

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НОВГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ЯРОСЛАВА МУДРОГО

---

# **ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАШИН**

*Учебное пособие*

ВЕЛИКИЙ НОВГОРОД  
2017

Р е ц е н з е н т ы:

кандидат технических наук, доцент Н.Н. Заводов,  
кандидат технических наук, доцент И.И. Зубрицкас

Н17 Основы надёжности и работоспособности машин: Учебное пособие /автор- сост. Я. Ф. Ракин; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2017. – 110 с.

Учебное пособие содержит сведения о понятиях надёжность, работоспособность и ремонт машин. Приводятся обобщенные материалы о влиянии структуры, усталости, трения, изнашивания, смазочных материалов, коррозионных процессов на срок службы и долговечность машин. Рассматриваются эксплуатационные и ремонтные мероприятия, влияющие на повышение надёжности и работоспособности машин.

Предназначено для студентов по направлениям подготовки 23.03.03. – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов (профиль подготовки: автомобили и автомобильное хозяйство) и 35.03.06. – Агроинженерия (квалификация – бакалавр).

ББК 40.72я73

© Новгородский государственный  
университет, 2017

© Я. Ф. Ракин, составление, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях возрастает значение надёжности, основного и определяющего показателя качества тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин. Чем выше надёжность машины, тем выше её качество, то есть выше её потребительские свойства и ниже затраты на её эксплуатацию.

Первоначальный уровень надёжности закладывается в машину в процессе её проектирования, создания опытного образца, последующего испытания, доводки и серийного изготовления.

В процессе эксплуатации происходит реализация первоначальной надёжности машины, и в силу различных естественных причин (изнашивания сопряжений деталей, деформаций, усталостных разрушений и коррозионных процессов) возникают неисправности (отказы) машины, а в результате нарушается её работоспособность и исправность.

Для поддержания и восстановления работоспособности и исправности машин в процессе эксплуатации применяется планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта, включающая ежесменное (ежедневное) и периодические ТО, текущие и капитальные ремонты, сроки проведения которых уточняются и корректируются в зависимости от конструктивных особенностей и технического состояния машины.

Оценка технического состояния проводится, как правило, диагностированием специальными инструментальными методами, в результате которого выявляют значения технических параметров механизмов, агрегатов и машин в целом и назначают соответствующий вид ремонтно-обслуживающего воздействия.

В учебном пособии рассматриваются основные сведения о надёжности, трении и изнашивании, приводятся термины и определения, характеризующие качественную сторону надёжности машин, а также количественные показатели, оценивающие качество эксплуатации и ремонта машины или её элемента.

Уделено достаточное внимание вопросам влияния смазочных материалов на работоспособность машин и управлению надёжностью и работоспособностью в течение жизненного цикла машин.

Автор надеется, что данные систематизированные материалы будут полезны студентам высших учебных заведений по направлениям подготовки 23.03.03. – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, профиль подготовки: автомобили и автомобильное хозяйство и 35.03.06. – Агроинженерия (квалификация – бакалавр).

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.

### 1.1 Основные понятия о надежности.

Каждая новая машина (изделие) имеет определённые показатели надёжности и работоспособности, характеризующие в основном её качество. Качество машины – это совокупность показателей, определяющих степень пригодности машины для использования по назначению. Эти показатели характеризуются эксплуатационными параметрами (мощностью, скоростью, тяговыми усилиями и др.), надёжностью, технологичностью, уровнем эстетики и эргономики, степенью стандартизации, унификации и взаимозаменяемости (рис. 1).

Понятие «надёжность» определяется государственным стандартом ГОСТ 27002. Надёжность в технике. Термины.

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

Таким образом, надёжность является одним из главных показателей при оценке качества любого объекта, и в частности, нового или капитально отремонтированного трактора, комбайна, автомобиля. Надёжность автомобиля в соответствии с государственным стандартом включает в себя четыре основных свойства: долговечность, безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость.

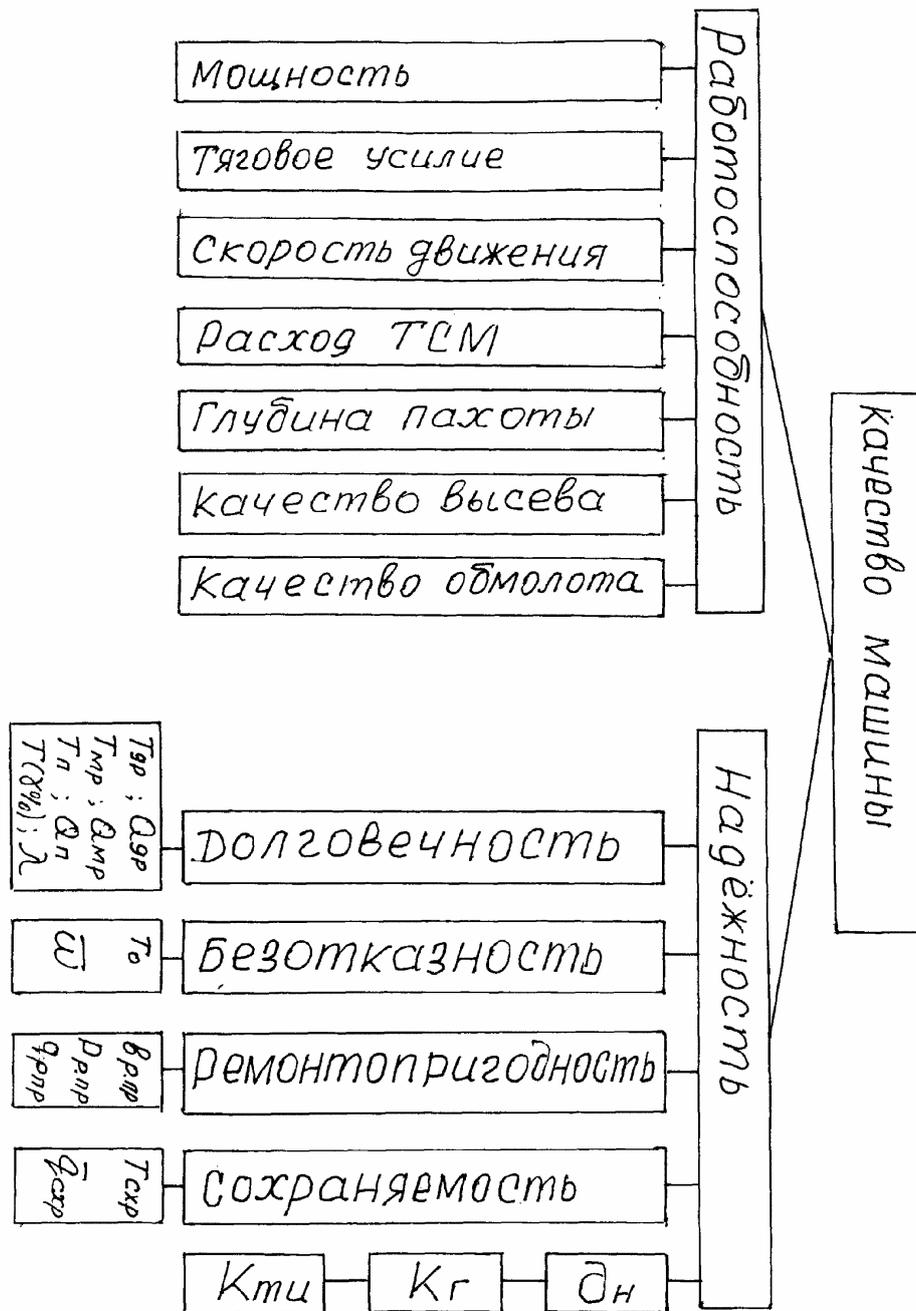
**Долговечность** – это длительность работы машины (элемента) до предельного состояния.

**Безотказность** – длительность непрерывной работы машины (элемента) до появления первого или очередного отказа.

**Ремонтпригодность** – приспособленность машины (элемента) к проведению технического обслуживания (ТО), обнаружению и устранению отказов.

**Сохраняемость** – свойство машины (элемента) сохранять работоспособность при хранении и транспортировке.

Долговечность и безотказность машины в процессе ее изготовления обеспечивают подбором материалов для изготовления деталей, упрочнением их трущихся поверхностей, выбором класса точности и системы допусков и посадок, выбором оптимальных сортов топлива и смазочных материалов и др.



**Рис. 1.** Показатели качества машины

Ремонтопригодность машины обеспечивается системой конструктивных мероприятий, предусматривающих: легкость проведения разборочно-сборочных работ в процессе эксплуатации и ремонта машины; экономическую целесообразность восстановления ресурса быстроизнашивающихся деталей и сопряжений; легкость и малый объем операций ТО; высокий уровень унификации узлов и механизмов; сокращение количества типоразмеров крепежных деталей; наличие центровочных отверстий и установочных плоскостей на деталях, подлежащих ремонту и т. п. Для лучшей сохраняемости и приспособляемости машины к транспортировке

применяют стойкие антикоррозионные покрытия, специальные заглушки и пробки, предохраняющие рабочие полости машины от попадания влаги и пыли при хранении, высококачественные лакокрасочные покрытия, разгружающие и демпфирующие устройства и т. д. Это очень важный показатель, особенно для комбайнов, используемых в течение года очень малый промежуток времени (месяц-полтора).

**Наработка** – продолжительность или объем работы объекта. Нарботку измеряют в различных единицах (время, площадь, масса и др.). Различают суточную, месячную, годовую наработку, наработку до первого отказа, наработку между отказами, заданную наработку и т. д.

Количественно долговечность оценивают техническим ресурсом и сроком службы.

**Технический ресурс (ресурс)** – наработка объекта от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до наступления предельного состояния. Различают доремонтный, межремонтный, назначенный, гамма-процентный, средний ресурс, средний ресурс до списания и др.

При оценке показателей долговечности принято указывать вид воздействия после наступления предельного состояния.

**Средний ресурс до ремонта** – средний ресурс от начала эксплуатации объекта до его первого ремонта.

**Средний ресурс между ремонтами** – средний ресурс между смежными ремонтами объекта.

**Средний ресурс до списания** – средний ресурс объекта от начала эксплуатации до его списания, обусловленного предельным состоянием.

**Гамма-процентный ресурс ( $t_\gamma$ )** – наработка, в течение которой объект не достиг предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

При известном распределении ресурса с плотностью вероятностей  $f(t)$ , гамма-процентный ресурс  $t_\gamma$  находится из условия:

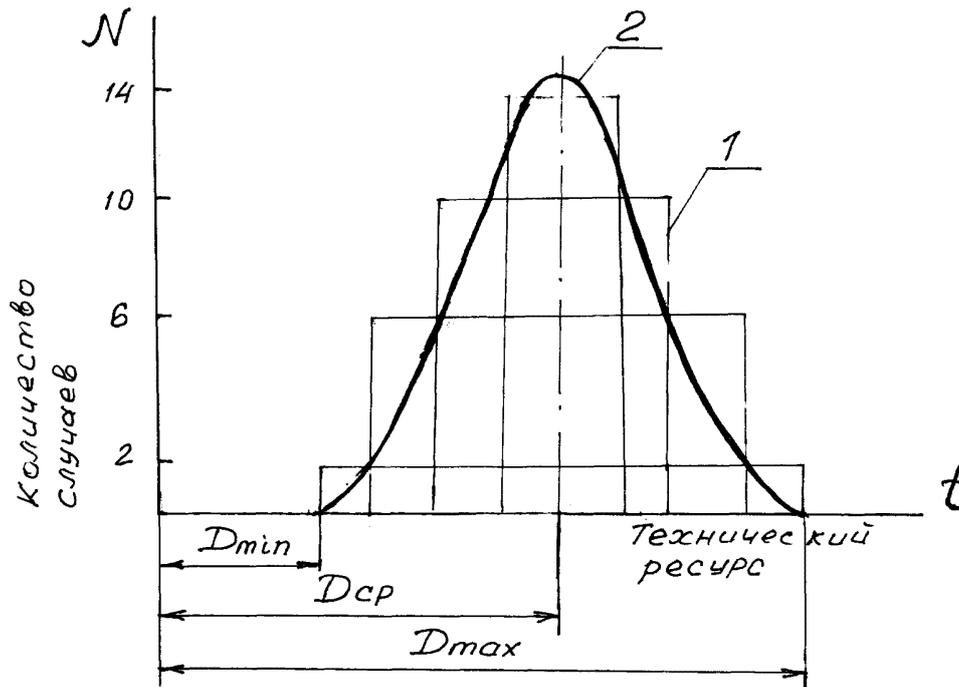
$$P(t_\gamma) = \int_{t_\gamma}^{\infty} f(t) dt = \gamma/100, \quad (1)$$

Для случая показательного (экспоненциального) распределения ресурсов применяя условие (1) получаем

$$\boxed{\bar{t} = 1/\lambda} \quad t_\gamma = 1/\lambda(-\ln \gamma/100), \text{ если } \gamma = 90\%,$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов;  $t_\gamma = 0,105/\lambda = 0,105 \bar{t}$ .

Для определения полного технического ресурса по статистическим данным строят гистограммы и кривые распределения вероятностей (рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение вероятностей отказов:  
1 – гистограмма; 2 – кривая распределения вероятностей машин

Средний технический ресурс можно подсчитать по формуле

$$D_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N D_i \cdot n_i}{N},$$

где  $D_i$  – полный технический ресурс машины;

$n_i$  – количество машин с полным техническим ресурсом;

$N$  – общее количество машин.

Технический ресурс может быть выражен наработкой в часах работы, кг израсходованного топлива, км пробега автомобилей, кг переработанного сырья и тому подобными единицами.

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала до предельного состояния. Различают средний срок службы между ремонтами, средний срок службы до ремонта, средний срок службы до списания.

## 1.2. Термины и определения.

Познакомимся с основными терминами и определениями, характеризующими техническое состояние машин в процессе эксплуатации, то есть терминами, определяющими качественную сторону надежности машин

(качество выполнения работ и экономическую эффективность использования машин).

**Исправное состояние** – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической и (или) конструкторской документацией.

**Неисправное состояние** – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно-технической и (или) конструкторской документацией.

**Работоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям, установленным нормативно-технической и (или) конструкторской документацией.

**Неработоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным нормативно-технической и (или) конструкторской документацией.

При анализе терминов «исправность» и «работоспособность» видно, что в понятие «исправность» заложено более глубокое содержание.

Если машина исправная, то она должна полностью отвечать всем требованиям технических условий на ее изготовление. Машина будет работоспособной, если она по ряду показателей (не нарушающих нормальное функционирование) и не отвечает требованиям технических условий на изготовление, например, по внешнему виду. Таким образом, машина может быть работоспособной, но неисправной. Если же машина исправная, то она обязательно будет и работоспособной.

**Предельное состояние** – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена во избежание аварийной поломки или резкого ухудшения технических или экономических характеристик машины, а также вследствие неустранимого нарушения требований техники безопасности или необходимости проведения ремонта. Признаки, по которым оценивают предельное состояние, устанавливаются нормативно-технической документацией (НТД), например, для тракторов, комбайнов, автомобилей – техническими требованиями на ремонт.

**Повреждение** – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта или его составных частей при сохранении работоспособного состояния. Повреждение может быть незначительным, при котором нарушается исправность, но сохраняется работоспособность. При значительном повреждении машина теряет работоспособность и наступает отказ.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Признаки отказов определяются НТД на данный объект. По природе происхождения отказы делятся на расчетно-конструкторские; производственно-технологические и эксплуатационные.

**Расчетно-конструкторские отказы** возникают в результате нарушения установленных правил и норм проектирования (неправильно рассчитаны нагрузки, допуски, выбран материал и т. д.).

**Производственно-технологические отказы** возникают вследствие нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, например, при неправильно назначенных режимах механической или термической обработки деталей, при ошибках в процессе сборки, обкатки и т. д.

**Эксплуатационные отказы** возникают в результате нарушения правил и условий эксплуатации, например, несоблюдения периодичности и объемов ТО, длительная работа в режимах перегрузки, неправильное переключение передач и т. д.

**Устранением отказа** называется технологический процесс восстановления работоспособности машины (узла, агрегата).

**Техническое обслуживание (ТО)** – это комплекс операций по поддержанию работоспособного или исправного состояния объекта при использовании по назначению, ожидании использования, хранении и транспортировании.

**Ремонт** называется технологический процесс восстановления работоспособности, исправности и межремонтного ресурса машины (узла, агрегата).

Иначе **ремонт** – это комплекс операций по восстановлению исправного и работоспособного состояния объекта, а также восстановлению ресурсов объектов или их составных частей.

**Отказы по взаимосвязи** могут быть зависимыми и независимыми; по доступности обнаружения – очевидными или скрытными; по следствиям – тягчайшими, тяжелыми, средними и незначительными. По характеру возникновения отказы делятся на постепенные и внезапные.

**Постепенные отказы** наступают после длительной наработки и постепенного изменения размеров и формы деталей, то есть являются следствием износа и старения деталей. В сопряжении увеличиваются зазоры, изменяются физико-механические свойства материала деталей. Постепенные отказы автомобильной и сельскохозяйственной техники благодаря наличию диагностических средств можно с достаточной степенью вероятности прогнозировать.

**Внезапные отказы** наступают неожиданно, внезапно и являются следствием разрушения деталей от концентрации нагрузок как внутреннего, так и наружного воздействия. Причиной таких отказов обычно являются недостаточно правильные расчеты деталей на прочность или недостатки технологического процесса изготовления машины.

### 1.3. Оценочные показатели надежности

Качество машины или ее элемента, а также качество технической

эксплуатации и ремонта оценивается совокупностью количественных показателей, характеризующих надежность и работоспособность машины.

**Показатели надежности** – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. По ГОСТ 27.002-89 показатели надежности подразделяются на:

- **единичный показатель надежности** – показатель надежности, относящийся к одному из свойств, составляющих надежность объекта;
- **комплексный показатель надежности** – показатель надежности, относящийся к нескольким свойствам, составляющим надежность объекта.

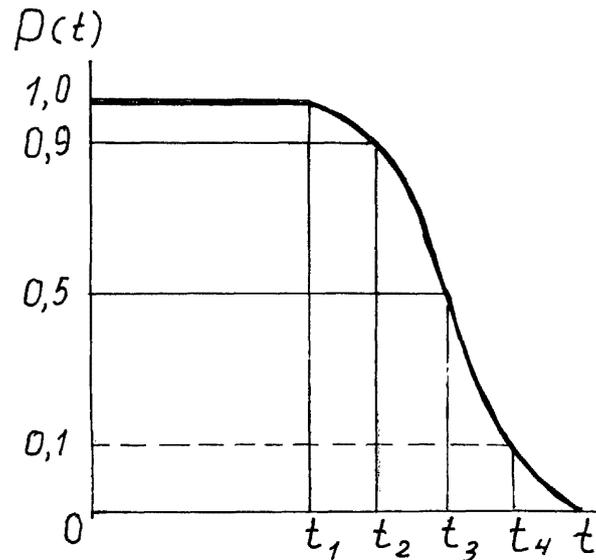
К единичным показателям относятся, например, такие, как вероятность безотказной работы, средний ресурс и средний срок службы машины, наработка на отказ и др. К комплексным – коэффициент готовности, удельная трудоемкость ТО, удельная суммарная стоимость ТО и ремонта машины и др.

На основании единичных показателей надежности машиностроительные и ремонтные предприятия выявляют слабые звенья машины и повышают качество продукции. Исходя из комплексных показателей, машино-испытательные станции (МИС) разрешают или запрещают серийный выпуск новых машин, а потребитель оценивает техническую и экономическую целесообразность приобретения новых машин и планирует их производственную деятельность, включая простои, затраты труда и средства на ТО и ремонт. Применительно к МТП сельского хозяйства комплексные экономические показатели имеют доминирующее значение, так как потребителя сельскохозяйственной техники в первую очередь интересует стоимость эксплуатации машин, длительность вынужденных простоев по техническим причинам и т. п. Показатель надежности может иметь размерность (например, ресурс, наработка на отказ), а может и не иметь (например, вероятность безотказной работы).

Рассмотрим некоторые показатели надежности, имеющие отношение к ремонтируемым объектам.

**Вероятность безотказной работы** – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не произойдет.

В связи с тем, что отказы отдельных элементов во времени или по наработке возникают случайно, время наступления можно определить только с определенной степенью вероятности. Как видно из рис. 3, вероятность безотказной работы с увеличением времени падает: при  $t_1$  она равна 1,0, а при  $t_4$  – 0,1.



**Рис. 3.** Функция вероятности безотказной работы в зависимости от наработки объекта

Для практических целей вероятность безотказной работы за некоторый промежуток времени можно определить статистическим методом по формуле

$$\bar{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{n_0},$$

где  $\bar{P}(t)$  – статистическая оценка вероятности безотказной работы;

$N_0$  – число изделий в начале испытания;

$n(t)$  – число изделий, отказавших за интервал времени (наработки)  $t$ .

**Средняя наработка до отказа** – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Среднюю наработку до первого отказа можно определить статистическим методом по формуле

$$t_{CP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i,$$

где  $t_i$  – наработка  $i$ -го изделия до первого отказа ( $i=1, 2, \dots, N$ );

$N$  – количество изделий (объектов).

**Параметр потока отказов** – плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени. Параметр потока отказов представляет собой отношение числа отказавших в единицу времени изделий к общему числу изделий, участвующих в эксперименте при условии, что отказавшие изделия заменяют новыми. По статистическим данным параметр потока отказов определяется по формуле

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N\Delta t},$$

где  $n(t)$  – число отказавших изделий в интервале времени от  $t$  до  $t + \Delta t$ ;  
 $N$  – число испытуемых (находящихся под наблюдением) изделий;  
 $\Delta t$  – интервал времени.

Функция потока отказов в зависимости от наработки объекта показана на рис. 4.

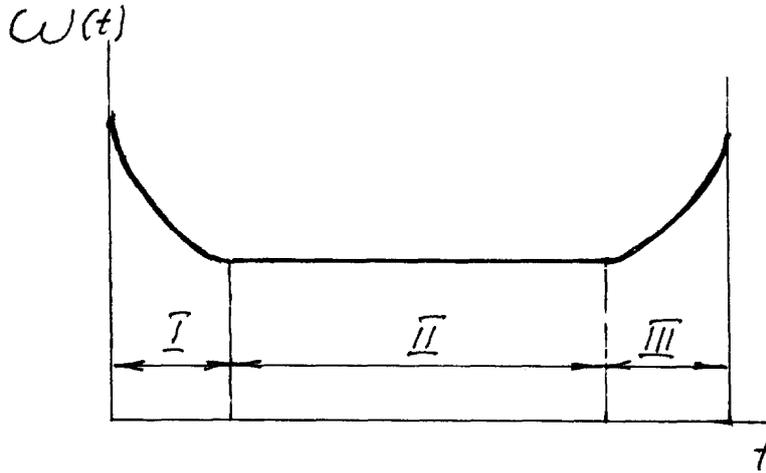


Рис. 4. Функция потока отказов в зависимости от наработки объекта

**Наработка на отказ** – отношение наработки объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

По статистическим данным наработку на отказ определяют по формуле

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N m_i},$$

где  $N$  – количество наблюдаемых машин;

$t_i$  – наработка  $i$ -й машины за время наблюдения ( $i=1, 2 \dots N$ );

$m_i$  – число отказов  $i$ -й машины за время наблюдения ( $i=1, 2 \dots N$ ).

**Коэффициент готовности ( $K_r$ )** – вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусмотрено. Коэффициент готовности по статистическим данным определяется по формуле

$$\bar{K}_r = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{N \cdot T_{РАБ}},$$

где  $\xi_i$  (кси) – суммарное время пребывания  $i$ -го объекта в работоспособном состоянии ( $i=1, 2 \dots N$ );

$T_{РАБ}$  – продолжительность эксплуатации, состоящей из последовательно чередующихся интервалов времени работы и восстановления, исключая простои на проведение плановых ремонтов и ТО.

Коэффициент готовности показывает долю, которую составляет время работы от суммарного времени, расходуемого на работу и восстановление. Он характеризует одновременно два различных свойства объекта: его безотказность и ремонтпригодность, а поэтому является комплексным показателем.

**Коэффициент технического использования ( $K_{ТИ}$ )** – это отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных ТО и временем ремонтов за этот же период эксплуатации. Статистически  $K_{ТИ}$  определяют как отношение суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии к произведению числа наблюдаемых объектов ( $N$ ) на заданное время эксплуатации:

$$\bar{K}_{ТИ} = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{N \cdot T_{ЭКС}},$$

где  $T_{ЭКС}$  – продолжительность эксплуатации, состоящей из интервалов времени работы, ТО и ремонтов. Если  $T_{ЭКС}$  различно для каждого изделия, то  $K_{ТИ}$  определяют по формуле

$$K_{ТИ} = \frac{t_{сум}}{t_{сум} + t_{рем} + t_0},$$

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

$t_{рем}$  – суммарное время простоев из-за плановых и внеплановых ремонтов объектов;

$t_0$  – суммарное время простоев из-за планового и внепланового ТО всех объектов.

Таким образом, значение коэффициента  $K_{ТИ}$  находится в прямой зависимости от значения коэффициента  $K_{Г}$ .

Коэффициент технического использования  $K_{ТИ}$  – обобщенный комплексный показатель надежности и более полной характеристики ремонтпригодности, чем коэффициент готовности, так как учитывает все простои, связанные с техническим обслуживанием и ремонтом объекта.

**Коэффициент восстановления ресурса ( $K_B$ )** – отношение среднего значения ресурса капитально отремонтированного объекта ( $\bar{t}_e$ ) к среднему значению ресурса нового объекта ( $\bar{t}_n$ ):

$$\bar{K}_B = \bar{t}_e / \bar{t}_n \cdot 100\%,$$

для автомобильной и сельскохозяйственной техники  $\bar{K}_B = 80\%$ .

**Расчеты показателей надежности.** Расчеты объектов на надежность предназначены для определения количественных показателей надежности. Их проводят на этапах разработки, создания и эксплуатации объектов (машин, оборудования и приборов). Для расчетов показателей надежности автомобильной и сельскохозяйственной техники пользуются соответствующими ГОСТ, ОСТ, РТМ, методическими указаниями и инструкциями по оценке надежности машин.

На этапе проектирования расчеты надежности производят с целью прогнозирования ожидаемой надежности разрабатываемого объекта.

При испытаниях и эксплуатации расчеты на надежность проводят для оценки количественных показателей надежности. Результаты расчетов в данном случае показывают, какой надежностью обладали объекты, прошедшие испытания или используемые в определенных условиях эксплуатации. На основании этих расчетов определяют слабые элементы объектов, намечают основные направления по повышению надежности, дается оценка надежности объекта и влияния на нее различных факторов. Так, например, на основании расчета машины и ее элементов на надежность определяют вероятность безотказной работы,  $K_T$ ,  $K_{ТИ}$  и др., а затем указывают пути улучшения полученных показателей надежности. При этом не все показатели можно рассчитывать, некоторые из них определяют экспериментально. Исходными данными для расчета являются характеристика сил, данные по конструкции элементов объекта, применяемым материалам, режимам работы, условиям эксплуатации и ремонта, а также по другим параметрам, определяющим работоспособность автомобильной и сельскохозяйственной техники.

Одним из методов повышения надежности объекта является **резервирование** введением избыточности, то есть введением дополнительных средств и возможностей сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. При отказе одного из элементов резервный элемент выполняет его функции, и объект не теряет работоспособности. Общая схема расчета машины на надежность показана на рис. 5.

Эта схема дана для случая, когда потеря работоспособности связана как с постепенными, так и с внезапными отказами машины.

