиванию. | б) кавитационному    |
| 3) Поверхности колец подшипников качения подвергаются .....                       | в) абразивному       |
| 4) Щетки электродвигателей подвергаются .....изнашиванию.                         | г) фреттинг-коррозии |
|   | д) водородному       |

1 – .....; 2 – .....; 3 – .....; 4 – .....

4. *Нагрузки при разрушении:*

- |   |  |
|---|--|
| 1) Усталостное разрушение наступает при нагрузках ...                   | а) динамических<br>б) статических                    |
| 2) Пластическое деформирование наступает при нагрузках ...              | в) знакопеременных                                   |
| 3) Мгновенное разделение изделия на части наступает при нагрузках ..... | больше предела прочности<br>больше предела упругости |

1 – .....; 2 – .....; 3 – .....

5. *Виды разрушений:*

- |  |   |
|--|---|
| 1) На деталях машин обнаружены трещины           | а) Усталостное  |
| 2) На поверхностях детали обнаружена ржавчина    | б) Водородное растрескивание<br>в) Трещинообразование |
| 3) На изломе обнаружены участки сербистого цвета | г) Коррозия<br>д) Разрушение при контактных нагрузках |

1 – .....; 2 – .....; 3 – .....

6. *Старение машин:*

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1) Изменение начальных свойств и нарушение нормального функционирования техники – старение | а) моральное<br>б) физическое |
| 2) Изменение стоимости техники под влиянием технического прогресса – старение              | в) износ машины               |
- 1 – .....; 2 – .....

7. *Коррозия:*

- |   |   |
|---|---|
| 1) В подповерхностном слое металла образовалось вздутие в результате ..... коррозии.          | а) питтинговой                          |
| 2) На гладкой поверхности детали появились темные точки: следствие ..... коррозии.            | б) язвенной                             |
| 3) На зеркальной поверхности цилиндра имеются глубокие темные точки: следствие ..... коррозии | в) подповерхностной<br>г) неравномерной |

1 – .....; 2 – .....; 3 – .....

## МОДУЛЬ 2

# КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

## 1 ДЕФЕКТЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ, СНИЖАЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ

### 1.1 Общие сведения о дефектах

**Дефектом** называют каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.

Дефекты ухудшают физико-механические свойства металлов, например прочность, пластичность, плотность, электропроводность, магнитную проницаемость и т.д. Их часто разделяют на типы: **явные и скрытые**. Первые обнаруживают при визуальном способе контроля или при помощи инструментальных средств и методов, которые приведены в нормативной документации. Если дефекты с большой вероятностью выявляются с помощью соответствующих инструментальных методов неразрушающего контроля, но не обнаруживаются визуально, то они относятся к **скрытым**.

Дефекты подразделяются на три вида: **критические**, наличие которых делает использование продукции по назначению невозможным или опасным; **значительные** – существенно влияющие на работоспособность продукции или ее долговечность; **малозначительные**, а также на **устраняемые и неустраняемые**. Вид не оказывающий такого влияния, а также **неустраняемые** дефекты, в отличие от типа, характеризует степень его влияния на эффективность и безопасность использования продукции с учетом ее назначения, т.е. потенциальную опасность рассматриваемого дефекта.

По количеству и характеру распределения в изделиях дефекты могут быть одиночными, местными (трещины, раковины и т.п.), распределенными в органических зонах, например, зонах коррозионного поражения или по всему изделию, например, неоднородность химсостава; наружными (поверхностными и подповерхностными) и внутренними (глубинными).

По характеру геометрических параметров дефекты могут быть точечными, линейными, плоскостными и объемными.

В зависимости от размера дефекты металлов подразделяются на субмикродефекты, микродефекты и макродефекты. К субмикродефектам относят дефекты кристаллической решетки, к микродефектам – микротрещины, микропоры и т.п., различимые при увеличении более шести раз, остальные относят к макродефектам, которые могут быть мелкими и крупными.

**Дефектное изделие** – изделие, имеющее хотя бы один дефект. Дефекты, приобретаемые объектом, изделием в результате эксплуатационных факторов, как правило, называют **повреждениями**.

### 1.2 Производственно-технологические дефекты

К производственно-технологическим относятся металлургические дефекты, которые возникают при отливке и прокатке, и технологические, возникающие при изготовлении изделий и их ремонте.



**Металлургические дефекты** – дефекты, связанные с особенностью процессов выплавки и разлива металла, влияющих на качество металлургической продукции, а также образовавшиеся в процессе обработки металла давлением.

К металлургическим дефектам относятся:

- дефекты слитков, проката и поковок;
- дефекты стальных труб и профилей, образовавшиеся в процессе прессования;
- дефекты холодной объемной штамповки;
- дефекты отливок из чугуна и стали;
- дефекты цветного литья.

Основными причинами дефектов отливок являются нетехнологичность конструкции деталей, несовершенство технологического процесса, нарушение технологии и недоброкачественность технологических материалов.

Число и размеры допускаемых в отливках дефектов определяется технологическими условиями на данный вид отливок.

**Дефекты сварки.** Сварной шов характеризуется литой микроструктурой металла. Ему присуща первичная микроструктура кристаллизации, тип которой зависит от состава шва и условий фазового перехода из жидкого состояния в твердое.

В процессе образования сварного соединения в металле шва могут возникать дефекты, приводящие к снижению прочности, эксплуатационной надежности, точности, а также ухудшающие внешний вид изделия. Дефекты оказывают большое влияние на прочность сварных соединений и могут явиться причиной преждевременного разрушения сварных соединений. Особенно опасны трещиноподобные дефекты (трещины, непровары), резко снижающие прочность, особенно при циклических перегрузках.

Дефекты сварных соединений по месту их расположения делятся на **внутренние и наружные**. К дефектам, связанным с металлургическими и тепловыми явлениями, происходящими в процессе формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания металла, относятся: горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, шлаковые включения.

К дефектам, связанным с нарушением режимов сварки, неправильной подготовкой и сборкой элементов конструкции под сварку, неисправностью оборудования, небрежностью и низкой квалификацией сварщика, относят: несоответствие швов расчетным размерам, непровары, подрезы, прожоги, наплывы, несваренные кратеры и др.

Классификация дефектов швов при сварке металлов плавлением определяется НСО 6520.

К дефектам паяных изделий относят: продольные и поперечные трещины, пористость, пузырь (вздутие), включения (твердотельное, оксидное, филаковое, флюсовое), непропай, подрез, наплыв пайки, проплавление, неполноценный шов, брызги, смещение кромок, выход флюса на поверхность.

**Дефекты металлических защитных покрытий.** Изделиям, которым была придана соответствующая форма и обеспечены требуемые размеры, часто требуется чистовая обработка поверхности для удовлетворительного выполнения ими своих функций, а также защитное покрытие или металлопокрытие с более высо-

кими физико-механическими характеристиками (твердость, износостойкость и т.д.)

К дефектам металлопокрытий относят: поры, включения (несплошность), пузыри, трещины, отслаивание.

### 1.3 Эксплуатационные дефекты и повреждения

Воздействие эксплуатационных нагрузок, окружающей среды (температура, влажность, пары кислот, щелочей, агрессивных компонентов топлива и т.д.), фазовые и структурные превращения, протекающие во времени в условиях воздействия эксплуатационных факторов, при неблагоприятных сочетаниях могут вызвать зарождение и развитие эксплуатационных повреждений (коррозионные язвы, питтинги, фреттинг-коррозия, трещины и т.д.).

Как при статическом, так и при переменном нагружении металла, особую опасность вызывает такое повреждение, как **коррозионное поражение**.

Это физико-химическое взаимодействие металлического материала и окружающей среды, приводящее к ухудшению эксплуатационных свойств материала, среды или технической системы.

Особую группу образуют коррозионно-механические повреждения, в которую входят: коррозионное распрескивание, коррозионная усталость, фреттинг-коррозия, водородное охрупчивание, эрозионная коррозия, кавитационная коррозия.

Опасны в условиях эксплуатации питтинговая и межкристаллитная коррозия. Первая может дать начало подповерхностной коррозии, которая разрушает рабочую поверхность деталей, вторая – разрушая зерен металла продвигается вглубь материала и, не оставляя видимых следов на поверхности приводит к полному разрушению деталей и системы.

**Трещины коррозионной усталости.** Коррозионная усталость проявляется при одновременном воздействии на металл циклических напряжений и коррозионных сред. Характеризуется понижением предела выносливости металла.

Коррозионно-усталостное повреждение начинается, как правило, после существенного повреждения поверхности, образования на ней язв, каверн и межкристаллитной коррозии. Коррозионно-усталостные трещины – это в большинстве случаев многочисленные трещины, разветвляющиеся по мере роста и заканчивающиеся пучками, напоминающими корневую систему растений. При коррозионно-усталостном воздействии повреждения могут проходить как по границам, так и по телу зерен.

**Радиационные повреждения.** При воздействиях ионизирующих излучений (рентгеновское,  $\alpha, \beta, \gamma$ , протонное, нейтронное) на конструкционные материалы последние получают определенные повреждения, определяемые количеством энергии, поглощенной материалом. К числу таких радиационных повреждений относятся: вакансии, внедренные атомы, ионизационные эффекты.

Физические и химические неоднородности, возникающие при облучении металлов, существенным образом изменяют их свойства, а именно: возрастает удельное электросопротивление; повышается склонность к коррозионному рас-

трескиванию; металлы охрупчиваются; предел текучести, предел прочности, твердость возрастают, а пластичность снижается; падает значение длительной прочности.

Все повреждения технических систем, возникающие в процессе их эксплуатации должны своевременно устраняться, ибо наличие их в рабочих объектах приводит в конечном случае к разрушению элементов технических систем отказам машин и оборудования.

## 1.4 Отказы и повреждения

Согласно ГОСТ 21.002-83 *событие, заключающееся в нарушении работоспособности, называется отказом, а событие, заключающееся в нарушении исправного состояния, – повреждением.*

Причины, обуславливающие появление отказов, связаны с определенными физическими и физико-химическими процессами, происходящими в материалах и конструкциях на различных этапах их "жизни". Отказы объектов в процессе их эксплуатации возникают по трем основным причинам: изнашивание поверхностей трения деталей, усталость материала, коррозионное разрушение.

Классифицировать отказы можно по следующим признакам.

**По природе происхождения** отказы делят на естественные и искусственные (преднамеренные).

*Естественные* отказы происходят по причинам, независящим от человека, эксплуатирующего технику.

*Искусственные* отказы возникают в результате сознательных или несознательных действий персонала, эксплуатирующего технику.

**По времени возникновения** различают приработочные отказы, отказы при нормальной эксплуатации и отказы при эксплуатации в режиме аварийного изнашивания.

**По характеру возникновения** отказы подразделяют на постепенные, внезапные, самоустраняющиеся, перемежающиеся и сбои.

*Постепенные отказы* проявляются в постепенном изменении одного или нескольких параметров объекта. Причинами его обычно бывают износ, коррозия, поверхностная усталость и другие постепенно нарастающие изменения в деталях и узлах машины в процессе длительной эксплуатации. Зная ресурс детали или узла, а также применяя методы технического диагностирования, такой отказ можно предвидеть и предупредить своевременным обслуживанием или ремонтом.

*Внезапные отказы* характеризуются скачкообразным изменением одного или нескольких параметров машины или ее элемента. Причинами тому бывают, например, дефекты в материале, небрежность при изготовлении или ремонте, перегрузки. Эти отказы трудно предвидеть, так как происходят они без предшествующих заметных симптомов.

Тем не менее, как постепенные, так и внезапные отказы являются результатом накопления повреждений. Это накопление представляет собой совокупность промежуточных состояний между работоспособностью и отказом.

В случае постепенного отказа изделие медленно приближается к нему с понижением своих выходных параметров. При внезапном отказе выходные параметры до наступления отказа заметно не ухудшаются, хотя скрытое нарастание повреждений также может происходить в течение длительного времени, например, развитие трещины или самоотворачивание крепежной детали.

*Самоустраняющиеся отказы* – это возникающие в процессе эксплуатации машины отказы, устраняющиеся без каких-либо обслуживающих или ремонтных воздействий. Примерами таких отказов могут быть остановка карбюраторного двигателя в результате образования воздушной пробки в системе питания или обледенение карбюратора. После того, как двигатель постоит некоторый промежуток времени, возможен его повторный запуск.

*Перебегающие отказы* – это многократно возникающие самоустраняющиеся отказы объекта одного и того же характера. Примером такого отказа является ухудшение параметров двигателя из-за образования нагара в камере сгорания. При быстрой езде нагар обычно выгорает и неисправность самоустраняется.

*Сбой* – самоустраняющийся кратковременный отказ. Так, попадание воды в систему питания может привести к перебоям в работе и остановке двигателя, но при прокручивании стартером отказ самоустраняется.

**По взаимосвязи** отказы подразделяют на независимые и зависимые.

*Независимый* отказ не обусловлен отказом другой детали или узла, а *зависимый* – обусловлен. 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 передач и т. д.

**По степени воздействия** отказа, определяющей возможность дальнейшего использования объекта, а также место и метод его устранения, все отказы разделяют на эксплуатационные и ресурсные.

*К эксплуатационным*, с этой точки зрения, отказам относятся такие, устранение которых не связано с большим объемом разборочно-сборочных работ, не требует высокой квалификации обслуживающего персонала и сложного оборудования и сводится к замене неисправных деталей или регулировке вышедшего из строя механизма. Устранение таких отказов осуществляется методами текущего ремонта.

*К ресурсным* относят такие отказы, устранение которых требует специального оборудования и большого объема разборочно-сборочных работ, т. е. капитального ремонта. Например, к ресурсным отказам двигателя относят изгиб или скручивание шатунов, разрыв шатунных болтов, коробление гнезд подшипников коленчатого вала, предельный износ, задиры гильз или поршней и др.

**По причине возникновения** отказы разделяются на следующие виды:

*исследовательские* отказы, возникающие вследствие ошибок, допущенных на стадии исследований, приводящих к выдаче неверных исходных данных для проектирования (конструирования) объекта или его элемента;

*расчетно-конструкторские* отказы, появляющиеся вследствие ошибок при выборе кинематики механизмов и выполнении прочностных расчетов, расчетов на из-

нос и назначении технических условий на изготовление элементов и объекта в целом;

*производственно-технологические* отказы, являющиеся следствием плохого качества материалов деталей, несовершенных технологических способов и методов их обработки, применения недостаточно точных 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;

*эксплуатационные* отказы, являющиеся результатом 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 и затратам** отказы могут быть тягчайшими, когда они приводят к человеческим жертвам (например, отказ рулевого управления или тормозов мобильных машин), тяжелыми, средними и незначительными.

**По группам сложности** устранения отказы 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.

## 1.5 Методы обнаружения скрытых дефектов

В ремонтном производстве наряду с контролем размеров и геометрической формы деталей, весьма важно установить наличие в них недопустимых дефектов типа нарушения сплошности материала: поверхностных и внутренних трещин; усадочных, газовых, шлаковых, земляных раковин, пленок окислов и расслоений; непроваров; рыхлостей. Эти дефекты, как правило, скрыты и не поддаются обнаружению традиционными методами контроля.

В табл. 1.1 приведены характерные особенности и области применения распространенных способов неразрушающего контроля.

**Визуально-оптический.** Метод применяется для обнаружения поверхностных дефектов на деталях из любых материалов. Обнаруживаются дефекты в виде трещин, раковин, обломов, сколов, заусенцев и др. Для более эффективного поиска дефектов применяются лупы  $2...5^x$  увеличения, биноклярные очки  $2...4^x$  увеличения, микроскопы.

**Гидравлический метод.** Опрессовкой определяют повреждения в корпусных деталях (блок и головка цилиндров, впускной и выпускной трубопроводы и др.) и

в отдельных узлах машин (водяной радиатор). Блоки и головки испытывают на стендах, впускные и выпускные трубы – на специальных плитах (рис. 2.1).

При установке детали на стенд наружные отверстия закрывают крышками и заглушками. Насосом заполняют рубашку блока и внутренние полости головки водой и создают давление 0,4...0,5 МПа. Давление контролируют манометром. Испытания длятся 5 мин. При испытании радиаторов  $P=0,1...0,15$  МПа,  $t=1$  мин. Течи и потения не должно быть.

**Пневматический метод** используют для определения повреждений радиаторов, камер, топливных баков. Воздух под давлением 0,01...0,05 МПа подают внутрь радиатора, камеры, погруженных в ванну с водой и по пузырькам выходящего воздуха обнаруживают места дефектов. При обнаружении дефектов в топливных баках воздух нагнетают в бак до 0,1 МПа. Предполагаемые места дефектов смазываются мыльным раствором. Нарушение герметичности определяют по выступающим пузырькам воздуха.

**Ультразвуковой метод** контроля основан на способности ультразвуковых волн распространяться в любых материальных средах с большой скоростью (1400...6300 м/с) и на большие расстояния в виде направленных пучков и отражаются от дефектного участка (от границы раздела двух сред) вследствие резкого изменения плотности среды, а следовательно, и ее акустических свойств.

Наиболее распространенный способ получения ультразвуковых колебаний основан на пьезоэлектрическом эффекте некоторых кристаллов (кварца, сегнетовой соли) или материалов (титана, бария). Эффект заключается в том, что если противоположные грани пластинки, вырезанной из этих материалов, например, из кварца, заряжать разноименными зарядами электричества, то пластинка будет деформироваться в такт изменениям знаков заряда. Изменяя знаки электрических зарядов с частотой свыше 20000 колебаний в секунду, получают механические колебания пластинки той же частоты, передающиеся в окружающую среду в виде ультразвука.

В ремонтном производстве используются два метода ультразвукового прозвучивания контролируемых объектов: теневой и эхо-метод (метод отражения).

Теневой метод заключается в том, что с одной стороны детали с помощью излучателя 4 (рис. 2.2) вводится пучок ультразвуковых колебаний, а с другой стороны с помощью приемника 5 регистрируется интенсивность этого пучка, прошедшего через деталь. В случае дефекта ультразвуковые волны отражаются, т.е. не попадают на приемник 5 и за дефектным участком детали образуется звуковая тень, а на приборе 3 изменяется показание. Этот метод применяется при двухстороннем доступе к детали.

Таблица 2.1 – Характерные особенности и области применения способов неразрушающего контроля

Способы неразрушающего контроля	Минимальные размеры дефекта		Область применения
	Глубина, мм	Ширина, мм	
Визуально-оптический (с помощью луп, микроскопов)	-	0,01	Детали из любых материалов (только поверхностные дефекты)
Давления (гидравлический, пневматический)	сквозные	0,001	Сквозные трещины в блоках, головках цилиндра, коллекторах, водяных радиаторах, топливных баках
Электрического сопротивления	-	0,001	Неэлектропроводные материалы, несплошности покрытий толщиной 0,5 мм. Трещины в деталях электрооборудования, баках аккумуляторов
Ультразвуковой	0,1	0,001	Детали из любых материалов. Наружные и глубинные несплошности. Дефекты сварных швов (не поддаются контролю детали мелкие, сложной конфигурации и при шероховатости поверхности свыше 2,5 мкм)
Люминесцентный	0,03	0,002	Детали из любых материалов (применяют в основном для немагнитных материалов и деталей с темной поверхностью). Только поверхностные дефекты
Цветной (хроматический)	0,02	0,002	То же
Токовыхревой	0,01	0,001	Детали из электропроводных материалов. Поверхностные и подповерхностные дефекты
Магнитопорошковый	0,01	0,001	Детали только из магнитных материалов. Наружные и подповерхностные дефекты на светлых поверхностях
Рентгенографический	2...3% от толщины изделия	-	Детали из магнитных и немагнитных материалов. Внутренние дефекты
γ-графический	3% от толщины изделия		Все материалы. Внутренние и наружные дефекты
Капиллярный (смачивания керосином с последующей обмазкой)	0,01	0,001	
Травление детали кислотой	0,01	0,001	Магнитные и немагнитные неметаллические материалы. Поверхностные трещины
Нагрева детали	-	0,001	Герметически закрытые сосуды из любых материалов. Сквозные дефекты

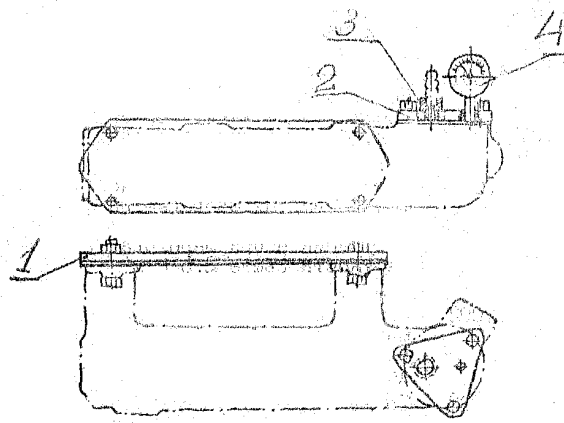


Рисунок 2.1 – Приспособление для гидравлических испытаний трубопроводов:  
1, 2 – плиты с резиновыми прокладками; 3 – автоматический клапан; 4 – манометр

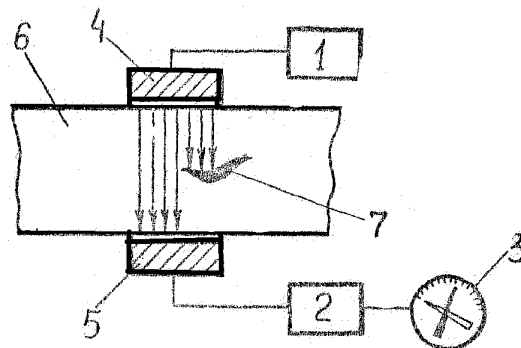


Рисунок 2.2 – Схема ультразвукового контроля (теневой метод):  
1 – блок генератора; 2 – блок усилителя; 3 – прибор регистрации сигналов;  
4 – излучатель; 5 – приемник; 6 – проверяемая деталь; 7 – дефект

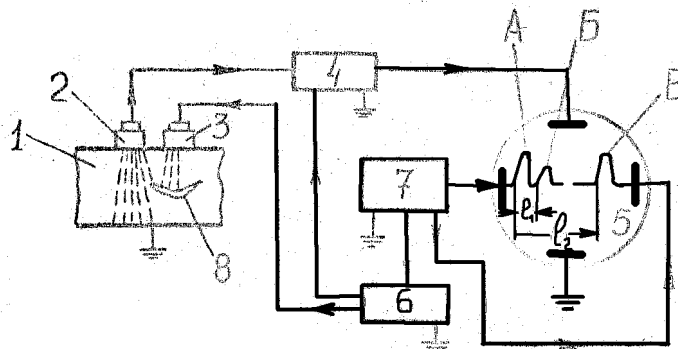


Рисунок 2.3 – Схема дефектоскопа, работающего по принципу отражения ультразвуковых волн:

1 – деталь; 2 – приемная искательная головка; 3 – излучатель; 4 – усилитель;  
5 – электронно-лучевая трубка; 6 – генератор импульсов; 7 – генератор развертки;  
8 – дефект; А – начальный импульс; Б – импульс отраженный от дефекта;  
В – донный сигнал



Эхо-метод состоит в том, что импульсный генератор возбуждает пьезоэлектрический излучатель. Излучатель посылает в материал короткие импульсы ультразвуковых колебаний длительностью  $(0,5 \dots 10) \cdot 10^{-6}$  сек. Встретив препятствие, они отражаются и возвращаются к приемной искательной головке, в которой возникает слабый электрический ток.

В практике контроля деталей наибольшее распространение получили импульсные дефектоскопы, работающие на принципе отражения ультразвуковых волн. Схема действия импульсного ультразвукового дефектоскопа показана на рис. 2.3.

В импульсном дефектоскопе пьезоэлектрический излучатель 3, преобразующий энергию электрических колебаний импульсного генератора 6, посылает в деталь ультразвуковые колебания в виде коротких импульсов длительностью  $0,5 \cdot 10^{-3} \dots 1,0 \cdot 10^{-2}$  сек, разделенные паузами  $1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ . Для плотного контакта поверхностью соприкосновения излучателя с деталью смазывают тонким слоем вязкой смазки (трансформаторное или вазелиновое масло).

Достигнув противоположной стороны детали или дефекта, ультразвуковые импульсы отражаются от них и попадают на приемный пьезоэлектрический щуп 2, который преобразует механические колебания в электрические сигналы, поступающие через усилитель 4 на электронно-лучевую трубку 5. Для получения временной горизонтальной развертки луча на экране трубки служит генератор 7. Толщина контролируемой детали изображается на экране в виде вертикальных пик, соответствующих начальному импульсу *A* и данному сигналу *B*, расположенному на расстоянии  $l_2$  от начального импульса.

Начальный импульс вырабатывается генератором 6 и служит началом отсчета на электронно-лучевой трубке. При наличии в детали 1 скрытого дефекта 8 на экране появится отраженный от него импульс *B*, глубина залегания которого соответствует расстоянию  $l_1$  от начального сигнала.

Конструкция пьезоэлектрического щупа (искательной головки) бывает прямой *a* и призматической *b* (рис. 2.4) в зависимости от характера расположения дефекта и направления импульса поиска дефекта.

Ультразвуковой контроль обладает высокой чувствительностью к выявлению скрытых дефектов.

**Люминесцентный метод** основан на свойстве ряда жидкостей светиться (флуоресцировать) при облучении их ультрафиолетовыми лучами. Применяются для контроля деталей из сплавов цветных металлов и инструментов с пластинками из твердого сплава. Используют его и для контроля деталей из черных металлов. При контроле очищенную и обезжиренную деталь смачивают флуоресцирующей жидкостью, которая проникает в несплошности материала. Затем ее удаляют с поверхности детали струей холодной воды под давлением 0,2 МПа или протирают ветошью. Деталь просушивают, опыливают порошком силикагеля ( $SO_2$ ) и выдерживают на воздухе в течение 5...30 мин, излишки порошка удаляют. Поверхность детали облучают ртутно-кварцевой лампой через светофильтр УСФ-3. Дефекты обнаруживают по ярко-зеленому свечению порошка силикагеля, пропитанного флуоресцирующим раствором, который располагается по трещине.

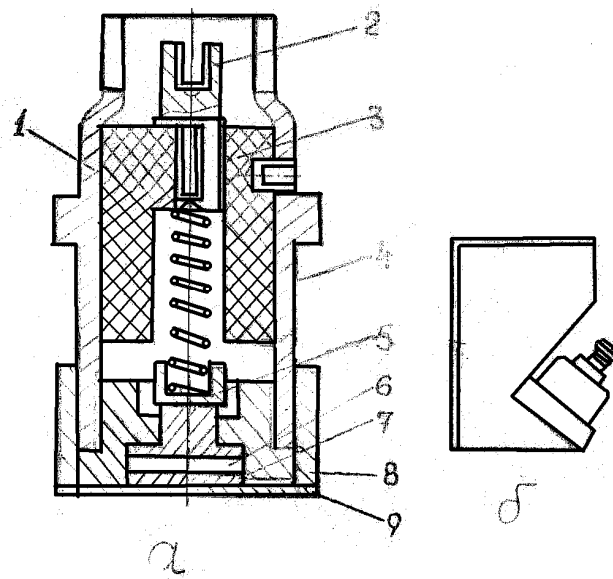


Рисунок 2.4 – Искательная головка: *а* – прямая, *б* – призматическая:  
 1 – корпус; 2 – контактный винт; 3 – изоляционная втулка; 4 – пружина;  
 5 – контактный стержень; 6 – демпфер; 7 – пьезопластина; 8 – стальное кольцо;  
 9 – защитный металлический колпачок

Флуоресцирующая смесь (жидкость) состоит из 50% керосина, 25% бензина и 25% светлого трансформаторного масла и флуоресцирующего красителя (зелено-золотистого дефектоля) в количестве 0,25 грамма на литр смеси.