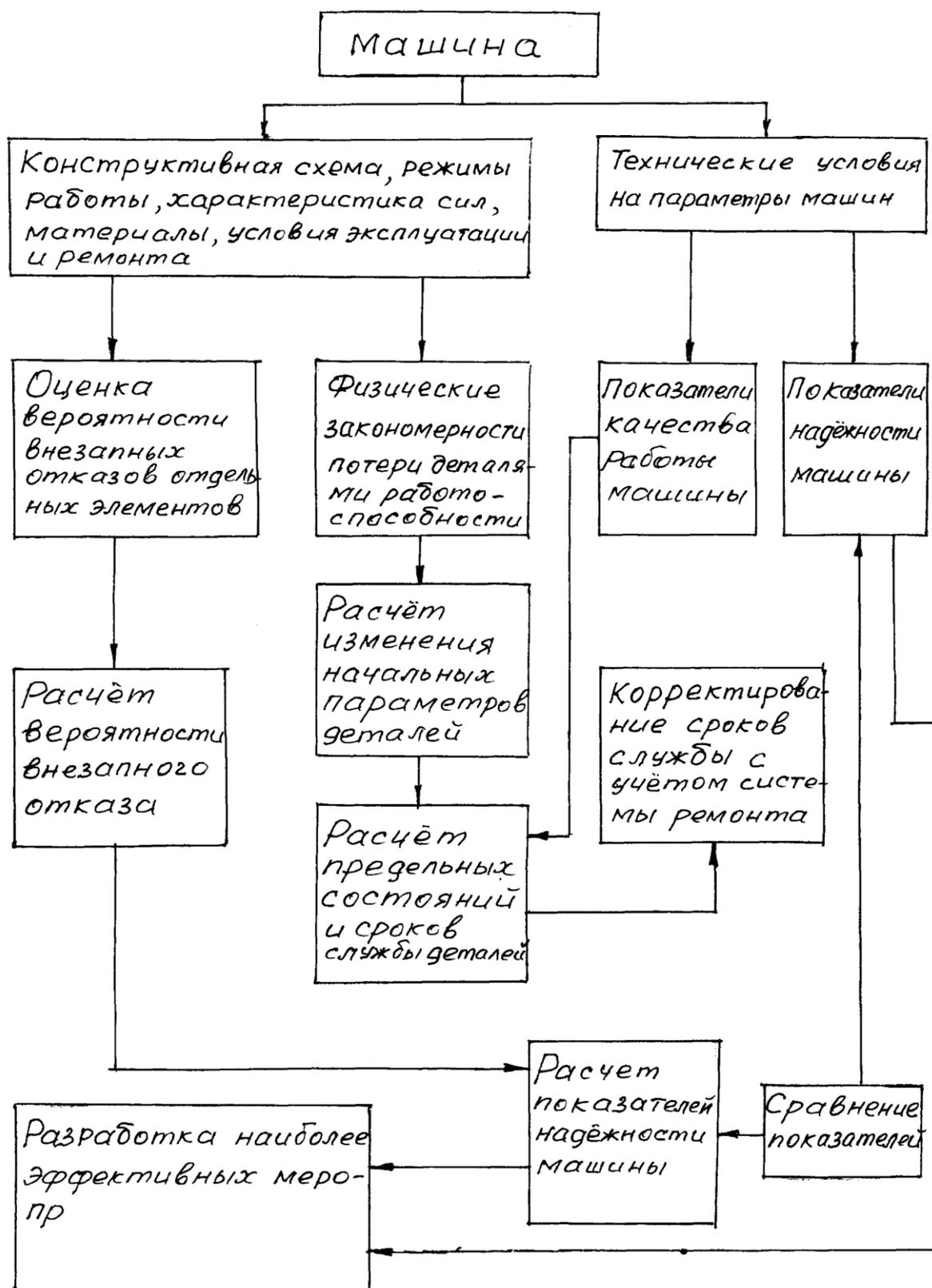


Рис. 5. Общая схема расчета машин на надежность

#### 1.4. Причины снижения надежности и потери работоспособности машин

Повреждение и разрушение деталей машин происходят под воздействием различных видов энергии. К ним относятся: механическая, тепловая, химическая, электромагнитная энергии в виде полей и сред с различными параметрами.

Детали автомобилей и сельскохозяйственных машин повреждаются и разрушаются под действием несущих нагрузок и скоростей (физических полей), так называемых факторов  $P, V, T$ ; от воздействия кислотной или щелочной сред (химических полей), а также вследствие совместного воздействия физических и химических полей. Большинство реальных деталей или сопряжений подвержены одновременному воздействию нескольких факторов, но ведущим будет являться один из них.

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

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

Кроме множества внешних факторов, детали машин повреждаются и разрушаются под действием внутренних факторов. К ним относятся *усталость материала* вследствие перераспределения внутренних напряжений, возникающих в процессе структуро- и формообразования деталей, и *объемная газовая коррозия*. Эти причины возникают в процессе естественного старения, то есть стремления материалов возвращаться в равновесное состояние, избавляться от технологической «наследственности». Они приводят к короблению детали, образованию трещин, изменению макро- и микроразмеров отдельных поверхностей, а также полному разрушению детали на отдельные части.

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

**Текучесть** – это свойство металлов и их сплавов деформироваться в упруго-пластической зоне с нарастающей остаточной деформацией по достижении напряжения в материале свыше определенного значения.

Большинство качественных поликристаллических металлов и сплавов не обнаруживает резко выраженного предела текучести, у них после достижения предела пропорциональности наблюдают постепенное нарастание пластической деформации (обычно 0,2–0,3%). Текучесть зависит от типа структуры металла, размера зерна, наличия и вида дефектов кристаллической структуры и др.

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

**Хрупкое и вязкое разрушение.** *Хрупкое разрушение* наступает без предварительной деформации под действием нормальных напряжений. *Вязкое разрушение* сопровождается значительной предварительной деформацией, вызываемой касательными напряжениями.

Прочность детали во многом зависит от состояния тонкого поверхностного слоя, в котором обычно образуются трещины. С возрастанием содержания углерода в углеродистых сталях, при их закалке, увеличивается прочность, но одновременно это приводит к образованию перенасыщенных твердых растворов углерода в железе, способствующих образованию трещин.

Прочность мягких сталей ( $C < 0,2\%$ ) почти не зависит от содержания перлита, а определяется размером ферритных зерен. Для сталей с содержанием углерода свыше 0,3% влияние перлита увеличивается, но все же ферритные зерна во всем диапазоне доэвтектоидных сталей  $C \leq 0,83\%$  определяют прочность металла, так как они составляют одну непрерывную фазу, выделяющуюся по границам бывших зерен, тогда как перлит группируется внутри этих зерен.

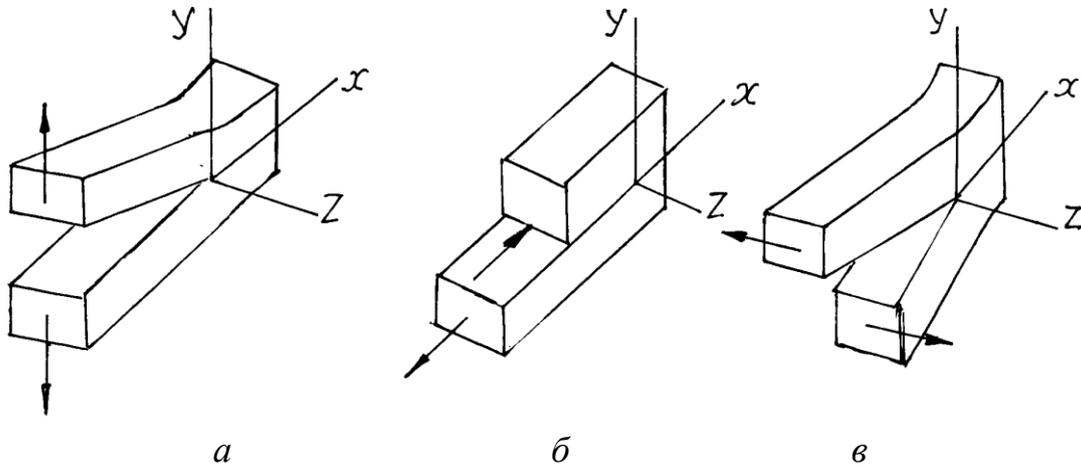
**Усталостное разрушение.** Детали, несущие статические и циклические силовые нагрузки (элементы рам машины, коленчатые и торсионные валы, листы рессор, пружины, шатуны и др.), разрушаются вследствие усталости. Усталостное разрушение металлов связано с пластической деформацией. Оно приводит к полной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

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

Многokратное приложение нагрузки вызывает разрушение деталей при нагрузках значительно меньших, чем в случае однократного их приложения. Явление, при котором напряжения разрушения при большом

числе повторных погружений могут быть ниже не только предела прочности, но и предела текучести, называется *усталостью металлов*.

Разрушение может происходить тремя путями (рис. 6), но оно всегда заканчивается образованием трещин вплоть до разрушения.



**Рис. 6.** Схема деформаций:  
*a* – нагружение растяжением; *б* – нагружение сдвигом (плоская деформация);  
*в* – нагружение сдвигом (антиплоская деформация)

Образование субмикротрещин несет дислокационный характер. Характер повторно-переменных нагружений деталей может быть различным (рис. 7).

Цикл напряжений характеризуется максимальным  $\sigma_{max}$ , минимальным  $\sigma_{min}$  напряжениями, амплитудой

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

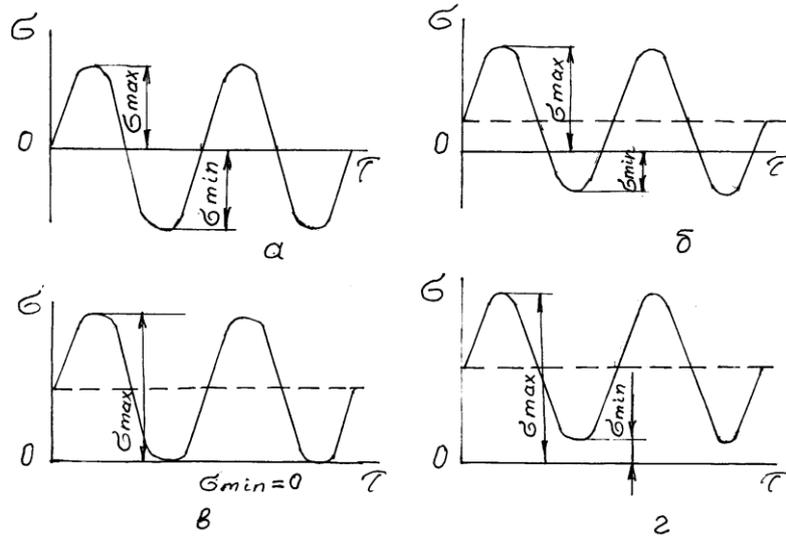
средним напряжением

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

и коэффициентом асимметрии цикла

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}.$$

Используя эти основные параметры, можно описать каждый из показанных на рис. 7 циклов напряжений, принимая, что напряжения растяжения положительны, а напряжения сжатия отрицательны.



**Рис. 7.** Характер повторно-переменных напряжений:  
 а – знакопеременный симметричный цикл; б – знакопеременный асимметричный цикл;  
 в – пульсирующий цикл; г – знакопеременный цикл

Например, знакопеременный симметричный цикл описывается так:

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

Основной критерий, характеризующий сопротивление металла усталостному разрушению, – *предел выносливости* (предел усталости), который для знакопеременного симметричного цикла обозначается  $\sigma_{-1}$ .

*Предел выносливости* (при данном  $R$ ) – это наибольшее напряжение цикла  $\sigma_{max}$ , которое может выдержать металл образца без разрушения от усталости.

При этом число перемен нагрузки, называемое базой, должно быть неограниченным и не должно вызывать усталостного разрушения.

Другой критерий, которым обычно характеризуют стойкость металла против усталости, – долговечность. Долговечность  $N$  – это число циклов напряжения, при котором происходит разрушение в данных условиях испытания.

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

Процесс усталости металла обычно разделяют на два периода по времени:

- а) накопление необратимых изменений в металле под влиянием локальных микродеформаций, приводящее к образованию зародыша трещины;
- б) развитие (подростание) трещины.

**Тепловое разрушение** происходит под действием теплового поля. Некоторые детали машин во время работы нагреваются, вследствие чего в них разрушается созданная ранее структура материала, и они теряют свои служебные свойства. К таким деталям относятся: головки цилиндров, форкамера, поршни, выпускные коллекторы и трубы. Большому тепловому напряжению подвержены токопроводящие детали электрооборудования машин при коротком замыкании «на массу» вследствие разрушения изоляции или обрыва проводов, обмоток. Детали, претерпевшие тепловое разрушение, восстановлению не подлежат.

**Оплавление** и разрушение поверхности деталей вызывается действием электромагнитного поля. Некоторые детали электрооборудования машин, проводящие ток, согласно кинематике механизмов, размыкаются и замыкаются или находятся на определенном расстоянии друг от друга. Между этими деталями периодически возникает искровой разряд. В этом случае электроны перемещаются с катода на анод. С поверхности анода уносятся частицы металла, которые частично рассеиваются в окружающей среде, а частично переносятся на катод. Такому виду разрушения подвержены электроды свечей зажигания, контакты прерывателей и др. Эти детали обычно подлежат замене.

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

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

**Разрушение деталей под действием химической среды** происходит вследствие коррозионных процессов. *Коррозия* – это разрушение металлов из-за химического или электрохимического взаимодействия их с внешней (коррозионной) средой. Предотвращение или замедление коррозионных процессов является общегосударственной технико-экономической проблемой, позволяющей сохранить от потерь тысячи тонн металлических изделий. Причина коррозии – термодинамическая неустойчивость металлов, вследствие чего в природе они всегда находятся в окисленном состоянии. *Коррозия* – гетерогенный процесс, то есть процесс, протекающий на границе раздела металл – газ или металл – жидкость. Реальная скорость коррозии определяется многими факторами: состоянием поверхности металла и особенностями его структуры, температурой, составом и скоростью движения коррозионной среды, механическими напряжениями материала и др.

*Классификация коррозии* по наиболее общим и типичным признакам проведена на рис. 8.

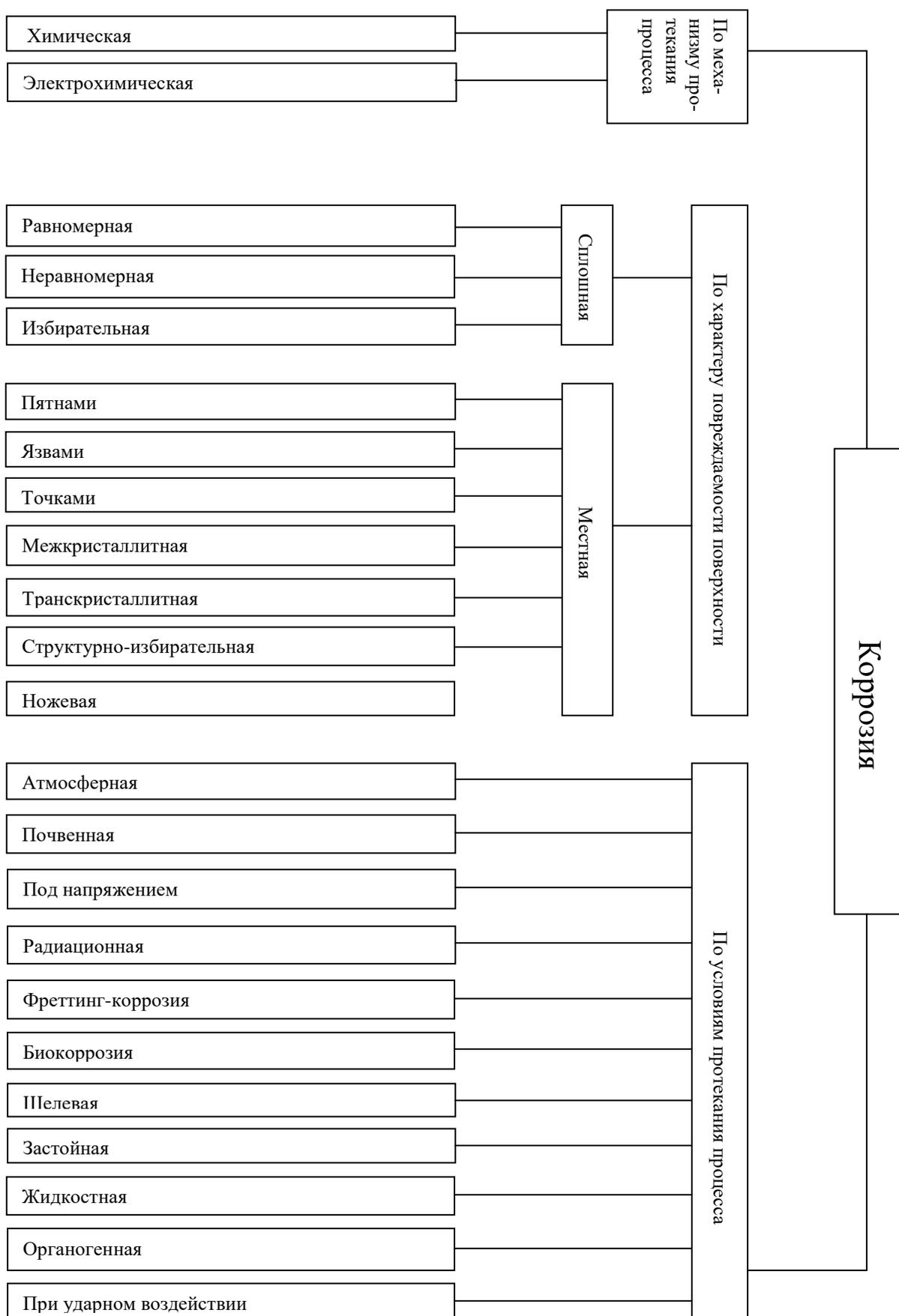
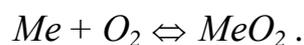


Рис. 8. Классификация коррозии

В зависимости от протекания процесса коррозия делится на химическую и электрохимическую.

**Химическая коррозия** протекает при взаимодействии металла со средой, обладающей малой электропроводностью, и не сопровождается возникновением электрического тока (коррозия металлов в нефтепродуктах). Применительно к деталям сельскохозяйственной техники химическая коррозия чаще проявляется в виде газовой коррозии – при контакте металлов с кислородом, сернистым газом, сероводородом, углекислотой и другими газами (в основном при повышенных температурах). Газовая коррозия начинается при химической адсорбции атомов или ионов окружающей среды на поверхности металла с образованием нового химического соединения.

Взаимодействие металла с кислородом (окисление металла) протекает по уравнению



Различные металлы в различных температурных интервалах окисляются по-разному.

Линейный закон характерен для натрия, кальция, магния; параболический – для меди, железа, никеля; логарифмический – для алюминия, хрома, цинка.

В технических металлах и сплавах наблюдается еще один тип коррозионного разрушения – объемная газовая коррозия, которая снижает физико-механические и др. свойства изделий, их качество и надежность.

Различают два механизма образования объемной газовой коррозии металлов: это поглощение жидким металлом в процессе его производства различных газов: кислорода, водорода, азота и др. и поглощение (окклюзия) металлами водорода из электролитов, газовой среды, при трибохимических процессах и т. п. (Трибохимия – это раздел триботехники, изучающий взаимодействие контактирующих поверхностей с химически активной средой. Она исследует проблемы коррозии при трении, химические основы избирательного переноса и воздействие на поверхность деталей химически активных веществ, выделяющихся при трении вследствие деструкции полимеров или смазочного материала). Проникновение водорода в металл начинается с его адсорбции на поверхности, из электролитов происходит адсорбция гидратированных ионов, а из газовой фазы адсорбируют как ионы, так и атомы водорода. Водород, вступая в химическое соединение с металлом или с его примесями, вызывает объемную коррозию металла. Ионы и атомы кислорода, водорода и азота могут проникать в решетку кристаллов металла по обратному пути, чем атомы металла, которые оставили решетку, создав вакансии, как это показано на рис. 9.

Атомы газов, попав в дивакансию, начинают перемещаться вместе с ней по кристаллу, корродируя его по внутренней поверхности и образуя при этом химические соединения и твердые растворы. Механизмы коррозионного разрушения решетки железа показаны на рис. 9.

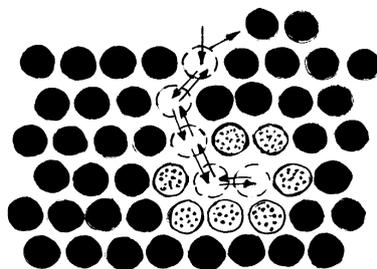


Рис. 9. Схема образования механизма объемной газовой коррозии

В зависимости от того, какое число вакансий будет заполнено кислородом, могут соответственно образовываться следующие соединения:  $FeO$  (рис. 10, а),  $Fe_2O_3$  (рис. 10, б),  $Fe_3O_4$  (рис. 10, в), причем коррозионное разрушение решетки в данном случае осуществляется по законам симметрии только в обратном порядке построения решетки.

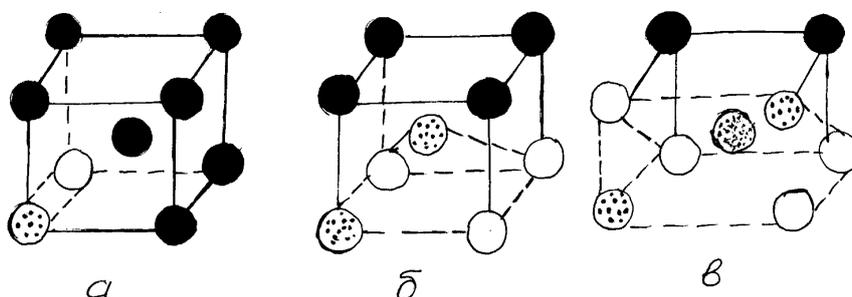


Рис. 10. Схема механизма образования химических соединений в решетке железа:  
а –  $FeO$ ; б –  $Fe_2O_3$ ; в –  $Fe_3O_4$

Объемная газовая коррозия поражает все детали машин, вследствие чего они преждевременно «устают», изнашиваются, уменьшается срок их службы. Свидетельством объемной газовой коррозии является их повышенная хрупкость при длительном пребывании в нерабочем состоянии.

**Электрохимическая коррозия** возникает тогда, когда на поверхности детали образуется слой электролита.

Электролитом может быть вода или водные растворы кислот и щелочей, образующиеся в результате взаимодействия воды с топливом, маслом или продуктами окисления.

При электрохимической коррозии разрушение металла связано с

возникновением и перетеканием электрического тока с одних участков поверхности на другие. Коррозия этого вида является наиболее распространенной, в той или иной степени она наблюдается практически во всех элементах дорожных машин. Большинство деталей машин в условиях эксплуатации взаимодействует с раствором электролитов. В процессе работы при изменении температуры поверхностей деталей на них из воздуха конденсируется вода в виде пленки. Газы, находящиеся в атмосфере, легко растворяются в воде, образуя такие кислоты, как серная, сернистая, азотная, азотистая и др., а также щелочные соединения, являющиеся типичными электролитами.

Все металлы неустойчивы с точки зрения термодинамики и стремятся вступить во взаимодействие с окружающей средой с образованием различных оксидов. Реакции окисления металлов сопровождаются перемещением электронов и имеют электрохимический характер. Металлы обладают различной склонностью к электрохимической коррозии. Кроме того, в зависимости от свойств среды и сочетания материалов деталей сопряжений возможен анодный или катодный характер коррозионного разрушения. Например, в паре медь – сталь стальная деталь будет выступать в роли анода, а в паре сталь – цинк – в роли катода.

Процессы, происходящие при электрохимической коррозии, можно представить следующим образом. Железо в анодной зоне теряет электроны, которые перемещаясь в катодную зону, взаимодействуют с водой и кислородом, образуя гидроксильные ионы. В свою очередь, гидроксильные ионы вступают в реакцию с двухвалентными ионами железа, образовавшимися на аноде. В результате этой реакции образуется гидроксид двухвалентного железа. Под действием кислорода воздуха он окисляется с образованием гидратированного оксида железа  $Fe_2O_3 \cdot 2(H_2O)$ , т. е. ржавчины.

Применительно к сельскохозяйственному производству преобладают следующие виды электрохимической коррозии: атмосферная коррозия, возникающая под действием атмосферной влаги; жидкостная коррозия, возникающая под действием электролитов, главным образом воды и водных растворов солей; грунтовая или подземная коррозия металлических сооружений, уложенных в землю.

**Атмосферная коррозия** является самым распространенным видом коррозионного разрушения деталей автомобилей сельскохозяйственных машин и сооружений.

Разрушение деталей в атмосферных условиях происходит под воздействием пленки влаги, образующейся на деталях машин в результате прямого попадания атмосферных осадков или конденсации влаги на поверхности металла.

Скорость коррозионного разрушения металлов и сплавов в этом случае определяется метеорологическими факторами: продолжительностью

выпадения осадков, температурой и влажностью воздуха, содержанием в атмосфере коррозионно-активных газов и солевых примесей.

Коррозионной средой во всех случаях служит пленка влаги, в которой растворены кислород и двуокись углерода, а в некоторых случаях еще и двуокись серы, сероводород и др. газы.

Скорость и механизм атмосферной коррозии во многом определяются толщиной слоя электролита.

При толщине пленки влаги меньше  $100 \text{ \AA}$  коррозионный процесс называют *сухой атмосферной коррозией*, до  $0,1 \text{ мкм}$  – *влажной коррозией*, более  $0,1 \text{ мкм}$  – *мокрой коррозией*.

При сухой атмосферной коррозии в результате химического взаимодействия кислорода с металлом последний разрушается незначительно. Влажная и мокрая коррозия являются наиболее опасными, приводящими к разрушению металла, снижению чистоты обработки поверхностей и потере прочности деталей.

Скорость коррозии металла в условиях окружающей атмосферы во многом зависит от ряда факторов: состава атмосферы, состава и свойств продуктов коррозии, влажности и температуры воздуха. Примеси, находящиеся в атмосфере, повышают скорость коррозии. Наиболее опасным и содержащимся в большом количестве в атмосфере является сернистый ангидрид (двуокись серы  $SO_2$ ), который образуется в результате сжигания угля, нефти и продуктов ее переработки. В промышленных районах концентрация  $SO_2$  в воздухе примерно в 10 раз выше, чем в сельской местности, поэтому и корродирует там металл быстрее.

Большое влияние на протекание электрохимических процессов оказывают вторичные продукты коррозии. Химическим анализом установлено, что продукты коррозии состоят главным образом из гидроокиси железа  $FeO \cdot nH_2O$  (70–80%) и  $Fe_2O_3$  (10–20%). Содержание  $FeO$ ,  $Fe_3O_4$  и  $FeSO_4$  не превышает 0,9%. Рыхлая порошкообразная гидроокись железа увеличивает химическую и капиллярную конденсацию и тем самым ускоряет процесс коррозионного разрушения металла.

Влажность воздуха влияет на коррозию металла тогда, когда на металле имеются загрязнения и продукты коррозии, способные поглощать атмосферную влагу. При повышенной влажности и высокой температуре процессы коррозии ускоряются, металлы в такой среде разрушаются быстрее.

Для предотвращения электрохимической коррозии металлов применяют различные меры, учитывающие не только особенности самого металла, но и условия его эксплуатации. Все меры по характеру их воздействия можно разделить на три основных фактора: воздействие на металл; воздействие на среду и на конструкцию. К числу этих мер относятся легирование, термообработка металла, применение различных по-

крытий, ингибиторов и смазок, а также использование электрохимической защиты (катодная защита).

Для уменьшения электрохимической коррозии в коррозионную среду вводят ингибиторы, а также производят осушение воздуха специальными адсорбентами в замкнутом пространстве, используемое при консервировании металлоизделий, например, запасных частей к машинам.

Для предотвращения контактной коррозии металлов и коррозии конструкций, соединений механизмов и машин ведут подбор материалов и прокладок, устраняют возможность скопления влаги, обеспечивают слитность сечения деталей (наименьшее отношение периметра сечения к его площади), большее предпочтение отдают сварным соединениям, чем болтовым, обеспечивают возможность нанесения и возобновления различных покрытий в процессе эксплуатации и ремонта объектов и др. В сельскохозяйственном производстве наибольшее применение для защиты машин, их деталей и узлов от коррозии находят лакокрасочные покрытия, защитные и пластичные смазки, жидкие ингибированные консервационные смазки типа К-17 и НГ-203, малорастворимые присадки типа АКОР-1, летучие и контактные ингибиторы, а также ингибированные промывочные и смазочно-охлаждающие жидкости, применяемые для защиты деталей в процессе ремонта машин и восстановления деталей.

## 2. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА И УСТАЛОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ

### 2.1 Контакт рабочих поверхностей

При расчете элементов машин на прочность и долговечность необходимо правильно оценить влияние давления на рабочие поверхности. Для этого необходимо определить площадь контакта деталей сопряжения.

Поверхности деталей сопряжения в процессе работы контактируют по площади, определяемой шероховатостью и физико-механическими свойствами материалов. Различают номинальную, контурную и фактическую площади контакта (рис. 10).

*Номинальную* площадь  $A_n$  контакта  $C$  (размеры рабочей поверхности  $l \times l_1$ ) рассчитывают как геометрическую площадь соприкосновений рабочих поверхностей деталей сопряжения без учета неровностей. Вследствие волнистости и шероховатости рабочих поверхностей касание происходит в отдельных точках, а не по всей номинальной площади. Волнистость и макроотклонения поверхности приводят к тому, что детали сопряжения контактируют только по площадкам вершин волн и макроотклонений, в то время как участки поверхности, расположенные во впадинах, в работе не участвуют. Высокие удельные нагрузки в точках касания приводят к взаимному внедрению неровностей. Неодинаковая высота неровностей обуславливает разную глубину их взаимного внедрения.

*Контурная* площадь касания  $A_c$  (где  $m$  – число контурных площадок касания) представляет собой площадь, образованную в местах касания рабочих поверхностей, обусловленных волнистостью и макроотклонениями. Контурная площадь зависит от шероховатости поверхности, ее геометрических очертаний, а также от нагрузки.

На контурной площади касания расположены площадки фактического контакта микронеровностей  $A_j$ .

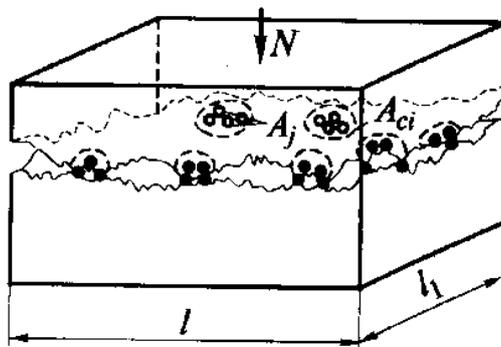


Рис. 10. Схема контактирования рабочих поверхностей деталей:

$N$  – нормальная нагрузка на рабочую поверхность;

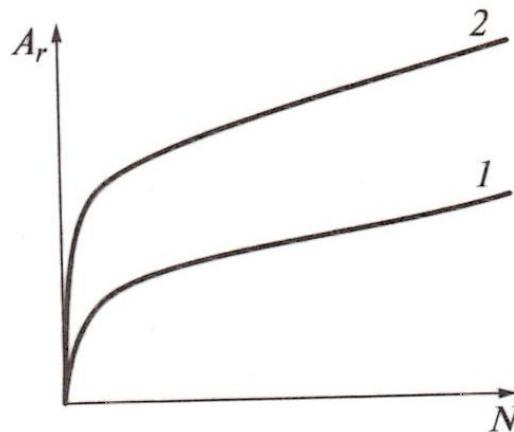
$l, l_1$  – размеры рабочей поверхности

*Фактическая* площадь контакта  $A_r$  (где  $n$  – число точек фактического контакта) дискретна и представляет собой алгебраическую сумму площадей соприкосновения отдельных неровностей.

Пятна фактического контакта, образованные вследствие деформации отдельных микронеровностей, очень малы и имеют размеры от 3 до 50 мкм, поэтому соотношение номинальной и фактической площадей контакта  $A_a/A_r = 1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$ . Это необходимо учитывать при расчетах деталей на прочность, износостойкость и долговечность.

Зависимость контурной и фактической площадей контакта от параметров шероховатости деталей описывается кривой опорной поверхности. Эта кривая дает представление о распределении материала по высоте неровностей и, таким образом, позволяет оценить возможную площадь контакта поверхности на разных уровнях высоты профиля.

Контурная и фактическая площади контакта рабочих поверхностей в большой степени зависят от нагрузки. С увеличением нагрузки (рис. 11) площадь контакта значительно возрастает. Это объясняется смятием микронеровностей под действием давлений, превышающих предел текучести материала.



**Рис.11.** Зависимость фактической площади  $A_r$  контакта рабочих поверхностей деталей от нормальной нагрузки  $N$ :

1 – при твердости  $HB_1$ ; 2 – при твердости  $HB_2 < HB_1$

Нормальная нагрузка, отнесенная к единице фактической площади контакта, называется *фактическим давлением*. При пластическом контакте неровностей значение фактического давления приближается к значению твердости материала, а при упругом контакте оно существенно меньше.

Фактическая площадь контакта зависит также от параметров профиля рабочих поверхностей и от механических свойств материалов деталей сопряжения, которые характеризуются твердостью, модулем упругости и пределом текучести. Чем выше твердость поверхностей деталей, тем меньше фактическая площадь контакта.

Площадь контакта и характер взаимодействия деталей зависят от соотношения твердостей контактирующих поверхностей. При взаимодействии деталей из металлических материалов, твердости которых соизмеримы, происходит постепенное сближение поверхностей, сопровождающееся появлением новых пятен контакта. Если поверхности деталей обладают различной твердостью, то сближение происходит в основном вследствие смятия микронеровностей менее твердой поверхности и внедрения в нее выступов шероховатости, обладающих более высокой твердостью.

Если твердость одной из деталей несоизмеримо мала по сравнению с твердостью контактирующей поверхности, то микронеровности твердого основания полностью погружаются в материал противоположной поверхности. Такая схема контакта характерна для уплотнений, манжет, сальников и других деталей из неметаллических материалов.

Особый интерес представляет механизм контакта эластомеров с твердыми неровностями. Поверхность эластомера легко облегает профиль твердой поверхности и благодаря своим эластичным свойствам выдерживает значительные упругие деформации без разрушения. В этом случае фактическая площадь контакта приближается к номинальной и зависит в основном от упругости эластомера, нагрузки, параметров и формы микронеровностей твердой поверхности.

Фактическую и контурную площади контакта рабочих поверхностей деталей измеряют методом регистрации электрической проводимости контакта, методом переноса материала одной поверхности на другую, методом радиоактивных изотопов, а также оптико-физическими методами.

## 2.2 Структура поверхностного слоя детали

При обработке детали в ее поверхностных слоях формируется новая структура, которая отличается по физико-механическим свойствам от основного металла

Механическая обработка детали сопровождается пластической деформацией поверхностных слоев и частичным упрочнением – *наклепом*. В результате наклепа увеличиваются пределы текучести и временное сопротивление разрыву, уменьшаются показатели пластичности материала в поверхностном слое детали.

При обработке поверхностей большое влияние на их физические свойства оказывает процесс теплообмена детали с окружающей средой. Под действием теплоты, образующейся при взаимодействии режущего инструмента и детали, происходит вторичная закалка обрабатываемого слоя металла (рис. 12, зона I), а на некотором удалении от поверхности – отпуск закаленного слоя (зона II), Далее сохраняется твердость основного металла (зона III).

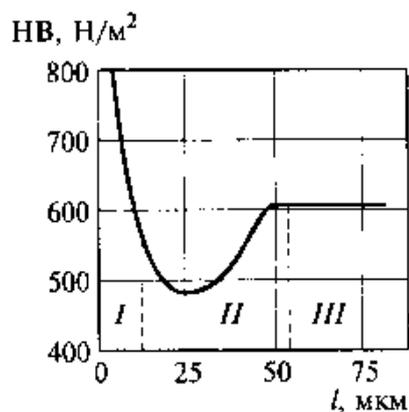


Рис. 12. Изменение микротвердости НВ по глубине  $l$  поверхностного слоя детали из закаленной стали 45 при обработке со скоростью 135 м/мин

Увеличение температуры, сопровождающее механическую обработку деталей, также вызывает остаточные напряжения. При нагреве поверхностного слоя его объем увеличивается. Холодные нижележащие слои препятствуют этому. При охлаждении объем металла поверхностного слоя уменьшается. В этом случае материал сердцевины препятствует сжатию. Так, в поверхностном слое возникают остаточные напряжения растяжения, а в сердцевине – сжатия. При выравнивании температуры напряжения не исчезают, так как степень пластичности охлажденного материала недостаточна для пластических деформаций. Внутренние напряжения, возникающие в поверхностном слое вследствие тепловых процессов, могут вызвать разрушение поверхностного слоя детали (рис. 13).

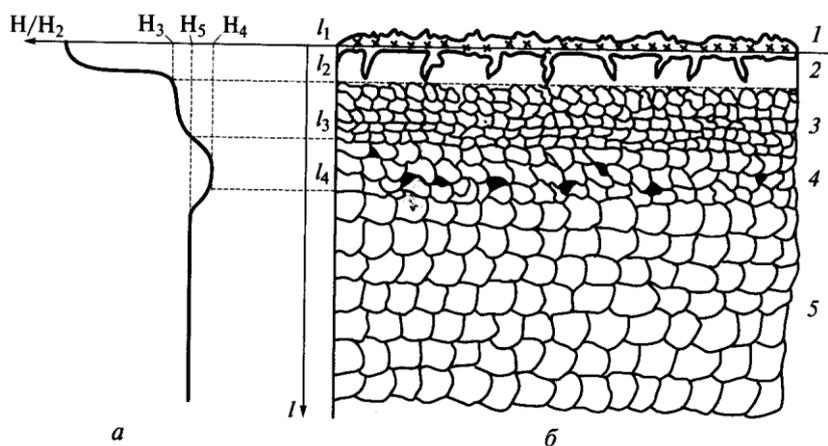


Рис. 13. Разрушение поверхностного слоя детали при высоких остаточных температурных напряжениях

Структуру поверхностного слоя материала детали, формирующуюся в результате механической обработки (рис. 14), можно представить в виде пяти слоев:

- 1) адсорбированный слой, состоящий из пленки влаги, газов и загрязнений; толщина  $l_1 = 0,2 \cdot 10^{-3} \dots 0,3 \cdot 10^{-3}$  мкм;
- 2) слой оксидов, имеющий повышенные твердость и износостойкость,  $l_2 = 0,002 \dots 0,5$  мкм;

- 3) слой с сильно деформированной кристаллической решеткой,  $l_3 = 1,5 \dots 5$  мкм;
- 4) более глубокий слой с искаженной кристаллической решеткой,  $l_4 = 0,2 \dots 50$  мкм;
- 5) слой металла с исходной структурой.



**Рис. 14.** Схема структуры поверхностного слоя материала детали: *a* – изменение микротвердости  $H$  по глубине  $l$  слоя; *б* – структура материала детали

Слой 1 образуется в результате поглощения (адсорбции) полярно-активных молекул смазочного материала, влаги, газов и других веществ, находящихся в зоне трения. Этот слой представляет собой рыхлую мономолекулярную пленку, толщина которой зависит от параметров шероховатости поверхности, материала детали и окружающей среды.

Слой 2 формируется в результате химического взаимодействия материала детали с окружающей средой. Окислительные процессы, развивающиеся в верхнем слое материала, вызывают образование тонких оксидных пленок, обладающих, как правило, повышенными твердостью (см. рис. 14) и износостойкостью. В результате воздействия внешней среды и знакопеременных нагрузок пленка приобретает пористую структуру и рельеф, характерный для условий работы детали.

Слои 3 и 4 образуются в результате пластической деформации и наклепа металла под действием сил резания в процессе механической обработки поверхности и сил трения при взаимодействии деталей сопряжения. Наклеп приводит к изменению физико-механических свойств металла. В слое 3 сдвиг зерен металла и искажение кристаллической решетки обуславливают значительное повышение микротвердости материала по сравнению с исходным значением. Большое число вакансий и дислокаций, возникших в слое 4 в результате наклепа, приводит к уменьшению микротвердости металла.

Правильно выбранные способы и режимы обработки детали (механической, химико-термической или лазерной) позволяют значительно повысить долговечность сопряжения. Например, в результате упрочнения поверхности регулировочного болта толкателя топливного насоса термодиффузионным хромированием ресурс сопряжения болт–пята плунжера возрастает в 10 раз.

### 2.3. Условия развития усталостных процессов

Остаточные деформации деталей возникают при высоких давлениях на поверхности; при больших нагрузках, вызывающих напряжения, которые являются для данного материала предельно допустимыми или близкими к ним. В первом случае появляется смятие поверхностей, во втором – скручивание, изгиб.

Смятие поверхностей характерно для деталей, работающих в условиях высоких ударных нагрузок при отсутствии относительного смещения поверхностей деталей. В качестве примера можно привести деформацию зубьев муфт полужесткого соединения элементов силовой передачи, смятие шлицов балансиров и торсионов ходовой части, шпонок и др.

В начальный период работы деталей зазоры и динамические нагрузки небольшие. Пластическое деформирование поверхностей происходит постепенно и сопровождается лишь некоторым упрочнением поверхностных слоев. С увеличением зазоров и, следовательно, динамических нагрузок начинается течение материала, появляются трещины и сколы.

Скручивание и изгиб, вызывающие высокие напряжения материала, наиболее часто наблюдаются у упругих элементов (пружины, торсионы, рессоры). Причинами деформации являются напряжения, превышающие предел упругости (рис. 15).

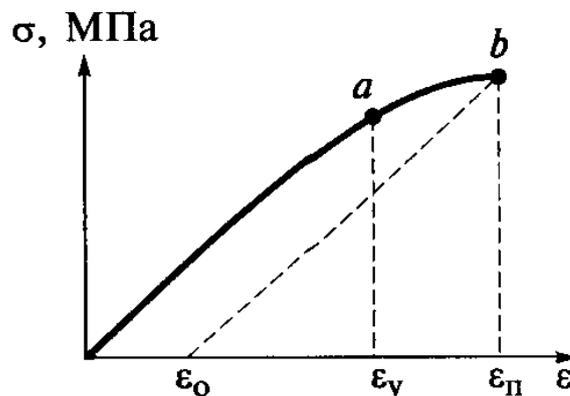


Рис.15. Зависимость напряжения  $\sigma$  от деформации  $\varepsilon$  упругого элемента.

При напряжениях  $\sigma$  выше этого предела (участок  $ab$ ) полная деформация  $\epsilon_p$  состоит из упругой  $\epsilon_u$ , исчезающей при разгрузке, и остаточной  $\epsilon_0$ , остающейся после разгрузки.

*Усталость* – процесс постепенного изменения физико-механических свойств и накопления внутренних повреждений материала под действием повторно-переменного нагружения.

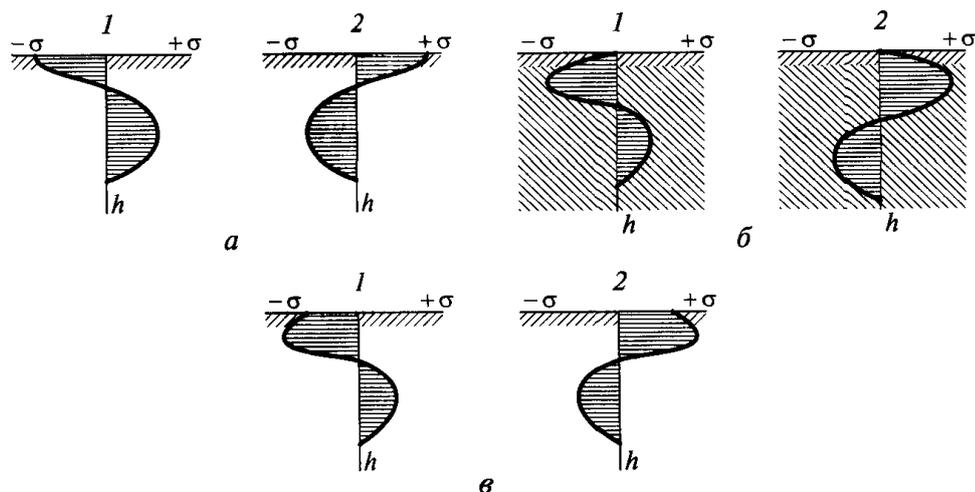
Большинство деталей дорожных машин в процессе работы испытывают статические или динамические нагрузки. В зависимости от значения и точки приложения нагрузки, а также характера нагружения возникают деформации детали различных видов: изгиб, кручение или сдвиг. Если нагрузка не превышает соответствующего предела прочности материала, то разрушения детали или изменения ее формы после снятия нагрузки не происходит. Однако напряжения, возникающие в материале детали под действием нагрузки, не исчезают бесследно. Они постепенно накапливаются в материале и вызывают изменение его физико-механических свойств.

Внутренние напряжения в материале деталей возникают не только под действием нагрузки, но и по ряду других причин. При изготовлении детали возникают остаточные внутренние напряжения, вызванные изменением температуры материалов в процессе обработки поверхности. Эти напряжения образуют равновесную систему и могут проявляться в виде макронапряжений, охватывающих большие объемы детали (напряжения I рода), микронапряжений, локализуемых в пределах одного или нескольких кристаллических зерен (напряжения II рода) и субмикроскопических напряжений, действующих между элементами кристаллической решетки (напряжения III рода). В зависимости от причины возникновения различают литейные, сварочные, закалочные, шлифовочные и другие остаточные напряжения, являющиеся следствием технологических операций.

При механической обработке в поверхностных слоях материала детали также возникают остаточные напряжения, как правило, I и II рода.

Наиболее отрицательное влияние на долговечность деталей оказывают остаточные напряжения I рода. Распределение этих напряжений по толщине материала поверхностного слоя детали может быть различным. Непосредственно у поверхности в процессе обработки детали могут возникнуть сжимающие или растягивающие остаточные напряжения.

Особенно опасны растягивающие остаточные напряжения, вызывающие уменьшение предела выносливости и износостойкости материала. Эпюры распределения напряжений, приведенные на рис. 16, а, характерны для деталей, прошедших механическую обработку (точение, фрезерование).



**Рис.16.** Типичные эпюры остаточных напряжений I рода в поверхностном слое материала детали после механической обработки (а), диффузионного отжига (б) и химико-термической обработки (в): 1 – сжатие; 2 – растяжение.

Остаточные внутренние напряжения могут накапливаться и в более глубоких подповерхностных слоях материала. Например, при диффузионном отжиге деталей с гальваническими покрытиями, металл которых обладает способностью диффундировать в сталь, на границе раздела покрытие – основа возникает диффузионный слой, обладающий большим удельным объемом, чем основной металл покрытия. Результатом этого явится возникновение на границе слоя остаточных сжимающих напряжений (рис. 16, б). При химико-термической обработке поверхностно-обезуглероженных сталей возникают растягивающие остаточные напряжения с максимумом на границе раздела диффузионный слой – основа. Релаксационные явления, происходящие в материале после химико-термической обработки, могут несколько изменять характер распределения напряжений (рис. 16, в).

Разнообразие распределения остаточных внутренних напряжений объясняется в первую очередь силовыми и температурными воздействиями. Величина остаточных напряжений зависит от формы и размеров детали, вида и режима обработки, а также от физико-механических свойств материала детали.

В материале детали часто образуются местные концентрации внутренних напряжений в местах резкого изменения формы поверхности. Концентраторами внутренних напряжений могут быть галтели, отверстия, канавки и другие конструктивные элементы детали, а также микрповреждения поверхности (микроцарапины, трещины, впадины микронеровностей). В процессе работы деталей сопряжений при трении рабочих поверхностей возникают местные напряжения, обусловленные взаимодействием микронеровностей. Эти напряжения называют рабочими, или внешними. Они

могут усиливать или ослаблять внутренние остаточные напряжения. При сложении внешних растягивающих напряжений с внутренними остаточными того же знака предел выносливости материала резко снижается и деталь разрушается.

Рассмотрим условия возникновения усталостных повреждений в элементах зубчатых колес. При работе сопряжения в условиях качения с проскальзыванием внешние напряжения будут формироваться под действием напряжений двух типов: чистого скольжения и чистого качения (рис. 17).

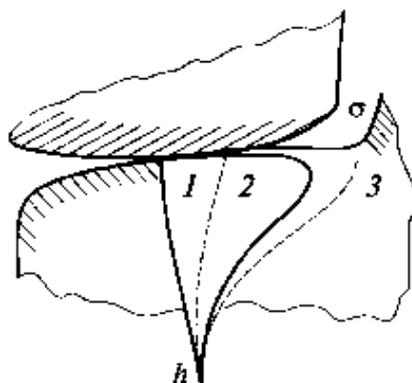


Рис. 17. Эпюры внешних напряжений, возникающих при качении с проскальзыванием: 1 – чистое скольжение; 2 – чистое качение; 3 – суммарная эпюра

Если максимальные касательные напряжения будут больше предела выносливости материала, то в верхних слоях детали параллельно поверхности будут развиваться усталостные микротрещины. Эти трещины активно развиваются в процессе работы механизма и, постепенно смыкаясь, приводят к разрушению поверхности. При реверсивном характере работы зубчатой передачи усталостные трещины развиваются по нормали к поверхности в глубь материала, вызывая уменьшение несущей способности и скол зубьев.

#### 2.4. Механизм усталостного изнашивания и разрушения материала

В реальных материалах с кристаллической структурой всегда присутствуют местные дефекты кристаллического строения, из-за которых атомная решетка искажается. Наличие дислокаций в материале обуславливает возможность его пластического деформирования. При приложении внешней нагрузки происходит перемещение дислокаций путем скольжения. При некотором критическом значении касательных напряжений скольжение дислокаций, возникших еще в процессе кристаллизации, приводит к появлению новых дислокаций. В свою очередь, увеличение числа дислокаций вызывает дальнейшее развитие пластических деформаций материала. С ростом числа дислокаций постепенно увеличивается и сопро-

тивление их скольжению. Это является причиной деформационного упрочнения материала, называемого наклепом.

При достижении определенной плотности дислокаций в материале в местах их скопления перед препятствиями (например посторонними включениями) зарождаются первичные микроскопические трещины. Причиной образования микротрещины является разрыв связей, вызванный одновременным развитием деформаций сжатия и растяжения кристаллической структуры по разные стороны от плоскости скольжения. Если локальные напряжения в области скопления дислокаций превышают предел текучести материала, то возникают микроскопические трещины, являющиеся первичными повреждениями материала детали.

В аналитической форме зависимость между числом  $N_{ц}$  циклов нагружения детали до разрушения, напряжением  $\sigma$  и пределом выносливости материала  $\sigma_R$  имеет вид

$$N_{ц} = K(\sigma - \sigma_R)^{-m},$$

где  $K$  и  $m$  – величины, зависящие от вида материала, конструкции детали и режима нагружения.

Большое влияние на характер протекания процесса образования усталостных микротрещин оказывают теплофизические свойства материала. В процессе пластической деформации материала под действием циклического нагружения в полосах скольжения дислокаций возникают локальные температурные всплески. Повторные, переменные по абсолютному значению и знаку напряжения создают большое число кратковременных температурных всплесков разной интенсивности. При достаточно высокой частоте циклического нагружения детали локальные температурные всплески могут привести к увеличению средней температуры материала до значений, вызывающих его разупрочнение. Кроме того, температурные всплески вызывают возникновение температурных градиентов и сопутствующих им тепловых напряжений. Эти напряжения могут достигать значений, соизмеримых с пределом прочности материала. Поэтому тепловые напряжения, особенно при их суммировании с остаточными внутренними и внешними, могут ускорять процесс образования усталостных микротрещин. Характер тепловых процессов и абсолютные значения повышения температуры материала при циклическом нагружении детали зависят от амплитуды напряжения, частоты приложения нагрузки, теплопроводности и теплоемкости материала, а также от условий теплоотвода.

Процесс усталостного разрушения материала зависит также от наличия смазочного материала и его свойств. Пленка масла, перераспределяя более равномерно давление по поверхности детали и устраняя непосредственный механический контакт выступов микронеровностей, позволяет уменьшить внешние напряжения в материале. Благодаря этому значитель-

но увеличивается продолжительность работы детали до возникновения усталостных микротрещин. Однако после появления трещин на поверхности детали масло, проникая в глубь трещины, оказывает расклинивающее действие и ускоряет процесс усталостного разрушения материала. Скорость увеличения трещин под влиянием смазочного материала при осевых напряжениях пропорциональна величине  $\sqrt{\nu\omega}$ , где  $\nu$  – кинематическая вязкость масла;  $\omega$  – частота колебаний нагружения.

Процесс усталостного разрушения является монотонным и ведет к появлению так называемых постепенных отказов машины, момент возникновения которых можно представить с той или иной степенью точности, если известна продолжительность эксплуатации машины (число циклов нагружения детали).

Наглядной графической характеристикой процесса усталостного разрушения металлов является обобщенная диаграмма усталости (рис. 18), полученная В. С. Ивановой. Согласно этой диаграмме процесс усталостного разрушения материала подразделяют на три стадии: *I* — в результате действия циклических напряжений, не превышающих предела упругости, в металле происходит накопление упругих искажений кристаллической решетки; *II* — упругие напряжения кристаллической решетки, накопившиеся за определенное число циклов нагружения, становятся критическими и обуславливают развитие в материале субмикроскопических усталостных трещин; *III* — субмикроскопические трещины достигают размеров микротрещин, и происходит окончательное разрушение детали.

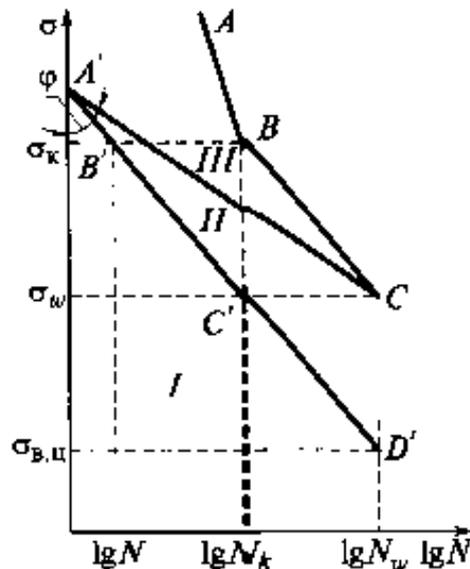


Рис. 18. Обобщенная диаграмма усталости

На обобщенной диаграмме усталости линия *ABC* — кривая выносливости (кривая Велера), построенная в полулогарифмических координатах,

— характеризует зависимость между напряжением и числом циклов до разрушения материала. Линия  $A'C$  — линия необратимой повреждаемости (кривая Френча) — определяет начало области перехода субмикроскопических трещин в микротрещины. Отрезок  $A'B'$   $C$  определяет условия начала появления субмикроскопических трещин. Отрезок  $CD'$  характеризует условия накопления необратимости искажений кристаллической решетки материала.

В соответствии с приведенной диаграммой можно выделить следующие критерии усталости материала:

- критическое число  $N_K$  циклов нагружения, по достижении которого при напряжении, равном пределу выносливости, возникают необратимые искажения кристаллической решетки — субмикроскопические трещины;
- критическое напряжение  $\sigma_K$ , при котором разрушение материала наступает при критическом числе циклов  $N_K$  нагружения;
- коэффициент усталости  $\alpha_y$ , равный разности между критическим напряжением и пределом выносливости материала (выражен в касательных напряжениях):  $\alpha_y = \tau_K - \tau_w$ ;
- базовое число циклов нагружения  $N_w$  (число циклов до разрушения материала при минимальном напряжении  $\sigma_w$  вызывающем образование субмикроскопических трещин);
- циклический предел упругости  $\sigma_{B.Ц}$  (максимальное напряжение, при котором необратимые искажения кристаллической решетки не появляются при любом числе циклов нагружения);
- коэффициент  $K$  живучести металла, равный тангенсу угла наклона линии необратимой повреждаемости  $A'C$  к оси ординат:  $K = tg \varphi$ .

Перечисленные критерии усталости используют при оценке усталостной прочности материалов экспериментальными методами и при проведении лабораторных испытаний образцов материалов на усталость в условиях циклического нагружения.

Отказы машин, вызванные усталостным разрушением материала, не всегда связаны с поломкой деталей. Усталостные трещины, сами по себе незначительно снижающие работоспособность механизма, представляют опасность, поскольку при быстром распространении могут, смыкаясь, значительно уменьшить несущую способность детали и вызвать ее поломку. В реальных сборочных единицах дорожных машин усталостные изменения в материалах протекают в сочетании с другими процессами, вызывающими разрушение деталей. Типичными примерами такого сочетания могут служить усталостное изнашивание и коррозионно-усталостное разрушение, наблюдаемое, например, при фреттинг-коррозии. В таких случаях интенсивность разрушения поверхности, как правило, выше интенсивности воз-

никновения повреждения как суммы повреждений при действии каждого процесса в отдельности. Определение закономерностей, описывающих данное явление, и оценка долговечности детали представляют непростую задачу, требующую проведения специальных экспериментальных исследований.

Полимерные материалы и эластомеры, имеющие аморфную структуру, также подвержены изменениям усталостного характера под действием циклического нагружения. Однако механизм явлений, приводящих к зарождению повреждений в цепных молекулах, в настоящее время еще недостаточно изучен.

Сопротивление разрушению высоко- и низкомолекулярных соединений существенно зависит от температуры и скорости деформирования, а также от времени выдержки под нагрузкой. Из микроскопических трещин, зародившихся в звеньях молекулярных цепей, развиваются магистральные трещины, пересекающие большое число цепных молекул. При постоянной или возрастающей нагрузке с увеличением скорости эти трещины растут до полного разрушения материала. Большое влияние на скорость зарождения и распространения трещин оказывают технологические дефекты материалов в виде пор, надрывов, поверхностных царапин и т.п., которые являются источниками преждевременного возникновения повреждений.

Многие полимерные материалы подвержены процессу старения. Под *старением* материала подразумевают изменение его физико-механических свойств во времени в результате физико-химических процессов, активизируемых под влиянием внешней среды.

Рассмотрим в качестве примера процесс старения ненасыщенных полимеров (каучука). Ненасыщенные полимеры в процессе работы поглощают кислород из воздуха и, взаимодействуя с ним, теряют эластичность. Процесс старения можно представить в виде трех стадий. На первой стадии происходит поглощение кислорода с примерно постоянной скоростью, обусловленной наличием ингибиторов в материале. Ингибиторы снижают интенсивность поглощения полимером кислорода и таким образом замедляют процесс старения. На второй стадии, после того как ингибитор израсходован, происходит активизация окисления. Интенсивное взаимодействие полимера с кислородом ведет к снижению его прочности на растяжение и модуля упругости, к повышению хрупкости. На третьей стадии, когда верхние слои полимера оказываются достаточно насыщены кислородом и разрушены, процесс окисления замедляется.