В качестве флуоресцирующей жидкости может применяться суспензия, состоящая из 10...15 флуоресцирующего порошка, 30...40 г эмульгатора (смачивателя) ОП-7, 5...10 г нитрата натрия (ингибитора коррозии) на литр воды, а также некоторые нефтепродукты (керосин, соляровое масло), которое при облучении светится голубовато-фиолетовым светом.

Люминесцентный дефектоскоп (ЛД-2, ЛД-4) представляет собой установку, в которой смонтированы принадлежности для покрытия изделий люминофором, промывки, просушки и облучения ультрафиолетовыми лучами проверяемой детали. Для контроля крупногабаритных деталей дефектоскоп снабжен переносной лампой ультрафиолетового излучения ДРШ-250 и переносным насосом с поливателем. Переносной лампой можно пользоваться и на стационаре.

Схема люминесцентного дефектоскопа представлена на рис. 2.5.

Для определения глубины раскрытия трещины пользуемся зависимостью ширины флуоресцирующей полосы от глубины трещины (рис. 2.6).

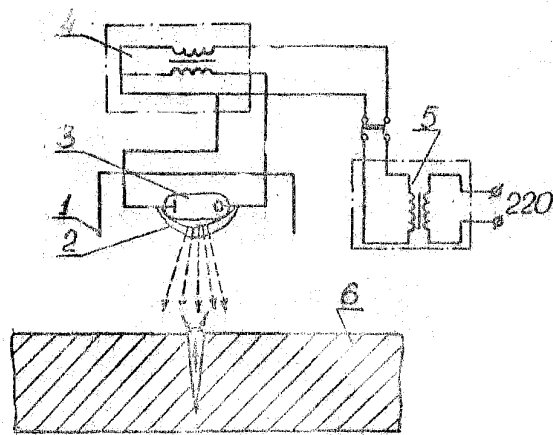


Рисунок 2.5 – Схема люминесцентного дефектоскопа:

1 – рефлектор; 2 – светофильтр; 3 – ртутно-кварцевая лампа; 4 – высоковольтный трансформатор; 5 – силовой трансформатор; 6 – деталь

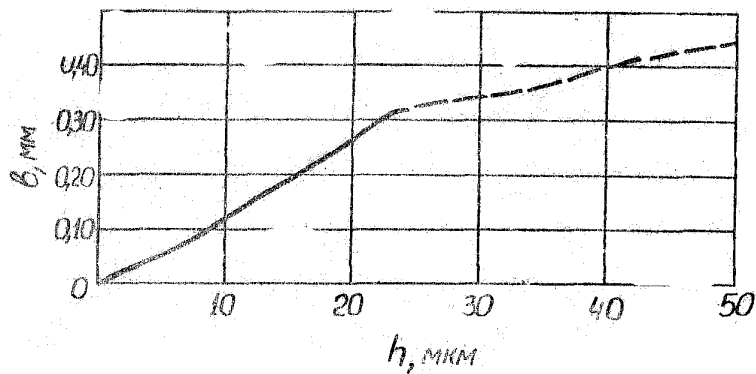


Рисунок 2.6 – Зависимость ширины флуоресцирующей полосы ( $l$ ) от глубины трещины ( $h$ )

Обнаружение поверхностных невидимых дефектов **цветным (хроматическим методом)**.

На очищенную и обезжиренную деталь наносится проникающая в трещины и поры жидкость, состоящая из 800 мл керосина, 100 мл бензина, 100 мл ацетона и 30 г темно-красного красителя 5С. Жидкость наносится кистью 3...4 раза с интервалами 5...10 мин и выдержкой 10...15 мин. Удаляется излишняя проникающая жидкость путем промывки проточной водой с последующим протирающим ветошью насухо. На предполагаемые места дефектов наносится проявитель следующего состава: коллодий медицинский – 700 мл; бензол – 200 мл; ацетон – 100 мл; цинковые белила – 50 г. Проявитель наносится кистью равномерным слоем. Деталь выдерживается 15...20 мин до проявления рисунка дефектов. Деталь очищается ветошью, смоченной ацетоном.

**Магнитная дефектоскопия.** Сюда относятся токовихревой и магнитно-порошковый методы. Они применяются для контроля деталей любой конфигурации и размеров, изготовленных из ферромагнитных сплавов (сталь, чугун) и от-

личаются высокой точностью. Она позволяет обнаруживать трещины шириной до 0,001 мм, а также раковины и поры на глубину 1,5...2,0 мм.

Применяя магнитный контроль при профилактическом осмотре деталей и узлов, можно обнаружить трещины усталости в самом начале их развития, когда они еще малы по размерам и невидимы при осмотре невооруженным глазом.

Выявление скрытых трещин способом магнитной дефектоскопии основано на том, что магнитные силовые линии, проходя через деталь, при встрече препятствия в виде трещин, пор и других дефектов с меньшей магнитной проницаемостью, огибают эти препятствия и образуют над ними поля рассеивания с наибольшей концентрацией магнитно-силовых линий (рис. 2.7).

Для выявления поля рассеивания применяют магнитный порошок (лучше суспензию этого порошка в трансформаторном масле или дизельном топливе). Намагниченную деталь опыливают магнитным порошком или обливают суспензией. Частицы порошка в поле рассеивания намагничиваются и притягиваются к краям дефекта как к полюсам магнита. Здесь они образуют на поверхности детали осадок порошка в виде жилки, ширина которой может достигать 100-кратной ширины трещины. По оседанию порошка судят о месте расположения и характере дефекта.

При контроле деталей данным методом применяют циркуляционное, продольное и комбинированное намагничивание. Циркуляционное намагничивание используют для выявления продольных трещин; продольное намагничивание – для выявления поперечных трещин; комбинированное намагничивание применяют в случае, если характер дефекта неопределенный (рис. 2.8).



Рисунок 2.7 – Схема намагничивания

Сущность контроля рентгеновскими лучами заключается в следующем. Лучи, проходящие через материалы, незначительно теряют свою интенсивность, если на их пути встречаются пустоты контролируемой детали в виде трещин, раковин и пор. И наоборот, они теряют свою интенсивность, если на своем пути не встречают таких дефектов. Спроектированные на экране выходные лучи покажут значительные или более ярко освещенные места, отличающиеся от общего фона. Эти пятна и полосы различной яркости указывают на дефекты в материале. Сфотографированный на рентгеновскую пленку экран называется рентгенограммой (с обратным негативным изображением). Кроме рентгеновских лучей, в дефектоскопии нашли применение лучи радиоактивных элементов – гамма-лучи. Их проникающая способность позволяет просвечивать металл толщиной до 300 мм. Источником получения гамма-лучей служат радиоактивные изотопы: кобальт 60, цезий 137 и др. В ремонтном производстве лучевая дефектоскопия пока не нашла применения.

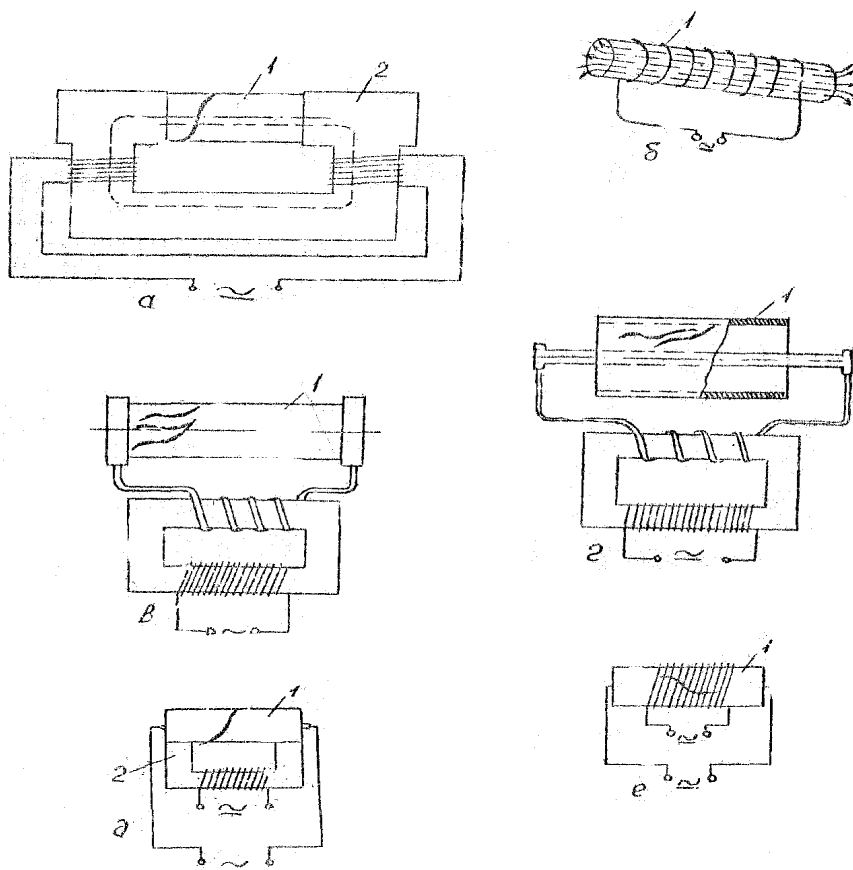


Рисунок 2.8 – Схемы способов намагничивания деталей:  
*а, б* – продольное; *в, г* – циркулярное; *д, е* – комбинированное;  
*1* – деталь; *2* – электромагнит

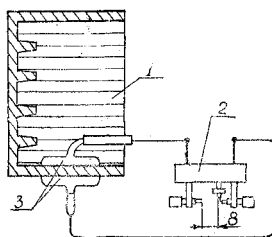


Рисунок 2.9 – Схема проверки бака аккумулятора на наличие трещин  
*1* – бак аккумулятора; *2* – искровой разрядник; *3* – контакты

Методом нагрева детали пользуются для обнаружения трещин в тонкостенных герметически закрытых деталях (латунные поплавки карбюраторов). Деталь помещают в горячую воду ( $t = 80...90^{\circ}\text{C}$ ). По выходящим пузырькам нагретого воздуха устанавливают месторасположение трещины.

Методом проверки электрической прочности деталей пользуются для выявления трещин в изоляционных деталях электрооборудования и баках аккумуляторов. Прекращение искрообразования в трехэлектродном разряднике стенда свидетельствует о наличии трещины.

## 2 ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1 Классификация и структура показателей надежности

Поскольку надежность включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, то для каждого из этих свойств имеются свои количественные характеристики, которые называют *показателями надежности*.

*Показатель надежности* – количественная характеристика одного или нескольких свойств объекта. Все показатели надежности классифицируются на две группы: *основные* и *дополнительные*. К *основным* показателям надежности относятся единичные и комплексные. К *единичным* показателям надежности относятся показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. К *комплексным* показателям надежности следует относить: коэффициент готовности, коэффициент технического использования и удельная стоимость надежности.

Все показатели надежности подразделяют также на расчетные, экспериментальные, экстраполированные, а также групповые и индивидуальные.

*Расчетный показатель надежности* – показатель, значения которого определяется расчетным методом.

*Экспериментальный показатель надежности* – показатель, точечная или интервальная оценка которого определяется по данным эксплуатации.

*Экстраполированный показатель надежности* – показатель надежности, точечную или интервальную оценку которого определяют на основании результатов расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполирования на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации.

*Групповой показатель* надежности служит для оценки надежности совокупности изделий данного типа (вида, марки, модели).

*Индивидуальный показатель* предназначен для оценки надежности каждого изделия данного типа.

Для характеристики отдельных свойств и элементов технических систем вводятся показатели эксплуатационной технологичности, коэффициенты взаимозаменяемости элементов, унификации, конструктивной последовательности, кратности обслуживания и срока службы конструктивных элементов, общей контролепригодности, удобства, доступности и массы монтажных сборочных единиц, которые в большей степени характеризуют качество технических систем, но неразрывно связаны с надежностью.

Основные показатели надежности связаны единой структурой, представленной на рис.2.10

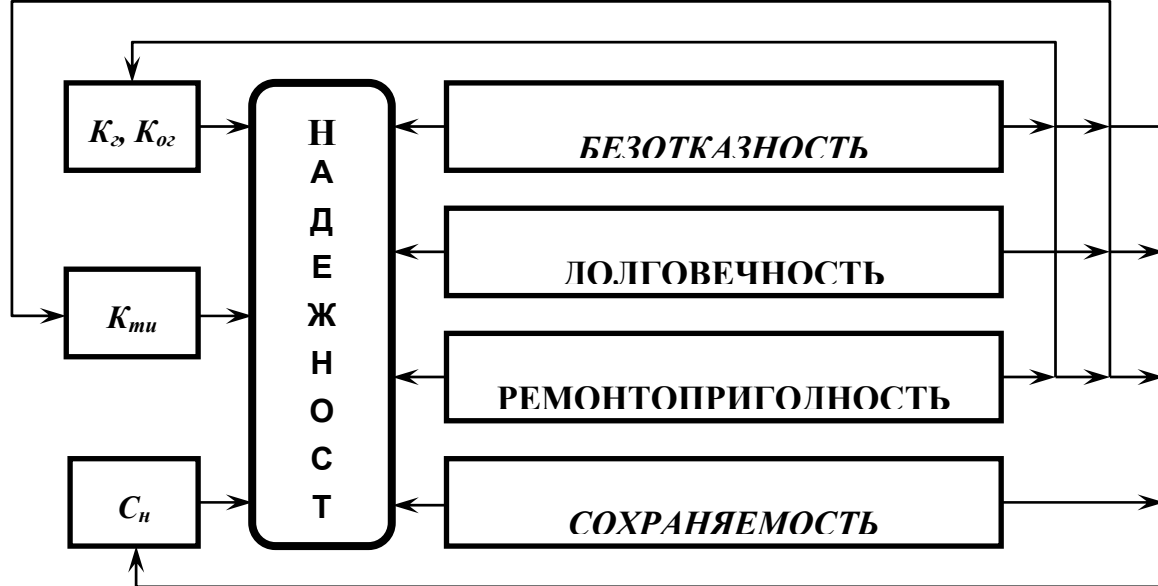


Рисунок 2.10 – Структура показателей надежности машины

## 2.2 Единичные показатели надежности

### Показатели безотказности.

Вероятность безотказной работы  $P(t)$  – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет.

$$P(t) = \frac{N - m(t)}{N} = 1 - \frac{m(t)}{N}, \quad (2.1)$$

где  $N$  – общее число наблюдаемых объектов;

$m(t)$  – число отказавших объектов до наработки  $t$ .

Средняя наработка до отказа  $T_{cp}$  – математическое ожидание наработки до первого отказа.

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{1i}, \quad (2.2)$$

где  $t_{1i}$  – наработка на первый отказ  $i$ -го объекта.

Средняя наработка на отказ  $T_o$  – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки

$$T_o = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (2.3)$$

где  $m$  – суммарное число отказов у  $N$  наблюдаемых объектов;

$t_i$  – наработка  $i$ -го объекта.

В связи с тем, что характеристика потока отказов не постоянна, величина наработки на отказ зависит от продолжительности периода, в течение которого она определяется.

Параметр потока отказов  $\omega(t)$  – отношение среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольно малую его наработку к значению этой наработки.

$$\omega(t) = \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{N \Delta t}, \quad (2.4)$$

где  $m(t + \Delta t)$  – суммарное число отказов до наработки  $t + \Delta t$ ;

$m(t)$  – суммарное число отказов до наработки  $t$ ;

$\Delta t$  – величина интервала наработки.

Параметр потока отказов характеризует среднее число отказов в единицу времени или скорость возникновения отказов в рассматриваемый момент времени.

Интенсивность отказов  $\lambda(t)$  – показатель надежности невосстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени (наработки) объектов к числу объектов, оставшихся работоспособными.

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}, \quad (2.5)$$

где  $N(t)$  – число объектов, работоспособных к моменту времени  $t$ ;

$N(t + \Delta t)$  – число объектов, работоспособных к моменту времени  $(t + \Delta t)$ .

По другому интенсивность отказов определяется как условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, при условии, что до этого момента отказ не возник.

### Показатели долговечности.

Технический ресурс (сокращенно ресурс) – наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновление после капитального ремонта до наступления предельного состояния. Различают:

доремонтный ресурс  $T_{др}$  – ресурс до первого капитального ремонта;

межремонтный ресурс  $T_{мр}$  – ресурс между смежными капитальными ремонтами;

полный ресурс  $T_n$  – ресурс до списания.

Срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта до перехода в предельное состояние.

Стандартизованными являются следующие показатели долговечности.

Средний ресурс (срок службы)  $\bar{T}$  – математическое ожидание ресурса (срока службы).

Гамма-процентный ресурс (срок службы)  $T_\gamma$  – наработка (календарная продолжительность эксплуатации) объекта, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Назначенный ресурс (срок службы)  $T_n$  – суммарная наработка (календарная продолжительность эксплуатации) объекта, при достижении которой его применение по назначению должно быть прекращено независимо от его состояния.

### Показатели ремонтпригодности.



Среднее время восстановления работоспособного состояния  $T_в$  – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния.

$$T_в = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{в.i}, \quad (2.6)$$

где  $t_{в.i}$  – время восстановления работоспособности  $i$ -го объекта.

Вероятность восстановления работоспособного состояния  $P_в(t)$  – вероятность того, что время работоспособного состояния объекта не превысит заданного. Она представляет собой значение функции распределения времени восстановления при  $T_в = T_з$ , где  $T_з$  – заданное время восстановления.

Кроме того, для оценки ремонтпригодности используют технико-экономические показатели: удельные затраты времени  $T_{pn}$ , труда  $P_{pn}$ , и денежных средств  $C_{pn}$  на поддержание работоспособности.

$$T_{pn} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_{mo.i} + T_{p.i} + T_{o.i}}{T_{dp(mp)}}, \quad (2.7)$$

$$P_{pn} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_{mo.i} + P_{p.i} + P_{o.i}}{T_{dp(mp)}}, \quad (2.8)$$

$$C_{pn} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{mo.i} + C_{p.i} + C_{o.i}}{T_{dp(mp)}}, \quad (2.9)$$

где  $T_i, P_i, C_i$  – суммарные затраты времени, и денежных средств на проведение технических обслуживаний (индекс «*мо*»), ремонта (индекс «*р*») и устранения эксплуатационных отказов (индекс «*о*») за доремонтный (межремонтный) период работы  $i$ -ой машины.

#### **Показатели сохраняемости.**

Сохраняемость оценивается показателями, аналогичными тем, которые применяются для оценки долговечности.

Средний срок сохраняемости  $T_{xp}$  – математическое ожидание срока сохраняемости. Он характеризует среднюю продолжительность хранения объекта в заданных условиях.

Гамма-процентный срок сохраняемости  $T_{xp,\gamma}$  – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

Кроме того, сохраняемость оценивают и средними удельными затратами  $C_{xp}$  на хранение объекта.

$$C_{xp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{C_{xp.сум.i}}{T_i}, \quad (2.10)$$

где  $C_{xp.сум.i}$  – суммарные затраты на заработную плату, материалы, амортизацию зданий и сооружений машинных дворов при хранении  $i$ -ой машины.

## 2.3 Комплексные показатели надежности

Как уже отмечалось, они характеризуют несколько свойств надежности одновременно.

**Коэффициент готовности  $K_r$**  – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается:

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_g}. \quad (2.11)$$

Коэффициент готовности характеризует одновременно безотказность и ремонтпригодность объекта, следовательно, зависит от числа и сложности отказов и приспособленности изделия к их устранению.

**Коэффициент оперативной готовности  $K_{oz}$**  – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Если вероятность безотказной работы объекта  $P(t_p)$  в течение времени  $t_p$  не зависит от момента начала работы, то значение коэффициента оперативной готовности определяют по формуле

$$K_{oz} = K_r P(t). \quad (2.12)$$

Коэффициент оперативной готовности используется для характеристики надежности техники, применяемой для уборки урожая, кормоприготовительных машин животноводческих комплексов и т. д.

**Коэффициент технического использования  $K_{mi}$**  – отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

$$K_{mi} = \frac{t_{сум}}{t_{сум} + t_p + t_o}, \quad (2.13)$$

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

$t_p$  – суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых ремонтов всех объектов;

$t_o$  – суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых технических обслуживаний всех объектов. Время простоев по организационным причинам здесь не учитывается.

Коэффициент технического использования зависит от трех свойств надежности: безотказности, долговечности и ремонтпригодности. Численно этот коэффициент представляет вероятность того, что в любой произвольно взятый момент машина используется, а не простаивает в ремонте или на обслуживании. Коэффи-

циент технического использования повышается при более четкой организации ремонта и технического обслуживания, при агрегатном методе ремонта, при проведении технических обслуживаний вне периода полевых работ или в нерабочее время, при достаточном наличии материалов и запасных частей.

К комплексным показателям надежности относятся также *суммарная и удельная* (в расчете на единицу наработки) *трудоемкость технического обслуживания и ремонтов, суммарные и удельные затраты на поддержание и восстановление работоспособности* за определенный период эксплуатации и др. Наиболее обобщающим показателем надежности является *удельная стоимость надежности*  $C_n$  – это средняя стоимость приобретения, технического обслуживания, ремонта и хранения машины, отнесенная к единице наработки.

$$C_n = C_m + C_{pn} + C_{np} + C_{xp}, \quad (2.14)$$

где  $C_m$  – удельная стоимость новой машины;

$C_{pn}$  – удельная стоимость ремонтпригодности;

$C_{np}$  – удельная стоимость простоев;

$C_{xp}$  – удельная стоимость хранения.

**Показатели эксплуатационной технологичности** характеризует затраты труда, а также стоимость на подготовку сельскохозяйственной техники к эксплуатации, на плановое техническое обслуживание в процессе эксплуатации, на работы после эксплуатации (кроме постановки на хранение)

*Показатели ремонтной технологичности* характеризуют приспособленность конструкции машины к сложным (деталей, сложных единиц и др.) ремонтным работам, которые выполняются на ремонтных предприятиях.

К этим показателям относятся: среднее время ремонта, вероятность ее окончания в заданное время; относительные затраты, отнесенные ко времени пребывания машины в эксплуатации (для деталей, сложных единиц и др.)

Дополнительные показатели ремонтпригодности с основными позволяют конкретизировать затраты на ремонтпригодность.

Признаки, которые характеризуют общее техническое совершенство конструкции машин, в том числе конструктивные решения следующие:

**Коэффициент взаимозаменяемости конструктивных элементов** – отношение суммы количества наименований типоразмеров стандартизованных, нормализованных, заимствованных деталей и узлов к общему количеству наименований конструктивных элементов машин.

**Коэффициент унификации** определяет какая часть используемых деталей унифицирована. Например, коэффициент унификации двигателей ЯМЗ близок к 0,9.

**Коэффициент конструктивной последовательности** – отношение количества наименований ранее освоенных сложных единиц и деталей к общему количеству наименований конструктивных элементов объекта.

Последовательность значительно упрощает организацию и технологию изготовления машин и дает возможность рационально решать вопросы эксплуатации ремонта.

Перечисленные коэффициенты принадлежат к наиболее важным показателям стандартизации.

**Коэффициент взаимозаменяемости** – отношение количества взаимозаменяемых элементов к общему количеству конструктивных элементов машины.

Рациональный уровень взаимозаменяемости конструктивных элементов – важный способ снижения затрат труда и стоимости при устранении отказов.

**Коэффициент кратности обслуживания и сроков службы конструктивных элементов** – отношение соответствующего количества базовых элементов машин периодически обслуживаемых к общему количеству наименований конструктивных элементов. Кратность как и равная периодичность сроков службы конструктивных элементов значительно сокращает суммарное время простоя машины и затраты на ее обслуживание и ремонт.

**Коэффициент общей контролепригодности** – отношение количества конструктивных элементов, приспособленных к контролю разными способами в процессе эксплуатации к общему количеству элементов машины, контроль которых необходим во время эксплуатации.

Показатели, которые характеризуют приспособленность конструкции машины к профилактическим и ремонтным работам такие:

**коэффициент удобства** – отношение общего количества удобства поз при выполнении работ к общему количеству возможных поз;

**коэффициент доступности** определяет суммарную трудоемкость балластных работ (подготовка машины, необходимые разборочно-сборочные работы), которые необходимо выполнить при устранении отказа и технического обслуживания;

**коэффициент массы демонтажных сборочных единиц** определяет легко-разборность конструкции машины. Его определяют как отношение количества сборочных единиц, которые демонтируют вручную, масса которых не превышает установленного граничного значения, к общему количеству единиц машины, которые демонтируются при устранении отказов при техническом обслуживанием, ремонте и в процессе эксплуатации.

### 3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ»

#### Цель лабораторной работы

Получить практические навыки по определению показателей надежности.

**Студент должен знать:** основные понятия и выражения показателей надежности.

**Студент должен уметь:** оценивать показатели надежности сельскохозяйственной техники, оценивать результаты расчета.

#### Указания по выполнению работы

Перед выполнением лабораторной работы студенты должны:

1. Изучить теоретический материал методического указания к настоящей работе;
2. Пройти инструктаж по технике безопасности при проведении работ в лаборатории;
3. Ознакомиться с приборами и инструментом, представленным для выполнения работы;
4. Получить у лаборанта необходимые данные для выполнения работы;
5. К выполнению работы приступить после глубокого изучения теоретического материала;
6. Произвести замеры и расчеты показателей надежности.