### 3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ

#### 3.1. Общая закономерность изнашивания

Основной причиной, порождающей дефекты деталей, является физический, или материальный, их износ. При работе машины на поверхностях деталей в результате трения происходят непрерывные процессы, которые приводят к изменению физико-механических и химических свойств их материала, формы, размеров, микрогеометрии поверхностей, массы деталей и других показателей.

*Изнашиванием* называют 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. Основными количественными характеристиками изнашивания являются износ, скорость изнашивания, интенсивность изнашивания.

*Износ* – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Износ (абсолютный или относительный) характеризует изменение геометрических размеров (линейный износ), массы (весовой износ) или объема (объемный износ) детали вследствие изнашивания и измеряется в соответствующих единицах. Различают предельный и допустимый износ. *Предельным* называют износ, соответствующий предельному состоянию изнашиваемого изделия или его составной части. *Допустимым* называют износ, при котором изделие сохраняет работоспособность. Допустимый износ всегда по абсолютному значению меньше предельного и соответствует предотказному состоянию объекта.

*Скорость изнашивания*  $V$  ( м/ч, г/ч, м<sup>3</sup>/ч) – отношение износа  $I$  к интервалу времени  $\tau$ , в течение которого он возник:

$$V_I = I / \tau$$

*Интенсивность изнашивания* – отношение износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы:

$$J = I / L$$

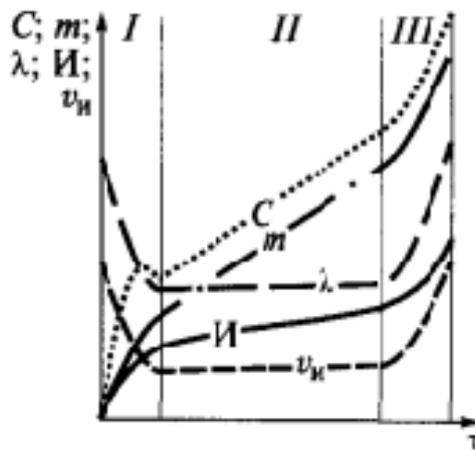
При линейном износе интенсивность изнашивания является безразмерной величиной, а при весовом – измеряется в единицах массы, отнесенной к единице пути трения.

Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения характеризуется *износостойкостью* – величи-

ной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания, в соответствующих единицах.

В процессе работы машины показатели изнашивания деталей и сопряжений не сохраняют постоянных значений. Изменение износа деталей во времени в общем случае можно представить в виде модели, которую предложил В. Ф.Лоренц (рис. 19). В начальный период работы, называемый периодом приработки, наблюдается довольно быстрое изнашивание деталей (участок I). Продолжительность этого периода обуславливается качеством поверхностей и режимом работы-механизма и составляет обычно 1,5...2 % ресурса узла трения. После приработки наступает период установившегося режима изнашивания (участок II), определяющий долговечность сопряжений. Третий период – период катастрофического изнашивания (участок III) – характеризует предельное состояние механизма и ограничивает ресурс.

Как видно по приведенным на рис. 19 графикам, процесс изнашивания оказывает прямое, определяющее влияние на возникновение отказов и неисправностей узлов трения машин. Изменение показателей надежности во времени идентично изменению показателей изнашивания. Более высокая крутизна кривых  $m(x)$  и  $C(x)$  на участке II объясняется тем, что с наработкой возникают отказы, вызванные, помимо изнашивания, усталостным, коррозионным разрушением или пластическими деформациями.



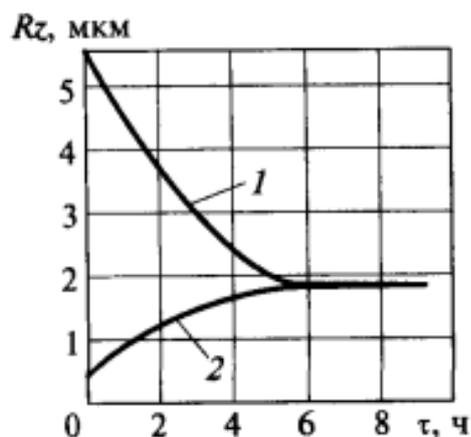
**Рис. 19.** Кривые изменения параметров сопряжения в процессе работы:  $C$  - затраты на поддержание работоспособности;  $m, \lambda$  - частота и интенсивность отказов;  $I$  – износ;  $v_{из}$  - скорость изнашивания.

**Приработкой** называют процесс изменения геометрических параметров поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при

постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания. Процесс приработки характеризуется интенсивным отделением с поверхностей трения продуктов изнашивания, повышенным тепловыделением и изменением микрогеометрии поверхностей.

Повышение температуры поверхностей трения вызывает изменение физико-механических свойств поверхностных слоев материала. Изменение структуры и свойств металлов в поверхностных слоях деталей происходит также вследствие наклепа, вызванного пластическими деформациями микрообъемов материала рабочей поверхности в процессе приработки. Интенсивное разрушение выступов, обладающих наименьшей прочностью, образование новых неровностей, отличающихся по форме и размерам от исходных, а также изменение формы остальных, ранее существовавших неровностей в процессе приработки ведут к изменению микрогеометрии поверхности.

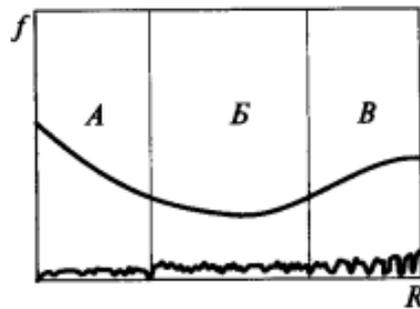
Экспериментально установлено, что при разных условиях в различных парах трения после приработки устанавливается одинаковая, так называемая «равновесная» шероховатость, характерная для определенных материалов. Равновесная шероховатость воспроизводится в процессе изнашивания поверхностей и остается в среднем постоянной. Исходная микрогеометрия поверхностей трения не оказывает влияния на равновесную шероховатость (рис. 20).



**Рис. 20.** Кривые изменения микрогеометрии рабочих поверхностей деталей сопряжения сталь-бронза в процессе приработки в условиях трения со смазочным материалом при различной начальной шероховатости ( $p=3$  МПа;  $v=5$  м/с): 1 – сталь; 2 – бронза

Схема формирования равновесной шероховатости показана на рис.21. В процессе приработки высота неровностей при большой начальной шероховатости ( $Rz$  3...5 мкм) уменьшается вследствие механического взаимодействия поверхностей. При этом наблюдаются микрорезание и

пластическая деформация материала на рабочих поверхностях деталей сопряжения.



**Рис. 21.** Схема формирования равновесной шероховатости в процессе приработки:

$f$  — коэффициент трения;  $R$  — параметр шероховатости;  $A$  — зона схватывания при малой ( $0,5 \dots 1,5$  мкм) начальной шероховатости;  $B$  — зона равновесной шероховатости;  $B$  — зона микрорезания при большой ( $3 \dots 5$  мкм) начальной шероховатости)

В процессе приработки при малой исходной шероховатости поверхностей ( $R_z 0,5 \dots 2$  мкм) высоты неровностей преимущественно увеличиваются вследствие молекулярного взаимодействия. В результате схватывания рабочих поверхностей деталей, возникающего под действием сил молекулярного притяжения, происходит разрушение материала, появляются новые неровности, и, таким образом, формируется шероховатость, отличная от исходной.

При правильном выборе соотношения твердостей деталей и режимов приработки достаточно быстро наступает период так называемого нормального, или установившегося, изнашивания (см. рис. 19, участок II). Этот период характеризуется невысокой, примерно постоянной интенсивностью изнашивания и продолжается до тех пор, пока изменения размеров или формы деталей не повлияют на условия их работы, либо до наступления предела усталости материала.

Накопление изменений геометрических размеров и физикомеханических свойств деталей ведет к ухудшению условий работы сопряжения. Основным фактором при этом является повышение динамических нагрузок вследствие увеличения зазоров в парах трения. В результате наступает период катастрофического, или прогрессивного, изнашивания (см. рис. 19, участок III). Описанная закономерность является условной и служит лишь иллюстрацией процесса изнашивания элементов машин.

### 3.2. Виды и теории трения

Изнашивание деталей определяется различными видами трения и условиями эксплуатации. Изнашивание деталей, образующих подвижное сопряжение, зависит от характера перемещения трущихся поверхностей – скольжения поверхностей относительно друг-друга (трение скольжения), перекатывания (трение качения) или перекатывания со сдвигом. При трении скольжения характерно истирание деталей, а при трении качения – смятие и выкрашивание.

Для деталей, работающих в условиях сложного трения, при котором происходит перекатывание со сдвигом, характерно выкрашивание (питтинг).

Различают трение ювенильных (идеально чистых) поверхностей, гидродинамическое трение, когда трущиеся поверхности полностью разделены жидкой средой, граничное трение, при котором внешняя нормальная нагрузка воспринимается деформирующимися выступами контактирующих поверхностей и гидродинамическим клином, образуемым вязкой промежуточной средой. В зависимости от условий работы преобладает либо контактирование трущихся поверхностей, либо разделение их гидродинамическим клином.

В процессе работы сопряжения общая сила трения является суммой сил, возникающих в результате того, что часть поверхности работает в режиме трения ювенильных контактов ( $S_{Ю}$ ), часть – в режиме граничного трения ( $S_{ГР}$ ) и часть – в режиме гидродинамического трения ( $S_{ГД}$ ).

Общая площадь, участвующая в трении, равна

$$S = S_{Ю} + S_{ГР} + S_{ГД}.$$

В зависимости от изменения соотношения этих площадей изменяется и коэффициент трения.

Известными физиками и исследователями разработано несколько теорий трения.

**Механическая теория трения.** Французскими физиками Амонтоном и Кулоном в 1699 году сформулирован закон трения, выраженный равенством

$$F = \mu \cdot N ,$$

где  $F$  – сила трения в кг;

$\mu$  – коэффициент трения;

$N$  – нормальная нагрузка, кг.

**Молекулярная теория трения.** Русский физик Б. В. Дерягин разработал молекулярную теорию трения и предложил закон трения в виде

$$F = \mu \cdot S(P_0 + P),$$

где  $F$  – сила трения в кг;

$\mu$  – коэффициент трения;

$S$  – площадь истинного контакта, см<sup>2</sup>;

$P_0$  – удельная сила молекулярного взаимодействия, кг/см<sup>2</sup>;

$P$  – удельное давление, кг/см<sup>2</sup>;  $P = \frac{N}{S}$ .

Причиной возникновения трения по этой теории являются атомные взаимодействия поверхностей, образующих сопряжения. При этом под действием внешнего давления электронные оболочки атомов настолько сближаются, что развиваются отталкивающие атомные силы. Сила, которая преодолевает возникающие отталкивающие атомные силы, и является силой трения.

**Молекулярно-механическая теория трения.** Известный русский физик И. В. Крагельский разработал молекулярно-механическую теорию трения. Для определения силы трения им было предложено выражение

$$F = \tau_{МЕХ} + \tau_{МОЛ} = \alpha \cdot S_{\phi} + \beta \cdot N,$$

где  $\tau_{МЕХ}$  – составляющая силы трения механического происхождения, Н (кг);

$\tau_{МОЛ}$  – составляющая силы трения молекулярного происхождения, Н (кг);

$S_{\phi}$  – фактическая площадь контакта, см<sup>2</sup>;

$N$  – давление, МПа (кг/см<sup>2</sup>);

$\alpha$  и  $\beta$  – величины, определяемые из опыта.

**Гидродинамическая теория трения.** Учеными Н. Н. Петровым, Н. Е. Жуковским, С. А. Чаплыгиным, Рейнольдсом, Митчелом, В. И. Казарцевым, Е. М. Гутьяром, С. А. Чернавским и др. были разработаны основы гидродинамической теории смазки.

По Н. Н. Петрову сила трения

$$F = \frac{\eta \cdot S \cdot V}{h},$$

где  $S$  – площадь поверхностей скользящих одна относительно другой, м<sup>2</sup>;

$V$  – скорость скольжения, м/с;

$h$  – толщина масляного слоя, м;

$\eta$  – абсолютная динамическая вязкость масла, Н · с/м<sup>2</sup>.

Для определения наивыгоднейшего зазора, при котором обеспечивается оптимальная толщина масляного слоя, профессор В. И. Казарцев, основываясь на гидродинамической теории трения, предложил формулу:

$$S_{наив} = 0,467d \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \eta}{k \cdot c}},$$

где  $d$  – диаметр вала, мм;

$n$  – частота вращения вала, мин<sup>-1</sup>;

$k$  – удельное давление, Па·с (кг/м<sup>2</sup>).

$c$  – поправка на конечную длину подшипника, причем

$$c = \frac{d + l}{l},$$

где  $d$  – диаметр подшипника, мм;

$l$  – длина подшипника, мм.

Максимально допустимый зазор можно определить по формуле

$$S_{max} = \frac{S_{наив}^2}{\delta},$$

где  $\delta$  – величина, определяемая в зависимости от величин неровностей поверхности вала и подшипника и размера абразивных частиц, находящихся между трущимися поверхностями.

Поддержание зазоров в допустимых пределах способствует увеличению срока службы сопряжений. Например, в кривошипных механизмах (шатунный подшипник) сила удара изменяется пропорционально кубическому корню из величины зазора в четвертой степени, то есть сила удара до определенных значений  $S$  равна

$$T = a \cdot \sqrt[3]{S^4}.$$

**Трение качения.** Сила сухого трения качения  $F_{КАЧ}$  шара или цилиндра радиусом  $R$  по плоской поверхности по закону Кулона равна

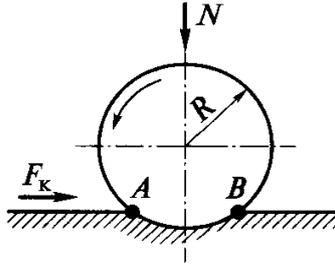
$$F_{КАЧ} = \frac{f_K}{R} \cdot P,$$

где  $f_K$  – коэффициент трения качения;

$P$  – сила, с которой шар или цилиндр давит на плоскость, Н.

Обычно силы трения качения значительно (примерно в 100 раз) меньше сил трения скольжения.

Физическая сущность трения качения заключается в следующем. При взаимодействии цилиндра с плоскостью (рис. 3.1) материал цилиндра на участке  $A-B$  сжимается, а материал плоскости в этой же области растягивается. Таким образом, при качении цилиндра, т.е. при последовательном нарушении контакта, точки поверхности цилиндра на участке  $A-B$  будут стремиться сблизиться, а соответствующие точки плоскости – удалиться одна от другой. Это приведет к относительному скольжению поверхностей цилиндра и плоскости.



**Рис. 22.** Схема фрикционного контакта поверхностей деталей при трении качения

Коэффициент трения качения имеет линейную размерность и представляет собой полухорду зоны сжатия  $A-B$  материала. Значение коэффициента трения качения зависит от упругих свойств материалов деталей сопряжения.

В узлах трения сборочных единиц могут одновременно возникнуть трение качения и трение скольжения. Это особенно характерно для элементов зубчатых передач.

Перечисленные виды трения наблюдаются при взаимодействии твердых тел. Между тем сопротивление относительно перемещению возникает и при взаимодействии твердых тел с жидкостью или газом. В механических системах такие виды трения встречаются в подшипниках, элементах гидравлического или пневматического привода машины. В таких случаях характер трения определяется микрогеометрией твердой поверхности, параметрами потока (скорость, угол атаки, расход жидкости или газа), а также свойствами рабочей среды (вязкость, плотность, температура). Рассмотренные ранее процессы взаимодействия являются различными вариантами внешнего трения.

При решении инженерных задач иногда приходится сталкиваться с явлением трения, возникающим внутри материала. При трении двух тел со смазочным материалом силы сопротивления относительно перемещению слоев смазочного материала прямо пропорциональны его вязкости. Для твердых тел процесс трения, происходящий внутри материала, сопровождается выделением теплоты при сообщении телу механической энергии. Этот процесс может происходить и в совокупности с внешним трением твердых тел. В инженерной практике такая ситуация наблюдается, например, при обработке металлов давлением.

Понятия «трение» и «движение» неразделимы. Любое относительное перемещение тел сопровождается трением. На преодоление сил трения в той или иной форме в настоящее время расходуется от трети до половины мировых энергетических ресурсов. Поэтому исследования трения и процессов, связанных с преодолением сил трения, исключительно важны.

### 3.3. Виды изнашивания реальных деталей машин

В соответствии с государственным стандартом ГОСТ 23.002–78 и классификацией, разработанной профессором М. М. Хрущовым, выделяются три вида изнашивания: механическое; молекулярно-механическое и коррозионно-механическое. Эти виды в свою очередь делят на 10 подвигов. Некоторые авторы выделяют в классификации четвертый тип изнашивания – при действии электрического тока (рис. 23). С этим необходимо согласиться, так как при прохождении электрического тока в результате воздействия разрядов происходит эрозийное разрушение поверхности детали. Так, например, изнашиваются коллекторы, щетки, детали прерывателя и др. детали автотракторного электрооборудования.

В отличие от эрозии под влиянием механических воздействий и воздействий в потоке газов или жидкостей и отнесенных к механическому изнашиванию, электроэрозийное изнашивание следует выделить в отдельный специфический вид изнашивания – под действием электрического тока.

**Абразивное изнашивание** – это механическое изнашивание материала, происходящее в результате режущего и царапающего действия на него твердых частей, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Оно происходит вследствие разной твердости граней зерен материала деталей и образования в процессе трения новых химических соединений (окислов) с большой твердостью. Абразивное изнашивание возникает также и от попадания извне между трущимися поверхностями абразивных частиц. Этому изнашиванию подвержены детали корпуса плуга – лемехи, отвалы, полевые доски; культиваторные лапы; рабочие органы зернотуковых сеялок, луцильников, борон и др.

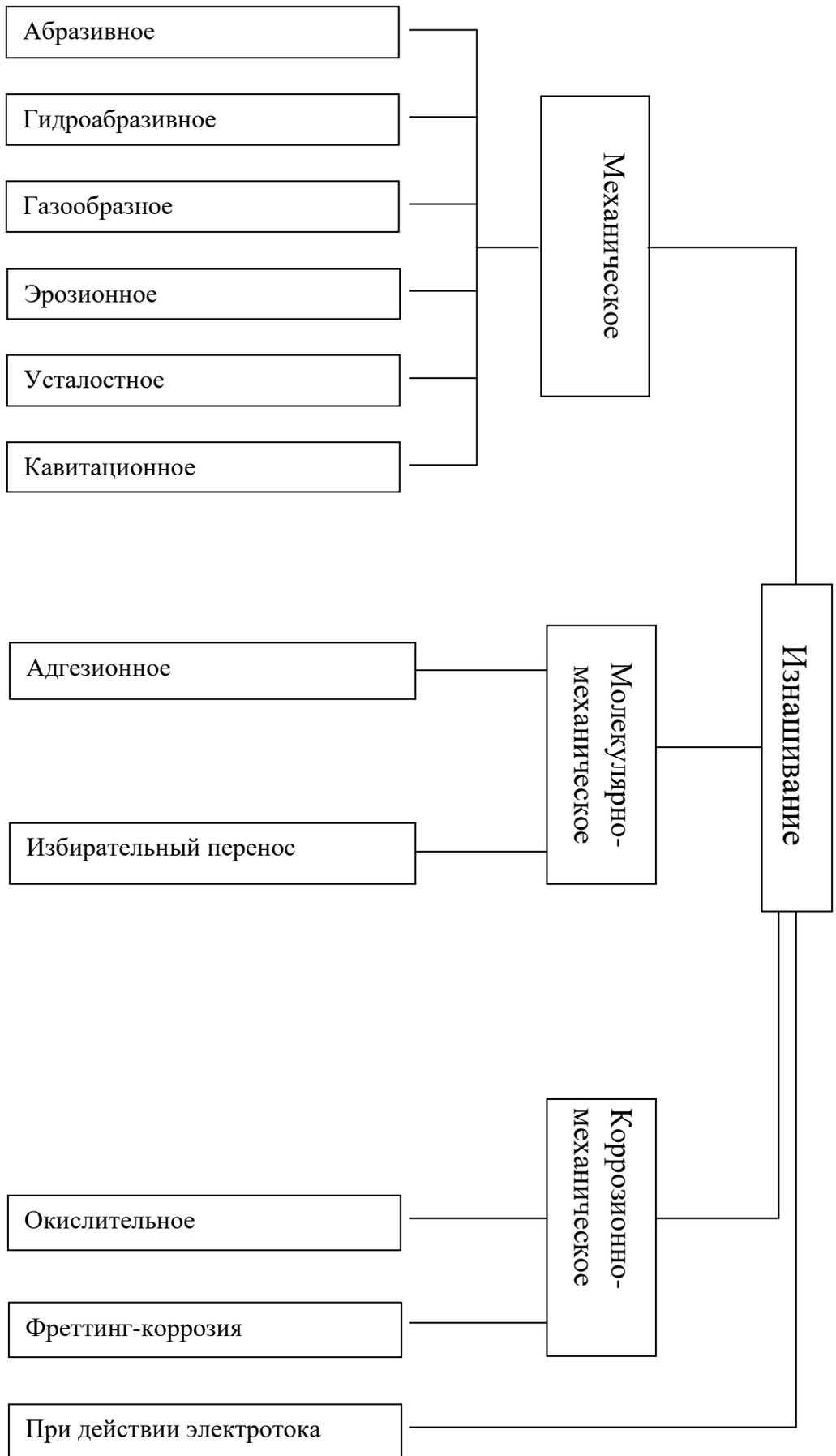


Рис. 23 Классификация видов изнашивания в машинах

**Окислительное изнашивание** – коррозионно-механическое изнашивание, при котором в основном на изнашивание влияет химическая реакция материала с кислородом или окружающей средой. Окислительному изнашиванию подвергаются детали ДВС – палец поршня, шейки коленчатого и распределительного валов и др.

**Усталостное изнашивание** представляет собой условное и обобщающее определение, под которым подразумевается разрушение деталей под действием знакопеременных нагрузок при повторном (циклическом) деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя, например, подшипников качения и скольжения, зубьев шестерен и им подобных деталей по условиям работы.

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

**Гидро-газоэрозионное изнашивание** – эрозионное изнашивание поверхности металла в результате воздействия потока жидкости (газа). Такому изнашиванию подвергаются, например, выпускные клапаны ДВС, шлицы вторичного вала коробки передач и др.

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

**Кавитационное изнашивание** – гидроэрозионное механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, во время которого пузырьки газа разрываются вблизи поверхности, что создает местное повышение давления или температуры, образуя язвы и оспины. Этому виду изнашивания в значительной степени подвержены гильзы цилиндров ДВС.

**Адгезионное изнашивание** является следствием возникновения в локальных участках контакта поверхностей трения атомно-молекулярного взаимодействия. Причем адгезионные связи микровыступов поверхностей трения значительно превосходят прочность связей материала поверхностей трения с основным материалом. В некоторых случаях адгезионное изнашивание приводит к заеданию поверхностей трения и отказу узла трения.

**Изнашивание в условиях избирательного переноса при трении** по Д. Н. Гаркунову (эффект безызности) характеризуется протеканием сложных физико-химических, химических, электрических и механических процессов как в смазочной среде, так и на поверхностях трения. В результате взаимодействия поверхностей трения и смазочной среды образуется тонкий слой, обогащенный медью. Этот слой обеспечивает значительное уменьшение трения и способствует равномерному распределению нагрузки по поверхности трения.

Процесс избирательного переноса можно условно разделить на две стадии: начальную и в установившемся режиме. В начальной стадии происходит интенсивное деформирование поверхностных слоев менее жесткого трущегося тела, сложные механико-химические и физико-химические превращения на поверхностях трения и в смазочной среде, снижение интенсивности износа поверхностей трения менее жесткого трущегося тела, формирование металлической (сервовитной) защитной пленки на поверхностях трения и начало избирательного растворения элементов поверхностей трения.

Для установившегося режима избирательного переноса характерно постоянство во времени коэффициента трения и интенсивности изнашивания, стабилизация химического состава поверхностей трения, а также химического и фракционного состава смазочной среды. Используя явление избирательного переноса, удастся значительно повысить износостойкость некоторых узлов трения, как, например, уплотнений подшипниковых узлов, шлицевых соединений карданных валов автомобилей, узлов трения их рулевых систем и др.

**Изнашивание при фреттинг-коррозии** происходит в условиях малых колебательных относительных перемещений контактирующих металлических поверхностей. Фреттинг-коррозия значительно отличается от других видов разрушения поверхностей: скорость относительного перемещения поверхностей трения значительно меньше скорости при обычном трении скольжения; из-за малой амплитуды смещений затрудняется удаление продуктов износа из зоны контакта; большая интенсивность разрушения; продуктами фреттинг-коррозии металлов являются их окислы.

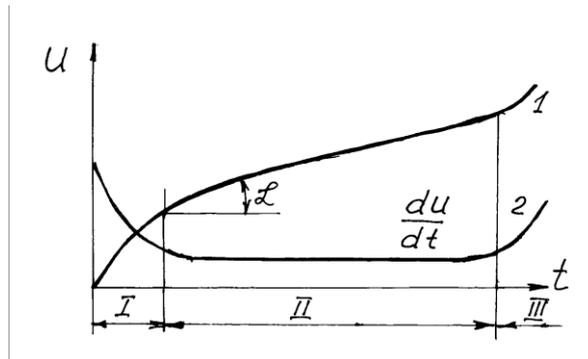
Процесс фреттинг-коррозии можно разделить на три этапа. На первом происходит упрочнение поверхностей трения с образованием ювенильных участков металла. Второй характеризуется химическим взаимодействием поверхностей трения с окружающей средой (кислородом, влагой и т. п.) и образованием твердого абразивного порошка оксидных пленок. Следует отметить, что скорость износа на этом этапе относительно невелика. Третий связан с высокой интенсивностью разрушения поверхностных слоев, что приводит к образованию большого количества продуктов износа и интенсификации абразивного изнашивания.

Чаще всего этому виду изнашивания подвержены подшипники качения (посадочные поверхности колец), контактные поверхности рессор, места посадки на вращающиеся валы муфт, шпоночные и болтовые соединения, кулачковые механизмы, клапаны и толкатели, контактные поверхности пружин и др.

### **3.4. Стадии изнашивания и предельные износы сопряжений деталей**

Детали во время эксплуатации изнашиваются неравномерно. Для большинства металлических деталей и сопряжений этот процесс может

быть охарактеризован кривой суммарного нарастания износа (рис. 24).



**Рис. 24.** Кривая суммарного нарастания износа

По оси абсцисс отложено время  $t$  работы пары трения, а по оси ординат — износ детали. Тангенс угла наклона  $\alpha$ , образованный осью абсцисс и касательной к кривой в произвольной точке, определяет скорость изнашивания в данный момент времени.

На кривой изнашивания в общем случае (кривая 1) выделяется три участка, соответствующие трем стадиям изнашивания: **I** — начальное изнашивание, наблюдаемое при приработке поверхностей деталей; **II** (прямолинейный участок кривой) — установившееся изнашивание ( $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$ ); **III** — процесс резкого возрастания скорости изнашивания, соответствующий периоду форсированного изнашивания.

Детали после сборки сопрягаются по выступам неровностей поверхностей, и площадь их фактического контакта в начальный период трения мала. Поэтому при нагружении в сопряжении деталей действуют большие давления, результатом чего является значительная пластическая деформация — неровности поверхностей частично сминаются и частично разрушаются как по выступам, так и по впадинам. Срабатывание микронеровностей, сглаживание макронеровностей и волнистости поверхностей сопровождается увеличением несущей поверхности, интенсивность изнашивания при этом снижается.

Микротвердость поверхностей трения к концу приработки стабилизируется независимо от их начального состояния. За время приработки происходит передеформирование поверхности и изменение ее физико-химических свойств.

Процесс установившегося изнашивания заключается в деформировании, разрушении и непрерывном воссоздании на определенных участках поверхностного слоя со стабильными свойствами. Износ деталей может существенно изменять свойства сопряжения. Увеличение зазоров в сочленениях ухудшает условия жидкостной смазки и может повысить фактор динамичности, а истирание цементированного или поверхностно закаленного слоя открывает поверхности с пониженной износостойкостью. Изме-

нения в макрогеометрии поверхностей (например, образование овальности и конусности шеек валов и цилиндров) также являются причинами, ухудшающими условия трения. Подобные обстоятельства могут вызвать при дальнейшей работе сопряжения увеличение интенсивности изнашивания и привести к отказу соединения.