#### Пример расчета показателей надежности

Исходные данные:

общее число наблюдаемых объектов  $N = 10$ ;

число отказавших объектов до наработки  $t=500$  мото-ч  $m(t) = 2$ ;

число обнаруженных и устраненных отказов  $N=25$ ;

число отказавших объектов за наработку в интервале  $[1000, 2000]$  мото-ч  $m(t_0, t_1) = 5$

1. Вероятность безотказной работы за наработку определяется по формуле:

$$P(t) = 1 - \frac{2}{10} = 0,8.$$

2. Средняя наработка до отказа  $T_{cp}$  определяется по формуле:

$$\bar{T}_{cp} = \frac{1}{10} (2,1 + 1,8 + 1,7 + 1,6 + 2,2 + 2,5 + 2,3 + 1,8 + 1,9 + 2,0) = 1,99 \text{ тыс. мото-ч.}$$

<b>№ объекта</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Наработка на первый отказ $i$ -го объекта $t_{1i}$ , тыс. мото-ч	2,1	1,8	1,7	1,6	2,2	2,5	2,3	1,8	1,9	2,0
Наработка $i$ -го объекта за время наблюдений $H_i$ , тыс. мото-ч	5,3	4,5	6,3	4,8	6,1	5,6	5,1	5,2	5,4	4,9
Число отказов $i$ -го объекта за наработку $H_i$ $N_i$	1	2	3	2	4	3	3	3	2	2
Время пребывания $i$ -го объекта в работоспособном состоянии $t_{раб.i}$ , тыс. ч	5,3	4,5	6,3	4,8	6,1	5,6	5,1	5,2	5,4	4,9
Время пребывания $i$ -го объекта на ремонте $t_{р.i}$ , ч	15	20	8	19	25	13	21	25	8	28
Время пребывания $i$ -го объекта на техническом обслуживании $t_{о.i}$ , ч	20	20	25	25	20	20	25	20	25	20
Время восстановления работоспособности объекта с $i$ -ым отказом $t_{в.i}$ , ч	2	4	7	5	10	5	6	8	5	6
<b>№ отказа</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Время восстановления работоспособности объекта с $i$ -ым отказом $t_{в.i}$ , ч	5	6	8	5	10	2	4	7	5	10
<b>№ отказа</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>					
Время восстановления работоспособности объекта с $i$ -ым отказом $t_{в.i}$ , ч	12	7	8	7	6					

3. Средняя наработка на отказ  $T_o$  определяется по формуле:

$$\bar{T}_o = \frac{1}{10} (5,3/1+4,5/2+6,3/3+4,8/2+6,1/4+5,6/3+5,1/3+5,2/3+5,4/2+4,9/2)=2,4 \text{ тыс. мото-ч.}$$

4. Среднее время восстановления работоспособного состояния  $T_v$  определяется по формуле:

$$\bar{T}_v = \frac{1}{25} (2+4+7+5+10+5+6+8+5+6+5+6+8+5+10+2+4+7+5+10+12+7+8+7+6)=6,36 \text{ ч.}$$

5. Коэффициент готовности  $K_r$  определяется по формуле:

$$K_r = \frac{2400}{2400 + 6,36} = 0,997.$$

6. Вероятность безотказной работы объекта  $P(t_0, t_1)$  в интервале  $[t_0, t_1]$  определяется по формуле (7):

$$P(t_0, t_1) = 1 - \frac{5}{10} = 0,5.$$

Коэффициент оперативной готовности  $K_{ог}$  определяется по формуле:

$$K_{ог} = 0,997 \cdot 0,5 = 0,499.$$

7. Математическое ожидание суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации  $\bar{t}_{сум}$  определяется по формуле:

$$\bar{t}_{сум} = \frac{1}{10} (5,3+4,5+6,3+4,8+6,1+5,6+5,1+5,2+5,4+4,9)=5,32 \text{ тыс. ч.}$$

Математическое ожидание суммарного времени простоев из-за плановых и внеплановых ремонтов всех объектов  $\bar{t}_p$  определяется по формуле:

$$\bar{t}_p = \frac{1}{10} (15+20+8+19+25+13+21+25+8+28)=18,2 \text{ ч.}$$

Математическое ожидание суммарного времени простоев из-за плановых и внеплановых технических обслуживаний всех объектов  $\bar{t}_o$  определяется по формуле:

$$\bar{t}_o = \frac{1}{10} (20+20+25+25+20+20+25+20+25+20)=22 \text{ ч.}$$

Коэффициент технического использования  $K_{ти}$  определяется по формуле:

$$K_{ти} = \frac{5320}{5320 + 18,2 + 22} = 0,993.$$

## Варианты заданий

$N$  – общее число наблюдаемых объектов;

$m(t)$  – число отказавших объектов до наработки  $t=500$  мото-ч;

$N$  – число обнаруженных и устраненных отказов;

$m(t_0, t_1)$  – число отказавших объектов за наработку в интервале  $[1000, 2000]$  мото-ч

	Номер варианта														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$N$	9	10	11	12	13	14	15	9	10	11	12	13	14	15	9
$m(t)$	2	3	4	2	3	4	4	2	3	4	2	3	4	4	2
$N$	18	20	22	24	26	28	30	18	20	22	24	26	28	30	18
$m(t_0, t_1)$	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3	4	5	3

№ объекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Наработка на первый отказ $i$ -го объекта $t_{1i}$ , тыс. мото-ч	2,2	2,5	2,3	1,8	1,9	2,1	1,8	1,7	1,6	2,2	2,5	2,3	1,8	1,9	2,0
Наработка $i$ -го объекта за время наблюдений $H_i$ , тыс. мото-ч	4,9	5,6	5,1	5,2	6,1	5,3	4,5	6,3	4,8	4,9	5,6	5,1	5,2	5,4	4,9
Число отказов $i$ -го объекта за наработку $H_i$ $N_i$	1	2	3	2	4	3	2	3	2	2	2	4	3	3	1
Время пребывания $i$ -го объекта в работоспособном состоянии $t_{раб.i}$ , тыс. ч	4,9	5,6	5,1	5,2	6,1	5,3	4,5	6,3	4,8	4,9	5,6	5,1	5,2	5,4	4,9
Время пребывания $i$ -го объекта на ремонте $t_{р.i}$ , ч	8	28	15	20	8	13	21	25	8	28	15	20	8	19	25

№ объекта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Время пребывания $i$ -го объекта на техническом обслуживании $t_{о.i}$ , ч	20	20	25	25	20	20	25	20	25	20	25	20	20	25	20

№ отказа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время восстановления работоспособности объекта с $i$ -ым отказом $t_{в.i}$ , ч	8	10	9	11	15	20	6	2	1	14
№ отказа	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Время восстан. работоспособности объекта с $i$ -ым отказом $t_{в.i}$ , ч	11	15	20	6	8	10	9	11	15	9
№ отказа	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Время восстан. работоспособности объекта с $i$ -ым отказом $t_{в.i}$ , ч	20	6	2	1	14	20	6	8	10	9



## **4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ВЫЯВЛЕНИЕ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В ДЕТАЛЯХ МАШИН»**

### **Цель лабораторной работы**

Получить практические навыки по определению скрытых дефектов, обнаруживаемых с помощью специальных методов контроля.

**Студент должен знать:** способы неразрушающего контроля деталей и их применение; применяемое при этом оборудование и материалы; технологию выполнения операции обнаружения скрытых дефектов и определение их размеров.

**Студент должен уметь:** определить предполагаемый характер дефекта и назначить для его выполнения необходимый способ контроля; выполнять операции подготовки оборудования и объектов контроля; выявить повреждение и дать по ним заключение.

### **Указания по выполнению работы**

Перед выполнением лабораторной работы студенты должны:

- 1) изучить теоретический материал методического указания к настоящей работе;
- 2) пройти инструктаж по технике безопасности при проведении работ в лаборатории;
- 3) ознакомиться с приборами и инструментом, представленным для выполнения работы;
- 4) получить у лаборанта необходимые данные для выполнения работы;
- 5) к выполнению работы приступить после глубокого изучения теоретического материала.

### **Порядок выполнения работы**

1. В соответствии с техническими условиями на дефектацию деталей внимательно осмотреть рабочие поверхности визуально-оптическим методом и дать заключение о качестве поверхности.
2. Разделить детали на две группы с целью проверки поверхности двумя методами обнаружения скрытых дефектов: магнито-порошковый и люминисцентный.
3. Подготовить установки контроля (магнито-порошковую и люминисцентную) к работе.
4. Произвести подготовку деталей к дефектации.
- 4.3. люминисцентным методом.
6. Результаты контроля занести в отчет .
7. Оформить отчет.

## 5 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО МОДУЛЮ 2

Укажите номер правильного ответа:

**1. Дефектами называют:**

1. Нарушение исправности объекта.
2. Повреждение объекта при сохранении работоспособности.
3. Каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям.
4. Нарушение работоспособности объекта при его эксплуатации.

**2. Дефекты классифицируются:**

1. Значительное, незначительное.
2. Явные, скрытые, устранимые и неустраняемые.
3. Изготовительные, эксплуатационные, ремонтные.
4. Конструкторско-технологические и эксплуатационные.

**3. Видами дефектов являются:**

1. Значительные, малозначительные, критические.
2. Скрытые устранимые и неустраняемые.
3. Изнашивание, разрушение, коррозия.
4. Износ, старение, излом.

**4. К производственно-технологическим дефектам относятся:**

1. Металлургические, дефекты при изготовлении и сварке.
2. Дефекты, полученные при изготовлении и конструировании.
3. Дефекты, полученные при изготовлении и в процессе эксплуатации.

**5. К эксплуатационным дефектам относятся:**

1. Трещины от действия нагрузок, коррозионные повреждения, радиационные повреждения.
2. Задиры, поломка, разрушения.
3. Коррозионно-усталостные трещины.

**6. К металлургическим дефектам относятся:**

1. Дефекты, связанные с особенностью процессов выплавки и разлива металла.
2. Горячие и холодные трещины, шлаковые включения, отслаивания.
3. Непровары, подрезы, отслаивания.

**7. К дефектам сварки относятся:**

1. Трещины, несплошность, отслаивания.
2. Горячие и холодные трещины, непровары, шлаковые включения, прожоги, наплывы.
3. Пористость, твердые и флюсовые включения, выход флюса на поверхность.
4. Крупнозернистость, отслаивание, несваренные кратеры.

**8. Дефектами металлопокрытий являются:**

1. Трещины, наплывы, крупнозернистость.
2. Поры, несплошность, пузыри, трещины.
3. Непровары, прожоги, наплывы.

**9. К дефектам, приобретенным в результате радиационного воздействия, относятся:**

1. Физические и химические неоднородности структуры, повышение предела текучести, прочности.
2. Понижение предела прочности, текучести, твердости.
3. Насыщение металла ионизирующим (рентгеновским, протонным, нейтронным и др.)

**10. Основными факторами, вызывающими эксплуатационные дефекты, являются:**

1. Воздействие эксплуатационных нагрузок, окружающей средой, условий эксплуатации и технического обслуживания.
2. Металлургические дефекты, дефекты сварки и пр.
3. Человеческий фактор, производственные упущения.

**Укажите номера всех правильных ответов:**

**1. Отказом технической системы является:**

1. Нарушение правил эксплуатации.
2. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности.
3. Событие, заключающееся в поломке изделия.
4. Событие, заключающееся в выходе из строя основных элементов объекта.

**2. Повреждением объекта принято называть:**

1. Процесс накопления дефектов в материале.
2. Событие, приведшее к потере работоспособности.
3. Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния.
4. Дефект, приобретенный в процессе эксплуатации.

**3. Процессы, приводящие к отказам технической системы:**

1. Изнашивание, разрушение, старение.
2. Окисление поверхностного слоя, трещины, излом.
3. Химические и физические взаимодействия, деформирование, усталость.
4. Моральное и физическое старение.

**4. Отказом объекта называется:**

1. Нарушение исправного состояния.
2. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности.
3. Событие, заключающееся в поломке изделия.
4. Приобретение дефекта.

**5. Классификация отказов технических осуществляется:**

1. По месту возникновения и их характеру
2. По природе происхождения, времени возникновения, характеру возникновения, по взаимосвязи.
3. По характеру эксплуатации и условиям техногенных сред.
4. По физико-механическим характеристикам объекта.
5. По степени и причине возникновения, по последствиям и затрата и по группам сложности.

**6. По времени возникновения отказы классифицируются:**

1. Мгновенные, длительные, эксплуатационные.
2. Постепенные, самоустраняющиеся, сбои.
3. Приработочные, при нормальной эксплуатации, отказы в режиме аварийного изнашивания.
4. При повреждении, при эксплуатации, при эксплуатации в аварийном изнашивании, при сбое.
5. Временные, устранимые и неустраняемые.

**7. По природе происхождения отказы классифицируются:**

1. Природные и независимые.
2. Устранимые, неустраняемые.
3. Сознательные и неосознательные ( в зависимости от действия человека).
4. Естественные и искусственные.
5. Постепенные и внезапные.

**8. Отказы по взаимосвязи классифицируются:**

1. Зависимые и независимые.
2. Самостоятельные и зависимые.
3. Зависимые, самостоятельные.
4. Зависимые от внешней среды и человека.
5. При существующей взаимосвязи деталей и при отсутствии ее.

**9. По степени воздействия отказы классифицируются:**

1. Независимые, самоустраняющиеся и сбои.
2. эксплуатационные и ресурсные.
3. Исследовательские, конструкторские и рабочие.
4. Внезапные, естественные и искусственные.
5. Постепенные и внезапные.
6. Рабочие и ресурсные.

**10. Показатель надежности представляет собой:**

1. Коэффициент, характеризующий надежность.
2. Количественную характеристику одного или нескольких свойств надежности.
3. Величину параметра надежности.

**Дополните:**

1. Отказы по причине возникновения подразделяют на исследовательские, (.....).
2. Отказы по последствиям и затратам подразделяют на тягчайшие, тяжелые (.....).
3. Отказы по группам сложности классифицируются на (.....) группы сложности.
4. Показатели надежности подразделяются на группы: расчетные, экспериментальные, экстраполированные, групповые, индивидуальные (.....).

5. К показателям безотказности относятся вероятность безотказной работы, параметр потока отказов, интенсивность отказов (.....).
6. К показателям долговечности относятся: срок службы, (.....).
7. К показателям ремонтпригодности следует отнести (.....) и вероятность восстановления работоспособного состояния.
8. К показателям сохраняемости относятся: средний срок сохраняемости, (.....).
9. К комплексным показателям надежности относятся коэффициенты: (...).
10. К дополнительным показателям надежности относятся показатели эксплуатационной и ремонтной технологичности, (.....).

### Установите соответствие:

#### 1. Нарушение работоспособности.

- |  |                 |
|--|-----------------|
| 1) Событие, заключающееся в нарушении работоспособности, называется .... | а) повреждением |
| 2) Событие, заключающееся в нарушении исправного состояния, называется   | б) отказом      |
|  | в) износом      |
|  | г) разрушением  |
- 1 – .....; 2 – .....

#### 2. Обнаружение дефектов.

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| 1) Поверхностные дефекты до 0,01 мм определяются методом.....      | а) капиллярным          |
| 2) Сквозные трещины в блоках цилиндров определяются.....           | б) визуально-оптическим |
| 3) Дефекты на любых материалах размером до 0,001мм определяют..... | в) люминисцентным       |
| 4) Дефекты на немагнитных материалах определяются .....            | г) давления             |
|  | д) ультразвуковым       |
|  | е) нагрева детали       |
- 1 – .....; 2 – .....; 3 – .....; 4 – .....

#### 3. Диагностирование деталей

- |   |                      |
|---|----------------------|
| 1) Пучок ультразвука проходит через деталь и поглощается приемником при ..... | а) эхо-методе        |
| 2) Ультразвуковые импульсы отражаются от препятствия при .....                | б) импульсном методе |
|   | в) теновом методе    |
- 1 – .....; 2 – .....

#### 4. Показатели надежности.

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| 1) Единичный показатель надежности характеризует .....   | а) несколько свойств    |
| 2) Комплексный показатель надежности характеризует ..... | б) одно свойство        |
|  | в) характерные свойства |
- 1 – .....; 2 – .....

## 5. Единичные показатели надежности

- |  |  |
|--|--|
| 1) Средняя наработка на отказ характеризует .....                            | а) Ремонтпригодность                       |
| 2) Срок службы машины характеризует .....                                    | б) Сохраняемость                           |
| 3) Вероятность восстановления работоспособного состояния характеризует ..... | в) Долговечность                           |
| 4) Средний срок сохраняемости характеризует .....                            | г) Надежность                              |
|  | д) Безотказность                           |
|  | 1 – .....; 2 – .....; 3 – .....; 4 – ..... |

## 6. Комплексные показатели

- |  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1) Готовность объекта к функционированию характеризует коэффициент .....                                     | а) сохранение эффективности |
| 2) Долю времени нахождения объекта в рабочем состоянии с учетом ТО и ремонте характеризует коэффициент ..... | б) готовности               |
|  | в) оперативной готовности   |
|  | г) тех. использования       |
| 1 – .....; 2 – .....   |                             |

## МОДУЛЬ 3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 1 ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 1.1 Методы повышения надежности

Методы и возможности по повышению надежности по повышению надежности машин весьма разнообразны и связаны со всеми этапами конструирования, изготовления и эксплуатации машин. В соответствии с этим они подразделяются на конструкторские, технологические(производственные), эксплуатационные и методы повышения надежности техники при ремонте.

Конструкторская надежность – это надежность, которая закладывается в проекте, в конструкции машин, до ее производства и эксплуатации.

Производственная – реализует конструктивную надежность при изготовлении машин и обуславливается качеством заготовок и материалов, соблюдением технологии, квалификацией рабочих, организацией труда, контролем качества продукции.

Эксплуатационной надежностью называют надежность функционирования машины. Она зависит в основном от условий эксплуатации и квалификации обслуживающего персонала, а также от уровня проектной и производственной надежности.

*К конструкторским (проектным) методам повышения надежности машин относятся:*

1. Упрощение конструктивной схемы машины, уменьшение числа составляющих ее элементов.
2. Замена элементов, лимитирующих надежность машины, более надежными.
3. Выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний их в сопряжениях.
4. Защита элементов машины от разрушающих действий окружающей среды.
5. Резервирование в машине.
6. Установка различных автоматических устройств, сигнализирующих об изменении технического состояния в машине.
7. Обеспечение благоприятных условий работы и смазки деталей.
8. Выбор материалов, обладающих достаточной износостойкостью.

*Технологические (производственные) методы повышения надежности с.-х. машин:*

1. Обеспечение необходимой точности и качества изготовления деталей.
2. Упрочнение деталей и их рабочих поверхностей термической и химико-термической обработками.
3. Обеспечение необходимого качества сборки.

### *Эксплуатационные методы:*

1. Обкатка новых (отремонтированных) машин в хозяйствах.
2. Организация технического обслуживания и наличие для его проведения необходимой базы.
3. Обеспечение нормального режима работы машин и установленных правил их хранения.
4. Эксплуатационное резервирование.
5. Соблюдение рекомендаций заводов изготовителей по применению горюче-смазочных материалов.

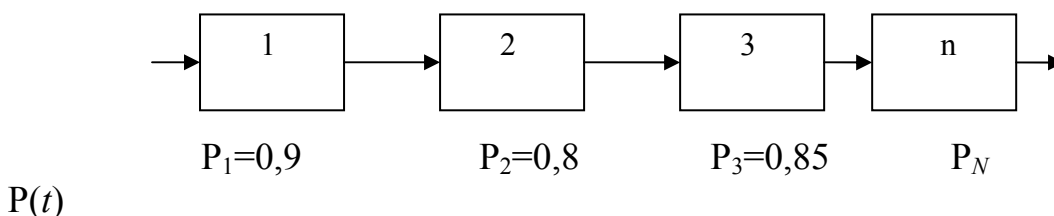
### *Методы повышения надежности машин при ремонте:*

1. Проведение предремонтного диагностирования в мастерских хозяйствах.
2. Обеспечение сохраняемости ремонтного фонда, поступающего на предприятия.
3. Выполнение разборочных работ без повреждения деталей и разукomплектовки соответствующих пар.
4. Выполнение качественной очистки машин, агрегатов и деталей от различных загрязнений.
5. Введение на предприятиях входного контроля запасных частей.
6. Качественная сборка узлов и агрегатов, внедрение стендовой обкатки.
7. Повышение качества окраски ремонтируемых машин.

## **1.2 Резервирование как метод повышения надежности машин**

Для расчета надежности системы при возможности расчленения ее на отдельные элементы, используют структурные схемы. В этих схемах конструкцию машины представляют в виде отдельных ее элементов, каждый из которых характеризуется своим значением вероятности безотказной работы. В зависимости от схемы соединения отдельных элементов определяют надежность всей системы.

Наиболее характерным для конструкции сельскохозяйственных машин и других механических систем является случай, когда отказ одного элемента системы выводит из строя всю систему, то есть имеет место последовательное соединение элементов.





Например: Большинство приводов машин и механизмы передач построены по этому принципу. Так при выходе из строя любой шестерни, подшипника, муфты, рычага управления, системы смазки весь привод перестанет функционировать.

Так как вероятность безотказной работы каждого элемента – величина меньшая единицы – то вероятность безотказной работы системы при таком способе соединения будет существенно ниже чем вероятность безотказной работы каждого элемента. Покажем это. По теореме умножения вероятностей, которую мы с Вами рассматривали, вероятность безотказной работы системы будет равна произведению вероятностей отдельных элементов

$$P_c(t) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \dots P_n = \prod_{i=1}^n P_i$$

При одинаковой надежности элементов формула примет вид

$$P_c(t) = P_i^n$$

Для системы из трех элементов

$$P_c(t) = 0,9 \cdot 0,8 \cdot 0,85 = 0,612$$

**Сложные системы, даже состоящие из элементов высокой надежности, могут обладать низкой надежностью за счет большего числа элементов.**

*Например:* Узел состоит из 50 деталей, вероятностью их безотказной работы  $P=0,99$ , то вероятность безотказной работы узла будет равна

$$P_c(t) = (0,99)^{50} \approx 0,55 \text{ при } N=400 \quad P_c(t) = (0,99)^{400} = 0,018$$

т.е. практически узел неработоспособен.

Именно с таким фактом столкнулись создатели первых ЭВМ, когда число элементов превышало миллионы штук, а необходимо было создать работоспособную систему.

Наиболее действенным методом повышения надежности в этом случае будет так называемое резервирование.

**Резервирование** – применение дополнительных средств и возможностей с целью сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного, или нескольких его элементов.

**Резерв** – совокупность дополнительных средств и возможностей, используемых для резервирования.

Резервирование является мощным средством повышения надежности, так как при резервировании надежность машины (агрегата, узла) может быть выше надежности любого входящего в нее элемента.

В этом состоит принципиальное отличие этого метода повышения надежности от всех остальных, ранее нами рассмотренных.

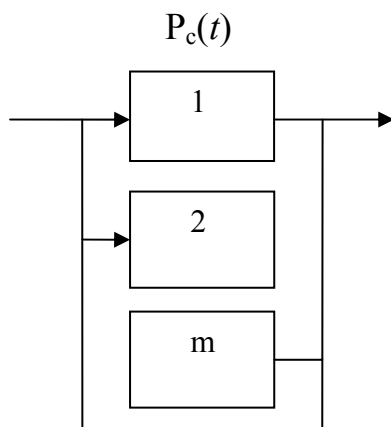
Рассмотрим теперь основные виды резервирования. Представим схематически систему, в которой предусмотрены резервные элементы, которые работают одновременно с основными.

При такой схеме (отказ) основного элемента не нарушает работу всей системы, так как резервные элементы продолжают функционировать.

Очевидно, что вероятность отказа системы снижается, так как она наступает при отказе  $m$  элементов.

Поэтому вероятность отказа системы, то есть вероятность отказа всех элементов (по теореме умножения) будет равна:

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^m Q_i$$



а вероятность безотказной работы системы равна

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^m Q_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i)$$

если элементы системы равно надежны:

$$P_c(t) = 1 - (1 - P_i)^m$$

где:  $m$  – число элементов системы, включая и основной.

из этих формул следует, что если  $P_i < 1$  (что всегда бывает на практике), то при  $m > 1$ ,  $P_c(t) > P_i$ , то есть надежность системы выше, чем надежность отдельных элементов.

Такое соединение элементов носит название *постоянного резервирования*, когда резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основными.

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов объекта называют кратностью резервирования

Резервирование, кратность которого равна единице, называют дублированием.

Пример: Рассмотрим эффективность постоянного резервирования на примере заднего моста грузового автомобиля. Его структурная схема будет иметь вид:

Вероятность безотказной работы каждого колеса

$$P_{1л} = P_{2л} = P_{1п} = P_{2п} = 0,9$$

Крайность резервирования = 1

т.е. дублирование  $m = 2$

В случае резервирования

$$P_c(t) = [1 - (1 - P_{лл})^2] = [1 - (1 - 0,9)^2] \cdot [1 - (1 - 0,9)^2] = 0,99^2 = 0,98$$

без резервирования

$$P_c(t) = P_{II} \cdot P_A = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81$$

Примерами постоянного резервирования могут быть конструкции многокатковых ходовых систем гусеничных машин, скребковые транспортеры, грабельные рабочие органы сельскохозяйственных машин, отдельный привод гидравлической системы тормозов легковых автомобилей и др.

Постоянное резервирование предполагает одновременную работу основных и резервных элементов, поэтому их ресурс исчерпывается одновременно при эксплуатации изделия. Это является его недостатком.

Наряду с постоянным резервированием очень часто в сельскохозяйственной технике применяется *резервирование замещением*.

Это резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента.

При таком резервировании ресурс резервного элемента не расходуется и следует ожидать, что вероятность безотказной работы системы будет выше, чем при постоянном резервировании. Но это будет в том случае, если время на установку резервного элемента будет весьма незначительно по сравнению со временем работы элемента до отказа или в случае наличия специального устройства для включения резерва (что часто применяется в радиоэлектронных системах).

Если время на установку резервного элемента достаточно большое, то эффективность этого способа резервирования снижается.

К резервированию замещением можно отнести не только установку и наличие резервных элементов (ручного тормоза запасных колес, лап культиваторов, теребивильных лап и других быстроизнашивающихся элементов с/х машин), но и все виды регулировок, с помощью которых восстанавливается первоначальный зазор сопряжения, а следовательно и работоспособность узла или агрегата.

Примером резервирования замещением может также служить перестановка венца маховика, звездочек, зубчатых колес и др., когда используются поверхности деталей, ранее не контактировавшие при резервировании износостойкости.

Кроме разновидностей резервирования по методу включения в работу (постоянное, замещением) на практике применяют *общее резервирование* и *отдельное резервирование*.

Общее резервирование – это резервирование объекта в целом.

Отдельное резервирование – резервирование отдельных элементов объекта или их группы.

Физическая модель общего резервирования такова, что при отказе элемента основной системы (машины) она заменяется полностью резервной системой (машиной). Если  $P_i$  – вероятность безотказной работы одного элемента, а  $P_y$  – вероятность безотказной работы системы с общим резервированием равна

$$P_o(t) = 1 - \prod_{y=1}^m (1 - P_y) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \prod_{i=1}^n P_i)$$

где  $N$  – число элементов в системе

$m$  – число систем, включая и основную.

Если все элементы системы равнонадежны, то формула имеет вид:

$$P_o(t) = 1 - (1 - P_i^n)^m$$

*Физическая модель раздельного резервирования* такова, что вместо того, чтобы держать в резерве  $(m-1)$  машин (систем) на случай отказа основной машины (системы), в резерве держат  $(m-1)N$  элементов и при отказе элемента основной машины его заменяют резервным.

В этом случае вероятность безотказной работы системы определяют по формуле:

$$P_p(t) = \prod_{j=1}^n [1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_j)],$$

а если все элементы разнонадежны

$$P_p(t) = [1 - (1 - P_i)^m]^n.$$

Для того чтобы определить эффективность этих систем рассмотрим пример:

Имеется система, состоящая из  $N=4$  элементов и имеющая  $m=3$  резервных систем. Вероятность безотказной работы элементов одинакова и равна  $P_i = 0,9$

Определить какое резервирование следует применять

$$P_o(t) = 1 - (1 - (1 - P_i^n)^m) = 1 - (1 - 0,9^4)^3 = 0,958,$$

$$P_p(t) = [1 - (1 - P_i)^m]^n = [1 - (1 - 0,9)^3]^4 = 0,996,$$

а эта же система без резервирования

$$P_p(t) = 0,94^4 = 0,656.$$

Следует отметить, что раздельное резервирование несмотря на высокий уровень безотказности приводит к усложнению всей системы, что снижает эффект от его применения.

На практике часто применяют *смешанное резервирование*, сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте.

Наибольшее распространение этот метод повышения надежности получил в радиоэлектронных системах, космических объектах и др. т.е. в системах, связанных с жизнью и безопасностью людей.

Для механических систем метод резервирования в чистом виде применяется сравнительно редко, так как для механических систем характерны взаимосвязанные структуры, где надежность отдельных элементов нельзя считать независимым событием.

Примерами чистого резервирования, кроме названного ранее, могут быть резервирование привода в системе управления крылом самолета, наличие в гидросистемах у золотниковых систем управления двойных и даже тройных золотников (буйеров) в технологических автоматизированных линиях применяется установка дублирующих агрегатов и оборудования или создаются параллельные технологические потоки (одновременное решение задач производительности и надежности).

Однако для механических систем и изделий с.-х. техники более характерно применение принципа избыточности в виде резервирования по выходному параметру (своеобразного вида постоянного резервирования).

То есть идут по пути создания запасов прочности, мощности, износостойкости, жесткости, виброустойчивости, теплостойкости и т.п., что приводит к повышению запасов надежности изделия, так как предельное состояние по выходному параметру удаляется от рабочей области значений.

При создании надежных механических систем принцип избыточности проявляется в том, что ресурс изделия устанавливается намного ниже среднего значения наработки отказа. Недоиспользование потенциальной долговечности изделия дает гарантию его безотказной работы (авиация).

Техника, поступающая в сельскохозяйственное производство, обладает определенным уровнем надежности, заложенным при ее конструировании и изготовлении. Этот первоначальный уровень надежности эквивалентен определенному объему работ (наработке), выполняемой машиной в процессе эксплуатации. Длительность периода эксплуатации до предельного состояния (доремонтный ресурс), а следовательно, и величина полезной работы (суммарная доремонтная наработка) зависит от скорости снижения ее уровня надежности.

В идеальном случае скорость снижения уровня надежности должна быть минимальной, а наработка машины за доремонтный ресурс максимальной.

Чтобы в реальных условиях эксплуатации результаты были близки к этому идеальному случаю, необходимо выполнение определенных требований, составляющих систему эксплуатационных мероприятий по поддержанию надежности с/х техники.

### 1.3 Прогнозирование надежности

**Среднестатистическое прогнозирование** основано на статистической обработке и анализе результатов, полученных в процессе разработки, производства и эксплуатации машин, и последующем установлении единых допустимых значений параметров состояния и единой периодичности обслуживания для одноименных элементов однотипных машин. При этом исходят из необходимости обеспечения допускаемого уровня безотказной работы, минимума суммарных удельных издержек на техническое обслуживание и устранение отказов, безопасности, качества работ и др. Оно применяется для прогнозирования технического состояния большинства элементов машин и *заключается в сопоставлении замеренных при диагностировании параметров состояния элементов с допустимыми значениями*. Если при этом в момент контроля значение параметра меньше допустимого или равно ему, то элемент не требует никакого воздействия до очередного контроля. Если же оно больше допустимого или равно предельному значению, то элемент подлежит профилактике или ремонту.

Применение среднестатистического прогнозирования в значительной мере упрощает планирование и организацию технического обслуживания и ремонта машин. Однако, в связи с рассеиванием сроков безотказной работы элементов, применение такого вида прогнозирования может, с одной стороны, вызвать их отказы, а с другой – создать возможность значительного недоиспользования ресурса.

**Прогнозирование по реализации** основано на выявлении скоростей (динамики) изменения значений параметров состояния элементов машины путем непосредственных измерений этих значений во время диагностирования и последующей обработки результатов с учетом характера изменения контролируемых параметров, установленного ранее путем анализа динамики изменения состояния од-

ноименных элементов машин. Цель такого прогнозирования – определение остаточного ресурса конкретной машины. Этот вид прогнозирования позволяет более полно использовать ресурсы элементов машин, а также повысить их надежность.

В целях прогнозирования остаточного ресурса машин по реализации изменения параметров закономерность изменения их аппроксимируют\* функцией, достаточно точно описывающей процесс этого изменения. Наиболее распространенной является степенная функция вида

\* (аппроксимация – замена одних математических объектов: чисел, функций – другими, простыми, близкими к исходным. Например, ломаных линий близкими к ним кривыми).

$$U(t) = Vt^\alpha + Z(t) + \Delta\Pi, \quad (3.1.)$$

где  $U(t)$  – текущее изменение параметра технического состояния;

$V$  – коэффициент, характеризующий интенсивность (скорость) изменения параметра;

$t$  – наработка;

$\alpha$  – показатель степени, характеризующий динамику изменения параметра (кривизну кривой);

$Z(t)$  – функция случайного отклонения параметра от гладкой теоретической кривой;

$\Delta\Pi$  – показатель, характеризующий изменение параметра во время приработки.

Общий вид этой кривой представлен на рис.3.1, из которого видно, что реальное изменение параметра технического состояния происходит не по гладкой, а по ломаной кривой. Такой характер обусловлен влиянием на процесс изменения параметра технического состояния двух групп факторов: **внутренних** (заводских) и **внешних** (эксплуатационных). Под влиянием внутренних факторов параметр изменяется по плавной кривой, а под влиянием воздействия внешних факторов кривая получает изломы.

С целью упрощения прогнозирования остаточного ресурса машин полагают, что изменение параметра происходит по плавным кривым, т. е. считают, что  $Z(t) = 0$ , и аппроксимирующая функция имеет вид

$$U(t) = Vt^\alpha + \Delta\Pi, \quad (3.2)$$

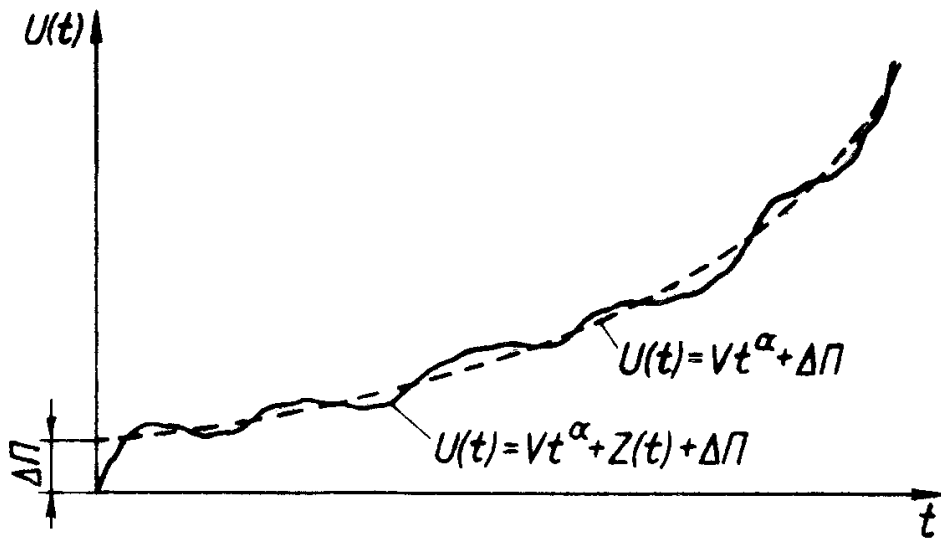


Рисунок 3.1 – Реальная и аппроксимирующая кривая изменения параметра

а влияние составляющей  $Z(t)$  на результат прогноза учитывают, задаваясь определенной доверительной вероятностью прогнозирования.

Для прогнозирования полного ресурса полагают, что изменение параметра достигло своего предельного значения, т. е.  $U(t) = U_{np}$ . Тогда формулу можно переписать в следующем виде

$$U_{np} = VT^\alpha + \Delta\Pi,$$

где  $T$  – полный ресурс элемента.

Откуда находим

$$T = \sqrt[\alpha]{\frac{U_{np} - \Delta\Pi}{V}}. \quad (3.3)$$

В случае линейного изменения параметра ( $\alpha = 1$ ) и без учета параметра приработки ( $\Delta\Pi = 0$ ) получим формулу

$$T = \frac{U_{\text{предельное}}}{V}, \quad (3.4)$$

которую мы использовали при расчете ресурса соединения деталей на лабораторно-практических занятиях.

#### 1.4 Прогнозирование остаточного ресурса технических систем

Прогнозирование остаточного ресурса возможно наиболее объективно осуществлять с применением методов и средств диагностики, которые позволяют определить диагностические параметры и на их основе рассчитать остаточный ресурс, учитывая конкретные условия работы агрегата или машины. Но даже в этом случае, прогнозируя остаточный ресурс, предполагают, что скорость износа или закономерность изменения диагностируемого сопряжения в рассматриваемом периоде остаются постоянными.

Наибольшее распространение при прогнозировании ресурса получили два способа.

Один из них, разработанный В.М. Михлиным (ГОСНИТИ), носит название функционального статического способа определения остаточного ресурса по среднестатистическим закономерностям изменения параметров во времени (ГОСТ 21571-76).

Среднестатистический остаточный ресурс сопряжения или сборочной единицы по формуле:

$$T_{ост} = t_n \left( \sqrt[\alpha]{\frac{P_{пр} - P_{нач}}{P_{изм} - P_{нач}}} - 1 \right), \quad (3.5)$$

где  $t_n$  – наработка сопряжения с начала эксплуатации (или после ремонта) до диагностирования;

$\alpha$  – показатель степени (значения  $\alpha$  приведены в табл. 4.1);

$P_{пр}$  – предельное значение параметра;

$P_{нач}$  – начальное значение параметра;

$P_{изм}$  – значение параметра, измеренное при диагностировании.

Если наработка с начала эксплуатации новой или капитальной отремонтированной машины неизвестна, остаточный ресурс сопряжений определяют по наработке между двумя диагностированиями по формуле:

$$T_{ост} = R \cdot t'_{ост}, \quad (3.6)$$

где  $t'_{ост}$  – условный остаточный ресурс, определяемый по формуле:

$$t'_{ост} = t_0 \left( \sqrt[\alpha]{\frac{P_{пр} - P_{нач}}{P_{изм} - P_{нач}}} - 1 \right), \quad (3.7)$$

где  $R$  – коэффициент пропорциональности, определяемый из выражения

$$R = \frac{1}{\sqrt{\frac{P_{изм} - P_{нач}}{P_{изм}^{-1} - P_{нач}}}} + 1, \quad (3.8)$$

где  $t_0$  – наработка между двумя диагностированиями;

$P_{изм}, P_{нач}$  – параметры, измеренные при предыдущем и последующем диагностированиях.

Второй способ, разработанный В.И. Кирсой, В.И. Мехлом и А.А. Болкопным (Украинский филиал ГОСНИТИ), называется определение остаточного ресурса сопряжения машин по коэффициенту технического ресурса.

Сущность способа состоит в том, что по трем значениям параметра (начальное и два замеренных при диагностировании) и известной наработке с начала эксплуатации до каждой проверки устанавливают закономерность изменения параметра во времени и экстраполируют ее до предельного параметра.



Таблица 3.1 – Значение показателя  $\alpha$  для различных параметров технического состояния составных частей тракторов и сельскохозяйственных машин

Параметры технического состояния	$\alpha$
Угар картерного масла	2,0
Мощность двигателя	0,8
Расход газов, прорывающихся в картер: до замены колец	1,3
после замены колец	1,5
Зазоры в кривошипно-шатунном механизме	1,4
Зазоры между клапаном и коромыслом механизма газораспределения	1,1
Износ опорных поверхностей тарелки клапана газораспределения и посадочного гнезда (утопание клапана)	1,6
Износ кулачков распределительного вала по высоте	1,1
Износ гусеничных и втулочно-роликовых цепей (увеличение шага)	1,0
Износ плунжерных пар	1,1
Радиальный зазор в подшипниках качения	1,5
Износ посадочных гнезд корпусных деталей	1,0
Износ зубьев шестерен по толщине	1,5
Износ шлицевых валов	1,1
Износ валиков, пальцев и осей	1,4
Износ накладок тормозов и дисков муфт сцепления	1,0

Закономерности изменения параметров во времени выражаются через коэффициент технического ресурса:

$$R = 1 - mt^\alpha, \quad (3.9)$$

где  $t$  – наработка от начала эксплуатации нового сопряжения;

$m$  – коэффициент пропорциональности;

$\alpha$  – показатель степени функции.

Коэффициент технического ресурса в свою очередь определяются :

$$R = \frac{P_{np} - P_{изм}}{P_{np} - P_{нач}}, \quad (3.10)$$

где  $P_{np}$  – предельное значение параметра;

$P_{изм}$  – значение параметра, измеренное при диагностировании;

$P_{нач}$  – начальное значение параметра.

Показатель  $\alpha$  и  $m$  определяют на основании результатов двух диагностировании по формулам:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{1 - R_2}{1 - R_1}}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (3.11)$$

$$m = \frac{1 - R_1}{t_1^\alpha},$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – коэффициент технического ресурса, определенные по значениям параметров, измеренных при диагностировании;

$t_1$  и  $t_2$  – наработка от начала эксплуатации нового сопряжения до первого и второго диагностирования.

Остаточный ресурс сопряжения находят по следующему выражению:

$$T_{ост} = \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{\alpha}} - t_2, \quad (3.12)$$

Так как 85% всех деталей и сопряжений сельскохозяйственной техники теряют свою работоспособность, а следовательно и ресурс из-за износа, то на практике наибольший интерес представляет характер изменения этого параметра. Причем для большинства сопряжений затруднительно, а иногда невозможно, установить износ деталей или сопряжений методами безразборной диагностики. Поэтому в условиях рядовой эксплуатации наиболее часто используют для определения величины износа деталей и сопряжений микрометраж. Считая в этом случае изменение износа в зависимости от наработки линейным, зная начальное (номинальное) значение параметра и значение параметра, определяемое на основе микрометража (диагностирования) в момент прогнозирования, расчет остаточного ресурса выполняют по формуле:

$$T_{ост} = t_{изм} \left( \frac{P_{пр} - P_{нач}}{P_{изм} - P_{нач}} - 1 \right), \quad (3.13)$$

где  $t_{изм}$  – наработка сопряжения с начала эксплуатации до момента измерения;

$P_{нач}$ ,  $P_{пр}$  – начальное (номинальное) и предельное значение параметра;

$P_{изм}$  – значение параметра к моменту измерения в целях прогнозирования.

Эту зависимость чаще всего используют в тех случаях, когда имеются данные, полученные путем обмера деталей (например при анализе ресурса деталей, поступающих в ремонт). При этом значение  $P_{пр}$  берется из технических условий, а  $P_{нач}$  – номинальные размеры по чертежу. Величина износа деталей в период приработки не превышает величину допуска на ее изготовление. Поэтому за начальный размер детали и начальный зазор в сопряжении принимают для деталей типа “вал” – нижний предельный размер, а для деталей типа “отверстие” – верхний предельный размер. Для сопряжения – наибольший зазор (наименьший натяг) по чертежу.

Оценку остаточного ресурса одним числом называют точечной оценкой. Более точной и объективной оценкой является интервальная, заключающаяся в определении интервала, в пределах которого с заданной вероятностью будет находиться оцениваемый параметр (остаточный ресурс). При интервальной оценке ресурса деталей и соединений исходя из того, что рассеивание ресурсов одноименных деталей и соединений тракторов и сельскохозяйственных машин в большинстве случаев подчинено закону Вейбулла с коэффициентом вариации  $V=0,33-0,40$ , величиной смещения начала рассеивания  $T_{см}=0,3$  и доверительной вероятностью  $\alpha=0,8-0,9$ .

Для практических расчетов доверительные границы рассеивания остаточного ресурса при  $\alpha=0,8$  определяются по следующим зависимостям:

$$T_{com}^B \approx 1,35T_{ост} \quad (3.14)$$

$$T_{com}^H \approx 0,75T_{ост} \quad (3.15)$$

## 1.5 Технический контроль качества продукции

Технический контроль – один из важнейших элементов системы управления качеством продукции. Его главная цель – предупредить производство и предотвратить выпуск продукции, не соответствующей требованиям нормативно-технической документации.

Эффективность и качество проведения контроля во многом зависят от организации проведения контрольных работ.

Виды контроля. Применяемый на ремонтных предприятиях контроль за качеством ремонта можно классифицировать по следующим видам:

стадиям технологического процесса – входной, операционный, приемочный и инспекционный;

степени охвата – сплошной и выборочный; времени проведения – летучий, непрерывный и периодический.

Входной контроль – это контроль продукции поставщика, поступившей к потребителю или заказчику и предназначенной для использования при ремонте или эксплуатации продукции. Такому контролю подвергают запасные части, материалы и комплектующие изделия.

Операционный контроль – это контроль продукции во время выполнения или после завершения технологической операции.

Приемочный контроль – это контроль продукции, по результатам которого принимаются решения о ее пригодности к использованию.

Инспекционный контроль – это контроль, проводимый специально уполномоченными лицами с целью проверки эффективности ранее выполненного контроля.

Сплошной контроль – контроль каждой единицы продукции в партии.

Выборочный контроль – контроль, при котором качество партии изделий оценивают по результатам проверки одной или нескольких выборок.

Летучий контроль – контроль, проводимый в случайное время.

Непрерывный контроль – контроль, при котором информация о контролируемых параметрах поступает непрерывно.

Периодический контроль – контроль, при котором информация о контролируемых параметрах поступает через установленные интервалы времени.

Состав службы технического контроля. Качество выпускаемой продукции на ремонтных предприятиях контролируется работниками службы технического контроля. В ее функции входят: эффективный контроль качества и приема продукции на всех стадиях производства; проведение испытаний продукции на соответствие нормативно-технической документации; контроль соблюдения технологической дисциплины и состояния средств технологического оснащения производственного процесса на всех стадиях производства; оценка качества труда исполнителей и подразделений на основе результатов проведения технического контроля; сбор и анализ информации о качестве продукции в сфере эксплуатации; принятие мер по рекламациям; своевременное обнаружение брака; предотвращение дальнейшей обработки бракованных изделий; установление причин появле-

ния брака и принятие мер по их устранению.

Анализ результатов проверок качества ремонта, проводимых ГосНИТИ, показывает, что недостаточный уровень в работе службы технического контроля – одна из основных причин того, что выпускаемые из ремонта машины имеют значительное число дефектов.

От количественного и качественного состава службы технического контроля и организации контрольных постов в значительной степени зависит ее эффективность.

Трудоемкость контрольных операций, выполняемых службами технического контроля, нормируют, как и все остальные технологические операции, и включают в трудоемкость ремонта изделий. Возложение на работников службы технического контроля обязанностей по выполнению других технологических операций не допускается.

Перевод отдельных лиц на самоконтроль, внедрение системы бездефектного изготовления продукции и проведение других мероприятий по повышению качества ремонта не снижают ответственность служб технического контроля за оценку соответствия продукции установленным требованиям и не освобождают их от выполнения функции контролирующего органа.

Независимо от указанных мероприятий служба технического контроля должна контролировать продукцию в той мере, в какой это необходимо для гарантии выпуска высококачественной продукции.

Число работников, входящих в службу технического контроля, рассчитывают, исходя из трудоемкости контрольных операций.

Общее число контрольных мастеров

$$P_{к.м} = \frac{\sum_1^n K_i t_i b_i N a}{T_d}, \quad (3.16)$$

где  $N$  – число наименований объектов контроля;

$K_i$  – число контрольных операций по каждому объекту;

$t_i$  – трудоемкость  $i$ -й контрольной операции в часах рабочего времени;

$b_i$  – коэффициент повторяемости  $i$ -й операции;

$N$  – программа выпуска  $N$ -го объекта;

$a$  – коэффициент, учитывающий время на оформление документов и другие затраты;

$T_d$  – действительный фонд времени контроля, ч.

Значения  $K_i$ ,  $t_i$  и  $b_i$  берут из ведомости операций технического контроля.

В соответствии с существующими ныне положениями число работников службы технического контроля определяют, исходя из условия: один контрольный мастер на 15...20 основных производственных рабочих.

Служба технического контроля входит в число основных подразделений предприятия. Поэтому оплату мастеров, рабочих и контролеров приравнивают к оплате соответствующих работников производственных подразделений. Более того, высококвалифицированным рабочим-контролерам, постоянно связанным с контролем и приемкой наиболее сложной и ответственной продукции, в установленном порядке присваивают квалификационные разряды на единицу выше по сравнению с разря-

дами рабочих, занятых изготовлением продукции.

Статистические методы контроля. Один из путей повышения эффективности работы подразделений ОТК – внедрение статистического контроля, особенно входного статистического контроля комплектующих изделий, запасных частей, полуфабрикатов, материалов, а также приемочного контроля при приемке готовой продукции или полуфабрикатов в процессе обработки. Под статистическими методами контроля понимают контроль качества продукции, проводимый на основании теории вероятности и математической статистики.

Сущность статистических методов контроля заключается в том, что из подконтрольной партии  $N$  объектов непосредственно проверяют только некоторую ее часть  $N$ , называемую выборкой.

В зависимости от числа или доли годных в этой выборке деталей всю партию принимают (считают годной) или не принимают (бракуют).

Применяют статистический приемочный контроль по количественному признаку и статистический приемочный контроль по альтернативному признаку.

Контроль по количественному признаку заключается в том, что у единицы продукции измеряют значения контролируемого параметра, вычисляют среднее арифметическое значение и оценивают его отклонение от одной (верхней или нижней) или двух заданных границ. Эти отклонения сравнивают с заранее установленными контрольными нормативами и по результатам сравнения принимают решение в соответствии или несоответствии продукции установленным требованиям.

Контроль по альтернативному признаку состоит в том, что все изделия в выборке разбивают на две группы: годные и дефектные. Годность партии оценивают по доле дефектных изделий в общем числе проверенных.

Приемочный уровень качества определяют в зависимости от значимости дефектов. С этой целью возможные дефекты деталей классифицируют по трем категориям: критические, значительные и малозначительные. Под критическими понимают дефекты, при наличии которых использование продукции по назначению невозможно. Значительными называют дефекты, которые существенно влияют на долговечность продукции. Малозначительными считаются дефекты, которые существенно не влияют на использование продукции и ее долговечность.

План контроля деталей и сборочных единиц устанавливают, исходя из следующего. По параметрам изделий, несоблюдение которых ведет к критическому дефекту, надо применять сплошной контроль. По всем другим параметрам используют статистический ; контроль с приемочным уровнем качества (дефектности), равным 1, 4 или 10% в зависимости от значимости дефекта.

Существует два типа планов контроля: (одноступенчатый – решение о принятии партии на основании проверки одной выборки; многоступенчатый – по результатам контроля  $K_1 \geq 2$  выборок, причем число последних устанавливают заранее).

При одноступенчатом приемочном контроле партии деталей  $N$ , содержащей  $M$  дефектных деталей, делают случайную выборку объемом  $n$  деталей. Партию принимают, если в выборке оказывается не более  $C$  дефектных деталей. В противном случае ее бракуют.

Многоступенчатый приемочный контроль выполняют так. Из партии деталей  $N$  случайным образом отбирают выборку объемом  $N_1$ :

если в выборке число дефектных деталей  $N_1$ , не превышает приемочного числа  $C_1$ , то партию принимают;

если  $N_1$  оказывается не менее браковочного уровня  $d_1$  ( $d_1 > C_1$ ), то партию бракуют; если  $N_1$  попадает в интервал  $C_1 < m_1 < d_1$ , то принимают решение о взятии второй выборки объемом  $N_2$ .

Для второй выборки устанавливают нормативы  $C_2$  и  $d_2$ , с которыми сравнивают результаты контроля:

если  $m_1 + m_2 \leq C_2$ , то партию принимают;

если  $m_1 + m_2 \geq d_2$ , то партию бракуют;

если  $m_1 + m_2 < d_2$  и  $m_1 + m_2 > C_2$ , то назначают третью выборку и т.д.

При практическом использовании статистического контроля по альтернативному признаку для определения браковочных и приемочных чисел и других показателей разработаны специальные таблицы. Применение этого метода рассмотрим на входном контроле качества запасных частей.

Входной контроль качества запасных частей. Опыт контроля запасных частей показывает, что значительная их часть имеет отклонения от чертежей и стандартов. Это служит одной из причин снижения ресурса отремонтированных машин и заставляет потребителя вводить входной контроль.

Входной контроль соответствия запасных частей чертежам и техническим требованиям – вынужденная мера по обеспечению высокого качества ремонта.

Если число запасных частей в партии, поступившей на предприятие, менее 100, то их подвергают сплошному контролю. При поступлении на предприятие более 100 изделий по одному сопроводительному документу входной контроль выполняют статистическим методом по альтернативному признаку.

## 2 СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1 Роль стандартов в проблеме надежности

Методы и процедуры, связанные с обеспечением надежности на всех этапах жизненного цикла продукции, начиная с разработки технического задания, подлежат стандартизации. Основы нормирования и обеспечения надежности рекламирования национальными стандартами, а также международными документами рекомендательного характера.

Стандарты по надежности служат нормативной базой для создания продукции, обладающей необходимым уровнем надежности, регулируют взаимоотношения заинтересованных сторон (заказчиков, разработчиков, изготовителей, поставщиков и потребителей) при решении проблемы обеспечения надежности продукции на всех стадиях жизненного цикла.

Особенно велика роль стандартов применительно к объектам общегосударственного значения (энергетика, связь и другие линии жизнеобеспечения, оборонная техника и т.п.), а также применительно к объектам, отказы которых могут угрожать населению и (или) окружающей среде или могут привести к большому экономическому ущербу. Система стандартов по надежности включает меры организационного, технического, эксплуатационного, экономического характера, направленные на обеспечение и поддержание технико-экономически целесообразного уровня надежности изделий, на сокращение связанных с обеспечением надежности затрат времени, трудовых и материальных ресурсов.

Методологическое значение стандартов по надежности состоит в том, что они позволяют регламентировать методы решения типовых задач анализа, прогнозирования, оценивания и обеспечения надежности, отвечающие современному научно-техническому уровню. Тем самым стандарты по надежности вносят существенный вклад в общее дело повышения культуры проектирования, изготовления и эксплуатации технических объектов, повышения эффективности производства и качества продукции. Для изделий, которые являются объектами общегосударственного значения, стандарты устанавливают количественные требования к показателям надежности, а также к способам контроля надежности на всех этапах жизни изделия.

Нормативно-техническая документация по надежности представляет собой комплекс взаимосвязанных нормативных документов. Образцом таких документов могут служить разработки Международной организации по стандартизации (ИСО) и Международной электротехнической комиссии (МЭК), а также ряда других международных, региональных и национальных организаций общетехнического, межотраслевого и отраслевого характера.

Структура стандартов по надежности в технике, предложенная ТК-119, представлена в табл. 3.2

Таблица 3.2 – Структура общетехнических стандартов

по надежности (предложения ТК-119)

Направления надежности	Предполагаемые аспекты стандартизации
1	2
1. Общие вопросы	1.1. Системообразующий стандарт (концепция стандартизации в области надежности) 1.2. Основные понятия. Термины и определения 1.3. Общие правила классификации отказов и предельных состояний 1.4. Состав и общие правила задания требований по надежности 1.5. Экономические аспекты надежности (оценка стоимости жизненного цикла)
2. Организационные вопросы обеспечения надежности	2.1. Основные положения по организационному обеспечению надежности (системы и службы надежности, задачи, организация работ) 2.2. Программы обеспечения надежности (в том числе комплексной экспериментальной отработки, обеспечения ремонтпригодности и др.) 2.3. Сбор, обработка и реализация информации о надежности
3. Физические, технические, технологические аспекты обеспечения надежности	3.1. Методы контроля надежности изделий по параметрам технологического процесса их изготовления 3.2. Приработка изделий, технологическая тренировка, отбраковка потенциально ненадежных экземпляров 3.3. Модели отработки изделий на надежность 3.4. Прогнозирование и оценка остаточного ресурса изделий 3.5. Контроль правильности применения комплектующих изделий 3.6. Физические основы форсированных испытаний на надежность. Общие положения



1	2
4. Расчеты	4.1. Расчеты надежности. Общие требования 4.2. Расчеты безотказности и долговечности невосстанавливаемых изделий 4.3. Расчет безотказности восстанавливаемых изделий 4.4. Расчет ремонтпригодности изделий 4.5. Расчет долговечности восстанавливаемых изделий (включая обоснование назначенных показателей долговечности) 4.6. Расчет надежности сложных систем изделий 4.7. Расчет комплектов ЗИП 4.8. Расчет параметров технического обслуживания и ремонта 4.9. Расчет надежности программного обеспечения 4.10. Анализ возможных причин и последствий отказов при проектировании
5. Испытания, оценка, контроль	5.1. Испытания на надежность. Основные положения 5.2. Предварительная обработка статистических данных, характеризующих надежность изделий 5.3. Оценка параметров распределения случайных величин, характеризующих надежность изделий 5.4. Оценка показателей надежности по экспериментальным данным 5.5. Методы и планы испытаний для контроля средней наработки на отказ 5.6. Методы и планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы 5.7. Методы и планы испытаний для контроля коэффициента готовности 5.8. Методы испытаний ремонтпригодности 5.9. Ускоренные испытания на надежность. Основные положения 5.10. Оценка и контроль надежности с учетом априорных статистических данных

Предложено вести три уровня стандартов: первый – общетехнический, положения которого распространяются на технику в целом; второй уровень образуют стандарты на укрупненные группы однородной продукции; стандарты третьего уровня распространяются на группы однородной продукции или изделия конкретного вида.