Кривая (2) на рис. 24 характеризует скорость изнашивания.

В начале третьего периода форсированного (аварийного) изнашивания (лучше в конце второго периода нормальной эксплуатации) дефектные элементы узлов трения должны быть заменены на новые, а в случае необходимости узел трения следует снять с машины и направить в ремонт.

По графику изнашивания (см. рис. 24) срок службы сопряжения или детали определяют по формуле

$$t = (U_{\max} - U_o) \cdot \gamma,$$

где  $U_{\max}$  – предельный износ;

$U_o$  – начальный износ (приработочный износ);

$\gamma = \operatorname{tg} \alpha$  – скорость изнашивания.

Для расчета необходимо установить предельный износ и знать скорость изнашивания.

Износ детали или сопряженной пары нередко характеризуется несколькими показателями. Важно выявить наиболее существенный из них по воздействию на работоспособность. На работу подшипника скольжения влияет не только увеличение зазора. Эллиптичность и др. искажения формы деталей изменяют кривизну соприкасающихся поверхностей, и поэтому режимы трения при жидкостной смазке становятся иными. Как было показано выше, с помощью гидродинамической теории смазки не представляет особого труда решить задачу о допустимом предельном зазоре в подшипнике при геометрически правильных поверхностях деталей, но расчет допустимых искажений формы представляет собой довольно сложную задачу. Нужно проводить стендовые испытания, сочетая их с теоретическим расчетом той или иной степени приближения.

Определить скорость изнашивания в реальных парах можно только на основании опыта эксплуатации, но и здесь наблюдается большой разброс результатов.

В каждый момент скорость изнашивания деталей является функцией многих переменных факторов, таких, как неоднородность материалов одних и тех же марок, отличия исходных действительных размеров деталей в сопряжениях и вариации зазоров в пределах полей допусков, различия условий эксплуатации и характеристика перерабатываемого материала в технологических машинах и т. д.

Сведения о сроках службы детали необходимы инженерам-эксплуатационникам при планировании ремонта машин. Так как достоверные данные по скорости изнашивания каждой детали получить невозможно, то важны результаты статистической обработки данных о сроках службы масла в отдельных узлах, сроках очистки фильтров и др. Учитывая, что при длительной эксплуатации начальный износ составляет обычно небольшую часть от полного износа, можно скорость изнашивания определить как частное от деления полного износа на время работы машины, включая и обкатку. Такие данные имеются для многих машин массового производства. Уменьшая промежутки между обмерами, но оставляя их все же достаточно длительными, можно получить представление о скорости или интенсивности изнашивания при различных наработках.

Средние сроки службы различных деталей одной и той же машины должны быть кратными между собой и кратными межремонтному периоду работы машины.

**Обоснование и расчет предельного состояния** позволяет полнее использовать каждую деталь, сопряжение, узел и механизм машины при минимальных затратах средств. При заниженных предельных состояниях ресурс сельскохозяйственной техники используется не полностью, а при завышенных могут возникать аварийные отказы, увеличатся простои техники и затраты на ее эксплуатацию и ремонт.

Изменение состояния сопряжений характеризуется, главным образом, износом деталей, а поэтому предельное состояние сопряжений устанавливается по критериям (признакам) предельного износа.

Рекомендуется рассматривать три критерия (по Г. В. Веденяпину) предельного состояния деталей и сопряжений: технический (безотказность, работа без поломок), технологический (качество работы) и экономический.

Критерий предельного износа рекомендуется устанавливать в зависимости от того, какое влияние оказывает износ детали на работу машины. При этом рассматривается три случая.

В первом случае (рис. 25, *a*) в результате износа машина не может больше функционировать, то есть становится неработоспособной.

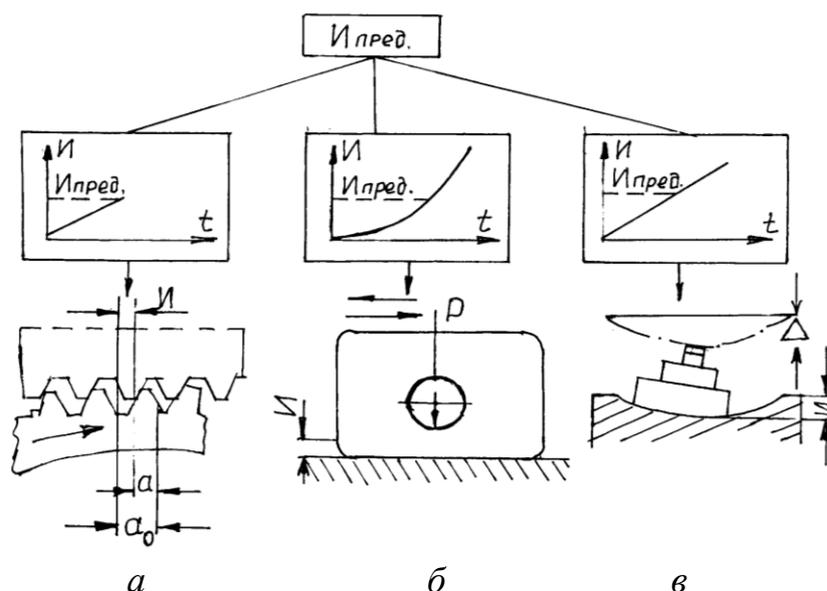


Рис. 25. Критерии предельного износа машины и ее элементов

Например, происходит поломка коленчатого вала, задир поверхностей вкладышей коренных или шатунных подшипников, поломка поршневого пальца.

Во втором случае (рис. 25, б) износ приводит к попаданию в зону интенсивного выхода из строя машины и ее деталей. При этом возникают удары, происходит форсированное изнашивание поверхностей, возрастают вибрации машины, повышается температура узлов. На кривой износа в зависимости от наработки – это период аварийного изнашивания. Этот случай можно проиллюстрировать на примере верхнего поршневого кольца ДВС, покрытого электролитическим хромом.

Предельный износ наступает тогда, когда в результате изнашивания слой хрома будет снят и интенсивность изнашивания сопряжения при этом резко возрастает.

В третьем случае (рис. 25, в) в результате износа характеристики машины выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (снижается точность работы, падает производительность, КПД, и т. п.). При износе деталей цилиндро-поршневой группы ДВС изменяются мощность, удельный расход топлива, повышается расход моторного масла, прорыв газов в картер. ДВС может продолжать работать, но как только состояние его сопряжений будет соответствовать максимально допустимым его характеристикам, это состояние станет предельным.

Насос гидросистемы при предельном состоянии не обеспечивает необходимой подачи. Предельные износы основных деталей часто устанавливаются на основании практических данных эксплуатации и ремонта машин отдельных марок.

Для определения наработки (ресурса)  $T$  необходимо иметь кривую износа детали в зависимости от наработки (рис. 26) и значение предельного износа  $I_{\text{ПРЕД}}$ , так как

$$T = \frac{I_{\text{ПРЕД}}}{\gamma},$$

где  $\gamma$  – случайная функция, характеризующая скорость изнашивания сопряжения.

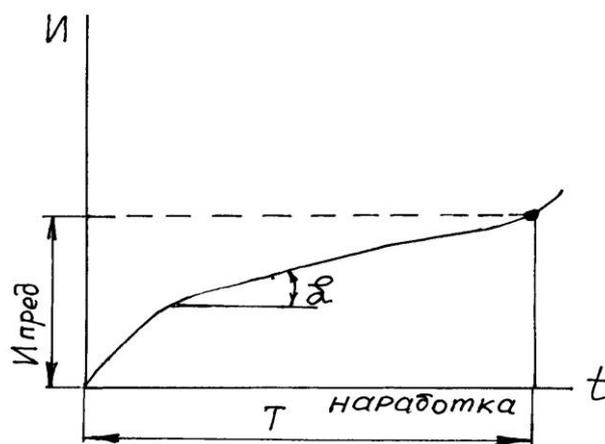


Рис. 26. Зависимость износа от наработки

С другой стороны,  $\gamma = du/dt = f(P, V, K_T, K_\Theta)$ , то есть функция, зависящая от нагрузки, скорости скольжения, технологических и эксплуатационных факторов.

Допустимые износы  $I_{\text{ДОП}}$  (рис. 27) меньше предельных  $I_{\text{ПРЕД}}$ , так как деталь не должна выйти из строя в течение последующей межремонтной наработки  $T_1$ .

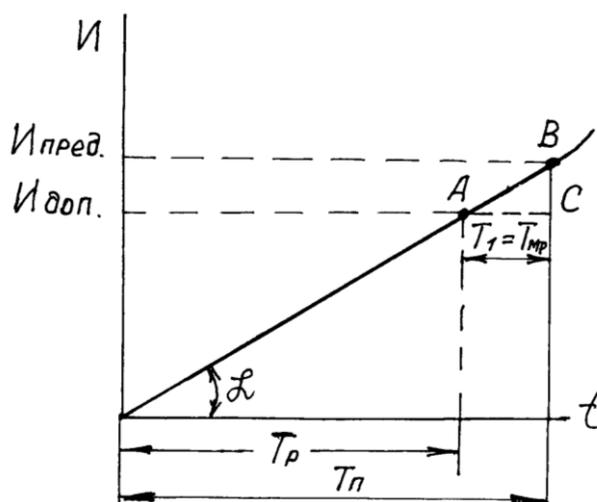


Рис. 27. К расчету допустимого и предельного износа детали

За период межремонтной наработки износ детали увеличивается на  $\gamma \cdot T$ . Отсюда имеем:

$$I_{\text{ДОП}} + \gamma \cdot T_1 = I_{\text{ПРЕД}}$$

или  $I_{\text{ДОП}} = I_{\text{ПРЕД}} - \gamma \cdot T_1$ .

Учитывая, что  $\text{tg} \alpha = \gamma = I_{\text{ДОП}} / T_p$ , где  $T_p$  – наработка детали до выполняемого в данный момент ремонта, получим

$$I_{\text{ДОП}} \left( 1 + \frac{T_1}{T_p} \right) = I_{\text{ПРЕД}};$$

$$I_{\text{ДОП}} = \frac{I_{\text{ПРЕД}}}{1 + \frac{T_1}{T_p}}. \quad (2)$$

Если от последнего ремонта данный периодический ремонт, при котором проводится дефектация деталей, будет  $K$ , то  $T_p = K T_1$ .

Тогда формула (2) для подсчета допустимого износа примет вид

$$I_{\text{ДОП}} = \frac{I_{\text{ПРЕД}}}{1 + \frac{T_1}{K T_1}}; \quad I_{\text{ДОП}} = \frac{K}{K + 1} I_{\text{ПРЕД}}.$$

По значениям  $I_{\text{ПРЕД}}$  можно определять наработку  $T_p$  деталей, заменяемых при периодическом ремонте.

Подставляя в формулу значение  $I_{\text{ДОП}} = \gamma \cdot T_p$ , получаем

$$\gamma T_p = \frac{K}{K + 1} I_{\text{ПРЕД}},$$

откуда следует:

$$T_p = \frac{K}{K + 1} I_{\text{ПРЕД}} / \gamma$$

или 
$$T_p = \frac{K}{K + 1} T_{\text{П}}.$$

Учитывая, что  $\gamma$  – случайная величина, в значительной мере зависящая от реальных условий эксплуатации, и, кроме того, наблюдается рассеивание величины  $T_p$ , на практике пользуются вероятностными показателями  $T_p$ .

Рассмотрим еще один пример определения предельных и допустимых размеров или других контрольных показателей технического состояния деталей, сопряжений, механизмов, которые необходимы для дефектации ремонтируемых машин. Ю. Н. Артемьевым разработана методика определения допустимых износов деталей и допустимых износов сопряжений, имеющих недолговечные сменные детали, заключающаяся в следующем.

На схеме (рис. 28) построены линии износа деталей № 1 и № 2, работающих в сопряжении с деталью № 1. Начальный зазор в сопряжении деталей на схеме обозначен  $S_{НАЧ}$ . Средняя интенсивность (скорость) изнашивания детали № 1 характеризуется углом  $\alpha_1$  наклона линии износа, а детали № 2 – углом  $\alpha_2$ . Предельная наработка сопряжения, а следовательно, и предельный зазор в сопряжении определяется аналитически или графически. На схеме эти показатели отмечены вертикальной линией I – I, предельная наработка обозначена  $T_{ПРЕД}$ , а предельный зазор –  $S_{ПРЕД}$ .

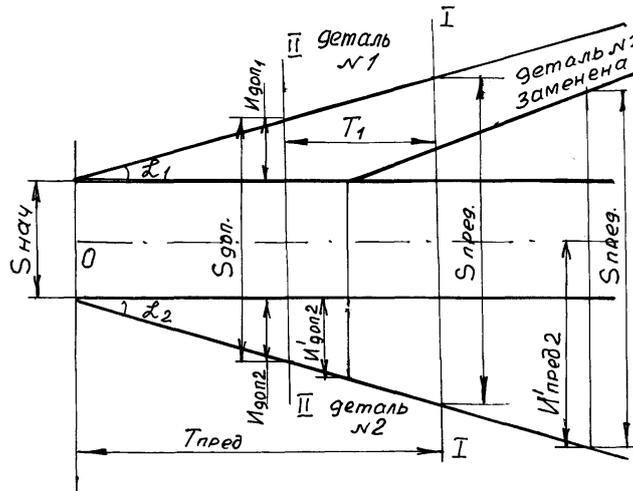


Рис. 28. К определению допустимых износов деталей и допустимых зазоров в сопряжениях

Если известно, через какую наработку данное сопряжение обязательно вторично поступит на ремонтное предприятие на контроль или ремонт, то по построенной схеме можно установить допустимый износ обеих деталей и допустимый зазор в сопряжении.

Для этого необходимо влево от вертикали I – I отложить значение  $T_1$ , соответствующее межремонтной наработке, и провести вертикаль II – II. Размер  $S_{ДОП}$ , показанный на этой вертикали, будет соответствовать значению допустимого зазора, при котором детали с износом можно без восстановления оставить на машине, так как они отработают ресурс до следующего ремонта. Пересечение вертикали II – II с линией износа детали № 1 позволяет определить также допустимый ее износ, обозначенный на рис. 28  $I_{ДОП1}$ , а с линией износа детали № 2 – допустимый износ  $I_{ДОП2}$ .

Когда предельный зазор в сопряжении увеличить нельзя, и по условиям работы сопряжения одна из деталей имеет больший ресурс и больший предельный износ без опасности аварии, при ремонте машины можно восстановить работоспособность сопряжения заменой одной из деталей (например, детали № 1). В данном случае деталь № 2 будет иметь повышенный предельный и допустимый износы ( $I'_{ПРЕД2}$  и  $I'_{ДОП2}$ ).

Допустимые и предельные износы таких деталей, как шестерни, втулки, пальцы, и многих других и зазоры в основных сопряжениях получены с использованием этого метода.

**Пример:** Трактор ДТ-75 после ремонта имел наработку 2200 моточасов ( $T_p = 2200$  моточасов). Измерением толщины зубьев шестерни коробки передач установлено, что  $h_{изм} = 8,76$  мм. Требуется определить остаточный ресурс шестерни и его доверительные границы при  $\alpha = 0,80$ , если известно из технических условий: начальная толщина зуба  $h = 9,35 \frac{-0,110}{-0,158}$ ; предельная толщина зуба  $h_{пред} = 8,34$  мм; допустимая толщина зуба  $h = 8,64$  мм.

Расчет ведется следующим образом.

- Определяется средняя скорость изнашивания зуба шестерни при среднем допуске на изготовление

$$-\left(\frac{0,110 + 0,158}{2}\right) = -0,134 \text{ мм}$$

по формуле

$$\gamma = \frac{I_{изм}}{T_p} = \frac{(9,35 - 0,134) - 8,76}{2200} = \frac{9,22 - 8,76}{2200} = 0,20 \text{ мкм/моточас.}$$

- Вычисляется средний остаточный ресурс шестерни по уравнению

$$T_{ост} = \frac{1}{\gamma}(I_{пред} - I_{изн}) = \frac{(9,22 - 8,34) - (9,22 - 8,76)}{0,0002} = 2100 \text{ моточасов.}$$

- Определяются доверительные границы остаточного ресурса шестерни по формулам для распределения Вейбулла–Гнеденко:

$$T_{осн}^H = 0,70T_{ост} = 0,70 \cdot 2100 = 1470 \text{ моточасов;}$$

$$T_{ост} = 1,35T_{ост} = 1,35 \cdot 2100 = 2840 \text{ моточасов.}$$

## 4. ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАШИН

### 4.1. Назначение и классификация смазочных материалов

Смазочные материалы и рабочие жидкости, применяемые в автомобилях и других машинах, выполняют следующие функции:

- устранение механического взаимодействия поверхностей трения деталей;
- предотвращение атомного-молекулярного взаимодействия материалов поверхностей трения;
- формирование на рабочих поверхностях деталей оксидных плёнок, обладающих повышенной износостойкостью;
- снижение сил трения;
- равномерное распределение давления по рабочим поверхностям деталей;
- отвод теплоты из зоны трения;
- защита деталей от коррозионного воздействия окружающей среды;
- отвод продуктов изнашивания и частиц механических примесей из зоны трения;
- передача энергии, усилий и крутящих моментов от ведущих элементов к ведомым (гидротрансмиссии машин);
- снижение интенсивности изнашивания рабочих поверхностей деталей;

В процессе работы смазочные материалы и рабочие жидкости накапливают информацию о техническом состоянии сборочных единиц в которых они используются. Это свойство обеспечивает возможность их применения при диагностировании машин.

Кроме того, способность масел оказывать воздействие на форму и параметры рабочих поверхностей деталей, позволяет их применять в качестве ремонтных средств при восстановлении работоспособности машин.

Таким образом, качество смазочных материалов и рабочих жидкостей определяет техническое состояние и уровень работоспособности машин.

Для обеспечения работоспособности машин в эксплуатации необходимо контролировать состояние масел, использовать свойства масел для восстановления формы и параметров изношенных рабочих поверхностей деталей машин.

От правильного выбора смазочного материала во многом зависит работоспособность машины, поэтому при решении задачи обеспечения надежности машин на стадиях проектирования и эксплуатации смазочные

материалы рассматриваются как самостоятельные конструктивные элементы.

В зависимости от физического состояния различают газообразные, жидкие, пластичные и твердые смазочные материалы.

Жидкие смазочные материалы при положительных температурах находятся в жидком состоянии.

Масла классифицируют по назначению и области применения:

- моторные, применяемые в ДВС;
- автотракторные трансмиссионные, применяемые для смазывания элементов трансмиссий;
- промышленные общего назначения, применяемые для смазывания элементов станков, промышленного оборудования;
- гидравлические, применяемые в качестве рабочих жидкостей в системах гидропривода.

Пластичный смазочный материал представляет собой полутвёрдый или твёрдый продукт, состоящий из смеси минерального или синтетического масла, стабилизированного мылами или другими загустителями с возможным содержанием других компонентов.

Загуститель образует структурный каркас и придаёт смазочному материалу свойства твёрдого тела с невысоким пределом прочности (до 5 кПа). При повышении температуры до 200-300 градусов по Цельсию пластичные смазочные материалы переходят в жидкое состояние.

По назначению пластичные смазочные материалы делят на антифрикционные, снижающие трение и износ; консервационные (защитные), предохраняющие металлические поверхности от коррозии; уплотнительные, служащие для герметизации зазоров в сопряжениях.

По происхождению жидкие и пластичные смазочные материалы подразделяют на минеральные, растительные, животные и синтетические.

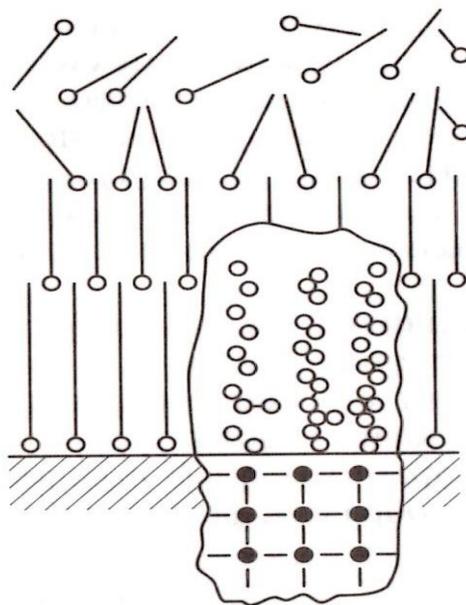
Для автомобильного транспорта и других машин в основном применяют жидкие и пластичные смазочные материалы нефтяного происхождения. В последнее время по мере развития химической промышленности применяют синтетические смазочные материалы. Перспективными являются и твёрдые смазочные материалы, которые используют в конструктивных элементах автомобилей.

## **4.2. Механизм смазочного действия масел**

В подшипниках скольжения тонки слои масел вследствие их свойства несжимаемости уравнивают внешнее давление. Чем больше давление, тем меньше толщина слоя масла, способного уравновесить дополнительное внешнее давление.

Вблизи твёрдой поверхности детали существует электромагнитное силовое поле. Оно оказывает воздействие на молекулы смазочного мате-

риала, вызывая направленную адгезию граничных плёнок масла и изменяя ориентацию его молекул (рис. 29).



**Рис. 29.** Строение граничного слоя смазочного материала.

По мере удаления от поверхности детали влияние силового поля ослабевает. При этом изменяется строение смазочной плёнки и восстанавливаются объёмные свойства масла.

В тонких смазочных слоях на расстоянии 0,1-0,2 мкм от твёрдой поверхности вязкость масла обычно повышается вследствие изменения ориентации осей молекул. Способность смазочного материала к изменению ориентации молекул характеризует эффективность смазочного действия.

Силовое поле вблизи поверхности детали возникает вследствие повышенной полярной активности поверхностных слоёв твёрдого материала, вызванной неуравновешенностью атомарных сил, действующих в них. В результате полярной активности материала на поверхности трения образуются тонкие плёнки адсорбированных молекул масла. Для увеличения сил сцепления адсорбированных слоёв масла с поверхностью трения в его состав вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ) – это органические кислоты и их мыла, спирты, смолы.

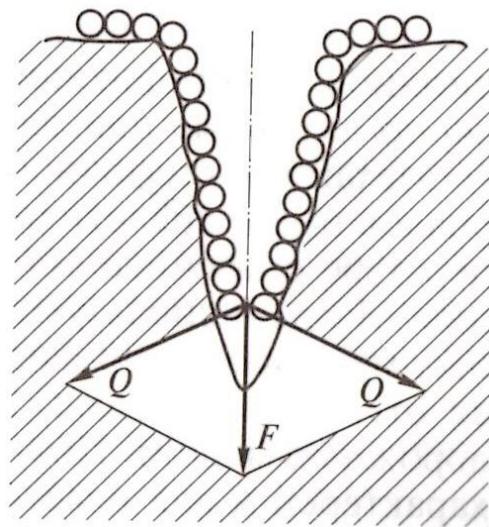
Для ПАВ характерно несовпадение центров положительных и отрицательных зарядов в их молекулах. Благодаря этому свойству молекулы, называемые полярными, притягиваются к твёрдой поверхности и удерживаются на ней длительное время.

Молекулы масел обычно имеют удлинённую форму, причём их длина в 5-10 раз превышает диаметр. У органических кислот и их мыл полярно-активной часто является карбоксильная группа  $\text{COOH}$ , у спиртов – гидроксид  $\text{OH}$ .

Различают два вида адсорбции молекул масла к поверхности тела: химическую и физическую. Химическая адсорбция (хомосорбция) сопровождается образованием химических соединений плёнок оксидов при взаимодействии полярно-активных концов молекул масла с молекулами материала поверхности. При физической адсорбции взаимодействие ограничивается формированием молекулярных связей. В большинстве случаев эти два вида адсорбции наблюдаются одновременно, с преобладанием одного из них. Под действием сил молекулярного притяжения молекулы масла приобретают определённую ориентацию, поэтому смазочная способность масла улучшается.

С повышением температуры масла межмолекулярные расстояния возрастают, молекулярные связи ослабевают, происходит дезориентация адсорбированного слоя молекул, активизируется подвижность молекул и ухудшаются смазочные свойства масла. Для различных масел нарушение адсорбции происходит при температуре 40-150 градусов по Цельсию.

При образовании на поверхности трения ультрамикроскопических трещин поверхностно-активные молекулы масла проникают внутрь этих трещин. Ширина трещин соизмерима с размерами молекул, поэтому силы молекулярного взаимодействия оказывают на материал твёрдой поверхности расклинивающее действие (рис. 30).



**Рис. 30.** Схема адсорбционного расклинивающего действия полярных молекул смазочного материала:

$F$  – сила адсорбционного притяжения молекул,  $Q$  – расклинивающие составляющие сил молекулярного взаимодействия.

Давление молекул масла на стенки трещин может достигать 100 Мпа. В таких условиях смазочный материал оказывает отрицательное воздействие на процесс изнашивания. Это явление получило название адсорбционно-расклинивающего эффекта (Эффект Ребиндера).

В начале 1960-х годов исследование механизма взаимодействия смазочных материалов с металлами деталей в процессе трения привело к открытию эффекта трибополимеризации. Этот эффект заключается в том, что в процессе трения металлических поверхностей в присутствии углеводородной смазочной среды наблюдается образование аморфных высокомолекулярных продуктов, которые были названы полимерами трения.

Полимерные плёнки, образующиеся на поверхности трения, обеспечивают противозадирные и противоизносные свойства материалов, что резко снижает интенсивность изнашивания деталей сопряжения.

В качестве смазочных материалов, создающих условия возникновения эффекта трибополимеризации, применяют масла и их отдельные фракции, индивидуальные углеводороды (цетан) и другие органические соединения. Для активизации процесса пластификации, к маслам добавляют специальные полярно-активные присадки.

Механизм смазочного действия пластичных смазочных материалов имеет аналогичный характер, так как при рабочей температуре смазочные материалы переходят в вязко-текучее состояние. Масла, используемые в качестве основы пластичных смазочных материалов по физико-химическим свойствам не отличаются от обычных масел, применяемых для смазывания элементов автомобилей и других машин. Поэтому описанный механизм действия масел характерен и для пластичных смазочных материалов.

#### **4.3. Изменение эксплуатационных свойств смазочных материалов в процессе работы**

Эксплуатационные свойства жидких и пластичных смазочных материалов в процессе работы постепенно ухудшаются.

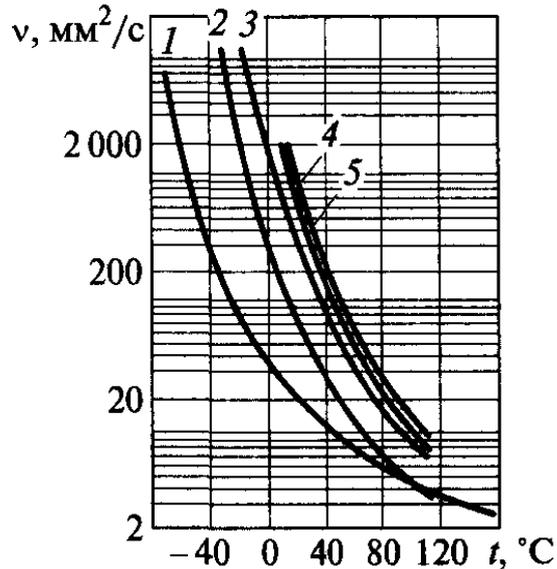
На состояние смазочных материалов влияют высокие температуры в зоне трения сопряженных поверхностей деталей, окисление масел, срабатывание присадок, загрязнение смазочных материалов продуктами изнашивания, водой, топливом и другими посторонними примесями. Ухудшение эксплуатационных свойств масел и ПСМ (пластичные смазочные материалы) количественно оцениваются по изменению основных показателей: кинематической вязкости; кислотного и щелочного чисел; объемной или массовой доли примесей; температуры вспышки и т.д.

В зависимости от температуры в зоне трения изменяются физико-механические показатели смазочных материалов: вязкость, плотность, модуль упругости, предел прочности на сдвиг. С повышением температуры вязкость масел снижается. Для минеральных масел изменение кинематической вязкости при изменении температуры (рис. 31) оценивают по формуле:

$$v_t = v_{50} (50/t)^n$$

где  $\nu_t$  и  $\nu_{50}$  – вязкость масла при заданной температуре и температуре  $50^\circ\text{C}$  соответственно;

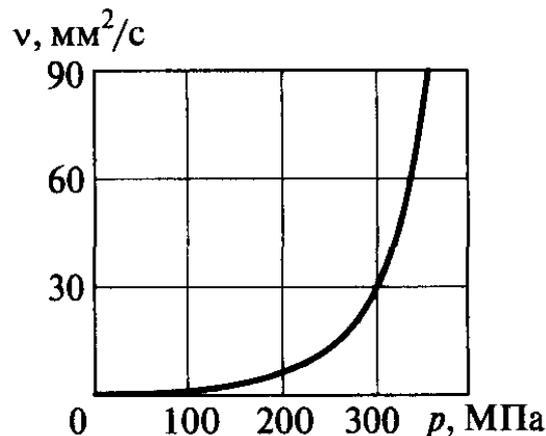
$n$  – показатель степени.