Стандарты первого уровня образуют систему стандартов "Надежность в технике". Эти стандарты должны быть согласованы с международными стандартами. При этом планируется осуществить максимально возможное соответствие структуре международных стандартов. В частности, предусмотрена возможность введения в действие стандартов МЭК в качестве государственных стандартов.

Стандарты второго и третьего уровней будут разработаны вне системы "Надежность в технике". Эти стандарты конкретизируют положения общетехнических стандартов применительно к данной группе изделий, а также содержат конструктивные, технологические и эксплуатационные требования, специфические для данной группы изделий. Стандарты третьего уровня разрабатывают лишь при явно выраженной специфике в организации и методологии обеспечения надежности соответствующих изделий или при необходимости назначения более жестких (по сравнению со стандартами второго уровня) требований по надежности. Такая структура нормативно-технической документации по надежности отражает сложившуюся мировую практику по стандартизации, а именно упрощение иерархии стандартов путем ее сведения к двум уровням: уровню национальных стандартов, гармонизированных с международными и уровню стандартов фирм, ассоциаций и т.д.

Среди международных организаций, наряду с Международной организацией по стандартизации (ИСО), следует выделить Международную электротехническую комиссию (МЭК). Документы по надежности, разработанные МЭК, выходят далеко за пределы электроники и родственных ей отраслей.

Примером другого подхода к стандартизации может служить разработка норм и стандартов в рамках Американского общества инженеров-механиков (ASME). Эта деятельность ведется с 1884 г. Строго говоря, эта документация не носит обязательного характера даже в пределах США. Однако практически все американские частные и государственные организации признают за этими документами силу закона *de facto*. Более того, многие из них приняты (полностью или с небольшими изменениями) в качестве нормативно-технических документов в других странах, а также положены в основу международных документов. Примером могут служить нормы по расчету и проектированию котлов, сосудов давления и трубопроводов. (Pressure Vessel and Piping Code). Эти документы с изменениями и дополнениями существуют многие десятки лет. Но далеко не все инженеры-практики, связанные с обеспечением надежности трубопроводов и сосудов давления, знают, что прототипом применяемых ими норм служат соответствующие нормы ASME. Менее известно в нашей стране методическое руководство для расчетной оценки ресурса машиностроительных конструкций (ASME XI – Life Evaluation Code).

Среди организаций, которые вносят значительный вклад в разработку стандартов и норм, следует указать Американское общество по испытаниям и материалам (American Society for Testing and Materials, ASME). Образованное в ре-

зультате выделения из ASME, оно занимает сейчас одно из ведущих мест в мировой практике стандартизации. Основное направление ASTM – создание нормативно-технической и методической документации по испытаниям материалов, элементов конструкции и деталей машин на конструкторскую надежность. Рекомендации ASTM находят широкое применение в других отраслях техники – в авиации, судостроении, космической технике и т.п. Один из наиболее известных стандартов ASTM, посвященный методам экспериментального определения характеристик трещиностойкости конструктивных материалов (имеется в виду ASTM E – 399) стал прототипом для многих аналогичных национальных стандартов.

Новое поколение отечественных стандартов в значительной степени приближено к международному уровню, сохраняя в то же время традиции, заложенные в предыдущих стандартах.

## **2.2 Системы стандартизации и сертификации надежности машин**

Сертификация соответствия – действие третьей стороны, показывающее, что обеспечивается необходимая уверенность в том, что должным образом идентифицированная продукция, процесс или услуга соответствует конкретному стандарту или другому нормативному документу.

**Система сертификация** – система, располагающая собственными правилами процедуры и управления для проведения сертификации соответствия.

Сертификация надежности машин проводится на соответствие требований системы стандартов в области надежности техники, представленной структурой и фондом общетехнических стандартов, в которых установлены для всеобщего и многократного использования правила, общие принципы и характеристики различных видов деятельности и их результатов, направленных на достижение оптимальной степени надежности машин.

На международном уровне проблема стандартизации надежности выделена в отдельный технический комитет МЭК ТК-56 "Надежность", а фонд международных стандартов по надежности насчитывает 50 наименований. Все чаще появляющиеся ссылки на международные стандарты по надежности в контрактах и договорах расцениваются как свидетельство международного признания требований к высокому качеству и надежности поставляемых машин. Отношение стран к разработке международных стандартов по надежности является весьма ответственным и определяется перспективой непосредственного применения международных стандартов в области надежности в качестве национальных стандартов.

В 1990 году в ходе развития работ по стандартизации в связи с новыми экономическими условиями в России и в РБ создана система по стандартизации ТК – 119 "Надежность в технике". Проведенные исследования целей и задач стандартизации данного направления и сравнительный анализ национального и международного фонда стандартов по надежности определили следующие основные цели создания национальной системы стандартизации "Надежность в технике" (ССНТ).

1. Нормативное регулирование взаимоотношения и взаимодействия сторон, участвующих в создании и эксплуатации техники, при решении проблемы обеспечения ее надежности, имея в виду, в первую очередь, выполнение требований по безопасности, охране среды обитания, ресурсосбережению;

2. Создание предпосылок по внедрению в практику достижений научно-технического прогресса путем регламентации в стандартах современных методов решения задач надежности как основы для разработки соответствующих правил, методик процедур, применяемых при создании и применении конкретных изделий;

3. Установление необходимого уровня надежности изделий, качество которых является объектом государственного управления, ввиду непосредственной связи с обеспечением требований по безопасности и охране среды обитания.

**Основными задачами в области стандартизации** надежности машин, необходимыми для достижения поставленных целей, являются: установление положений и требований по обеспечению надежности изделий на всех стадиях их жизненного цикла, целесообразных правил, методов решения типовых задач надежности, обоснование ограничений на уровень надежности и требований к способам контроля надежности отдельных видов изделий, обеспечение максимально высокого уровня взаимоувязанности стандартов по надежности различных уровней, в частности, гармонизацию национальных общетехнических стандартов ССНТ с международными стандартами МЭК ТК-56 "Надежность".

Национальный фонд стандартов по надежности условно подразделяются по следующим иерархическим уровням: 1) общетехнические стандарты по надежности, образующие систему стандартов "Надежность в технике", разрабатываемые ТК-119 и распространяющиеся на технику в целом или на большинство ее видов; 2) стандарты по надежности укрупненных групп продукции и видов техники, развивающие и конкретизирующие необходимым образом положения общетехнических стандартов для данного вида техники;

3) разделы по надежности стандартов на продукцию вида "Общие технические требования" (ОТТ) и "Общие технические условия" (ОТУ) или стандарты по надежности конкретного вида изделий.

В структуре стандартов ССНТ на первом уровне с учетом проблемной ориентации общетехнических стандартов, состояния национальной и международной стандартизации в области надежности, тенденций и перспектив развития выделены пять основных, направлений стандартизации: общие вопросы; организация работ по обеспечению надежности; способы обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла; анализ и расчет надежности; испытания, контроль, оценка надежности. Исходя из реально решаемых задач, практике обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла в стандартах ССНТ выявлен наиболее рациональный состав объектов стандартизации по каждой группе.

В группу "Общие вопросы" входят объекты стандартизации, не связанные непосредственно со стадиями жизненного цикла, техникой обеспечения надежности, видами работ и т.п. Сюда относятся: основные принципы стандартизации в области надежности; понятия надежности, термины и определения, положения и модели; общие правила выработки требований по надежности, которые следует

предъявлять к изделиям; виды классификаций, принятые в надежности, в том числе основной вид – классификация отказов и предельных состояний.

В группу "Организация работ по обеспечению надежности" входят: общий порядок обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла, организационные структуры; планирование работ и программы обеспечения надежности; управление применением комплектующих изделий (надежностные аспекты); информационное обеспечение надежности; экспертиза проектов.

В третью группу входят: физические, технические, технологические и эксплуатационные аспекты; общие требования и рекомендации по конструктивным и технологическим способам обеспечения надежности; экспериментальная обработка на надежность и моделирование роста надежности; надежность-ориентированные способы контроля и отбраковки потенциально ненадежных экземпляров; назначение и продление срока службы и ресурса; обеспечение (поддержание) надежности в эксплуатации.

Четвертая группа "Анализ и расчет надежности" включает в качестве объектов стандартизации: порядок и общие требования к методам анализа и расчета; методы расчета показателей надежности; учет надежности программного обеспечения; эргономические аспекты надежности; анализ возможных видов последствий и критичности отказов.

В пятой группе "Испытания, контроль и оценка надежности" выделены следующие объекты стандартизации: порядок оценки и контроля надежности; правила проведения и общие требования к методам испытаний; выбор условий и режимов испытаний; предварительная обработка статистических данных о надежности, выявление неоднородностей. т.п.; оценка показателей надежности по экспериментальным данным; планы контрольных испытаний на надежность; оценка надежности объектов по данным о надежности составных частей; методы сокращения объемов испытаний, включая контроль надежности изделий по состоянию технологического процесса их изготовления.

## **3 ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ**

### **3.1 Общие организационно-методические принципы испытания техники**

Высокое качество машин и механизмов может быть обеспечено только с помощью их всесторонних испытаний. Поэтому комплекс знаний, необходимых для экспериментальной оценки особенностей технических систем и машин следует рассматривать как составную часть надежности.

Испытания – это экспериментальное определение количественных и качественных характеристик и свойств испытуемого объекта при его ремонте под заданной нагрузкой.

Испытание техники, узлов и механизмов – основа для создания надежных конструкций машин, агрегатов и комплексов, определения уровня их качества, совершенствования методов их изготовления, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Проведение испытаний машин и технических систем позволяют дать оценку их надежности на каждом этапе жизненного цикла объекта: проектировании, производстве и эксплуатации.

Надежность во многом зависит от качества отработки конструкции машин при проектировании. По данным машиноиспытательных станций, примерно 8...20 % отказов происходит из-за конструкционных недоработок. На этом этапе показатели надежности определяют расчетным путем на основе априорной информации о надежности комплектующих изделий, отдельных сборочных единиц или машин-аналогов. Для получения необходимой информации часто проводят специальные исследовательские испытания.

Важный этап в повышении надежности сельскохозяйственной техники – технологическая подготовка производства. Для разных групп машин 20...60% дефектов, обнаруженных при испытании, связаны с нарушениями технологии производства. К основным причинам возникновения дефектов относятся: отступление от чертежей – 17,3...17,8%; низкое качество сварки – 11,3...12,8; низкое качество сборки, регулировки и подтяжки креплений —14,1...17,9%.

Приняты законодательные акты по защите прав потребителей. В связи с этим заводы проводят работу по обеспечению стабильности показателей качества в соответствии с заявленным. Проверка и контроль систем обеспечения качества выпускаемой продукции – обязательное условие для выдачи сертификата качества.

Составной элемент систем контроля качества – контрольные испытания, сбор и анализ рекламаций по реализованной продукции, данные по отказам, поступающим от пунктов гарантийного ремонта и официальных дилеров, наблюдение и обследование работы сельскохозяйственной техники в условиях эксплуатации. Наиболее полная и достоверная информация о надежности изделий может быть получена только в ходе испытаний (рис.3.2).

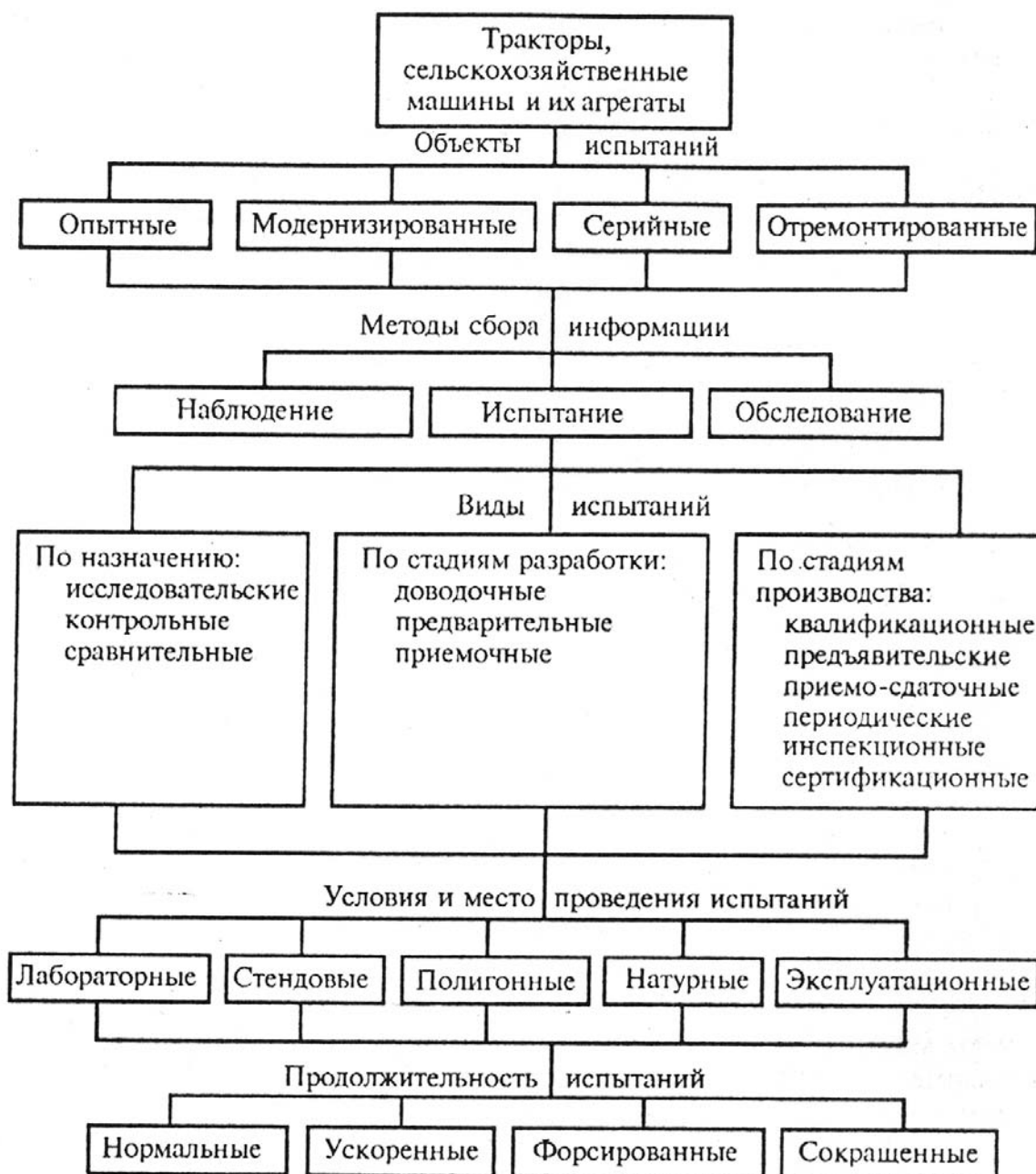


Рисунок 3.2 – Классификация испытаний сельскохозяйственной техники на надежность

Работы по испытанию сельскохозяйственной техники на надежность, помимо стандартов системы ССНТ (система стандартов надежности в технике), регламентируется и рядом других нормативных документов, к которым относятся: РД 10.2.1 «Испытания сельскохозяйственной техники техническая экспертиза». РД 10.2.6 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Показатели и методы их определения».

ОСТ 70/23.2.7 «Техника сельскохозяйственная. Надежность. Испытания в условиях эксплуатации».

РД 10.2.8 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Сбор и обработка информации».

ОСТ 70.2.9 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Надежность. Методика оценки приспособленности к техническому обслуживанию».

РД 10.2.10 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Методика оценки приспособленности к ремонту».

ОСТ 23.2.158 «Машины сельскохозяйственные. Ускоренные испытания на надежность».

РД 10.2.29 «Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Оценка качества материалов деталей. Основные положения».

Действующая система стандартов «Надежность в технике» (ССНТ), «Система разработки и постановки на производство» ГОСТ 15.001, «Испытания и контроль качества продукции» ГОСТ 16504 и отраслевая стандартизация предусматривают около 40 различных видов испытаний.

Применяемость испытаний на надежность приведена в табл. 9.1.

### **3.2 Организация и особенности испытаний машин на надежность**

Испытания сельскохозяйственной техники на надежность проводят заводы-изготовители, научно-исследовательские организации и специализированные машиноиспытательные станции (МИС), расположенные в различных почвенно-климатических зонах Беларуси. Испытания проводят для опытных, модернизированных, серийных или отремонтированных объектов. В соответствии с программой в качестве объектов испытаний могут быть и отдельные сборочные единицы машин или комплектующие изделия.

Машиноиспытательная станция как испытательный центр проводит приемочные и периодические испытания сельхозтехники на основании годовых планов (заданий), утвержденных Министерством сельского хозяйства и продовольствия.

Такие планы составляются на основании предложений организаций-разработчиков и изготовителей техники. Изготовитель (разработчик) должен представить изделия на госиспытания в срок, предусмотренный планом испытаний, с документацией в соответствии с РД 10.2.1. Количество образцов изделий, представляемых на испытания, устанавливается планом испытаний.



Таблица 3.2 – Применяемость испытаний на надежность

Контролируемое свойство надежности	Контроль при испытаниях						Типовых
	Предварительных	Приемочных	Квалификационных	Приемосдаточных	Периодических		
Безотказность	Проводят (нормальные или ускоренные)	Проводят (нормальные или ускоренные)	Проводят (нормальные или ускоренные)	Проводят* (нормальные)	Проводят (нормальные или ускоренные)	Проводят (нормальные или ускоренные)	Проводят (нормальные или ускоренные)
Ремонтопригодность	Проводят (ускоренные)	Проводят (ускоренные)	Проводят (ускоренные)	Не проводят	Проводят (ускоренные) по требованию заказчика	Проводят (ускоренные)	Проводят (ускоренные)
Долговечность, сохранимость	Проводят самостоятельные (ускоренные или нормальные)	Проводят самостоятельные (ускоренные или нормальные)	Не проводят**	Не проводят	Проводят самостоятельные (ускоренные или нормальные)	Проводят самостоятельные (ускоренные или нормальные)	Проводят самостоятельные (ускоренные или нормальные)
Несколько свойств	Проводят	Проводят	Проводят	Не проводят	Проводят	Проводят	Проводят

\* Только для изделий кратковременного действия.

\*\* По требованию заказчика допускается проводить испытания установочной серии изделий на долговечность и сохраняемость как самостоятельные испытания (ускоренные или нормальные).

Государственный испытательный центр может проводить кроме приемочных и, периодические и другие виды испытаний по закрепленной номенклатуре – типовые, функциональные, специальные и другие – по договоренности с разработчиком или изготовителем изделий.

Государственные испытания сельхозтехники проводят по рабочим программам и методикам, которые составляют специалисты испытательного центра на основании типовых методик. Методики, изложенные в государственных и отраслевых стандартах, руководящих технических материалах на программы и методы испытаний изделий также являются типовыми.

Типовая программа государственных испытаний включает в себя ряд оценок: по параметрам (конструктивным) изделия; по оценке безопасности и эргономичности; по качеству выполнения машиной технологического процесса; энергетическая оценка; эксплуатационно-технологическая оценка; оценка технической надежности; экономическая оценка.

Для испытания конкретного изделия на основании типовой программы и методики составляют рабочую программу и методику испытаний (типовая форма 2.1), которые согласовывают с представителем предприятия-изготовителя и (или) разработчика и утвержденной у руководителя государственного испытательного центра. В рабочей программе и методике указывают с учетом особенностей испытываемого изделия перечень определяемых при испытаниях показателей, режимы, условия и места испытаний, наименование применяемых приборов и оборудования, порядок проведения испытаний, наименование применяемых приборов и оборудования, порядок проведения испытаний, обеспечивающих необходимую точность, достоверность и производительность результатов испытаний.

В рабочую программу и методику включают показатели, предусмотренные ТЗ или ТУ и другой нормативной документацией, в зависимости от целей и задач испытаний, и указывают типовую методику, в которой изложена рабочая методика определения показателя. В случае если перечень показателей, представленных в технической документации, недостаточен для всесторонней оценки качества изделия и принятия решения по результатам испытаний, то рабочую методику дополняют необходимыми показателями в зависимости от назначения и принципа действия изделия.

В зависимости от назначения испытания могут быть исследовательскими, контрольными или сравнительными. В ходе исследовательских испытаний оценивают влияние различных факторов (условий работы, материалов, режимов работы, смазок, технологий изготовления и т. д.) на процессы изнашивания, трения, прочностные характеристики, интенсивность отказов или ресурс изделия. Контрольные испытания проводят для подтверждения стабильности заявленных показателей надежности.

Сравнительные испытания служат основным видом приемочных испытаний. В качестве базы для сравнения принимают: реально существующие изделия (аналоги), государственные или отраслевые стандарты или другие нормативные документы или условное изделие, которое представляет собой совокупность лучших на момент оценки показателей технического уровня.

При создании новых машин доводочные испытания проводят для отработки конструкции и доведения показателей надежности до нормативного уровня. Широко используют специальные стенды для испытаний как отдельных сборочных единиц, так и полнокомплектных изделий. Создание новых или модернизированных образцов завершается предварительными испытаниями для оценки соответствия показателей технического уровня заданным требованиям. Решение о постановке на производство созданной машины принимают по результатам приемочных испытаний, проводимых машиноиспытательными станциями. Показатели качества и технического уровня, полученные в ходе испытаний, сравнивают с результатами испытаний машины-аналога, агротехническими требованиями и показателями, заявленными заводом-изготовителем.

Изделия единичного заказа или отремонтированную технику передают заказчику по результатам приемо-сдаточных испытаний. Периодические испытания проводят для контроля стабильности качества производимой продукции через установленные промежутки времени. Контрольные периодические испытания изделий установочной серии (первого или второго года производства) считают как квалификационные испытания. Они необходимы для определения готовности предприятий к серийному производству на основе отработанного производственного процесса. Сертификат качества выдают специально аккредитованные испытательные лаборатории после сертификационных испытаний.

Испытания на надежность проводят в лабораторных условиях на специальных стендах, на специальных полигонах или при эксплуатации. В зависимости от продолжительности и нагрузочных режимов различают нормальные, ускоренные, форсированные или сокращенные (цензурированные) испытания.

При организации и проведении испытаний центральный момент – выбор плана испытаний, обеспечение заданной степени подобия режимов и сопоставимости полученных результатов. Сопоставимость результатов обеспечивается единством программы и методики испытаний и испытательного оборудования. Испытания проводят на типичных фонах и рабочих режимах работы машинно-тракторных агрегатов. Порядок сбора и обработки информации о надежности сельскохозяйственной техники устанавливает РД 10.2.8.

План испытаний определяет число испытываемых объектов (образцов), продолжительность и критерий прекращения испытаний, число ступеней контроля, характер действия с отказавшими изделиями, момент начала испытаний и периодичность контроля. Для названных элементов плана испытаний используют символические обозначения. Планы испытаний сельскохозяйственной техники на надежность, рекомендуемые РД 10.2.8, приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Рекомендуемые планы испытаний на надежность сельскохозяйственной техники

Тип вы- борки	Назва- ние	Название испытаний	Выборка данных	Показатель надежности
------------------	---------------	--------------------	-------------------	--------------------------

	плана			
1. Полная выборка	[NUN]		Ресурсы: $R_1, R_2, \dots, R_N$	Средняя наработка до отказа, средний ресурс
2. Однократно усеченная выборка	[NUT]		Ресурсы: $R_1, R_2, \dots, R_m$ Наработки: $T_1, T_2, \dots, T_N$ $m$	Гамма-процентная наработка до отказа, гамма-процентный ресурс
3. Многократно усеченная выборка	[NRT], [NMT]		Ресурсы: $R_{11}, R_{31}, \dots, R_{Ni}$ Наработки: $T_1, T_2, \dots, T_N$	Вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ, коэффициент готовности

При выборе плана испытаний необходимо учитывать минимум средней продолжительности  $M(T_{uc})$  или стоимости испытаний  $M(S_{ucn})$ . В отдельных случаях выбирают план испытаний, обеспечивающий достаточную точность. Рекомендации по выбору плана, удовлетворяющего перечисленным требованиям, приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.6 – Сравнительная эффективность планов испытаний

План испытаний	Функция эффективности		
	средняя продолжительность	средняя стоимость	точность
[NUN]	–	–	+
[NUR], [NUT]	±	±	±
[NUZ]	±	+	–
[NRR], [NRT]	+	+	–

Вычисление числа испытываемых образцов базируется на использовании зависимости точности ( $\delta$ ) и доверительной вероятности ( $\beta$ ) от результатов испытаний. Для расчета параметров планов предварительно задаются значениями  $\delta$  и  $\beta$ . Закон распределения показателей надежности предварительно выбирают по значению коэффициента вариации в зависимости от механизма отказа. Для выбранных значений  $\delta$ ,  $\beta$  и  $\nu$  параметры планов испытаний определяют с учетом формул, приведенных в табл. 3.7

Таблица 3.7 – Параметры  $\delta$  и  $\beta$  для различных объектов испытаний

Объект	$\delta$	$\beta$
Изделие в целом; деталь, обуславливающая внешний вид изделия	0,15...0,20	0,80...0,90
Базовая деталь	0,10...0,15	0,90...0,95
Детали, обеспечивающие безопасность изделия	0,05	0,95...0,99

Таблица 3.8 – Коэффициенты вариации ресурса изделий машиностроения

Закон распределения	Вид предельного состояния, причина отказа	Коэффициент вариации
Нормальный	Достижение предельного состояния целого изделия. Достижение предельного состояния агрегата.	0,10...0,20
	Износ деталей, узлов до предельного состояния.	0,30
	Наработка до предельного состояния деталей и сборочных единиц, обусловленного сочетанием износа, усталости и коррозии	0,30
		0,30
Логарифмически-нормальный Вейбулла	Разрушение от усталости при изгибе, кручении.	0,40...0,50
	Наработка резьбовых соединений до разрушения. Межремонтный ресурс.	0,70
	Наработка до разрушения от контактной усталости.	0,60...0,80
	Наработка до разрушения от усталости при изгибе, кручении.	0,70
	Наработка до разрушения резьбовых соединений	0,30...0,50
		0,80

Таблица 3.9 – Формулы для расчета параметров плана испытаний

План испытаний, параметр	Расчетная формула	
	закон распределения Вейбулла	закон нормального распределения
1. [NUN]; N	$\frac{2N}{X_{1-\beta}^2} = \delta + 1$	$\frac{t_{\beta}(N-1)}{\sqrt{N}} = \frac{\delta}{\nu}$
2. [NUR]; N, R	$\frac{2r}{X_{1-\beta}^2(2r)} = (\delta + 1)^b; \quad N = \frac{r}{\nu}$ $\nu = \sqrt{\left\{ \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)\right]^2} \right\} - 1}$	$\frac{t_{\beta}(r-1)}{\sqrt{r}} = \frac{\delta}{\nu}$ $N \frac{r}{\nu}$
3. [NUT]; N, T	$T = \bar{T}_k$ $k = \left[ \ln \frac{N+0,5}{N+0,5-r} \right]^{\frac{1}{b}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right]^{-1}$	$T = \bar{T}_k$ $k = 1 + H_k \nu$

Примечание. В таблице приведены обозначения:  $b$  – параметр распределения Вейбулла;  $\Gamma(x)$  – гамма-функция;  $H_k$  – квантиль нормального распределения уровня  $\beta$ ;  $\bar{T}$  – средняя продолжительность испытаний;  $\nu$  – допустимая степень цензурирования.

Пример. Определить объем выборки, достаточный для оценки среднего ресурса восстановленного лемеха с предельной относительной погрешностью  $\delta=0,1$  и доверительной вероятностью  $\beta=0,8$ .

Решение. Для определения среднего ресурса восстановленного лемеха выбираем план [NUN]. Предположительное значение коэффициента вариации для наработки до предельного состояния детали выбираем по таблице равным 0,30 для нормального распределения. Затем подсчитываем соотношение  $\delta/\nu \approx 0,33$ . После этого по таблице приложения выбираем  $t_{\beta}$  и подсчитываем соотношение  $t_{\beta}(N-1)/\sqrt{N}$ . Порядок расчета приведен в таблице. По данным расчета объем выборки равен  $N=7$ .

Таблица 3.10 – Порядок расчета объема выборки

N	$\sqrt{N}$	$t_{\beta}(N-1)$	$t_{\beta}(N-1)/\sqrt{N}$
5	2,236	0,920	0,411
6	2,449	0,906	0,370
7	2,646	0,896	0,338
8	2,828	0,889	0,314

Для плана [NUT] параметры  $N$  и  $T$  определяют по следующей схеме:  
 для заданных  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\nu$  находят параметры  $R$  и  $N$  формулам для плана [NUR];  
 подсчитывают коэффициент  $k$ ;  
 вычисляют среднюю продолжительность испытаний для плана

$$\left[ \begin{array}{l} [NUN]\bar{T} = \frac{1}{\lambda}(\ln N + C) \approx \frac{1}{\lambda} \ln 1,781N; \\ [NUR]\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N + 0,5}{N + 0,5 - r}, \end{array} \right. \quad (3.17)$$

где  $\lambda$  – параметр экспоненциального распределения;

$C$  – постоянная Эйлера ( $C = 0,5772$ );

подсчитывают параметр  $T$ .

Значения параметра  $\lambda$  определяют по формулам для плана

$$\left[ \begin{array}{l} [NUN]\lambda = (N - 1) / S; \quad S = \sum_{i=1}^N R_i; \\ [NUR]\lambda = r / S; \quad S = \sum_{i=1}^r R_i + \sum_{k=1}^{N-r} T_k \end{array} \right. \quad (3.18)$$

где  $R_i$  – наработка отказавших изделий;

$T_k$  – наработка до снятия с испытания работоспособного изделия.

После выбора плана испытаний и определения его параметров отбирают образцы по принципу случайной выборки и проводят испытания. Результаты отбора оформляют актом. Информацию о надежности отобранных образцов собирают в течение установленного периода испытаний. Началом испытаний считают момент получения образца испытательной организацией (для опытных образцов) или момент отбора на испытания (для серийных и отремонтированных объектов). Испытания начинают и заканчивают технической экспертизой по РД 10.2.1.

В процессе испытаний собирают и фиксируют в специальном журнале информацию о надежности объекта, посредством которой можно определить показатели по ОСТ 70.2.6. При этом учитывают: наработку изделия общую и на момент возникновения отказа или выявления неисправности; характеристику отказа; вероятную причину и способ устранения; техническое состояние отказавших и заменяемых составных частей; номенклатуру и число израсходованных запасных частей и материалов. Проводят хронометраж затрат времени на отыскание и устранение отказов или неисправностей и проведение регламентных операций по техническому обслуживанию. Учитывают затраты средств и материалов на проведение этих операций.

Характеристика отказа по РД 10.2.8 должна включать наименование отказавшей системы, сборочной единицы или детали; внешние проявления, условия выявления, характер и причину отказа, способ его устранения; данные о замененных составных частях, деталях; продолжительность и трудоемкость отыскания и устранения отказа; стоимость замененных деталей с указанием восстановленных или новых; наработку, при которой возник отказ. При описании отказа пользуют-

ся классификатором по РД 10.2.8.

При оценке надежности машин учитывают: нарушения работоспособности, возникшие при транспортировке и во время приемки на испытания; несоответствия требованиям правил дорожного движения, появившиеся при эксплуатации; конструкционную доработку машины в процессе испытания; нарушения работоспособности вследствие попадания камней в рабочие органы (для почв, засоренных камнями); внеплановые операции ТО; нарушения работоспособности деталей и сборочных единиц, выявленные при ТО, если их устранение не предусмотрено инструкцией по эксплуатации; нарушения работоспособности изделия вследствие поломок, предельных износов, установленные заводом-изготовителем и выявленные при заключительной экспертизе, если наработка изделия меньше нормативного ресурса до капитального ремонта или списания; выход основных рабочих показателей за предельные значения, установленные нормативно-технической документацией; подтекания рабочих и технологических жидкостей; срабатывание механических предохранительных устройств без внешних причин; перегорание электроламп.

Отказы группируют по группам сложности в соответствии с РД 10.2.6. Для этого используют классификаторы РД 10.2.8. При испытании фиксируют, но не учитывают при оценке надежности: нарушения работоспособности и отказы отдельных деталей, соединений и сборочных единиц, устраняемые при ТО или возникшие по вине обслуживающего персонала; дефекты декоративных покрытий; срабатывание электрических предохранителей; несоответствия техническим требованиям, не устранимые ремонтными воздействиями.

Наработку испытываемых объектов измеряют для тракторов, самоходных шасси и их составных частей в моточасах; для сельскохозяйственных машин – в часах основной работы; для транспортных машин – в часах общего пробега.

В соответствии с типовой программой испытания сельскохозяйственной техники на надежность оценивают приспособленность изделия к ТО и ремонту. Для машин, требующих досборки, оценивают монтажепригодность.

Испытания на надежность – наиболее дорогой и продолжительный вид испытаний. Доля затрат на их проведение для разных групп сельскохозяйственных машин составляет 39...75% общей стоимости испытаний. Для уменьшения сроков и снижения стоимости используют методы ускоренных испытаний. Объем испытаний по ускоренной методике может составлять 40...60% планируемой наработки.

### **3.3 Методы и технические способы ускоренных испытаний узлов и технических систем**

Сокращения времени испытаний достигают: за счет увеличения длительности работы в течение суток; проведения испытаний в неагротехнические сроки (на почвенных полигонах и стендах); совмещения циклов технологического процесса и уменьшения времени простоев между ними (имитация); перемещения объекта по климатическим зонам; увеличения номинальных эксплуатационных нагрузок и



учащенного воспроизведения нагрузок, близких к максимальным эксплуатационным (форсированные испытания).

В соответствии с ГОСТ 16504 ускоренные испытания на надежность (УИН) – это такие испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о надежности изделий в более короткий срок, чем при нормальных эксплуатационных испытаниях.

Показатели надежности изделий и методы их оценки определяются по ОСТ 70.2.6.

Сокращение времени испытаний изделий достигается:

- увеличением длительности работы в течение суток по сравнению с реальной продолжительностью испытаний в эксплуатационных условиях;
- проведение испытаний в неагротехнические сроки;
- совмещение циклов технологического процесса и уменьшением времени простоев между ними;
- перемещением изделий по климатическим зонам;
- учащенным воспроизведением нагрузок близких к максимальным эксплуатационным;
- увеличением номинальных эксплуатационных нагрузок (усилий, моментов, оборотов количества переключений и т. д.)

УИН подразделяются на стендовые, полигонные и эксплуатационные.

### **Стендовые ускоренные испытания**

Определение стендовых испытаний проводится в соответствии с ГОСТ 16504.

Стенды подразделяются на комплексные (для испытания составных частей изделия) и специальные.

В зависимости от причины потери работоспособности специальные испытания проводятся на усталость, износостойкость, коррозионную стойкость, а также при сочетании нескольких видов воздействия.

Комплекс испытательного оборудования включает:

нагружающие устройства, обеспечивающие статические и динамические нагрузки, достаточные для достижения предельного состояния испытываемого объекта;

задающую аппаратуру;

регулирующую и контрольно-измерительную аппаратуру, образующую в некоторых случаях замкнутый контур автоматического регулирования;

источник энергии;

элементы крепления и основание;

иммитационно-технологический материал;

средства воспроизведения воздействия окружающей среды.

Состав комплекса определяется целями и задачами испытаний.

## **Полигонные ускоренные испытания**

Определение полигонных испытаний проводятся в соответствии с ГОСТ 16504.

Выбор режима УИН на испытательном полигоне, критерии соответствия и коэффициенты ускорения выполняются в соответствии с разделом 2 ОСТ 23.2.158

Полигоны могут быть естественными и искусственными.

Под естественным (почвенным) полигоном понимается фон (поле, дорога, технологическая среда и т.д.) типичный для зоны эксплуатации машины, который воспроизводит реальные условия работы машины или минимальные эксплуатационные нагрузки на нее.

При испытаниях на почвенном полигоне должны воспроизводиться типичные эксплуатационные режимы нагружения и воздействия почвы на машину с отклонением в пределах  $\pm 15\%$ . На почвенном полигоне производится опробование и обкатка машин, испытания на надежность опытных и контрольных образцов машин и механизмов, а также сравнительные испытания рабочих органов на износ. Выбор режима испытаний на почвенном полигоне производится по средним значениям тягового сопротивления и крутящего момента, необходимого для привода рабочих органов.

Под искусственным полигоном понимается дорожка (трек) с установленными на ней препятствиями одинакового или различных типов, позволяющим проводить испытания машин на эксплуатационном или форсированном режиме.

Методика испытаний на искусственных полигонах выполняется в соответствии с ОСТ 23.1.145 «Методы ускоренных полигонах испытаний на надежность».

## **Эксплуатационные ускоренные испытания**

Эксплуатационными ускоренными испытаниями называют испытания, проводимые в условиях нормальной эксплуатации при специальной организации (трехсменная работа, перемещение изделий по почвенно-климатическим зонам при наступлении агротехнических сроков, сокращения простоя на ремонт и т. д.)

Типовые и рабочие методики разрабатываются организацией, проводящей испытания, на основе действующей межотраслевой и (или отраслевой) НТД. Методики испытаний должны быть аттестованы в соответствии с РД 50.360. Испытательное оборудование должно быть аттестовано в соответствии с ГОСТ 24555. Средства измерения, применяемые при испытаниях, должны пройти государственную поверку по ГОСТ 8.00, а нестандартизированные – ведомственную поверку по ГОСТ 8.326.

Компоновку стендов целесообразно осуществлять из унифицированных устройствах нагружения, управления и крепления, обеспечивающих установку на стенде различных машин. Средства ускоренных испытаний должны быть оборудованы системами аварийной защиты, звуковой или световой сигнализацией, блокировками.

Наиболее сложный и ответственный момент ускоренных испытаний – выбор режимов полигонных и стендовых испытаний. Для выбора режимов испытаний анализируют конструкционные и технологические особенности изделия, оп-

ределяют основные внешние воздействия, оказывающие наибольшее влияние на надежность изделия. Затем устанавливают типичные и экстремальные эксплуатационные режимы нагружения и воздействия среды и их характеристики. В качестве характеристик нагружения  $y_{jэ}(t)$  (рис.3.3) используют энергозатраты; нагруженность элементов машин или эксплуатационные показатели (производительность, пропускная способность и др.).

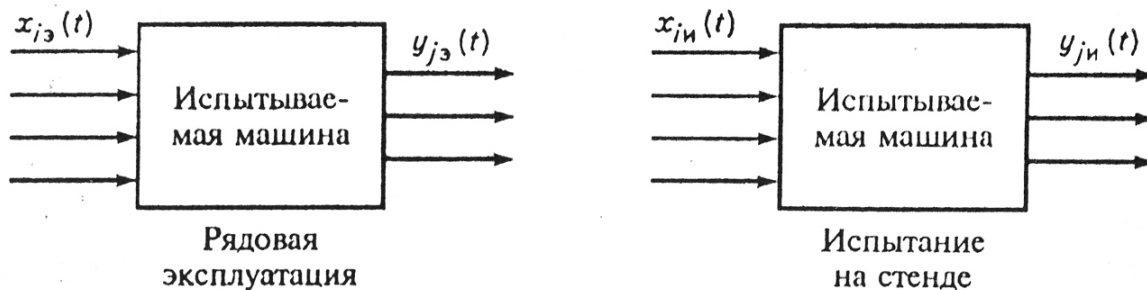


Рисунок 3.3 – Схема обоснования режимов ускоренных испытаний:

$x_{jэ}(t)$ ,  $x_{ji}(t)$  и  $y_{jэ}(t)$ ,  $y_{ji}(t)$  – случайные функции фактором нагружения и характеристик нагруженности элементов испытываемой машины и условиях нормальной эксплуатации и на испытательном стенде

Большинство факторов, влияющих на характеристики нагружения, являются случайными функциями. Наибольшее влияние на нагруженность сельскохозяйственных машин оказывают условия эксплуатации (профиль почвенно-дорожных фонов, неоднородность физико-механических свойств почвы и т.д.) и режимы работы, определяемые вариацией сопротивления машин и вращающего момента на ВОМ трактора. Режимы работы МТА характеризуются периодичностью и числом включений рычагов и педалей механизмов управления. Количественные характеристики нагружения определяют по результатам тензометрирования, с помощью классификаторов нагрузок СИН-404 и режимов СИН-403 или других аттестованных измерительных средств.

Критерии соответствия режимов ускоренных испытаний и испытаний в условиях рядовой эксплуатации – соблюдение условия (9.3)...(9.5) для средних значений характеристик нагружения  $y_{jэ}$  и  $\bar{y}_{ji}$ , их дисперсий  $D_{y_{jэ}}$  и  $D_{y_{ji}}$ , корреляционных функций  $R_{y_{jэ}}(\tau)$  и  $R_{y_{ji}}(\tau)$  и функций спектральных плотностей  $S_{\omega y_{jэ}}(\tau)$  и  $S_{\omega y_{ji}}(\tau)$ .

$$\left| \bar{y} - \bar{y}_{j\dot{e}} \right| / \bar{y}_{j\dot{y}} \leq \varepsilon_{y_j}; \quad (3.19)$$

$$\left| D_{y_{j\dot{y}}} - D_{y_{j\dot{e}}} \right| / D_{y_{j\dot{y}}} \leq \varepsilon_{D_{y_j}}; \quad (3.20)$$

$$\left| R_{y_{j\dot{y}}}(\tau) - R_{y_{j\dot{e}}}(\tau) \right| / R_{y_{j\dot{y}}}(\tau) \leq \varepsilon_{R_{y_j}}(\tau); \quad (3.21)$$

$$\left| S_{\omega_{y_{j\dot{y}}}}(\tau) - S_{\omega_{y_{j\dot{e}}}}(\tau) \right| / S_{\omega_{y_{j\dot{y}}}}(\tau) \leq \varepsilon_{S_{\omega_{y_j}}}(\tau), \quad (3.22)$$

где  $\varepsilon_{y_j}$ ,  $\varepsilon_{D_{y_j}}$ ,  $\varepsilon_{R_{y_j}}(\tau)$  и  $\varepsilon_{S_{\omega_{y_j}}}(\tau)$  – относительные отклонения статистических характеристик случайных функций характеристик нагруженности  $y_j(t)$ .

Относительные отклонения по этим характеристикам в соответствии с ОСТ 23.2.158 должны быть не более 20% при доверительной вероятности 0,8.

Эффективность методов ускоренных испытаний оценивают по коэффициенту ускорения по времени. Оно равно отношению календарного времени работы объектов в условиях эксплуатации к календарной продолжительности ускоренных испытаний до появления одинаковых повреждений или отказов или достижения предельного состояния.

Полигонные испытания проводят на естественных или искусственных полигонах. Под естественным полигоном понимается фон (поле, дорога, технологическая среда и т.д.), типичный для зоны эксплуатации машин. При выборе поля под естественный полигон учитывают механический состав почвы, удельное сопротивление, твердость и влажность. Участок должен быть характерным подлинегона, микро- и макрорельефу. Площадь участка полигона для испытания отдельной машины должна быть не менее чем дневная наработка.

Искусственный полигон представляет собой дорожку (трек) с устанавливаемыми на ней одинаковыми или различными препятствиями для проведения испытания машин на эксплуатационном или форсированном режиме. Для имитации воздействия на испытываемый объект внешних нагрузок используют специальные загрузочные устройства. Трек должен состоять из замкнутой дороги, выезда, устройств для обеспечения автоматизированного вождения и безопасности движения. Требования к оборудованию для ускоренных испытаний определены ОСТ 23.1.160.

Испытания на надежность проводят в лабораторных условиях с применением специальных стендов, которые подразделяют на комплексные (для испытания изделий в целом) и специальные (для испытания составных частей изделия или комплектующих изделий).

Для доработки конструкции новых комбайнов целесообразно использовать специальные стенды для ресурсных испытаний отдельных конструктивных элементов. Система стендового обеспечения для испытания отдельных элементов зерноуборочного комбайна приведена на рис. 3.4. Стрелками на рисунке показаны

виды силовых воздействий, моделируемых аппаратурой управления на каждом из приведенных стендов.

Для имитации неровностей поля или дороги при испытании транспортных, транспортно-технологических или прицепных машин в транспортном положении используют беговые барабаны или движущиеся ленты, на которые устанавливаются с определенной частотой различные препятствия.

В зависимости от причины потери работоспособности специальные испытания проводят на усталость, износостойкость, коррозионную стойкость, а также при сочетании нескольких видов воздействия.

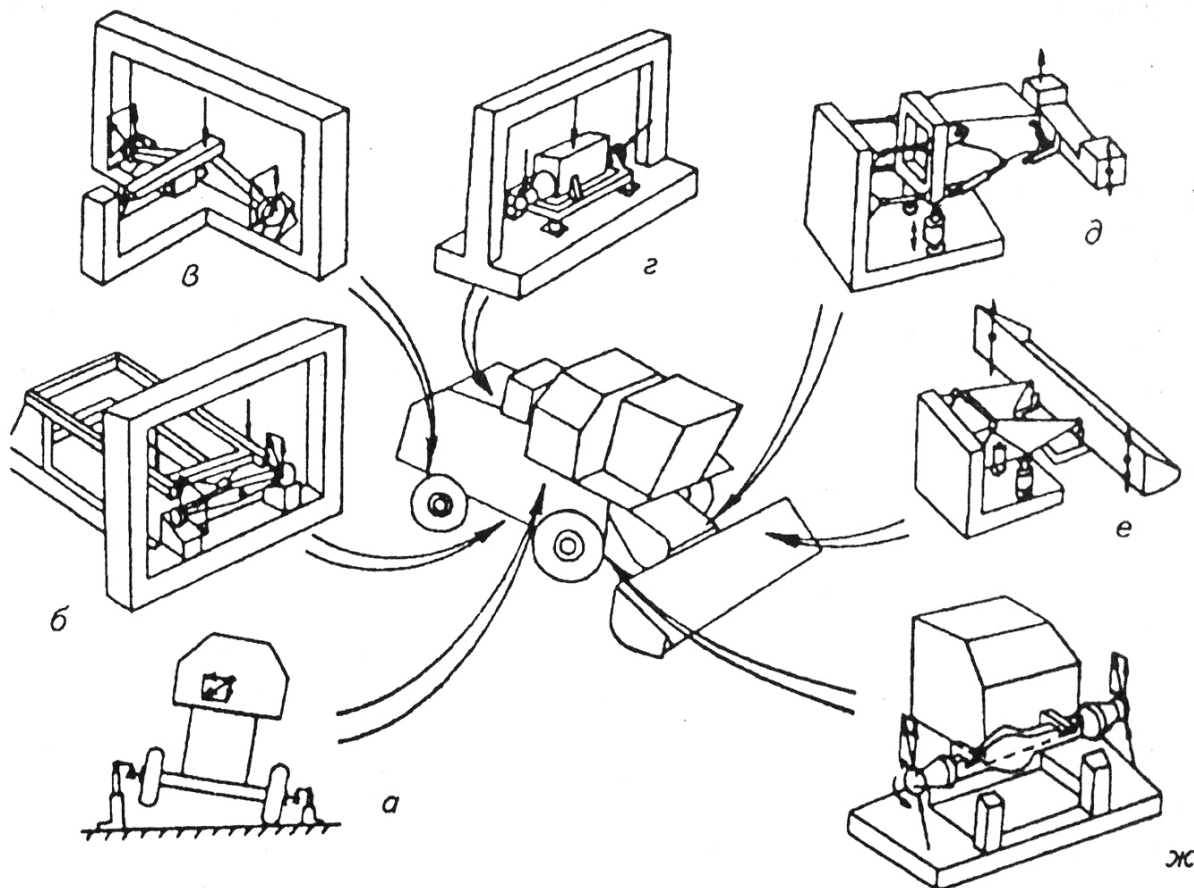


Рисунок 3.4 – Стенды для испытания отдельных элементов зерноуборочного комбайна:

*a* – каркаса молотилки и площадки водителя; *б* – рамы молотилки; *в* – балки управляемого моста; *г* – подмоторной рамы; *д* – каркаса наклонной камеры; *е* – каркаса жатки; *ж* – кожуха ведущего моста

Технические устройства для проведения стендовых испытаний должны удовлетворять следующим требованиям: высокой производительности и надежности; точности и стабильности заданных режимов работы; удобству их установки и возможности реализации различных режимов нагружения; удобству и высокой точности измерения создаваемых нагрузок; универсальности основных блоков и возможности переоборудования установки под различные типы испытываемых объектов и режимы деформирования; минимальным энергозатратам;

обеспечению требований безопасности; возможности создания различных условий испытаний (коррелирующая среда, высокие и низкие температуры, содержание пыли и влаги и т. д.).

Целесообразно компоновать стенды из унифицированных устройств нагружения, управления и крепления, обеспечивающих установку на стенде различных машин. Общая блок-схема стенда представлена на рис. 3.5.

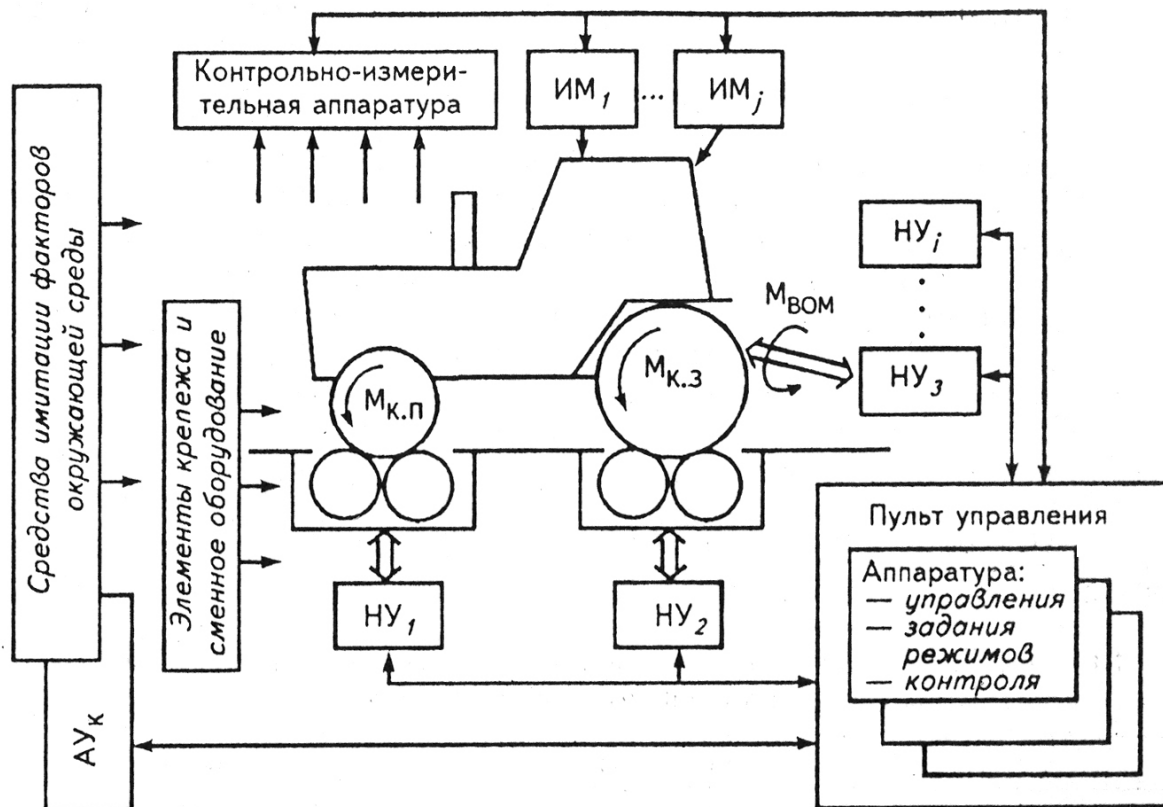


Рисунок 3.5 – Блок-схема стенда для ускоренных испытаний:

$H_{yi}$  – нагружающие устройства для имитации эксплуатационных нагрузок;

$ИМ_j$  – исполнительные механизмы управления трактором или машиной;

$АУ_к$  – аппаратура управления;  $M_{к.п}$ ,  $M_{к.з}$  и  $M_{ВОМ}$  – вращающие моменты соответственно на передних, задних колесах и ВОМ трактора

В зависимости от конструкции стенда применяют различные способы задания внешних нагрузок: имитацию периодической нагрузки с постоянной амплитудой; блок-программное ступенчатое изменение нагрузки или имитацию случайного нагружения.

Для задания нагрузки с постоянной амплитудой и при блок-программном нагружении для условий эксплуатации определяют случайные функции нагружения  $y_{jp}(t)$  для одной рабочей смены и различных режимов работы. Затем подсчитывают среднее значение параметра нагружения  $y_{jp}$  и по смешанному распределению амплитуд выбирают максимальное значение амплитуды цикла  $S_{amax}$  такое, вероятность превышения которого будет не более  $P(\sigma_a > \sigma_{amax}) \approx 10^{-5} \dots 10^{-6}$ . При построении блока нагружения учитывают амплитуды вариации нагрузок, удовлетворяющие условию

$$(0,1\dots 0,2)\sigma_{a\max} \leq \sigma_{ai} \leq \sigma_{a\max}. \quad (3.33)$$

Полученный диапазон изменения амплитуд  $\sigma_{ai}$  разбивают на классы. Их число должно быть не менее 6...8. Для каждого класса амплитуд подсчитывают число циклов  $N_i$ . По результатам обработки статистических данных строят диаграмму блока нагружения (рисунок 3.6). Методика построения приведена в методических указаниях МУ 23.2.28. Блоки нагружения строят для каждой из характеристик нагружения  $y_{jэ}(t)$ .