**Рис.31.** Зависимость кинематической вязкости масле от температуры  $t$ :  
1 - МГ-15Б; 2 – АУ; 3 – И-30А; 4 – И-40А; 5 – И50А.

Пластичность масел с повышением температуры также уменьшается. Уменьшение вязкости и плотности вызывает увеличение утечек и ухудшение смазочных свойств, поэтому смазочные материалы подбирают таким образом, чтобы их вязкость в диапазоне рабочих температур имела определенные значения.

Давление в зоне трения так же влияет на вязкость масла. При небольших давлениях в тонких пленках вязкость остается почти постоянной, но при давлении выше 100 МПа вязкость резко возрастает (см. рис. 32).



**Рис. 32.** Зависимость кинематической вязкости масел  $\nu$  от давления  $P$  в системе.

Зависимость динамической вязкости от давления  $P$  описывается степенной функцией:

$$h_p = h_A \cdot K P^{10^{-5} - 1}$$

где  $h_p$  и  $h_A$  – динамическая вязкость масла при повышенном и атмосферном давлении соответственно, Па·с;  $K$  коэффициент, характеризующий нагружение (для минеральных масел при  $P \leq 50$  МПа,  $K = 0,003$ ).

В процессе эксплуатации смазочные материалы испытывают интенсивное термическое и динамическое воздействие, кислород воздуха вызывает окисление углеводородов масел, легкие фракции испаряются, присадки срабатываются. Из окружающей среды в смазочный материал проникают различные засорители-частицы пыли, вода, продукты изнашивания. Все эти процессы приводят к старению смазочных материалов, чем больше продуктов окисления образуется в масле, тем выше кислотное число (КЧ), которым оценивается степень окисления. При этом смазочные свойства масел ухудшаются, активизируются процессы окислительного и коррозионного разрушения металлов.

По мере срабатывания присадок уменьшается щелочное число масла (ЩЧ).

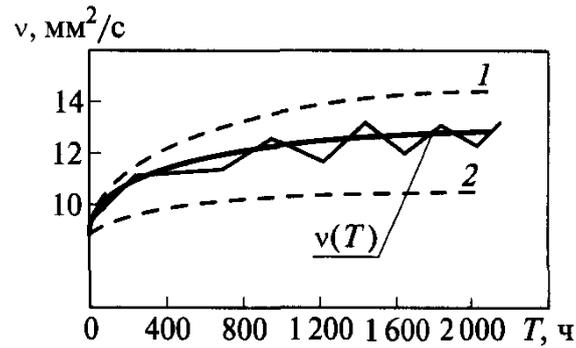
Компоненты отработавших присадок, выпадая в осадок, прекращают оказывать положительное влияние на эксплуатационные свойства масла и попадая в зону трения, выступают в роли абразивных частиц.

Особенно серьезное влияние на эксплуатационные свойства масел оказывают механические примеси – технологические загрязнения, частицы пыли, продукты изнашивания. Интенсивность процесса накопления механических примесей зависит от окружающей среды (запыленности воздуха, вида работ, типа грунта и др.), типа и состояния фильтрующих элементов.

Вода, попадающая в масло при его хранении, транспортировании и использовании, активизирует процессы коррозионного разрушения металлических поверхностей, ухудшает эксплуатационные свойства масел и интенсифицирует процесс его окисления.

### *Изменение кинематической вязкости масел*

Анализ изменения кинематической вязкости масел показывает, что с увеличением наработки вязкость постепенно возрастает (см. рис. 33, 34).



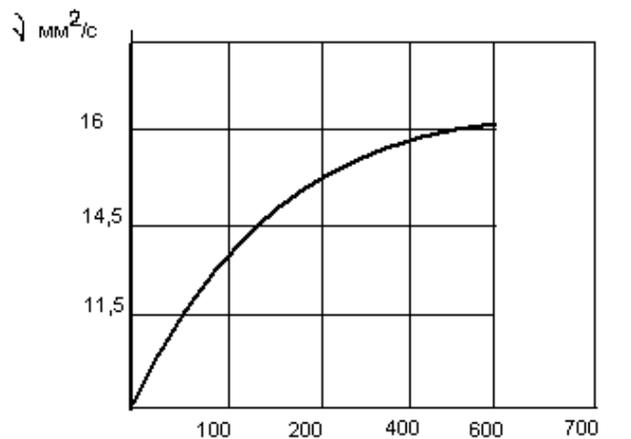
**Рис.33.** Динамика изменения параметров рабочей жидкости гидросистем в процессе наработки  $T$ ; где, 1,2 – верхняя и нижняя границы интервала значений.

При работе масла в двигателе, вязкость масла наиболее интенсивно возрастает в первые 60-180ч, а затем стабилизируется и вязкость практически сохраняется на достигнутом уровне. Вязкость масла в сравнении с первоначальным значением увеличивается на 2,5-3,5 мм<sup>2</sup>/с при 100<sup>0</sup>С. Это явление объясняется испарением в первый период работы масла легкокипящих маловязких фракций и накоплением в нем продуктов окисления.

Изменение вязкости в зависимости от времени работы масла подчиняется эмпирической зависимости:  $v_t = a(1 - e^{-kt}) + v$

где  $v_t$  – вязкость масла после работы в течении  $t$ , мм<sup>2</sup>/с;

$a$  и  $k$  – аналитические коэффициенты;  $v$  – вязкость свежего моторного масла при 100<sup>0</sup>С, мм<sup>2</sup>.

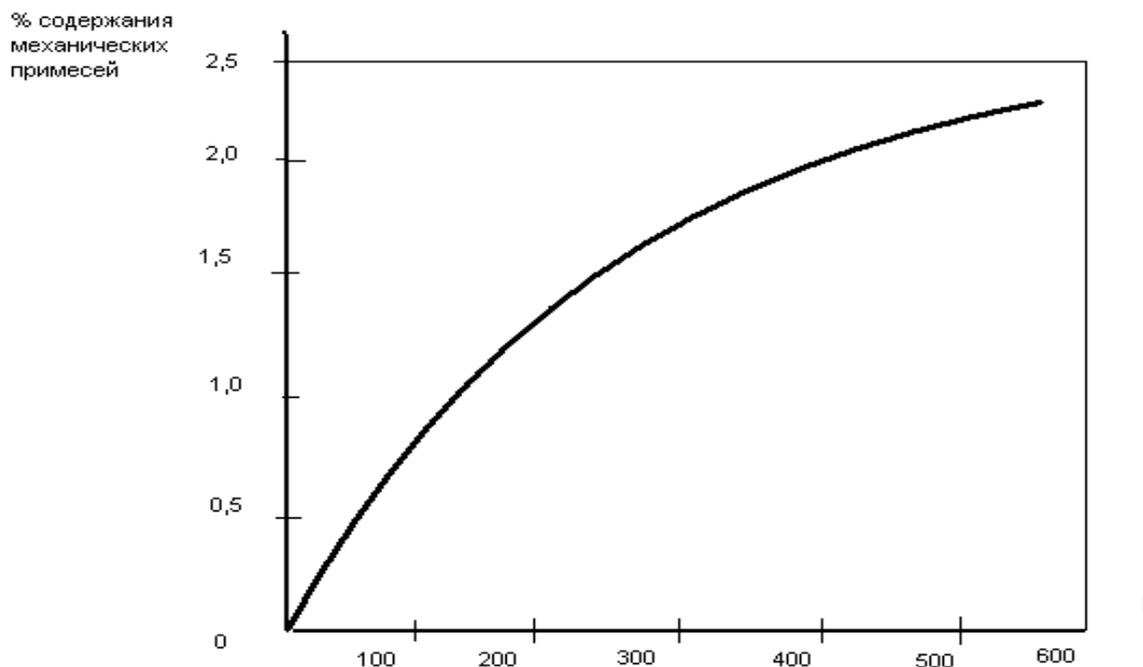


**Рис.34.** Зависимость вязкости моторного масла от времени его работы в дизеле.

#### *Изменение содержания механических примесей в маслах*

Наиболее интенсивно механические примеси накапливаются в моторном масле в первые 60-120ч его работы, а затем процесс стабилизиру-

ется (рис.35), интенсивное накопление механических примесей в первый период работы масла объясняется окислением малостабильных углеводородов масла во всем объеме смазочной системы. Затем этот процесс протекает главным образом в объеме масла, доливаемого с целью компенсации угоревшей его частиц.



**Рис.35.** Изменение содержания механических примесей в моторном масле от времени его работы в дизелях.

Установленная экспериментально закономерного накопления механических примесей в моторном масле имеет вид:  $Q_t = a(1 - e^{-kt}) + l$ ,

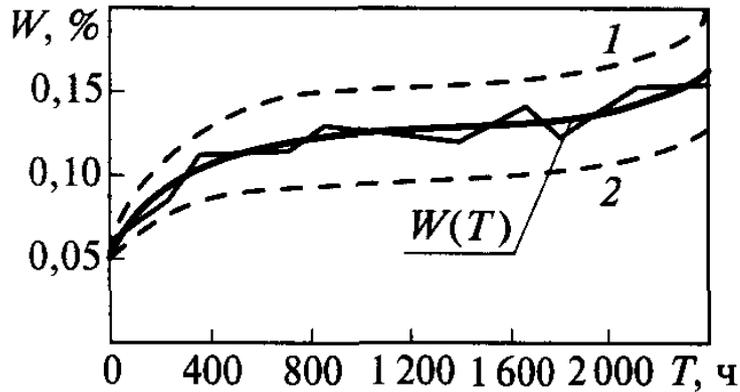
где  $Q$  – содержание механических примесей в масле при времени его работы  $t$ , ч, г;

$a$  и  $k$  – аналитические коэффициенты

$l$  – содержание механических примесей в свежем масле, г.

#### *Содержание воды в масле.*

Анализ содержания воды в масле позволяет сделать вывод о том, что значение этого показателя при соблюдении правил эксплуатации машин не превышает предельных значений (рис. 36).



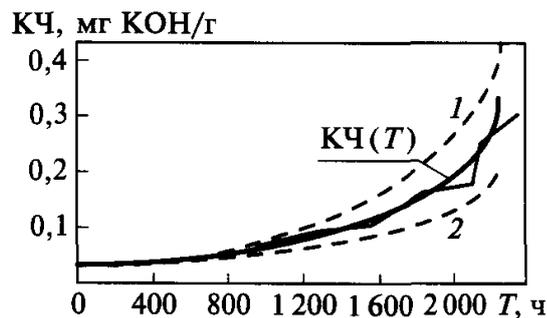
**Рис.36.** Зависимость содержания воды в масле от наработки  $T$ (ч): 1, 2 – соответственно верхняя и нижняя границы интервала значений.

Некоторое увеличение значений связано с накоплением в смазочной системе конденсата, образующегося при скачкообразных изменениях температуры окружающей среды.

#### *Изменение кислотного числа масел*

Показатель кислотного числа, характеризующий степень окисленности масла, с увеличением наработки масло «старее», т.е. происходит изменение масляной основы и срабатывание присадок.

Наиболее интенсивно этот процесс проходит в ДВС и гидродинамических системах, что связано с повышенной рабочей температурой (рис. 37). Доливы масел в процессе эксплуатации несколько замедляют и стабилизируют процесс их «старения», но при высоких значениях наработки скорость процесса окисления возрастает.



**Рис.37.** Изменение кислотного числа масла от наработки  $T$ : 1, 2 – верхняя и нижняя границы интервала значений.

#### *Изменение содержания присадок в масле*

Содержание присадок в маслах характеризуется значением щелочного числа, измеряемого в мгКОН на 1г масла. В процессе работы при окис-

лении масла и попадании в него частиц механических примесей и воды щелочное число уменьшается (рис. 38).

При снижении содержания присадок до предельного значения масло необходимо снять с эксплуатации (заменить).

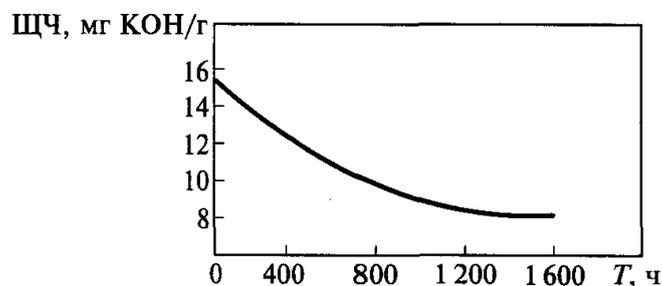


Рис.38. Изменение щелочного числа (ЩЧ) от наработки.

Ухудшение эксплуатационных свойств масла, вызванное его старением, постепенно приводит к тому, что оно перестает выполнять заданные функции и оказывает отрицательное влияние на трение и изнашивание. Для поддержания машины в работоспособном состоянии необходимо периодически контролировать качество смазочных материалов и при необходимости проводить мероприятия по очистке, обогащению или замене масел.

Предельно состояние масел характеризуется определенными значениями показателей их эксплуатационных свойств. В таблице 1 приведены браковочные значения показателей эксплуатационных свойств моторных масел (группы В и Г), определяющих их предельно состояние.

Таблица 1

### Браковочные значения показателей эксплуатационных свойств моторных масел

Показатель	Тип двигателя	
	Дизель	Бензиновый
Изменения вязкости, %:		
	увеличение	25
снижение	35	20
Содержание примесей, нерастворимых в бензине, мас. %	3,0	1,0
Содержание воды, мас. %	0,3	0,5
Содержание топлива, мас. %	0,8	0,8
Минимальное щелочное число, мг КОН/г	3,0	2,0
Снижение температуры вспышки, °С	20	20

Изменение состояния пластичных смазочных материалов в процессе работы выражается в снижении их пластичности, водостойкости и в насыщении абразивными частицами механических примесей. Кроме того, в процессе работы машины под действием высоких статических нагрузок и вибрации, а также из-за увеличения зазоров вследствие изнашивания, пластичные смазочные материалы постепенно выдавливаются из открытых сопряжений. В связи с этим для обеспечения нормальных условий работы узлов трения машин, необходимо заменять ПСМ в сроки указанные в инструкциях по эксплуатации машин.

#### **4.4. Восстановление работоспособности машин с помощью присадок к маслам**

Смазочные материалы и рабочие жидкости кроме выполнения функций по снижению трения и изнашивания деталей машин обладают рядом потенциальных возможностей, которые используют в системе управления долговечности машин.

– Во-первых, как отмечалось ранее, смазочные материалы и рабочие жидкости машин являются носителями оперативной информации о техническом состоянии основных систем и сборочных единиц. Анализируя эксплуатационные свойства, состояние, состав масел и динамику его изменения, можно оценить техническое состояние машины в определенный момент времени, а так же прогнозировать долговечность и безотказность на заданный период.

– Во-вторых, информация о техническом состоянии машины, полученная по результатам анализа масел, позволяет своевременно обосновать необходимость проведения управляющих воздействий и разработать комплекс технических мероприятий по обеспечению долговечности машин.

– В-третьих, смазочные материалы и технические жидкости могут выступать в роли инструмента для проведения ремонтно-восстановительных воздействий. В последние годы разработаны и нашли применение при восстановлении работоспособности изношенных зубчатых и червячных передач смазочные материалы типа G-Rapid plus, Molikote 321 и др. Эти материалы вводятся в состав трансмиссионных масел и обеспечивают восстановление работоспособности элементов трансмиссии машин без проведения разборочно-сборочных работ и трудоемких ремонтных операций.

Отечественные препараты «Римет» и «Метаплак» вводимые в состав машинного масла, позволяют восстановить рабочие характеристики изношенного двигателя также без проведения трудоемких операций.

Известны так же аналогичные ремонтно-восстановительные присадки к жидким маслам, выпускаемые как российскими НИИ, так и фирмами США, Великобритании, Израиля и фирмами других стран.

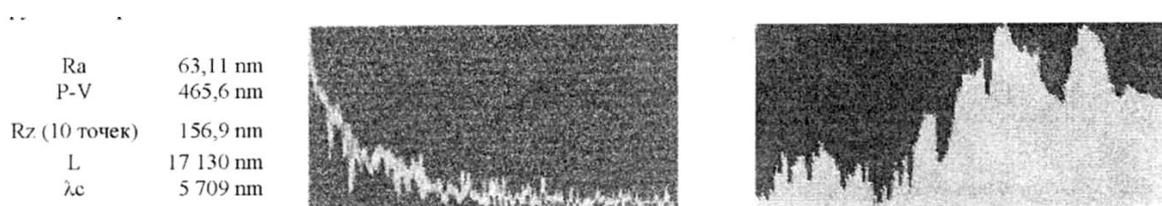
Так, например, компания «АТРИ» - альтернативные технологии русских инженеров, разработала противоизносный антифрикционный ремонтно-восстановительный состав (РВС) RENOVIT. Технология обработки узлов и механизмов этим составом является одним из методов повышения износостойкости деталей машин, основанных на эффекте безызносности при осуществлении избирательного переноса.

*Избирательный перенос* - это особый вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта тонкой, не окисляющейся металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и неспособной наклёпываться. Такую защитную пленку толщиной 1-4 мкм называют сервовитной (Vita - жизнь).

Свойства защитной сервовитной пленки, образующейся в процессе трения, иные, чем у исходного металла. Следует отметить, что при трении детали контактируют на очень маленькой площади, доля которой составляет всего 0,01-0,001 от номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате этого участки фактического контакта испытывают весьма высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической деформации и, следовательно - к интенсивному изнашиванию.

В случае избирательного переноса площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, что наглядно подтверждается фотографиями поверхностей, полученными до и после обработки деталей РВС (рис.39 а и рис.39 б, а также снижением коэффициента трения в 3-5 раз. Термодинамические процессы, происходящие в зонах трения в присутствии противоизносного антифрикционного состава, способствуют образованию модифицированного слоя в местах наибольшей выработки металла.

Таким образом, *в процессе взаимодействия противоизносного антифрикционного состава с поверхностями трения, величина зазора между трущимися деталями по всей площади пятен контакта постепенно стабилизируется и приближается к оптимальной.*



**Рис 39 а.** Профиль поверхности стального образца до обработки противоизносным антифрикционным составом.

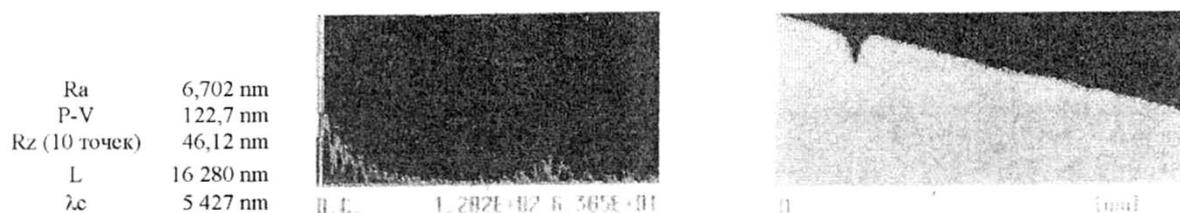


Рис. 39 б Профиль поверхности стального образца после обработки противозносным антифрикционным составом

Для достижения аналогичного эффекта традиционно используются дорогостоящие, высококачественные стали, повышаются классы обработки их поверхностей, уменьшаются допуски, а в некоторых случаях, например, в ТНВД двигателей, детали и узлы индивидуально подвигаются друг к другу. Однако, несмотря на все эти меры, агрегаты все равно изнашиваются по причине неизбежного контакта металлов при трении.

В автомобилях восстанавливаются при применении РВС параметры двигателей внутреннего сгорания, трансмиссии, гидроусилителя руля ГУР), агрегатов гидросистем.

Для регистрации параметров двигателей после их обработки РВС, используется анализатор пневмоплотности и герметичности цилиндров АГЦ2. Измеряемые параметры в процессе диагностики приведены в таблицах 2 и 3.

Следует отметить, что подобные результаты были получены при применении РВС на многих предприятиях РФ и зарубежных стран – Германии, Италии, Греции, Китая.

*Таблица 2*

### Изменение компрессии в цилиндрах двигателей до и после обработки РВС

Марка двигателя			Номер цилиндра								среднее
			1	2	3	4	5	6	7	8	
ВАЗ 2109, пробег 51949 км	Компрессия, кг/см <sup>2</sup>	до обработки	10,6	10,5	10,5	10,6	-	-	-	-	
		после обработки	11,2	10,9	11,0	10,9	-	-	-	-	-
КАМАЗ 5410	Компрессия, кг/см <sup>2</sup>	до обработки	27,0	26,0	27,0	28,0	24,9	27,0	27,0	27,0	26,7
		после обработки	27,5	26,2	27,2	28,5	25,0	27,2	27,6	27,2	27,1

### Изменение давления масла при обработке дизельного двигателя автомобилей

Давление масла при частоте вращения коленчатого вала двигателя	Давление масла, кгс/см <sup>2</sup>			
	До обработки (наработка двигателя 630 000 км)	Замеры после обработки РВС		
		Пробег 2 500 км	Пробег 30 000 км	Пробег 95 000 км
500-600 об/мин	1,0	3,0	3,9	2,0
1000 об/мин	3,0	3,8	4,0	3,9
max частота	3,0	3,8	4,0	4,1

Обработка производственных антифрикционных ремонтно-восстановительным составом имеет следующие технико-экономические показатели:

- стоимость обработки узлов и механизмов в два-три раза ниже стоимости ремонта по обычным технологиям;
- обслуживание техники производится в режиме штатной эксплуатации, не требует специально оборудованного помещения и наличия запчастей;
- технология позволяет заменить плановые ремонты предупредительной обработкой со значительным увеличением межремонтного срока и ресурса;
- наличие модифицированного слоя на поверхностях трения при эксплуатации приводит к снижению потребления электроэнергии и топлива на 10-20%;
- снижение вибрации и шума приводит к качественно новым виброакустическим показателям;
- снижается содержание СО и СН, а также твердых примесей (сажа) в выхлопных газах двигателей;
- при трении деталей с модифицированным слоем, снижаются требования к качеству применяемых масел.

## 5. УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МАШИН

### 5.1. Цель, задачи, сущность управления

*Управление надёжностью и техническим состоянием* – это целенаправленное изменение с помощью управляющих показателей свойств машины или её составной части, ведущей к достижению поставленной цели.

Цель управления надёжностью заключается в обеспечении при изготовлении, восстановлении при ремонте и поддержании при техническом обслуживании высокого или оптимального уровня работоспособности и исправности машины, в создании условий, позволяющих уменьшить частоту отказов при небольших материальных и денежных издержках.

Наиболее прогрессивный путь управления надёжностью – это улучшение физико-механических свойств материалов элементов машины и их конструкции. Эти возможности реализуют на этапе проектирования, разработки машины или её составной части. Применение износостойких материалов, создание условий, уменьшающих потери мощности на трение и износ составных частей, использование улучшенных уплотнителей, фильтрующих элементов и т. п. резко снижает скорость изнашивания, изменение параметров состояния, увеличивает средний ресурс ( $T_{cp}$ ) составных частей. Сокращаются число отказов, а значит и число ремонтов машины, общая трудоёмкость, продолжительность и стоимость.

Увеличение наработки между отказами даёт возможность увеличить периодичность технического обслуживания, исключить ряд регламентированных операций, т. е. также снизить трудоёмкость, продолжительность и стоимость обслуживания.

Другой путь управления техническим состоянием и надёжностью машины заключается в изменении динамики структурных параметров элементов. Назначая оптимальные допускаемые отклонения структурных параметров технического состояния, изменяя межконтрольную наработку, повышая степень восстановления исходных характеристик при техническом обслуживании и ремонте, предупредительно заменяя составные части, имеющие большие скорости изнашивания, увеличивают наработку между отказами, уменьшают среднюю скорость изменения параметров состояния машины. Эти мероприятия проводят на этапе эксплуатации.

Управление надёжностью путём улучшения параметров распределения ресурсов или наработки до отказа и параметров потока отказов элементов можно представить как следствие реализации двух путей управления.

По мере эксплуатации машина стареет, повышается число отказов и ремонтов и продолжительность простоя машины. Это ведёт к прогрессивному увеличению издержек на машину по мере её эксплуатации, устанавливая допускаемые, предельные издержки, прекращают дальнейшую эксплуатацию машины, списывают или ремонтируют её, предотвращая тем самым увеличе-

ние числа отказов. Издержки становятся обобщённым показателем, управляющим надёжностью и состоянием машины.

Для поддержания или восстановления высокого или оптимального уровня работоспособности используют набор управляющих показателей.

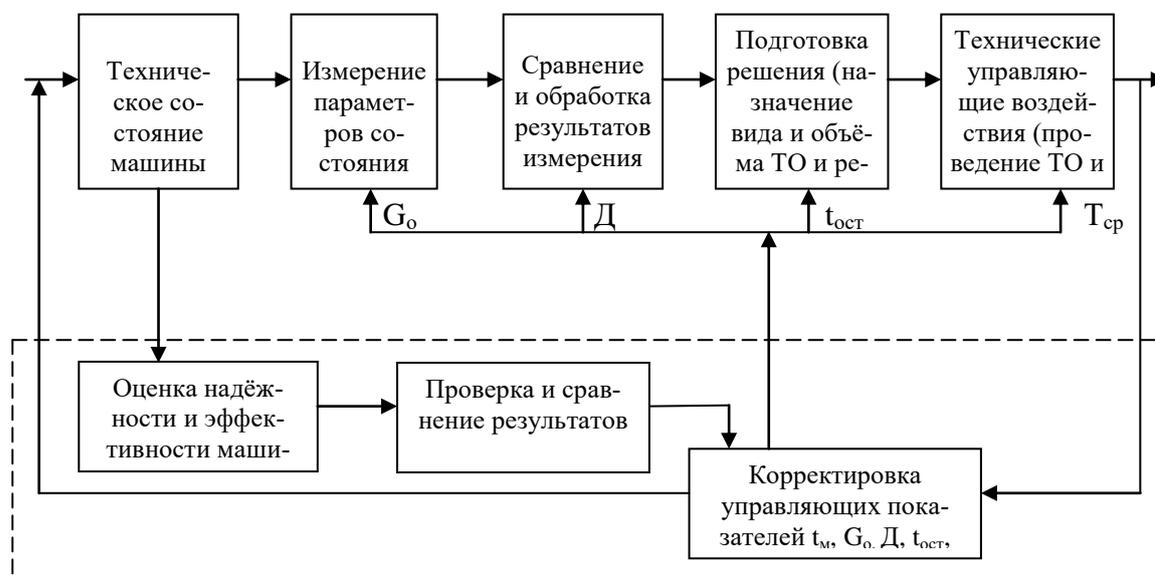
**Управляющие показатели** – это показатели, влияющие на техническое состояние и надёжность объекта. Их можно изменять для достижения цели. Это допускаемые и предельные отклонения параметров, межконтрольная наработка, ресурс или средняя наработка на отказ, назначенный остаточный ресурс до ремонта, срок службы машины до списания, а также суммарные издержки на техническое обслуживание и др.

В процессе эксплуатации управление надёжностью и техническим состоянием машины осуществляется путём назначения и проведения ремонтно-обслуживающих работ, предупреждающих отказы или устраняющих их последствия. В результате проведения соответствующих мероприятий восстанавливают ресурсные и функциональные параметры до уровня номинальных или близких к ним значений. При этом восстанавливаются технический ресурс и высокая вероятность безотказной работы составных частей машины.

Как и в каждом процессе управления, здесь можно выделить цель, управляющую систему, управляющие показатели, целевые функции управления, динамический характер и причинную связь элементов системы, обратную связь.

При эксплуатации цель управления состоит в сохранении высокой или оптимальной надёжности машины, т. е. управляемой системы.

На рис. 40 представлена схема непосредственного управления техническим состоянием машин.



**Рис. 40.** Схема управления техническим состоянием машины:

$G_0$  – погрешность измерения;  $D$  – допускаемое отклонение параметров;

$t_{ост}$  – назначенный остаточный ресурс до ремонта;

$T_{ср}$  – ресурс или средняя наработка на отказ;  $t_m$  – межконтрольная наработка

Основные принципы управления надёжностью и техническим состоянием машин представляют систему обобщающих положений, отражающих основные закономерности динамики состояния и процесса управления состоянием этих машин. Эти положения основываются на использовании диагностики, теорий прогнозирования, автоматического управления, вероятностей надёжности машин и оптимизации.

Управление надёжностью и состоянием имеет свои характерные особенности применительно к техническому обслуживанию и ремонту сельскохозяйственных и транспортно-технологических машин и комплексов.