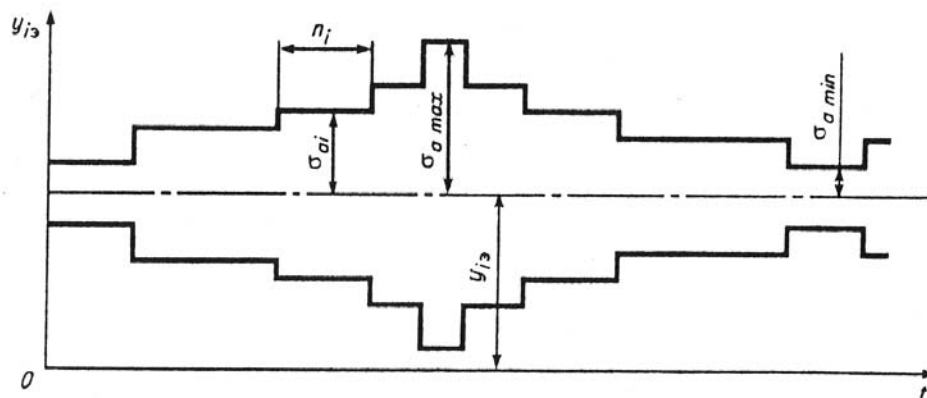


Рисунок 3.6 – Однопараметрический программный блок нагружения:  
 $\sigma_{ai}$  – амплитуда нагрузок  $i$ -го уровня;  $N_i$  – количество циклов на  $i$ -м уровне  
 в блоке нагружения;  $y_{jэ}$  – среднее значение параметра

Частоту и число повторений блоков нагружения при испытании выбирают такими, чтобы первая поломка наступала не ранее 15...20 повторений.

При моделировании случайных функций нагружения на стендах можно с большей точностью имитировать условия нормальной эксплуатации в ходе испытаний. Одним из методов воспроизводят статистические характеристики случайной функции нагружения. С этой целью используют генераторы случайных сигналов, продолжительные магнитофильмы или марковские матрицы случайных переходов, полученные при обработке экспериментальных данных.

В инженерной практике для определения технико-экономических показателей, в том числе и показателей надежности, могут быть эффективны методы прогнозирования. Их широко применяют при обосновании показателей надежности создаваемой машины во время разработки агротехнических требований или технического задания; определении остаточного ресурса по результатам диагностирования; оценке показателей работы машин по годам эксплуатации и др. Подобные задачи требуют описания изменения параметров (характеристик) объектов в различные моменты времени или их зависимости от основных параметров (массы, мощности, числа машин в агрегате и т.д.), характеризующих конструкцию.

При наличии достаточной информации для прогнозирования показателей применяют статистические методы: экстраполяцию, интерполяцию, корреляционный и регрессионный анализ и т.д. Рассмотрим решение задачи прогнозирования на примере. Исходные данные взяты из различных литературных источников.

Пример. Зная нормативную продолжительность НТО для существующих колесных тракторов, определить затраты времени на ЕТО для трактора мощностью 300 кВт. Справочные данные приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11 – Исходные данные для определения зависимости времени на ЕТО колесного трактора от номинальной мощности

Трактор	Номинальная мощность, кВт	Время на ЕТО, мин
Т-16М	14,7	16
Т-25	18,4	16
Т-40АМ	36,8	18
ЮМЗ-6	44,2	18
МТЗ-80 и МТЗ-82	58,9	18
Т-150К	121,3	24
К-701	221,0	30

Решение. Введем обозначения:  $x$  – номинальная мощность двигателя трактора и  $y$  – время, затрачиваемое на ЕТО. Оценим уровень статистической взаимосвязи между рассматриваемыми величинами. Для этого подсчитаем коэффициент парной корреляции  $r_{xy} = K_{xy} / (\sigma_x \sigma_y)$ , где  $K_{xy}$  – корреляционный момент;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – средние квадратические отклонения рассматриваемых величин. Порядок расчета следующий:

определим средние значения  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , т.е.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i = \frac{515,3}{7} = 73,6 \text{ кВт}; \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum y_i = \frac{140}{7} = 20 \text{ мин};$$

Выполним расчеты, приведенные в табл. 12.

Вычислим средние квадратические отклонения

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{32952,99}{7-1}} \approx 74,11 \text{ кВт};$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{\frac{160}{7-1}} \approx 5,16 \text{ мин};$$

Подсчитаем корреляционный момент

$$K_{xy} = \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{2283}{7} \approx 326,14;$$

Найдем коэффициент парной корреляции

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{326,14}{74,11 \cdot 5,16} \approx 0,85.$$

Таблица 3.12 – Расчет коэффициента парной корреляции



$N$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	-58,91	-4	235,64	3470,39	16
2	-55,21	-4	220,84	3048,14	16
3	-36,81	-2	73,62	1354,98	4
4	-29,41	-2	58,82	864,95	4
5	-14,71	-2	29,42	216,38	4
6	47,69	4	190,76	2274,34	16
7	147,39	10	1473,90	21723,81	100
Сумма	—	—	2283	32952,99	160

Значение коэффициента парной корреляции получим равным  $R_{xy} \approx 0,85$ . На практике значения коэффициента  $R_{xy} > (0,7 \dots 0,8)$  говорят о высокой степени статистической взаимосвязи между рассматриваемыми величинами. Для практических расчетов  $R_{xy}$  целесообразно использовать готовые программы для программируемых калькуляторов или ЭВМ.

Данные примера нанесем на график (рис. 3.7) и выберем вид зависимости для описания заданной закономерности.

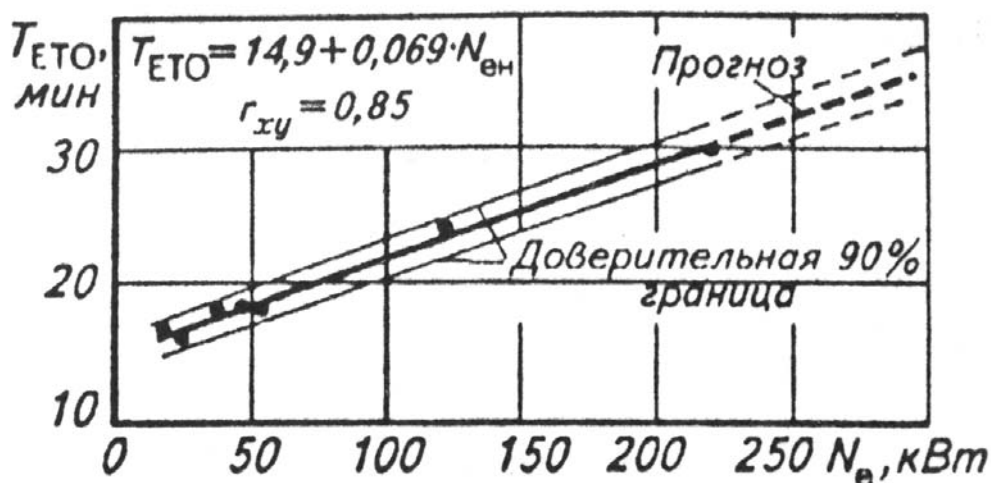


Рисунок 3.7 – Зависимость времени на ЕТО колесных тракторов от номинальной мощности

С учетом расположения точек на графике выбираем линейную зависимость, описываемую уравнением  $y = a + bx$ . Неизвестными в этом уравнении являются значения коэффициентов  $a$  и  $b$ , определяемые по статистической информации по методу наименьших квадратов. Для этого необходимо решить систему уравнений (10.8) относительно  $a$  и  $b$ , т. е.

$$\begin{cases} Na + \sum x_i b = \sum y_i; \\ \sum x_i a + \sum x_i^2 b = \sum y_i x_i. \end{cases} \quad (3.34)$$

Значения коэффициентов перед неизвестными рассчитываем по табл. 13

Таблица 3.13 – Расчет коэффициентов системы уравнений и остаточной дисперсии

$N$	$x_i$	$y_i$	$x_i y_i$	$x_i^2$	$\bar{y}_i$	$(\bar{y}_i - y_i)^2 \cdot 10^{-10}$
1	14,7	16	235,2	216,1	15,91	8,1
2	18,4	16	294,4	338,6	16,17	28,8
3	36,8	18	662,4	1354,2	17,44	313,6
4	44,2	18	795,6	1953,6	17,95	2,5
5	58,9	18	1060,2	3469,2	18,96	921,6
6	121,3	24	2911,2	14713,7	23,27	532,9
7	221,0	30	6630,0	48841,0	30,15	22,15
сумма	515,3	140	12589,0	70886,4	—	1830,0

С учетом результатов расчета система уравнения примет вид

$$\begin{cases} 7a + 513,3b = 140; \\ 515,3a + 70886,4b = 12589. \end{cases} \quad (3.34)$$

В ходе решения этой системы получим  $a=14,9$  и  $b=0,069$ . График полученной зависимости показан на рис. 10.8 сплошной линией, а прогнозируемые значения – пунктиром. Для  $x_i=300$  кВт прогнозируемое значение  $y_i=35,6$  мин.

Остаточную дисперсию, характеризующую разброс данных относительно полученного уравнения, подсчитывают по формуле

$$S_{ocm}^2 = \sum_{i=1}^N (\bar{y} - y_i)^2 = 1,830,$$

где  $\bar{y}_i$  – расчетные значения параметра .

Стандартную ошибку уравнений подсчитывают по формуле

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{N-2} S_{ocm}^2} = \sqrt{\frac{1,830}{7-2}} \approx 0,605.$$

Стандартную ошибку прогноза для  $x_i=300$  определяют так:

$$S_y = S_r \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} = 0,605 \sqrt{1 + \frac{1}{7} + \frac{(300 - 73,6)^2}{32952,99}} = 0,994.$$

Отклонение от среднего значения находят с учетом доверительной вероятности  $\pm t_{\beta} S_y$ . Для нашей задачи при уровне доверительной вероятности 0,9 значение времени на НТО ( $y$ ) будет находиться в интервале  $35,6 \pm 1,895 \cdot 0,994$  или  $35,6 \pm 1,88$  мин.

## 4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СОПРЯЖЕНИЙ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН»

### Цель работы

Получение практических навыков по расчету скорости изнашивания деталей и сопряжений, определению их полного и остаточного ресурсов, а также доверительных границ их рассеивания, установлению допустимых износов и размеров деталей.

### СТУДЕНТ ДОЛЖЕН ЗНАТЬ:

- основные определения и понятия, характеризующие техническое состояние деталей и сопряжений. Методы расчета их полного и остаточного ресурсов и скоростей изнашивания.

### СТУДЕНТ ДОЛЖЕН УМЕТЬ:

- определить средние скорости изнашивания деталей и сопряжений;
- рассчитать остаточный и полный ресурсы;
- определить доверительные границы рассеивания остаточного ресурса;
- рассчитать допустимые износы и размеры деталей.

### Указания по выполнению работы

1. По техническим условиям на дефектацию деталей ознакомиться с номинальными (начальными) допустимыми и предельными размерами деталей и зазорами (натягами) в соединениях. Результаты занести в отчет.

2. Произвести замеры деталей в местах их наибольшего износа или в местах, указанных преподавателем и определить величины наибольших фактических износов деталей:

для отверстия  $I_{\text{отв}} = D_{\text{изм}} - D_{\text{max}}$

для вала  $I_{\text{вал}} = d_{\text{min}} - d_{\text{изм}}$ ,

где  $I_{\text{отв}}$ ,  $I_{\text{вал}}$  – соответственно измеренное значение износа отверстия и вала

$D_{\text{изм}}$ ,  $d_{\text{изм}}$  – соответственно измеренные диаметры в местах наибольшего износа отверстия и вала;

$D_{\text{max}}$ ,  $d_{\text{min}}$  – соответственно максимальный и минимальный размеры деталей типа “отверстие” и “вал” по чертежу или тех условиям.

3. Определить величину максимального измеренного зазора в сопряжении.

$$S_{\text{изм}} = D_{\text{изм}} - d_{\text{изм}}$$

4. Определить по формуле средний остаточный ресурс сопряжения или детали (по заданию преподавателя).

5. Определить по формулам доверительные границы остаточного ресурса.

6. Рассчитать средний полный ресурс сопряжения (или детали) по формуле:

$$T_{\text{полн}} = T_{\text{изм}} + T_{\text{ост}}$$

7. Определить среднюю скорость изнашивания деталей и сопряжения:

$$V_{вал} = \frac{U_{вал}}{T_{изм}};$$

$$V_{отв} = \frac{U_{отв}}{T_{изм}};$$

$$V_{сопр} = V_{вал} + V_{отв}$$

$$V_{сопр} = \frac{S_{изм} - S_{Hmax}}{T_{изм}},$$

где  $S_{Hmax}$  – максимальный начальный зазор в сопряжении (по техническим условиям).

8. Определить предельные износы деталей сопряжения

$$U_{пред.отв} = \frac{U_{пред.сопр} \times V_{отв}}{V_{сопр}}$$

$$U_{пред.вал} = \frac{U_{пред.сопр} \times V_{вал}}{V_{сопр}}$$

$U_{пред.сопр}$  – предельный износ сопряжения определяется по зависимости:

$$U_{пред.сопр} = S_{пр} - S_{Hmax},$$

где  $S_{пр}$  – принимается по техническим условиям.

9. Определить допустимые без ремонта размеры деталей

$$D_{ор.отв} = D_{max} + T_{mr} \times V_{отв}$$

$$D_{ор.вал} = D_{min} + T_{mr} \times V_{вал}$$

10. Используя рассчитанные значения измеренного износа деталей или сопряжения, рассчитать значение остаточного ресурса по формуле, приняв значение  $\alpha$  из таблицы в соответствии с характером износа сопряжения или детали.

11. Сравнить значения остаточных ресурсов, рассчитанных по различным формулам и сделать выводы.

12. Оформить отчет.

## Содержание отчета

Цель работы.

Марка машины.

Наименование сборочной единицы.

Наименование детали, сопряжения.

Наработка до измерения.

ВЫПИСКА ИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ДЕФЕКТАЦИЮ ДЕТАЛЕЙ	Наименование детали по каталогу	Размеры, мм					
		Номинальный (начальный) $D, d$	Максимальный (минимальный) $D_{miN}, d_{miN}$	Допустимый		Пределный	Фактический (измеренный)
				с новыми деталями	с бывшими в эксплуатации		
		$D$	$D_{miN}$	$D_{др}$		$D_{пр}$	$D_{изм}$
$d$	$d_{miN}$	$D_{др}$		$D_{пр}$	$D_{изм}$		

условий на дефектацию деталей

### Зазоры в сопряжении

Наименование соединения	Зазор (+)		Натяг (-)		
	Нормальный (начальный)		Допустимый $S$	Пределный $S_{пр}$	Фактический (измеренный) $S_{изм}$
	$S_{max}$	$S_{min}$			

### Результаты расчетов

Наименование величины	Расчетная формула	Результаты расчета
Начальный размер детали $d_{miN}, D_{max}$		
Начальный зазор сопряжения, $S_{max}$		
Остаточный ресурс сопряжения (детали) $T_{ост}$ по формуле 4.9, по формуле 4.1		
Доверительные границы рассеивания остаточного ресурса $T_{ост}^B, T_{ост}^H$		
Полный ресурс сопряжения (детали) $T_{полн}$		
Средняя скорость изнашивания сопряжения (детали) $T_{полн}$		
Пределные износы сопряжения (детали) $U_{пр.сопр}; U_{пр.вал}; U_{пр.отв}$		
Допустимые без ремонта размеры деталей $D_{др.отв}; D_{др.вал}$		

Работу выполнил студент, курс, группа, дата выполнения, работу принял

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3.1

Данные из технических требований на капитальный ремонт дизелей Д-240, Д-240Л и их модификаций

№ варианта инд. Задача	Наименование деталей	Размер по чертежу, мм	Зазоры		
			начальный	допустимый	предельный
1	2	3	4	5	6
1	Блок цилиндров	25 <sup>+0,052</sup>	0,008...0,074	0,17	0,30
	Толкатель	25 <sup>-0,008</sup> -0,022			
2	Втулка распределительного вала	50 <sup>+0,025</sup>	0,050...0,114	0,17	0,40
	Вал распределительный	50 <sup>-0,050</sup> -0,089			
3	Втулка направляющая клапана	11 <sup>+0,027</sup>	0,070...0,117	0,20	0,40
	Клапан впускной	11 <sup>-0,035</sup> -0,060			
4	Втулка направляющая клапана	11 <sup>+0,027</sup>	0,070...0,117	0,20	0,40
	Клапан впускной	11 <sup>-0,70</sup> -0,090			
5	Коромысло клапана	19 <sup>+0,053</sup> +0,020	0,020...0,074	0,12	0,35
	Валик коромысел	19 <sup>-0,021</sup>			
6	Вкладыши шатунные	68 <sup>+0,025</sup> -0,010	0,065...0,115	0,135	0,30
	Вал коленчатый	68 <sup>-0,075</sup> -0,090			
7	Вкладыши коренные	75 <sup>+0,031</sup> -0,010	0,070...0,126	0,146	0,30
	Вал коленчатый	75 <sup>-0,60</sup> -0,095			
8	Втулка	50 <sup>+0,027</sup>	0,050...0,112	0,20	0,40
	Фланец установочный топливного насоса	50 <sup>-0,050</sup> -0,085			
9	Втулка ведомой шестерни	18 <sup>+0,060</sup> +0,030	0,030...0,072	0,14	0,25
	Палец ведомой шестерни	18 <sup>-0,012</sup>			
10	Втулка промежуточной шестерни	40 <sup>+0,050</sup> +0,025	0,025...0,75	0,12	0,20
	Палец промежуточной шестерни	40 <sup>-0,025</sup>			

Продолжение приложения 3.1

1	2	3	4	5	6
11	Втулка распределительного вала	$50^{+0,027}$	0,050...0,112	0,17	0,40
	Вал распределительный	$50^{-0,050}_{-0,085}$			
12	Корпус масляного насоса (диаметр гнезд под шестерни)	$42,25^{+0,16}_{+0,075}$	0,125...0,245	0,30	0,55
	Шестерня масляного насоса	$42,25^{-0,050}_{-0,085}$			
13	Корпус масляного насоса (глубина гнезд под шестерни)	$28^{+0,060}$	0,040...0,130	0,16	0,20
	Шестерня масляного насоса	$28^{-0,040}_{-0,070}$			
14	Крышка корпуса ротора	$19^{+0,023}$	0,040...0,093	0,12	0,20
	Ось ротора	$19^{-0,040}_{-0,070}$			
15	Насадок	$19^{-0,063}_{-0,084}$	0,026...0,080	0,10	0,20
	Ось ротора	$19^{-0,110}_{-0,143}$			
16	Корпус ротора	$18^{+0,019}$	0,030...0,074	0,10	0,18
	Ось ротора	$18^{-0,030}_{-0,055}$			
17	Втулка шестерни	$45,2^{+0,050}$	0,150...0,235	0,35	0,60
	Вал редуктора	$45,1^{-0,050}_{-0,085}$			
18	Втулка толкателя	$14^{+0,240}$	0,120...0,480	0,80	1,00
	Толкатель	$14^{-0,120}_{-0,240}$			
19	Втулка специальная	$13^{+0,240}_{+0,120}$	0,360...0,600	0,80	1,20
	Плунжер	$13^{-0,240}_{-0,360}$			
20	Ступица	$28^{+0,045}$	0,260...0,340	0,50	0,70
	Вал редуктора	$28^{-0,060}_{-0,095}$			

## **5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

### **«ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА И СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ»**

#### **Цель лабораторной работы**

Установить закономерности влияния материала и способов упрочнения на твердость металлопокрытий, полученных способами электротермического напыления и наплавки, закрепить знания и получить практические навыки при использовании приборов для определения твердости покрытий.

*Студент должен знать:*

- принципы формирования и технологические особенности изучаемых электротермических методов нанесения металлопокрытий;
- механизм влияния способа формирования покрытия и метода его упрочнения на физико-механические свойства;
- устройство и принципы работы оборудования для исследования параметра твердости твердосплавных композиционных материалов, в т.ч. в виде покрытий.

*Студент должен уметь* пользоваться оборудованием и приборами для определения твердости поверхностей, упрочненных различными технологическими приемами, выполнять статистическую обработку полученных экспериментальных данных.

#### **Оборудование и материалы для исследований**

Наиболее распространенными в автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении материалами являются конструкционные стали 45, 50, 40Х, 40ХН, из которых изготавливается основная масса ответственных деталей. Причем в последующем, при восстановлении и упрочнении разнообразных деталей, приходится иметь дело именно с углеродистыми сталями. Ввиду этого исходные образцы для исследования влияния материала и способов упрочнения на твердость были изготовлены из стали 45 (ГОСТ 1050-60).

В качестве материала металлопокрытий выбраны: широко применяемая при сварке и наплавке проволока Св-0,8Г2С по ГОСТ 2246-70, а также порошковый твердосплавный материал ПГ-СРЗ по ГОСТ 21448-70, грануляции 500 – 700 мкм.

В качестве защитной среды при наплавке выбран стандартный плавный высококремнемарганцевый флюс АН-348А по ГОСТ 9087-59, а также углекислый газ СО<sub>2</sub>.

Измерение параметра твердости данных образцов проводится на приборах: мод. 2140 ТР (метод Роквелла), прибор неразрушающего контроля твердости НТ-1 .



Таблица 3.14 – Характеристика образцов для исследований

№	Вид поверхности покрытия и способ его упрочнения
1	Наплавленная проволокой Св-0,8Г2С в среде CO <sub>2</sub>
2	Наплавленная проволокой Св-0,8Г2С под слоем флюса АН-348А
3	Наплавленная проволокой Св-0,8Г2С в среде CO <sub>2</sub> с введением порошка ПГ-СРЗ
4	Наплавленная проволокой Св-0,8Г2С в среде CO <sub>2</sub> с введением порошка ПГ-СРЗ в поле УЗК
5	Напыленная порошком ПГ-СРЗ без оплавления
6	Напыленная порошком ПГ-СРЗ с оплавлением газовой горелкой
7	Напыленная порошком ПГ-СРЗ с оплавлением лазерным лучом

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием методических указаний.
2. Выбрать метод измерения твердости в соответствии с рекомендациями методических указаний.
3. Ознакомиться с устройством и принципами работы прибора для измерения твердости по выбранному методу измерения .
4. Подготовить поверхность образцов для испытаний и произвести измерение твердости образцов покрытий.
5. Выполнить статистическую обработку полученных результатов .
6. В соответствии с полученными результатами измерения построить графические зависимости изменения параметра твердости от материала и способа упрочнения. Сделать выводы по работе.
7. Оформить в соответствии с существующими требованиями отчет по работе и сдать его преподавателю.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткое описание способов измерения твердости поверхности.
3. Экспериментальные данные измерения твердости (табл.15) и результаты статистической обработки по любому из образцов (дается преподавателем индивидуально).
4. График измерения твердости покрытий в зависимости от вида упрочнения по каждой марке материала.
5. Выводы по работе.

Таблица 3.15 – Результаты измерения твердости по методу Роквелла

Номер образца	Марка материала	Способ упрочнения	Условия испытаний		Результаты испытаний		
			Вид индентора	Испытательная нагрузка	HRC <sub>Э</sub>	H <sub>V</sub>	HВ, МПа·10 <sup>5</sup>

### Устройство и принцип работы прибора для измерения твердости по методу Роквелла 2140 TR

Прибор состоит из следующих основных узлов: корпуса, системы нагружения, грузовой подвески, привода, подъемного винта.

Все основные элементы прибора смонтированы в чугунном литом корпусе 40 закрытого типа.

Система нагружения предназначена для воспроизведения предварительной и общих нагрузок на испытательный наконечник, а также для визуального отсчета показаний по твердости. Система нагружения включает в себя шпindelную группу, измерительную и рычажную системы. Шпindelная группа, измерительная и рычажная системы смонтированы в обойме 12.

Шпindelная группа состоит из наконечника 8, ограничителя 9, шпинделя 10, призмы 11 и втулок 13. В измерительную систему входят: ручка 41, индикатор 14, серьга 15, палец 16, рычаг 17, винт 19 и планка 18. Рычажная система включает в себя рычаг 21, призму 20, груз 22, болт 24, рычаг 23.

Грузовая подвеска предназначена для создания основных нагрузок путем навешивания набора тарированных грузов на болт 24 рычага 21. Состоит из подушки 26, серьги 25, гайки 27, штока 28, тяги 35, грузов 30, 33, 34, кронштейна 31 и ручки 38. Нагрузку переключают вручную, изменяя положение ручки 38, жестко соединенной с кронштейном 31.

Привод 36 служит для приложения и снятия основной нагрузки с заданной скоростью и состоит из рычага 37, штока 29, втулки 32, рукоятки 39. Регулирование скорости производят втулкой 32.

Подъемный винт служит для подвода испытуемой детали к наконечнику, отвода ее после окончания испытания и приложения предварительной нагрузки. Состоит из втулки 2, болтов 3, кольца 4, маховика 5, винта 6 и сменных столов 7. Стол поднимают, вращая маховик 5, при этом винт 6 получает поступательное движение вверх или вниз в зависимости от направления вращения маховика.

С помощью опор 1 прибор устанавливают по уровню, который помещают на столе 7.

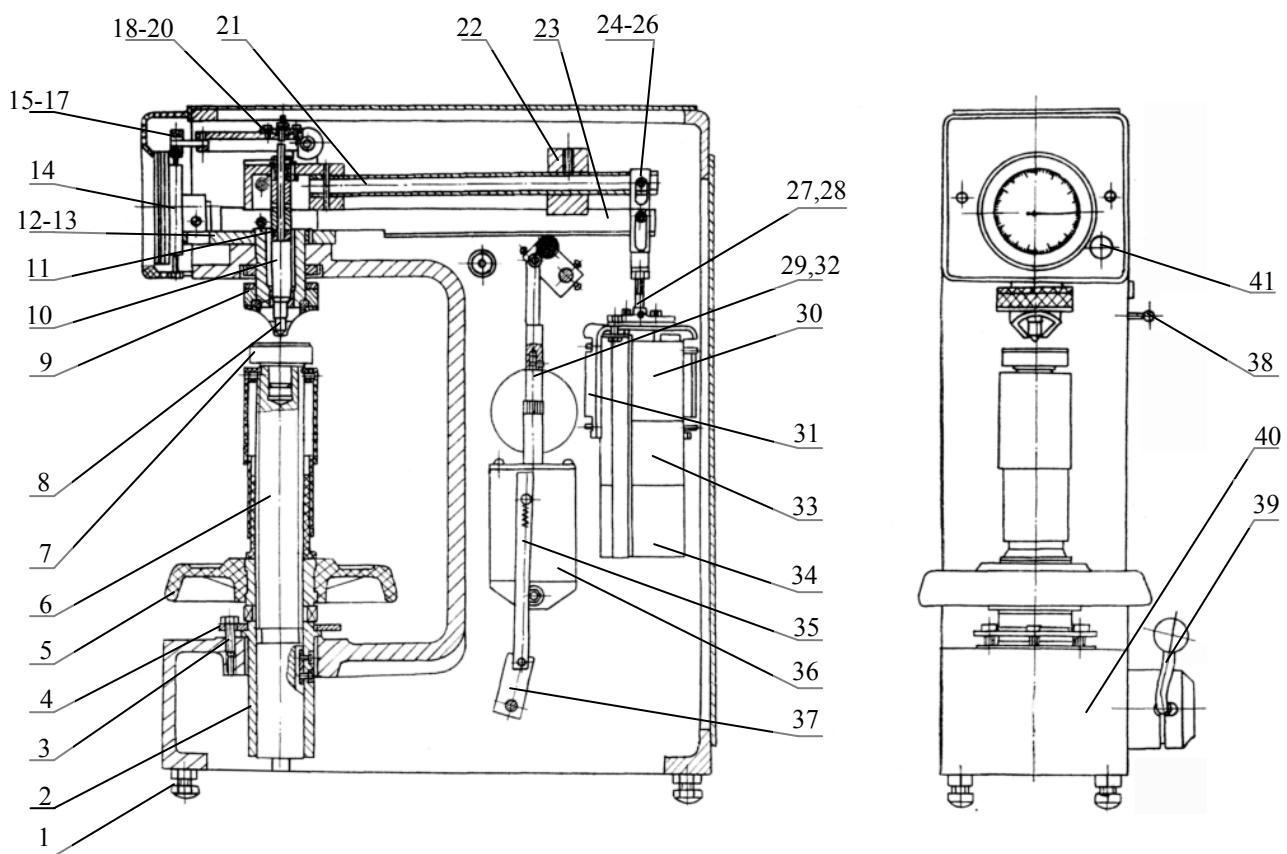


Рисунок 3.8 – Схема прибора для измерения твердости (мод. 2140 TP)

### Порядок определения твердости методом Роквелла

1. Подготовка изделия к испытаниям:

1.1. Для обеспечения достоверных результатов испытаний шероховатость поверхности образца должна быть  $R_a \leq 1,25$  мкм по ГОСТ 2789 – 73.

1.2. Поверхность образца должна быть чистой, сухой и не иметь трещин, выбоин и грубых следов обработки.

1.3. При подготовке поверхности образца необходимо принять меры против возможного изменения твердости вследствие нагрева или наклепа поверхности образца в результате механической обработки.

1.4. Опорные поверхности изделия и стола должны быть очищены от посторонних веществ и плотно прилегать друг к другу.

1.5. На опорных поверхностях не должно быть следов от предыдущих испытаний шариком или конусом.

2. Выберите, в зависимости от предполагаемой твердости изделия, шкалу твердости и соответствующую ей нагрузку и вид наконечника. Установите выбранный наконечник в шпиндель прибора. Алмазный наконечник должен отвечать требованиям ГОСТ 9377 – 81.

3. Установите на стол испытуемое изделие и с помощью маховика 5 поджимайте его к наконечнику 8 до тех пор, пока большая стрелка индикатора не встанет на нуль черной шкалы, а малая – на красную точку. Масса рычагов 17 и 21, масса шпиндельной группы и усилие от индикатора создадут предварительную нагрузку, равную 98,07 Н. Точная установка нуля шкалы напротив конца большой стрелки производится вращением ручки 41.

4. Приложите рукояткой 39 испытательную нагрузку, переместив ее в верхнее положение. Основная нагрузка через рычаг 21 с передаточным отношением 1: 20 передается на шпиндель с наконечником 8, который внедряется в поверхность образца. На окончание внедрения указывает замедление движения большой стрелки индикатора (для мягких изделий) или полная остановка большой стрелки (для твердых изделий).

5. Снимите основную нагрузку с рычага 21 возвратом рукоятки 40 в исходное нижнее положение.

6. Отсчитайте твердость по круговой шкале индикатора. Циферблат прибора имеет две шкалы – черную и красную, красная смещена по отношению к черной на 30 делений. При испытании алмазным конусом отсчеты производят по черной шкале, а стальным шариком – по красной. Угловое перемещение стрелки индикатора на одно деление соответствует глубине вдавливания 2 мкм.

7. Отведите испытуемое изделие от наконечника, вращая маховик против часовой стрелки, и снимите изделие со стола. Для каждого изделия проведите не менее 4-х испытаний. Первое испытание во внимание не принимайте.

## Принцип действия и порядок работы на приборе

Прибор НТ-1 предназначен для неразрушающего контроля твердости изделий из сталей 40Х, 45, 40 ХН и др. после закалки токами высокой частоты. Прибор может быть также использован для контроля твердости изделий из других марок сталей после упрочнения при наличии корреляционной зависимости между амплитудой третьей гармоники магнитной индукции и твердостью. Прибор обеспечивает индикацию результатов контроля в режиме относительных единиц ( $mV$ ) и абсолютных единиц (HRC).

Сущность работы заключается в том, что на контролируемый объект воздействуют синусоидальным магнитным полем, обусловленным током возбуждения электромагнитного преобразователя. Вследствие нелинейных свойств ферромагнетика в измерительной катушке преобразователя наводится сигнал сложной формы, содержащий высшие гармонические составляющие. О твердости контролируемого изделия судят по амплитуде третьей гармоники выходного сигнала преобразователя.

Прибор НТ-1 состоит из конструктивно законченных узлов: модулей – цифрового, аналогового и преобразователя электромагнитного, расположенных внутри корпуса прибора.

## Порядок измерения твердости на приборе НТ-1

1. Подготовить прибор к работе, произведя внешний осмотр корпуса и электромагнитного преобразователя, при необходимости удалите загрязнения. Перед использованием прогрейте прибор в течение 10 мин.

2. Одновременно нажимая кнопки «Режим  $\wedge$ » и «Режим  $\vee$ », выберите единицу измерения (HRC, относительные единицы  $mV$ ).

3. Нажатием кнопки «Режим  $\wedge$ » или «Режим  $\vee$ » выберите марку стали и вид поверхности. При выборе новой марки стали на табло появится присвоенный ей порядковый номер.

4. Для проведения измерения установите преобразователь на контролируемую поверхность детали по нормали к ней. При установке преобразователя на табло появится значение контролируемой величины.

5. По окончании работы необходимо выключить прибор и отключить его от питающей сети.

### Статистическая обработка результатов

Производится с привлечением методов математической статистики в следующей последовательности:

1. Определить среднее значение из  $N$  измерений

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$$

2. Найти погрешность отдельных измерений

$$\Delta H_i = \bar{H} - H_i$$

3. Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений

$$(\Delta H_i)^2$$

4. Определить среднюю квадратическую погрешность серии опытов

$$\Delta S_{\bar{H}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta H_i)^2}{n-1}}$$

5. Определить коэффициент Стьюдента  $t_s(\alpha, N)$  для заданной надежности « $\alpha$ » ( $\alpha=0,95$ ) и числа произведенных измерений « $N$ » по таблице 16.

6. Найти границы доверительного интервала (погрешности результата измерений)

$$\Delta H = t_s(\alpha, n) \cdot \Delta S_{\bar{H}}$$

7. Окончательный результат записать в виде

$$H = \bar{H} \pm \Delta H$$

8. Оценить относительную погрешность результата серии измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \cdot 100\%$$

Таблица 3.16 – Значение  $t_s$  в зависимости от « $f$ » и « $\alpha$ »  
(таблица Стьюдента)

f	$\alpha$					
	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
1	3,078	6,314	12,708	31,821	63,657	636,619
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	2,630	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,601
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959

где  $f = n - 1$  – число степеней свободы,  
 $N$  – число измерений

Таблица 3.17 – Методы определения твердости

Наименование прибора и автор (год)	Принцип действия и форма наконечника	Измеряемый параметр, метод вычисления твердости и ее условная размерность
1	2	3
<b>Динамические</b>		
По методу Герца (1881)	Вдавливание полусферы и плоскости из испытуемого материала до появления следов пластической деформации	$H_{\Gamma} = \frac{6P}{\pi d_{кр}^2}$ , кгс/см <sup>2</sup>
Пресс Бринелля (1900)	Вдавливание стального закаленного шарика диаметром 1,25; 2,5; 5 или 10 мм нагрузками в 15,625 – 3000 кгс в плоскую поверхность испытуемого тела	Твердость вычисляется по диагонали отпечатка как нагрузка, деленная на площадь поверхности отпечатка: $HB = P / \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$ , кгс/см <sup>2</sup>
Монотрон Шора	Вдавливание алмазного шарика диаметром 0,75 мм или стальных шариков диаметром 1/16" и 2,5 мм на стандартную глубину 0,045 мм	Мерой твердости служит нагрузка (кгс), необходимая для вдавливания на стандартную глубину
По методу Лудвика (1907)	Вдавливание стального конуса с углом заострения 90° в плоскость испытуемого тела	Твердость вычисляется как нагрузка, деленная на площадь проекции
Приборы Роквелл, Суперфишиэл-Роквелл (1922)	Вдавливание алмазного конуса с углом заострения 120° или стальных шариков диаметром 1/2", 1/4", 1/8" или 1/16" стандартными нагрузками 150, 100 и 60 кгс (Роквелл) или 45, 30 и 15 кгс (Суперфишиэл-Роквелл)	Мерой твердости служит разность глубин проникновения наконечника при приложении основной и предварительной нагрузки, измеренная в условных делениях
Прибор Виккерса (Смит и Сеналенд, 1925)	Вдавливание алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине между гранями 136° нагрузками в 1 – 120 кгс	Твердость вычисляется по диагонали отпечатка как нагрузка, деленная на площадь поверхности отпечатка $HV = 1,8544 P/d^2$ , кгс/см <sup>2</sup>
По методу М. С. Дрозда (1958)	Вдавливание шарика нагрузкой P, измерение глубины восстановленного отпечатка h и критической нагрузки P <sub>с</sub> , отвечающей переходу от упругого к остаточному отпечатку	$H = (P - P_s) / \pi Dh_{восст}$ , кгс/мм <sup>2</sup>
По методу Мартеля (1985)	Удар стальной пирамидой, укрепленной на падающем бойке	По энергии удара и диагонали отпечатка, как $H = E_1/V$ , кгс/мм <sup>2</sup>

Продолжение таблицы 3.17

1	2	3
Вертикальный копер Николаева	Удар бойка весом 3 кгс, падающего с высоты 530 мм, по стальному шарикю 10 мм, прижатому к изделию	По диаметру отпечатка и тарировочным кривым определяется НВ, кгс/мм <sup>2</sup>
Пружинный прибор Шоппера	Удар стальным шариком диаметром 10 мм с помощью сжатой пружины	По глубине отпечатка определяется НВ, кгс/мм <sup>2</sup>
Пружинный прибор Баумана	Удар бойком со стальным шариком диаметром 5 или 10 мм с помощью сжатой пружины с запасом энергии 0,15 и 0,53 кгс·см	По диаметру динамического отпечатка и тарировочным кривым определяется НВ, кгс/мм <sup>2</sup>
Прибор Польди	Удар молотком по бойку, под которым находится эталон и испытуемое тело с зажатым между ними закаленным стальным шариком диаметром 10 мм	По диаметрам отпечатков на образце и эталоне определяется твердость: $HV_{\text{ОБР}} = 2HV_{\text{ЭТ}} \cdot d_{\text{ЭТ}}^2 / d_{\text{ОБР}}^2, \text{ кгс/мм}^2$
Маятниковый копер Вальцеля (1934)	Удар стальным шариком диаметром 5 или 10 мм, укрепленным на маятниковом копере	Угол отскока в условных единицах
Склероскоп Шора	Падение бойка весом 2,3 гс с коническим алмазным наконечником с высоты 254 мм	Число условных единиц высоты отскока бойка
Маятник Герберта	Качание маятника весом 2 или 3 кгс, опирающегося на поверхность испытуемого тела стальным или рубиновым шариком диаметром 1 мм	Время 10 односторонних качаний маятника в секунду или амплитуда одного качания в условных единицах
Маятниковый склерометр Кузнецова (1931)	Качание маятника весом 1 кгс, опирающегося двумя стальными наконечниками или шариками на испытуемое тело	Время затухания колебаний до заданной амплитуды
<b>Статические</b>		
По методу Липса (1936)	Вдавливание пирамиды Виккерса 136° собственным весом индентора (35 г) и давлением воздуха на поршень	Твердость определяется как отношение нагрузки (в гс) к площади поверхности отпечатка (по диагонали в мкм) $HV = 1854,4 P / d_2, \text{ кгс/мм}^2$
Микротвердость Цейсса – Ганеманна (1940)	Вдавливание пирамиды Виккерса нагрузкой 2 – 100 гс, создаваемой плоскими пружинами	То же
ПМТ-2, ПМТ-3 (Хрущов, Беркович)		



1	2	3
<b>Определение твердости царапанием</b>		
По методу Кнуппа, Петерса, Эмерсона (1939)	Вдавливание алмазного наконечника Кнуппа (пирамида с основанием в виде сильно вытянутого ромба и углами между ребрами 130° и 172° 30') с нагрузкой 500 – 400 гс	Твердость определяется как отношение нагрузки (в кгс) к площади поверхности невосстановленного отпечатка, исчисляемой по длинной диагонали $d$ (в мм): $H_K = 12,87 \cdot P/d^2, \text{ кгс/мм}^2$
По методу Берковича	Вдавливание алмазной трехгранной пирамиды с углом между гранью и осью 65°	$H = 2092 \cdot P/a^2 = 1570 P/l^2, \text{ кгс/мм}^2$
По методу Егорова и др. (1970)	Вдавливание алмазного лезвия, образованного двумя цилиндрами радиусом 2 мм, оси которых пересекаются под углом 136°	$H = 3 \cdot R \cdot \sin \alpha \cdot P/l^2 = 4167960 P/l^3, \text{ кгс/мм}^2$
По методу Калей, Хрушова, Скворцова, АLEXИНА, Терновского, ШОРОХОВА (1968 – 1973)	Вдавливание алмазной 136° пирамиды с регистрацией нагрузки и глубины погружения индентора в процессе испытания	$H = 18544 \cdot P/d^2, \text{ кгс/мм}^2$
Испытание напильником (Барб, 1640)	Царапание испытуемого тела стальным напильником	Если тело царапается, оно мягче напильника, если не царапается, то тверже или имеет равную твердость
Испытание по Моосу (1822)	Царапание испытуемого тела набором 10 эталонных минералов (тальк, гипс, альцинит, флюорит, апатит, ортоклаз, кварц, топаз, корунд, алмаз)	Твердость выражается числом 10-и бальной шкалы
Прибор Мартенса (1890)	Царапание алмазным конусом с углом заострения 90° при нагрузках от 2 до 50 гс	Твердость выражается нагрузкой, отвечающей ширине царапины 10 мкм
Микрохарактеризатор Бирмаума (1920)	Царапание углом алмазного куба при нагрузке 3 гс	$H = 10^4 / b^2, \text{ где } b \text{ – ширина царапины в мкм}$
Прибор Хенкинса (1923)	Царапание V-образным алмазом с усилием 1 – 150 гс	$H = P/b^2, \text{ кгс/мм}^2$
Склерометр О'Нейля (1928)	Царапание полусферическим алмазом диаметром 1 мм	Твердость равна давлению, соответствующему царапине шириной 0,1 мм
ПМТ-3 (Григорович, 1949)	Царапание алмазной четырехгранной пирамидой с углом между гранями 136°	Твердость равна среднему контактному давлению $H = 4 \cdot P/b^2, \text{ кгс/мм}^2$
ПМТ-3 (Беркович)	Царапание трехгранной пирамидой	$H = 3708 \cdot P/b^2, \text{ кгс/мм}^2$

Таблица 3.18 – Сравнительные значения твердости

Роквелл			Бринелль		Виккерс Н <sub>V</sub> , МПа
HRC <sub>Э</sub>	HRA	HRB	Ø отпечатка	HB	
1	2	3	4	5	6
72	89	–	2,20	780	12240
70	87	–	2,25	745	11160
68	85,5	–	2,30	712	10220
66	84,5	–	2,35	682	9410
64	83,5	–	2,40	653	8680
62	82,5	–	2,45	627	8040
60	81,0	–	2,50	601	7460
58	80,0	–	2,55	578	6940
56	79,0	–	2,60	555	6490
54	78,0	–	2,65	534	6060
52	77,0	–	2,70	514	5870
50	76,0	–	2,75	495	5510
49	75,5	–	2,80	477	5340
48	74,5	–	2,85	461	5020
46	73,5	–	2,90	444	4730
45	73,0	–	2,95	429	4500
44	72,5	–	3,00	415	4350
42	71,5	–	3,05	401	4120
41	71,0	–	3,10	388	4010
40	70,5	–	3,15	375	3900
39	70,0	–	3,20	363	3800
38	69,0	–	3,25	352	3610
37	68,0	–	3,30	341	3440
36	68,5	–	3,35	331	3350
35	68,0	–	3,40	321	3200
34	67,6	–	3,45	311	3120
33	67,0	–	3,50	302	3050
31	66,0	–	3,55	293	2910
30	65,5	–	3,60	286	2850
29	65,0	–	3,65	277	2780
28	64,5	–	3,70	269	2720
27	64,0	–	3,75	262	2610
26	63,5	–	3,80	255	2550
25	63,0	–	3,85	248	2500
24	62,5	100	3,90	241	2400
23	62,0	99	3,95	235	2350
22	61,5	98	4,00	228	2260

Продолжение табл. 3.18

1	2	3	4	5	6
21	61,0	97	4,05	223	2210
20	60,0	97	4,1	217	2170
19	59,5	96	4,15	212	2130
18	59,0	95	4,2	207	2090
16	58,0	94	4,25	202	2010
12	57	93	4,3	196	1970
11	–	92	4,35	192	1900
–	–	91	4,4	187	1860
–	–	96	4,45	183	1830
–	–	99	4,5	179	1770
–	–	87	4,55	174	1740
–	–	86	4,6	170	1710
–	–	85	4,65	166	1650
–	–	84	4,7	163	1620
–	–	83	4,75	159	1590
–	–	82	4,8	156	1540
–	–	81	4,85	153	1520
–	–	80	4,9	149	1490
–	–	78	4,95	146	1470
–	–	76	5,0	143	1440
–	–	76	5,05	140	–
–	–	75	5,1	137	–
–	–	74	5,15	134	–
–	–	72	5,2	131	–
–	–	71	5,25	128	–
–	–	69	5,3	126	–
–	–	69	5,35	124	–
–	–	67	5,4	121	–
–	–	66	5,45	118	–
–	–	65	5,5	116	–
–	–	64	5,55	114	–
–	–	62	5,6	112	–
–	–	61	5,65	109	–
–	–	59	5,7	107	–
–	–	58	5,75	105	–
–	–	57	5,8	103	–
–	–	56	5,85	101	–
–	–	54	5,9	99	–
–	–	53	5,95	97	–
–	–	52	5,6	96	–

## 6 ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ ПО МОДУЛЮ 3

Укажите номер правильного ответа:

### 1. В теории надежности установлены три ее формы:

1. Конструкторская, изготовительная, рабочая.
2. Проектная, конструктивная, производственная, эксплуатационная.
3. Изготовительная, технологическая, конструкторская.
4. Исследовательская, конструкторская, при испытании техники .

### 2. Проектная надежность -

1. Надежность по техническим характеристикам.
2. Надежность получается при изготовлении.
3. Надежность закладывается при конструировании.

### 3. Производственная надежность-

1. Выбор долговечных и прочных материалов для деталей машин и соединений.
2. Реализация конструктивной надежности при изготовлении.
3. Надежность функционирования машины.

### 4. Эксплуатационная надежность-

1. Надежность функционирования машины.
2. Реализация конструктивной надежности.
3. Производственно-технологическая надежность.

### 5. Основные направления повышения надежности отремонтированных машин:

1. Конструктивные, технологические, эксплуатационные, повышение надежности при ремонте.
2. Повышение надежности, долговечности, ремонтпригодности, работоспособности и сохраняемости.
3. Проведение предремонтного диагностирования в мастерских хозяйств; обеспечение сохраняемости ремонтного фонда; выполнение разборочных работ без повреждения и разукomплектованности; выполнение качественной очистки машин, агрегатов, деталей; контроль и дефектация деталей.

### 6. Резервирование в надежности это –

1. Последовательное соединение элементов системы для повышения надежности.
2. Замена одного элемента системы более надежным.
3. Применение дополнительных средств с целью сохранения работоспособности объекта при отказе одного или нескольких элементов.

### 7. Резервирование в надежности бывает следующих видов:

1. Резервное, сменное, взаимосвязанное, дублирующее.
2. Постоянное, резервирование замещением, общее, отдельное и смешанное.
3. Кратковременное, длительное, постоянное и эксплуатационное.

### 8. Постоянное резервирование – это

1. Когда резервные элементы постоянно находятся вместе с объектом в нерабочем состоянии.

2. Когда резервные элементы участвуют в функционировании объекта наравне с основным.

3. Когда резервные элементы находятся на складе мастерских.

**9. Резервирование замещением -это когда.....**

1. Заменяемые элементы узлов и механизмов имеются на складе.

2. Функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента.

3. Функции основного элемента передаются резервному в процессе работы при увеличении нагрузок.

**10. Общее резервирование -это**

1. Резервирование объекта в целом.

2. Резервирование отдельных элементов объекта.

3. Резервирование отдельной группы деталей объекта.

**Укажите номера всех правильных ответов:**

**1. Раздельное резервирование включает в себя:**

1. Резервирование отдельных объектов системы.

2. Резервирование отдельных элемента.

3. Замена основного элемента резервным.

4. Резервирование группы элементов объекта.

**2. В надежности технических систем применяются следующие виды прогнозирования:**

1. Статическая обработка параметров в процессе разработки эксплуатации машин.

2. Среднестатистическое прогнозирование .

3. Аппроксимация параметров при диагностировании и эксплуатации.

4. Прогнозирование по реализации изменения параметров.

**3. При расчете ресурса технических систем применяется:**

1. Прогнозирование по реализации изменения параметров.

2. Среднестатистическое прогнозирование.

3. Прогнозирование методами моделирования.

**4. Технический контроль на производстве -**

1. Обязательный элемент производственного переоснащения.

2. Оценка качества труда производителей.

3. Один из важнейших элементов системы управления качеством продукции.

**5. Технический контроль по видам классифицируется:**

1. Приемочный и входной

2. Выборочный периодический

3. По стадиям технологического процесса, времени проведения, степени охвата.

4. По времени воспроизведения.

5. По степени охвата.

**6. Технический контроль по стадиям технологического процесса классифицируется:**

1. Выборочный, летучий, периодический.
2. Входной, операционный.
3. Непрерывный и периодический.
4. Приемочный и инспекционный.

**7. Технический контроль по степени охвата бывает:**

1. Летучий и периодический.
2. Операционный инспекционный.
3. Сплошной и выборочный.

**8. Технический контроль по времени проведения бывает:**

1. Инспекционный, входной и приемочный.
2. Летучий, непрерывный.
3. Входной, выборочный и технологический.
4. Периодический.

**9. Стандартизация -**

1. Процесс установления и применения стандартов.
2. Процесс образмеривания группы изделий.
3. Установление общих параметров изделий.

**Дополните:**

1. Сертификация – действие (.....), оказывающее соответствие изделия нормативному документу или стандарту.

2. Для стандартов по надежности предложено три уровня: (.....), стандарты на укрупненные группы однородной продукции; стандарты на группы однородной продукции конкретного вида.

3. Испытание технических систем, машин и механизмов – это (.....) определение характеристик и свойств объекта под заданной нагрузкой после его изготовления или ремонта.

4. Ускоренные испытания на надежность подразделяются на (...) и эксплуатационные.

5. Стендовые ускоренные испытания бывают (.....).

6. Полигонные ускоренные испытания проводятся (.....) и искусственных (треках) полигонах.

7. Специальная организация эксплуатационных ускоренных испытаний заключается в (.....), перемещении изделия по почвенно-климатической зоне, сокращении простоя, в условиях агротехнических сроков.

8. Ускоренные испытания – испытания, проводимые в условиях (.....) при специальной организации.
9. Испытания по назначению классифицируются как (.....) сравнительные и контрольные.
10. Испытания по стадиям разработки классифицируются как (.....), предварительные и приемосдаточные.
11. Испытания по стадиям производства классифицируют как (.....), приемосдаточные, периодические, инспекционные, сертификационные.

**Установите соответствие:**

1. Резервирование технических систем

- |  |                  |
|--|------------------|
| 1) Ходовые системы гусеничных машин имеют резервирование .....                                       | а) общее         |
| 2) Задний мост грузового автомобиля имеет резервирование .....                                       | б) отдельное     |
| 3) Когда в резерве держат «N» элементов и при отказе основного элемента его заменяют резервным ..... | в) постоянное    |
|  | г) дублированием |
|  | д) замещением    |
- 1 – .....; 2 – .....; 3 – .....

2. Ресурс

- |  |                       |
|--|-----------------------|
| 1) Нарботка объекта от начала эксплуатации или капремонта до предельного состояния – ..... | а) остаточный         |
| 2) Ресурс объекта до списания – .....  | б) технический ресурс |
| 3) Ресурс объекта от момента диагностики до предельного состояния – .....                  | в) полный             |
|  | г) доремонтный        |
- 1 – .....; 2 – .....; 3 – .....

3. Стандартизация

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| 1) Нормативной базой для создания любой продукции являются .....     | а) нормативные показатели |
| 2) Элементом в системе управления качеством продукции является ..... | б) стандарты              |
|  | в) технический контроль   |
|  | г) сертификация           |
- 1 – .....; 2 – .....

4. Методы повышения надежности.

- |  |                     |
|--|---------------------|
| 1) Обеспечение необходимой точности и качества деталей при изготовлении относится к методам .....            | а) эксплуатационным |
| 2) Выбор долговечных материалов деталей и рациональных их сочетаний в парах трения относится к методам ..... | б) производственным |
| 3) Обкатка новых машин в хозяйствах относится к методам .....  | в) технологическим  |
|  | г) конструктивным   |

1 – .....; 2 – .....; 3 – .....

5. Испытания на надежность.

- |  |                      |
|--|----------------------|
| 1) Испытания техники в лабораториях изготовителя при разработке называется ..... | а) стендовыми        |
| 2) Испытания техники в процессе ее эксплуатации называются .....                 | б) эксплуатационными |
| 3) Испытания техники на стендах называются .....                                 | в) лабораторными     |
|  | г) ускоренными       |
|  | д) нормальными       |

1 – .....; 2 – .....; 3 – .....



## ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕФЕРАТОВ И ТЕСТИРОВАНИЯ

Суммарная оценка результатов обучения по дисциплине осуществляется в рамках 3-х модулей посредством дифференцированных тестов и заданий каждого модуля.

Тесты и задания разработаны с учетом следующих требований и оценок:

- оценка «удовлетворительно»  
соответствует по пятибалльной системе – 3;  
по десятибалльной системе – 4,5,6;

- оценка «хорошо»  
соответствует по пятибалльной системе – 4;  
по десятибалльной системе – 7,8.

- оценка «отлично»  
соответствует по пятибалльной системе – 5;  
по десятибалльной системе – 9, 10.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ивашко, В.С. Надежность технических систем : курс лекций / В.С. Ивашко, В.В. Кураш, П.Е. Круглый.– Мн.: БГАТУ, 2003.
2. Основы надежности сельскохозяйственной техники : курс лекций / В.С. Ивашко [и др.]– Мн.: БГАТУ, 2001.
3. Надежность и ремонт машин / под ред. В.В. Курчаткина.– М.: Колос, 2000.
4. Машиностроение : энциклопедия. Т. 4. Надежность машин / В.В. Ключев [и др.]– М.: Машиностроение, 2001.

Учебное издание

## **НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Учебно-методический комплекс для студентов специальностей  
74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве»,  
74 06 06 «Материально-техническое обеспечение  
агропромышленного комплекса»*

Составители:

**Ивашко Виктор Сергеевич,  
Кураш Вячеслав Владимирович,  
Кудина Анна Вячеславовна**

Ответственный за выпуск *В.С. Ивашко*

*Издано в редакции авторов*

Подписано в печать 11.06.2008 г. Формат 60×84<sup>1/8</sup>  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 8,4.  
Уч.-изд. л. 7,6. Тираж 100 экз. Заказ 541.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский государственный аграрный технический университет  
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006. ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.  
220023, г. Минск, пр. Независимости, 99, к. 2.