## 5.2. Система технического обслуживания и ремонта машин

Система технического обслуживания и ремонта (ТОР) представляет собой совокупность средств, документации и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления надёжности и эффективности работы машин и регламентирована определёнными правилами, положениями, решениями. Среди многочисленных решений существуют три основных, называемых *стратегиями*. Стратегия ТОР может быть:

- по потребности после отказа;
- регламентированная в зависимости от наработки (срока службы);
- по состоянию (по результатам периодического диагностирования, контроля).

При первой стратегии управляющие воздействия (ремонтно-обслуживающие машины) проводят только после отказа, к такой стратегии относят замену, ремонт, регулировку составных частей после внезапного отказа, а также отказа, устранения последствий которого сопровождается относительно небольшими затратами (внезапный отказ ламп, контрольных приборов, прокладок и т. п.).

При второй стратегии работы носят планово-предупредительный характер и проводятся периодически в течение наработки (срока службы) вне зависимости состояния изделий (машин). К такой стратегии относят периодическую замену масел в карбюраторах машин, регулярное смазывание подшипников качения и скольжения и т. п.

При третьей стратегии предупредительные работы проводятся в зависимости от состояния. Контроль (диагностирование) в этом случае осуществляют в плановом порядке для установления состояния машины. По такой стратегии заменяют цилиндропоршневую группу, регулируют момент зажигания карбюраторного двигателя и т. п.

При ТОР сложного изделия в целом применяют несколько стратегий, каждую – по определённой составной части. Например, замена лампы фары трактора осуществляется по первой стратегии, замена мас-

ла в двигателе – по второй, замена цилиндропоршневой группы двигателя – по третьей.

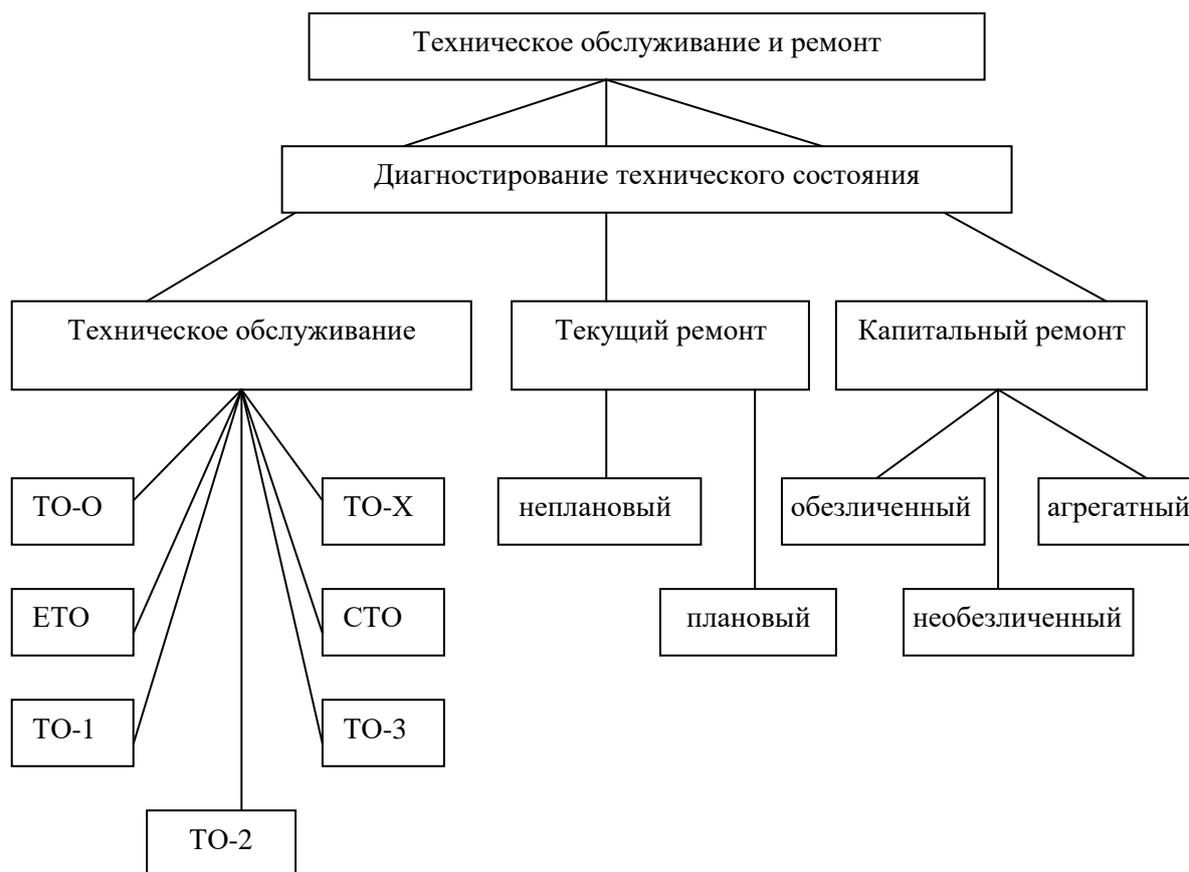
По мере развития методов и средств технического диагностирования область распространения третьей стратегии расширяется.

В зависимости от принятой стратегии изменяются технические требования на ТОР. Например, при первой стратегии ТОР допустимое отклонение параметра равно предельному отклонению, при второй – равно нулю. При третьей стратегии оно имеет промежуточное значение между нулём и предельным отклонением.

Для сельскохозяйственной техники принята и действует планово-предупредительная система ТОР по состоянию. К плановым операциям относятся регламентированная периодическая постановка машины на техническое обслуживание, плановый контроль (диагностирование) состояния машины и постановка её на ремонт после исчерпания назначенного остаточного ресурса. К предупредительным относятся работы, направленные на предотвращение отказов и неисправностей машин. Составные части регулируют, восстанавливают, заменяют для того, чтобы их параметры технического состояния не превысили в процессе эксплуатации предельную величину, а агрегаты не достигли предельного состояния. В связи с этим применяют нормативный характер технической документации, систему допускаемых значений параметров. С этой целью прогнозируют остаточный ресурс составных частей и машины в целом.

Однако в каждом конкретном случае оптимизируют стратегию ТОР, т. е. вырабатывают общее решение. Общий обзор основных видов ремонтно-обслуживающих воздействий, предусматриваемых системой технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве, приведён на рис. 41. Эта система имеет планово-предупредительный характер, периодичность и объём каждого элемента системы регламентируется государственным стандартом (ГОСТ 18322), разработанным ГОСНИТИ.

Диагностирование технического состояния машин является составной частью всего комплекса мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту для оценки работоспособности и исправности машины в целом или её сборочных единиц и агрегатов и назначения конкретных видов ремонтно-обслуживающих воздействий. Диагностирование проводится в процессе технического обслуживания, по заявкам и для оценки остаточного ресурса перед назначением того или иного вида ремонта машины (текущего или капитального). В качестве средств диагностирования применяются комплекты переносных приборов (для диагностирования при ТО-1 и ТО-2 и заявочного), передвижные и стационарные установки (для всех видов диагностирования).



**Рис. 41.** Схема основных видов технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве (ТО-О – механическое обслуживание при обкатке; ЕТО – ежесменное техническое обслуживание; ТО-Х – техническое обслуживание при хранении; СТО – сезонное техническое обслуживание; ТО-1, ТО-2, ТО-3 – номерные ТО)

Результаты диагностирования заносят в диагностическую карту, которая в дальнейшем служит основным документом для мастеров-наладчиков и слесарей при выполнении технического обслуживания или ремонта.

Основанием для назначения капитального ремонта является достижение предельного состояния эксплуатируемой машины. Значения параметров, определяющих предельное состояние, указывают в соответствующей нормативно-технической документации (технологии, руководстве, инструкции и т. д.). При этом предельное состояние технического объекта определяют по одному или нескольким «слаборесурсным» его элементам. Так, предельное состояние машины назначается по состоянию её агрегатов и сборочных единиц, предельное состояние агрегатов и сборочных единиц связывается с состоянием их деталей или сопряжений.

В качестве примера в табл. 4 приведены «ресурсные» агрегаты и сборочные единицы трактора.

Таблица 4

**Агрегаты и сборочные единицы, определяющие предельное состояние тракторов**

Тип трактора	Основные сборочные единицы	Дополнительные сборочные единицы
Колёсные с шарнирной рамой и гидромеханической коробкой передач	Двигатель, коробка передач, передний мост с колёсными редукторами, задний мост с колёсными редукторами	Управление поворотом с гидросистемой, рама, кабина в сборе, раздаточная коробка (автономная)
Колёсные полурамные и безрамные	Двигатель, коробка передач, задний мост с конечными передачами	Управление поворотом с гидроусилителем, кабина в сборе
Гусеничные с раздельными агрегатами	Двигатель, коробка передач, задний мост с конечными передачами	Подвеска, рама, кабина в сборе, гидротрансформатор
Гусеничные с моноблочным агрегатом (коробка передач – задний мост)	Двигатель, моноблок (коробка передач, задний мост с конечными передачами)	Подвеска, рама, кабина в сборе

**П р и м е ч а н и е.** По приведённому перечню состояние трактора считается предельным, если предельного состояния достигли минимум три его составных части: двигатель, какая-либо сборочная единица трансмиссии и любой элемент из числа дополнительных.

Состояние двигателя считается предельным, если установлен хотя бы один из нижеприведённых признаков:

- предельное состояние блока цилиндров, когда требуется его замена или ремонт с демонтажем и полной разборкой;
- предельное состояние коленчатого вала, определяемое предельным износом или механическими повреждениями, требующими его замены или шлифовки;
- предельный расход масла на угар или предельное значение прорыва газов в картер, не устраняемые заменой комплекта поршневых колец.

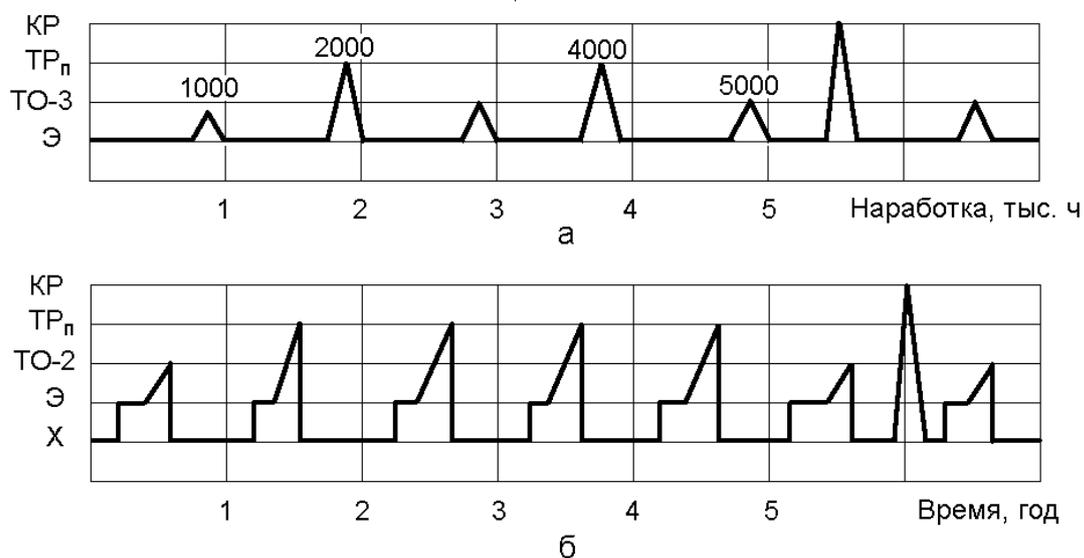
Состояние трансмиссии считается предельным при установлении хотя бы одного из признаков, приведённых ниже:

- для колёсных тракторов типа 4К4 (например, МТЗ-82) – предельное состояние двух основных сборочных единиц (см. табл. 4) или дважды одной сборочной единицы при замене на идентичную после первого ресурсного отказа;
- для колёсных тракторов типа 4К4 (например, МТЗ-80) и гусеничных тракторов (кроме тракторов с моноблочной трансмиссией) – предельное состояние ведущего моста или дважды коробки передач при её замене на идентичную после первого ресурсного отказа;

– для тракторов с моноблоком (например, трактор ДТ-75Н) – предельное состояние коробки передач или заднего моста.

Установление признаков предельного состояния одновременно связано с определением наработки объекта до ресурсного отказа. Вследствие неизбежного рассеивания ресурсов устанавливают усреднённое и скорректированное с учётом многолетней практики значение наработки до соответствующего вида ремонта для того или иного типа машин и оборудования.

На рис. 42 приведена структура ремонтно-обслуживающих воздействий до первого капитального ремонта на примере трактора Т-150 К и зерноуборочного комбайна СК-5 «Нива».



**Рис. 42.** Структура ремонтно-обслуживающих воздействий:

*a* – для трактора Т-150 К; *б* – для комбайна СК-5;

Э – эксплуатация (использование по назначению); Х – хранение;

КР – капитальный ремонт; ТР – текущий ремонт плановый;

ТО-2, ТО-3 – техническое обслуживание номер 2 и 3

ТО в особых условиях эксплуатации включает дополнительные операции к работам ЕТО, ТО-1, ТО-2, ТО-3, СТО-ВЛ и СТО-ОЗ.

Периодичность номерных ТО тракторов установлена в моточасах. Допускается регламентация номерных ТО по количеству израсходованного топлива в литрах или килограммах или в условных эталонных гектарах наработки. Коэффициенты перевода моточасов в условные эталонные гектары и литры израсходованного топлива приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Коэффициенты перевода моточасов в условные эталонные гектары,  
литры израсходованного топлива**

Марка трактора	Коэффициенты перевода			
	моточасы в у. э. га	у. э. га в моточасы	моточасы в литры	литры в моточасы
Т-130	1,54	0,65	16,7	0,060
К-700А	2,63	0,38	31,7	0,032
К-701	3,23	0,31	4545,0	0,022
Т-4А	1,64	0,61	23,3	0,043
ДТ-75 Н(МВ)	1,28	0,78	16,7	0,060
Т-150К	2,00	0,50	23,3	0,043
МТЗ-80/82	0,87	1,15	10,0	0,100
ЮМЗ-6Л(М)	0,75	1,33	8,0	0,125
Т-40АМ	0,62	1,61	9,0	0,111
Т-25	0,38	2,63	4,0	0,250

Допускается отклонение фактической периодичности (опережение или запаздывание) ТО-1, ТО-2 и ТО-3 до 10% от установленной.

При установлении периодичности проведения технических обслуживаний и ремонтов учитываются как технические, так и экономические условия.

При экономическом обосновании оптимальных сроков сопоставляют расходы на эксплуатацию машин и на различные виды ремонтно-обслуживающих воздействий.

Аналогичным образом, как и при экономическом обосновании сроков проведения ТО и ремонтов, дают обоснование экономически целесообразных сроков службы машин до их списания при эксплуатации. Для этого рассматривают ход изменения удельных расходов, связанных с поддержанием машин в работоспособном состоянии (кривая 2 на рис. 43), и амортизационных расходов (кривая 1) по мере роста наработки машин от начала их эксплуатации.

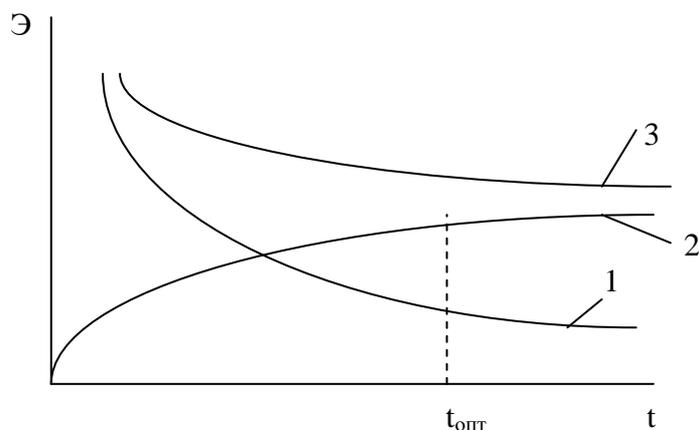
По минимуму суммарных расходов выносят заключение об оптимальной наработке, после которой дальнейшая эксплуатация машины экономически нецелесообразна.

Выбор сроков списания машин и их агрегатов относится к числу основных вопросов общей проблемы управления надёжностью эксплуатируемой техники.

Ранее списание машины ведёт к расточительному использованию трудовых и материальных ресурсов. Позднее списание вызывает снижение темпов роста производительности труда и общего уровня качества используемых машин, требует расширения ремонтно-обслуживающей базы и т. д.

Задача оптимизации списания машин и агрегатов требует для своего решения учёта большого числа факторов: технического состояния машин;

объёма их наработки; количества всех отказов, простоев, ремонтов; числа заменённых деталей и сборочных единиц; объёма всех видов затрат и т. д.



**Рис. 43.** Схема определения экономически целесообразной наработки машин:  
1 – амортизационные расходы; 2 – расходы на поддержание в работоспособном состоянии;  
3 – суммарные расходы;  $t$  – наработка;  $\mathcal{E}$  – расходы на единицу наработки

Периодичность заявочного (непланового) текущего ремонта не регламентируется.

Тракторы всех марок при их использовании по назначению (ГОСТ 20793–81) и хранении (ГОСТ 7751–85) подвергаются техническому обслуживанию следующих видов (табл. 6).

Таблица 6

### Виды и периодичность технического обслуживания тракторов

Виды технического обслуживания (ТО)	Периодичность или условия проведения ТО
При обкатке (ТО-О) (время обкатки 30 моточасов)	Перед началом, в ходе и по окончании обкатки
Ежесменное (ЕТО)	10 ч
Первое (ТО-1)	125 моточасов
Второе (ТО-2)	500 моточасов
Третье (ТО-3)	1000 моточасов
Сезонное при переходе к весенне-летнему периоду эксплуатации (СТО-ВЛ)	Проводится при подготовке трактора к весенне-летним условиям эксплуатации одновременно с очередным техническим обслуживанием (ТО-1, ТО-2, ТО-3)
Сезонное при переходе к осенне-зимнему периоду эксплуатации (СТО-ОЗ)	Проводится при подготовке трактора к осенне-зимним условиям эксплуатации одновременно с очередным техническим обслуживанием (ТО-1, ТО-2, ТО-3)

В особых условиях эксплуатации	При эксплуатации трактора: в условиях пустыни и песчаных почв; при длительных низких и повышенных температурах; на каменистых почвах; в условиях свыше двух тысяч метров над уровнем моря; на болотистых почвах и торфяниках
При подготовке к длительному хранению	Не позднее 10 дней с момента окончания периода использования
В процессе длительного хранения	Один раз в месяц при хранении на открытых площадках и под навесом; один раз в два месяца при хранении в закрытых помещениях
При снятии с длительного хранения	За 15 дней до начала использования

П р и м е ч а н и е. Сезонное техническое обслуживание СТО-ВЛ проводится при установившейся температуре окружающего воздуха выше 278К (+5 °С), а СТО-ОЗ – ниже 278К (+5 °С).

Для обеспечения показателей надежности и работоспособности автомобильного транспорта в процессе его эксплуатации принят основополагающий документ – «Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта» [19]. В нём изложены принципы системы технического обслуживания и ремонта автомобилей, основы организации и управления, а также приведены соответствующие нормативы и их корректировка с учётом условий эксплуатации.

Техническое обслуживание подвижного состава по периодичности, перечню и трудоёмкости выполняемых работ подразделяется на следующие виды:

- ежедневное техническое обслуживание (ЕО);
- первое техническое обслуживание (ТО-1);
- второе техническое обслуживание (ТО-2);
- сезонное техническое обслуживание (СО).

ЕО включает контроль по обеспечению безопасности движения, а также работы по поддержанию надлежащего внешнего вида, заправку топливом, маслом и охлаждающей жидкостью, а для некоторых видов подвижного состава, например, автобусов – санитарную обработку кузова.

ЕО выполняется на автотранспортном предприятии после работы подвижного состава на линии. Контроль технического состояния автомобилей перед выездом на линию осуществляется ими за счет подготовительно – заключительного времени.

ТО-1 и ТО-2 включает контрольно-диагностические, крепёжные, регулировочные, смазочные и другие работы, направленные на предупреждение и выявления неисправностей, снижения интенсивности ухудшения параметров технического состояния подвижного состава, экономию топлива и других эксплуатационных материалов, уменьшения отрицательного воздействия автомобилей на окружающую среду.

Периодичность ТО-1 и ТО-2 для автомобилей различных типов приведены в таблице 7 (1 категория условий эксплуатации, умеренный климатический район).

Периодичность ТО прицепов и полуприцепов равны периодичности их тягачей.

Сезонное ТО проводится два раза в год и включает работы по подготовке подвижного состава к эксплуатации в холодное и тёплое время года.

Все виды ТО подвижного состава проводятся в объёме перечней основных операций приведённых в Приложении 5 и химмотологической карте (приложение 6) «Положения о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта» [19].

Таблица 7

**Периодичность технического обслуживания подвижного состава, км**

Автомобили	ТО-1	ТО-2
- Легковые	4000	16000
- Автобусы	3500	14000
- Грузовые и автобусы на базе грузовых автомобилей.	3000	12000

Примечания. 1. Допускаемое отклонение от нормативов периодичностей ТО составляет  $\pm 10\%$ .

2. Периодичности замена масел и смазок уточняется в зависимости от типов (моделей) и конструктивных особенностей агрегатов (узлов), а также марки применяемого масла (смазки).

### **5.3. Система и программа обеспечения работоспособности и надежности машин**

#### *Общие понятия о работоспособности*

В связи с ускорением технического прогресса и повышением сложности машин и оборудования, происходит рост затрат на обеспечение их работоспособности. Для снижения этих затрат актуальным является повышение уровня надёжности на всех этапах "жизненного цикла" машины, включая её проектирование, производство и эксплуатацию.

Проектирование включает в себя:

- разработку технической документации на элементы машин, их размеры, конфигурацию, взаимное положение, материал и мероприятия по упрочнению;
- разработку технических условий на применение технической документации при производстве;

- разработку ремонтной и эксплуатационной документации.

Процесс производства связан с приобретением комплектующих изделий и полуфабрикатов, заготовительными операциями, механической обработкой, упрочнением элементов и сборкой.

Эксплуатация машины включает в себя все фазы её существования, в том числе, периоды хранения, транспортирования, подготовки к работе, выполнения рабочих функций.

Совокупность процессов на всех указанных этапах, направленных на обеспечение заданного уровня надежности, может рассматриваться как система обеспечения работоспособности.

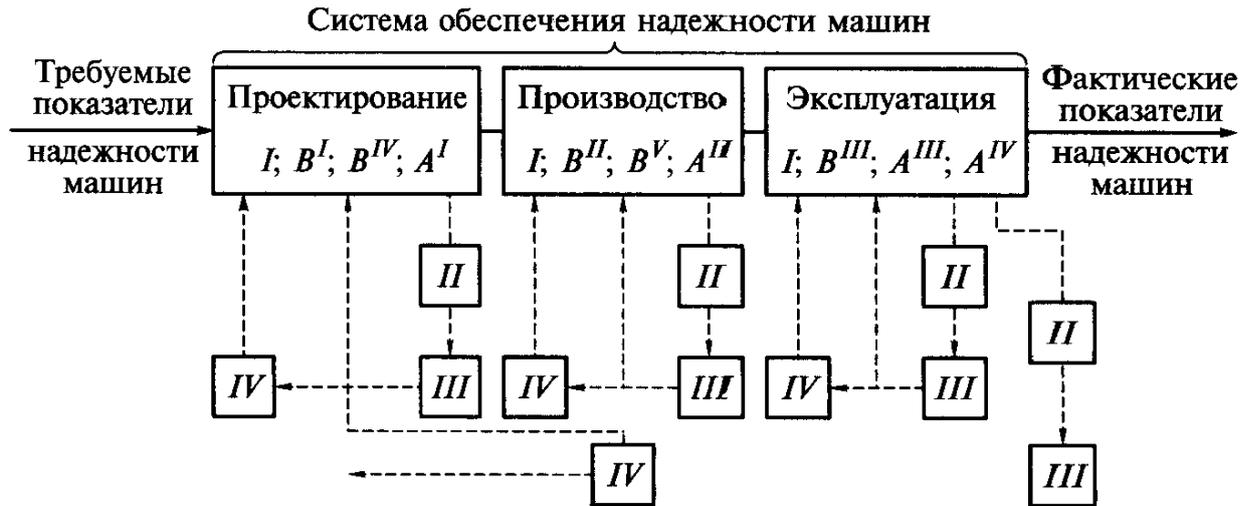
Целью системы является получение приемлемых для потребителей показателей надёжности машины с минимальными затратами.

Данная система относится к системе человек-машина-информация.

В соответствии с системным подходом всякая система входит в состав более крупной системы. В тоже время меньшие системы в рамках рассматриваемой системы представляются как подсистемы. К подсистемам системы обеспечения работоспособности можно отнести проектирование, производство и эксплуатацию. Подсистему можно также разделить на более мелкие части. Предполагается, что каждая система имеет границы.

В системе можно выделить: вход, процесс и выход. Под входом подразумевается компоненты, на основе которых строится функционирование системы. Выходом может быть информация, ресурсы, энергия и пр.. При этом предусматривается, что входные данные для какой-либо одной системы являются выходными данными, поступающими от других систем. Выход представляет собой результат функционирования или цель, для достижения которой создана система. Основной процесс системы является результатом всех осуществляемых видов деятельности для преобразования входных элементов системы в выходные.

Функциональная модель системы обеспечения работоспособности машины представлена на рис.7.1



**Рис.44.** Функциональная модель системы обеспечения работоспособности машины.

Входом системы обеспечения работоспособности являются требования к показателям надёжности изделия. Конечным выходом подсистемы проектирования является техническая документация, обеспечивающая расчетный уровень надёжности изделия.

Конечным выходом подсистемы производства является готовая продукция с определённым уровнем надёжности, а системы обеспечения работоспособности - показатели надёжности приемлемые для потребителя. Проблема обеспечения уровня надёжности машин и оборудования, отвечающая требованиям потребителя, может быть решена путём координированного взаимодействия системы человек-машина-информация, охватывающей весь процесс. Такая координация может быть достигнута на основе спроектированной системы обеспечения работоспособности с учётом передовых достижений системотехники, включающей в себя в первую очередь подсистему управления надёжности машины. При этом управление надёжностью продукции должно предусматривать оценку, обеспечение и поддержание необходимого уровня работоспособности продукции, при её разборке, производстве и эксплуатации.

Работоспособностью машин целесообразно управлять при помощи замкнутой системы регулирования с отрицательной обратной связью (см. рис.44) включает в себя:

- элементарный процесс обеспечения работоспособности машин с входными и выходными параметрами ( I );
- измерительный элемент величин выходных параметров ( II );
- элементы сравнения и выработки оптимального управляющего воздействия ( III );
- командный пункт, посылающий корректирующий сигнал ( IV ).

Схематично один из вариантов взаимодействия элементов системы управления работоспособности показан на рис.1 штриховыми линиями. Информация для контроля отбирается в различных частях системах, которые называются управленческими точками контроля  $A^I, A^{II}, A^{III}, A^{IV}$ . Точки  $B^I, B^{II}, B^{III}, B^{IV}, B^V$  являются местами осуществления воздействий на процесс. При этом целесообразно, по возможности, создание системы управления всем процессом обеспечения работоспособности машин и отдельными частными процессами (проектирования, производства, эксплуатации). Органами управления в частных системах могут быть подразделения (службы) надежности предприятий.

### *Программа обеспечения надежности*

Программа обеспечения надежности (ПОН) машин, как правило, разрабатывается в виде самостоятельных документов отдельно для стадии проектирования изделия и стадий его производства и эксплуатации. Разработка ПОН в виде единого документа проводится в том случае, если проектирование и изготовление изделия осуществляются одним предприятием.

ПОН на конкретное изделие содержит:

- перечень этапов программы по стадиям жизненного цикла изделия;
- состав (содержание) работ по отдельным этапам, сроки их выполнения и ответственных исполнителей;
- перечень отчетных документов, отражающих результаты выполнения работ (мероприятий).

Типовая структура ПОН на конкретное изделие включает в себя следующие этапы:

- обоснование требований к надежности изделия, его составных частей и сборочных единиц;
- проверка обеспечения требований к надежности при испытании опытных образцов и их составных частей;
- обеспечение надежности при производстве изделий;
- подтверждение показателей надежности серийно выпускаемых изделий.

Требования к надежности изделия и его сборочных единиц обосновывают на начальной стадии проектирования (при разработке технического задания, технического предложения, эскизного проекта). При этом для обоснования требований к надежности проектируемого изделия выполняют анализ надежности изделий-аналогов отечественного и зарубежного производства, возможных комплектующих сборочных единиц, а также аналогичных моделей изделий, выпускаемых на данном предприятии.

Результаты анализа сопоставляют с требованиями нормативных документов на данный тип изделия, дополнительными требованиями заказчика и возможностями завода-изготовителя и заносятся в технические условия (ТУ) и техническое задание (ТЗ) на проектируемое изделие. При этом материалы обоснования показателей надежности изделия, а также результаты расчета требований к надежности его составных частей оформляются в качестве приложений к ТУ и ТЗ.

Обоснование требований к ресурсам составных частей, а также расчет системы планово-предупредительных ремонтов (ППР) выполняют на основе структурного анализа надежности сборочных единиц. При этом при формировании системы ППР изделий, базирующихся на серийных машинах (промышленных тракторах и т.п.), а также использующих в качестве привода двигателя внутреннего сгорания, номенклатура и периодичность планового обслуживания и ремонтов задают по базовой машине (двигателю). При необходимости на основе окончательно сформулированных требований к надежности изделия и ресурсам его составных частей выполняют прогноз объемов производства запасных частей на весь период эксплуатации проектируемых изделий. Если расчетные объемы производства запасных частей в любом году их выпуска превысят возможности предприятия-изготовителя, то следует увеличить ресурс того конструктивного элемента, который образует дефицит запасных частей.

Проверку обеспечения требований к ресурсам составных частей проводят на основе действующих федеральных и отраслевых нормативно-технических и методических документов, а также материалов общей и специальной технической литературы. Если согласно расчету составная часть не удовлетворяет с заданной вероятностью требованиям к ее ресурсу, то вносят необходимые изменения в конструкцию или технологию изготовления составной части, после чего проверочный расчет выполняют повторно.

Проектирование испытательного оборудования и разработку программы стендовых ресурсных испытаний составных частей или изделия в целом осуществляют одновременно с рабочим проектированием изделия и выполняют для тех составных частей (или изделия в целом), для которых разработаны методики испытаний и технические задания на проектирование стендового оборудования.

В процессе серийного выпуска изделий мероприятия программы обеспечения надежности на стадии производства могут корректироваться и дополняться с учетом результатов испытаний установочной серии, контрольных и других испытаний, а также данных эксплуатации изделий.

Подтверждение показателей надежности серийно выпускаемых изделий осуществляется путем проведения контрольных испытаний в соответствии с требованиями ТУ, а также путем сбора статистической информации о надежности изделий в условиях эксплуатации. На основе анализа

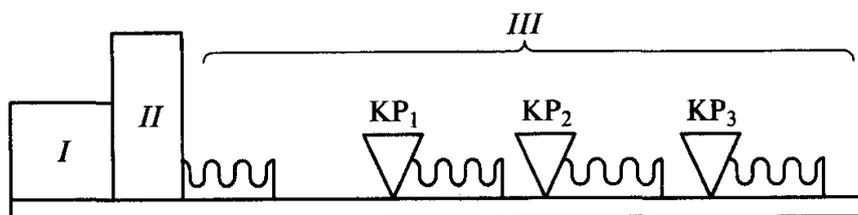
фактических показателей надежности разрабатывают оперативные мероприятия по повышению эффективности использования серийно выпускаемых изделий, а также определяют направление работ по их модернизации или созданию новых изделий.

### *Жизненный цикл машин.*

**Жизненный цикл машин** – это отрезок времени, измеряемый с начала проведения научно-исследовательских работ по обоснованию технико-экономических показателей машины и до снятия ее с производства.

Жизненный цикл делят на стадии (рис.45):

- I - разработка и подготовка производства изделия;
- II - серийное производство;
- III - эксплуатация.



**Рис.45.** Структурная диаграмма жизненного цикла машин

Стадия разработки включает в себя проведение НИР, работ по проектированию машины, изготовление опытных образцов и их испытание на всех этапах. Это начальная стадия жизненного цикла. В процессе ее выполнения обеспечиваются требования по ремонтпригодности.

Стадия серийного производства предусматривает технологическую подготовку производства (разработка серийной технологической документации, изготовление первого комплекта технологического оборудования, оснастки и инструмента), изготовление установочной и серийной партий выпускаемых изделий, а также организацию текущего и выходного контроля.

Стадия эксплуатации машин и их агрегатов включает в себя выполнение ими основных функций, проведение технического обслуживания и всех видов ремонта.

Эта стадия обычно делится на циклы моментом проведения капитального ремонта (КР) или другого вида ремонтного воздействия, восстанавливающего ресурс. **Ремонт** — совокупность организационно-технических и технологических мероприятий, направленных на устранение неисправностей, отказов и последствий изнашивания в целях восстановления работоспособности и ресурса машины (ее элементов) в соответствии с требованиями технической документации.

В течение эксплуатационного цикла наряду с техническим обслуживанием проводят все виды ремонтов, устраняющих внезапные и постепенные отказы для восстановления работоспособности и реализации ресурса машины (рис. 46).

Необходимо отметить, что если окончание жизненного цикла машины (агрегата) определяется моментом списания, то момент исчерпания ресурса определяется таким ее техническим состоянием, которое требует проведения капитального ремонта. Чем тяжелее, сложнее, а следовательно, дороже машина, тем более четко проявляется это обстоятельство. Стадия эксплуатации включает в себя, как минимум, два эксплуатационных цикла или один капитальный ремонт. Проведение ремонтных воздействий увеличивает продолжительность эксплуатационного цикла, проведение капитального ремонта приводит к увеличению стадии эксплуатации.

В течение эксплуатационного цикла проводят техническое обслуживание и все виды ремонтов, устраняющих последствия внезапных и постепенных отказов для восстановления работоспособности и ресурса машины (рис.46).

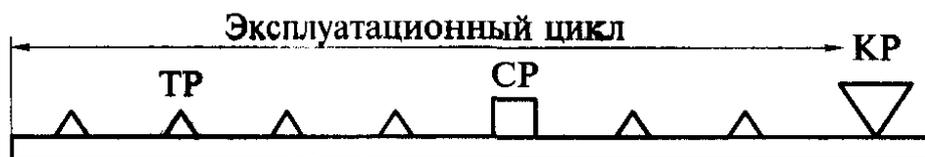


Рис. 46. Эксплуатационный цикл машины между капитальными ремонтами:  
ТР, СР, КР – текущий, средний и капитальный ремонт соответственно

**Старением** технической системы называют процесс накопления с разной интенсивностью повреждений ее элементов, который проявляется в необратимом изменении свойств и неравенстве остаточного ресурса элементов системы.

Под технической системой понимается машина в целом или ее отдельные элементы. Закон старения технических систем в процессе эксплуатации порождает необходимость проведения ремонта как единственно возможного способа устранения отказа (отказов) и обеспечения работоспособного состояния системы в течение назначенной конструктором наработки до предельного состояния.

Понятие «старение» применительно к машинам может использоваться в трех видах оценки их состояния: моральное старение; физическое старение материалов некоторых деталей; старение, связанное с изнашиванием рабочих поверхностей деталей машин.

Причиной морального старения служит появление в эксплуатации новых машин с более эффективными рабочими, экологическими, экономическими, эргономическими и другими свойствами в сравнении с машина-

ми предыдущих поколений. В этом случае такие машины являются (становятся) устаревшими, если их владелец решает на их замену новыми.

Следующий вид старения связан с необратимыми процессами физико-химических изменений свойств материалов некоторых деталей: резиновых уплотнений, сальников, пластиковых и синтетических материалов деталей, включая обивку салонов машин, электропроводов и т.д. Такие детали при ремонте заменяют.

Третий вид старения связан с изменением геометрических размеров и формы рабочих поверхностей деталей в результате их изнашивания, усталости и коррозии.

Последние два вида старения связаны с длительным воздействием на машину и ее элементы эксплуатационных факторов: природно-климатических, механических, динамических, термических и т.д. Проявление старения этих двух видов имеет необратимый характер. Борьба с такими проявлениями — основная, но не единственная цель ремонта. Все перечисленные проявления старения связаны с постепенным ухудшением технических характеристик машины или ее агрегатов и приводят к исчерпанию ресурса.

Повышение надежности подверженных старению технических систем в процессе эксплуатации может быть обеспечено только резервированием и методами ремонта:

- *нагруженным эксплуатационным резервированием*, т.е. повышением ремонтпригодности изделия до уровня, исключающего образование критических дефектов, которые могли бы вызвать неремонтпригодное состояние объекта в течение определенной наработки;
- *непогруженным эксплуатационным резервированием*, т. е. заменой отказавших элементов системы на ремонтные комплекты.

Объем ремонтных воздействий зависит от степени старения (изнашивания) или повреждения машины (агрегата). Различают несколько **видов ремонта**:

- **текущий ремонт** — совокупность технологических воздействий на изделие в целях восстановления одного или некоторой группы его эксплуатационных свойств до нормативного уровня:

- *плановый текущий ремонт* — совокупность технологических воздействий на изделие, проводимых в зависимости от установленной регламентом завода-изготовителя плановой наработки в целях восстановления одного его свойства или некоторой группы его эксплуатационных свойств до нормативного уровня;

- *явочный текущий ремонт* — совокупность технологических воздействий на изделие, проводимых в целях устранения или предупреждения случайного отказа.

Текущий ремонт машины восстанавливает или обеспечивает ее работоспособность после замены или восстановления изношенных (неисправ-

ных) деталей, узлов или агрегатов. При замене элементов машины выполняются необходимые ремонтные работы (регулирующие, слесарно-механические, сварочные и др.). Этот вид ремонта предусматривает замену лишь одного основного агрегата (механизма), кроме рамы и кузова для автомобилей, рамы и корпуса гусеничного трактора.

Текущий ремонт агрегатов заключается в частичной разборке, дефектации деталей и узлов, замене (ремонте) неисправных элементов и в проведении необходимых сопутствующих ремонтных работ:

- **средний ремонт** производится для тяжелых и большегрузных машин в целях частичного восстановления их ресурса после замены или ремонта изношенных (неисправных) агрегатов и узлов. Он предусматривает оценку технического состояния всех агрегатов и механизмов, выполнение сопутствующих ремонтных работ. Как показывает статистика, этот вид ремонта проводится после выработки 60 % ресурса машины;

- **капитальный ремонт** — совокупность технологических воздействий на изделие, проводимых в целях восстановления всех ее эксплуатационных свойств, включая ресурс, до нормативного уровня. Капитальный ремонт проводится в целях восстановления в полном объеме ресурса новой машины (ресурса до первого капитального ремонта). При этом виде ремонта машину полностью разбирают, заменяют новыми или ремонтируют все ее агрегаты, механизмы и узлы, восстанавливают или заменяют изношенные (поврежденные) детали с использованием различных способов устранения дефектов. Все ремонтные работы выполняют в соответствии с требованиями технических условий. Испытания машин или агрегатов после капитального ремонта проводят по тем же программам и методикам, которые применяются при оценке качества новых изделий;

- **восстановительный ремонт** — вторичное производство изделия, т.е. изготовление методами ремонта машин или сборочных единиц, у которых показатели свойств отличаются от показателей свойств аналогичных изделий, изготавливаемых на предприятии основного (первичного) производства, на допустимое значение. Кроме рассмотренных видов ремонта на стадии эксплуатации — в процессе жизненного цикла машины (агрегата) могут выполняться ремонт по техническому состоянию, гарантийный и профилактический ремонты.

**Ремонт по техническому состоянию** проводится по результатам оценки технического состояния машины (агрегата) по ряду оценочных показателей, в случае, если значения этих показателей отличаются от допустимых. В зависимости от числа таких показателей устанавливается объем ремонтных воздействий. Этот вид ремонта позволяет поддерживать и даже увеличивать ресурс машины или ее агрегатов. Он может выполняться на специализированных ремонтных заводах и других крупных ремонтных предприятиях.

**Гарантийный ремонт** производится в целях устранения отказов, возникающих в интервале гарантийной наработки и по вине завода-изготовителя (завода по капитальному ремонту). Этот ремонт выполняется силами завода-изготовителя на специализированных ремонтных заводах и др.

**Профилактический ремонт** проводится по рекомендациям главного конструктора машины (агрегата) в целях замены элементов, не обеспечивающих заданный межремонтный ресурс изделия. Как правило, этот ремонт выполняется силами ремонтных служб, эксплуатирующих изделие организаций. Подменные элементы (запасные части) поставляются заводом-изготовителем.

#### 5.4. Испытание машин на надежность

Цель испытания и контроля – определение показателей надежности сельскохозяйственной техники и сравнение их с нормативами или с показателями для машин-аналогов. Различают **исследовательские** (определяющие) и **контрольные испытания** (рис. 47).

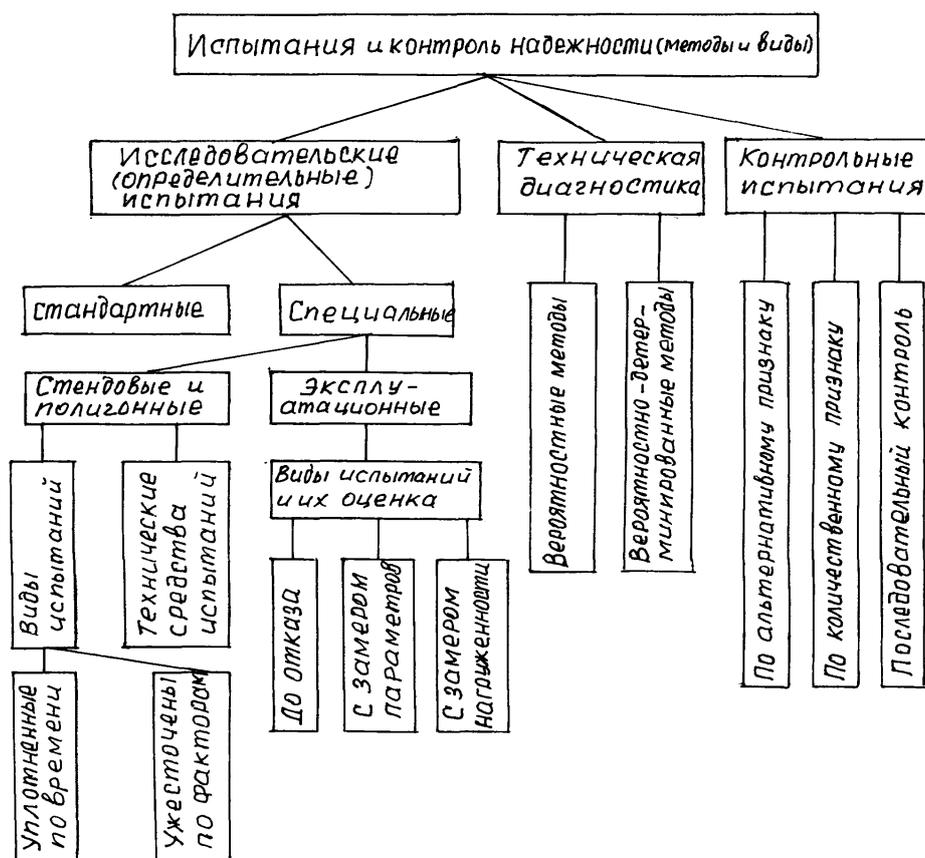


Рис. 47. Классификация методов испытания и контроля надежности

При исследовательских испытаниях определяют количественные показатели надежности и влияние на их значения различных факторов.

При контрольных испытаниях оценивают соответствие показателей надежности данного объекта заданным нормативам. Промежуточное место занимает техническая диагностика.

Такое деление испытаний условно. Иногда исследовательские испытания могут быть использованы для оценки соответствия объекта техническим условиям, а контрольные испытания – для определения количественных показателей и факторов надежности.

Исследовательские испытания могут быть стандартными и специальными. При стандартных испытаниях объектами обычно являются образцы изделий (испытания на износостойкость, усталостную прочность, коррозионную стойкость и т. д.), и результаты этих испытаний непосредственно не определяют показатели надежности. Этим испытаниям посвящен обширный список технической литературы и государственные стандарты. Специальные испытания могут проводиться на стендах, полигонах и в условиях эксплуатации.

Каждый из типов испытаний подразделяется на виды, для которых с учетом их особенностей рассматриваются применяемые средства испытаний, методы оценки показателей надежности и принятия решений.

Следует отметить, что основной вид испытаний машин на надежность в настоящее время – это испытания в хозяйственных условиях. Такие испытания широко используются как контрольные и проводятся на МИС в условиях подконтрольной эксплуатации при соблюдении правил обслуживания и ремонта, с непрерывным хронометражем и т. д. Хозяйственные испытания проводят также и заводы-изготовители.

Для машин серийного производства расширяют объем информации за счет сбора данных в рядовой эксплуатации. Для опытных образцов применяют методы имитационных и ускоренных испытаний на стендах и полигонах. На полигонах достигнута степень ускорения испытаний в 2–5 раз при уплотненных испытаниях и в 30 раз при ужесточении режимов испытаний. Уплотнение и ужесточение испытаний на полигонах и треках достигается движением машины по искусственным неровностям или гладкой поверхности, но с установкой на колесах машин специальных шипов. Для испытания несущих систем автомобилей, тракторов, прицепов и других машин получили распространение автополигоны с треками большой протяженности, оборудованные набором специальных препятствий. Недостаток полигонов и треков – трудности с воспроизведением для всех испытываемых машин всего спектра эксплуатационных нагрузок, а отклонения в воспроизведении приводят к появлению нехарактерных отказов при испытаниях.

Наибольшее практическое распространение для ускоренных испытаний тракторов, сельскохозяйственных машин и их сборочных единиц получили специализированные стенды, позволяющие получить высокие

коэффициенты ускорения при сохранении физической картины отказа, например, стенды для испытания двигателей в запыленной среде, инерционные стенды для сцепления и тормозов, вибростенды для топливной аппаратуры, силовые установки для испытания трансмиссии, абразивные ванны для гусеничных цепей, вибростенды для кабин и т. д.

### 5.5. Эксплуатационные мероприятия повышения надёжности

Высокие показатели надёжности и, в первую очередь, безотказность и долговечность, заложенные при проектировании и производстве машин, должны поддерживаться в процессе их эксплуатации. Основным мероприятием, направленным на достижение поставленной цели, является *обкатка новых и капитально отремонтированных машин в хозяйствах*. Обкатка закладывает основы длительной и безотказной работы машин и должна проводиться в течение 30 ч при постоянном повышении нагрузки в соответствии с рекомендациями заводов изготовителей или ремонтных предприятий. Она необходима для обеспечения взаимной приработки трущихся поверхностей деталей для подготовки их к работе с нормальной рабочей нагрузкой.

*Приработка* – это изменение геометрии и свойств поверхностных слоёв материала в начальный период трения, проявляющееся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания.

Под *геометрией поверхности трения* понимается совокупность показателей, характеризующих как шероховатость, т. е. величину и форму выступов и впадин, образовавшихся в процессе механической обработки, так и отклонения от правильной геометрической формы (овальность, конусность и т. д.).

Под *физико-механическими* свойствами поверхности понимают совокупность таких характеристик, как твёрдость, пластичность, структура, коэффициент трения, наличие внутренних напряжений в поверхностном слое.

Изменение геометрии поверхностей трения в процессе приработки происходит в результате изнашивания деталей и соответствует начальному участку типичной кривой изнашивания (см. рис. 24). В результате приработки создаётся микрорельеф поверхности, соответствующий конкретным условиям работы сопряжения и который не может быть сформирован на предварительных стадиях механической (или какой-либо другой) обработки деталей. Поэтому приработка при обкатке может рассматриваться как управляемый процесс формирования приспособленности трущихся поверхностей к характеру действующих эксплуатационных нагрузок.

Процессом приработки управляют через совокупность факторов, приведённых на рис. 48.

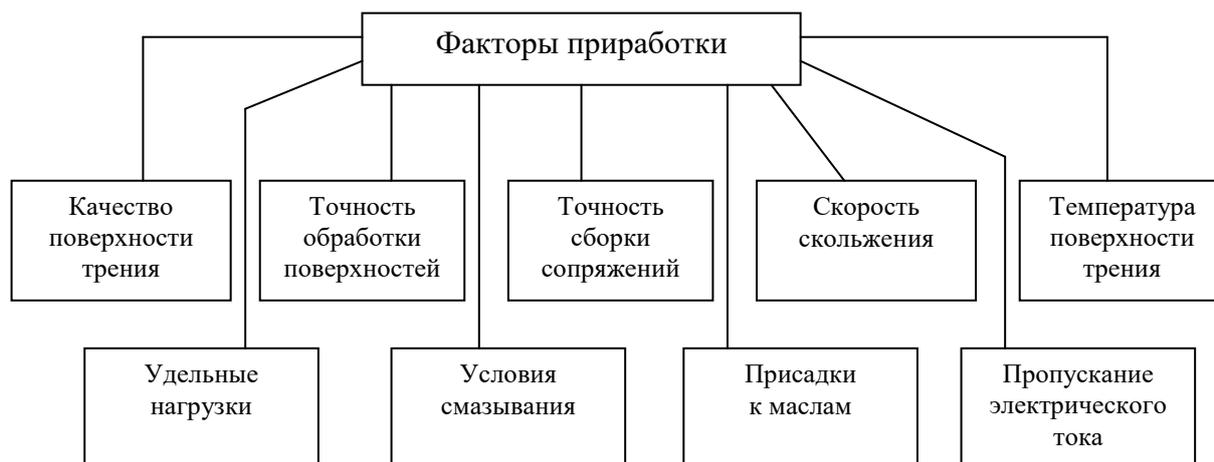


Рис. 48. Факторы процесса приработки сопряжённых поверхностей

Многие факторы, влияющие на процесс приработки, взаимосвязаны. Это видно на примере анализа работы сопряжения вал – подшипник (рис. 49). Для правильно сконструированного сопряжения кривые износа вала и подшипника будут иметь симметричный вид. Зазор в сопряжении, численно равный разности диаметров подшипника и вала, в начальный момент времени определяется расположением точек  $O_1$  и  $O_2$ . Зазор достигаемой в конце периода приработки определяется расположением точек  $A_1$  и  $A_2$ . Этот зазор соответствует началу периода нормальной работы сопряжения и поэтому считается наиболее выгодным. Зазор, определяемый расположением точек  $B_1$  и  $B_2$ , каждая из которых соответствует началу периода аварийного изнашивания, называется *предельным зазором*.

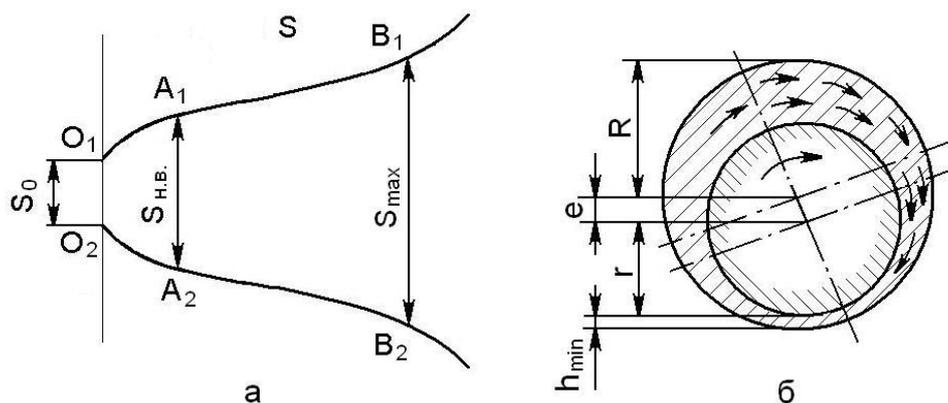


Рис. 49. Схема изнашивания сопряжения вал – подшипник:

$a$  – характер изменения зазора в сопряжении;  $b$  – положение вала в подшипнике;

$S_0$  – начальный зазор;  $S_{н.в.}$  – наиболее выгодное значение зазора;

$S_{max}$  – предельное значение зазора;  $h_{min}$  – минимальная толщина слоя смазки;

$R$  – радиус внутренней поверхности подшипника;  $r$  – радиус вала;

$e$  – абсолютный эксцентриситет

Расчетное определение значения зазора в сопряжении вал – подшипник основано на применении гидродинамической теории смазывания, согласно которой соотношение между зазором  $S$  и толщиной слоя смазки в самом узком месте клиновидной щели  $h_{min}$  (рис. 49, б), рассчитывается по формуле

$$h_{min} = 3,26 \frac{d^2 \cdot n \cdot \eta}{p \cdot S \cdot c}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр;

$n$  – частота вращения вала;

$\eta$  – абсолютная вязкость масла;

$p$  – удельная нагрузка (давление) на вал;

$c$  – конструктивный параметр, постоянный для данного сопряжения.

Для нахождения предельного значения зазора  $S_{max}$  из формулы (3) следует принять, что минимально возможное значение величины  $h_{min}$  не должно быть меньше суммы высот неровностей поверхности подшипника –  $\delta_n$  и вала –  $\delta_e$ , т. е.

$$h_{min} = \delta_n + \delta_e = \delta. \quad (4)$$

С учётом этого условия из выражения (4) находим

$$S_{max} = 3,26 \frac{d^2 \cdot n \cdot \eta}{p \cdot \delta \cdot c}. \quad (5)$$

Полученный результат – характерный пример аналитического определения параметров предельного состояния по техническому критерию. В данном случае такой критерий – допустимо минимальное значение  $h_{min}$ , поскольку дальнейшее её уменьшение приведёт к нарушению условий жидкостного трения и к возникновению поверхностных контактов, сопровождаемых процессом резко возрастающего изнашивания деталей.

Для определения наиболее выгодного значения зазора  $S_{н.в.}$  пользуются дополнительным условием, согласно которому сила трения в слоях смазки для рассматриваемого случая минимальна при значении относительного эксцентриситета, равного 0,5. Учитывая, что относительный эксцентриситет равен отношению абсолютного эксцентриситета  $e$  к половине зазора, это условие запишется соотношением

$$S_{н.в.} = 4e, \quad (6)$$

находя на рис. 49, б связь между  $e$  и  $h_{min}$ , получим из выражения (3) с учё-

том формулы (6) соотношение

$$S_{н.в.} = 1,81d \frac{n \cdot \eta}{p \cdot c}, \quad (7)$$

Полученное соотношение выражает связь результата приработки (в виде достигнутого наиболее выгодного зазора в сопряжении) с такими факторами процесса приработки (см. рис. 48), как удельные нагрузки ( $P$ ), скорость скольжения (частота вращения –  $n$ ) и вязкость масла ( $\eta$ ), которая в свою очередь зависит от температуры поверхности трения. Перечисленные факторы являются определяющим для назначения режимов обкатки. Так, для двигателей под режимом обкатки понимается совокупность этапов его работы на стенде при определённых нагрузках, частоте вращения вала и показателях его теплового состояния.

Из соотношения (7) можно определить качественный характер режимов обкатки. В частности, не учитывая возможное изменение вязкости масла ( $\eta$ ) и пренебрегая малыми изменениями конструктивных параметров ( $d$  и  $c$ ), по выражению (7) заключаем, что наиболее выгодное значение зазора ( $S_{н.в.}$ ), достигаемого приработкой сопряжения, определяется только отношением двух параметров: частота вращения вала ( $n$  – кинематический параметр) и механические нагрузки на вал ( $p$  – динамический параметр). По этому выражению видно, что неблагоприятным условием для процесса приработки будет уменьшение отношения двух отмеченных параметров. Отсюда следует, что увеличение частоты вращения при переходе от первых этапов приработки к последующим должно опережать нарастание механических нагрузок.

Подтверждение этому – установленные режимы обкатки, например, автомобильных двигателей, где различают четыре последовательные стадии приработки: холодная без нагрузки; холодная под нагрузкой; горячая на холостом ходу; горячая под нагрузкой.

Управлять процессом приработки можно по каждому из факторов, приведённых на рис. 48. Причём по таким факторам, как точность сборки сопряжений и точность обкатки поверхностей, управление фактически сводится к повышению качества выполнения соответствующих ремонтно-технических операций. В связи с этим обкатку машин и агрегатов часто рассматривают ещё и как их испытания.

Однако главной задачей обкатки является формирование сопряжений до состояния эксплуатационной готовности. В этом смысле проведение приработки сопряжений особенно важно для отремонтированных объектов, поскольку их сборочные единицы комплектуют деталями неоднородными (новые, восстановленные или повторно используемые). Одновременно с этим в процессе приработки может достигаться сглаживание ряда дефектов обработки деталей и сборки агрегатов. Отсюда появляется

возможность применения различных методов интенсификации приработки сопряжений. К ним относятся приработочные присадки к маслам (например, присадка ДК-8), пропускание электрического тока через контактирующие тела, образующие пару трения. Механизм воздействия электрического тока связывается с эрозионным съёмом металла с прирабатываемых поверхностей деталей.

Многофакторность процесса приработки свидетельствует о чрезвычайной сложности явлений, происходящих на первом этапе изнашивания сопряжений. Оптимальное формирование геометрии и физико-механических свойств поверхностных слоёв сопряжённых деталей может быть достигнуто только при соответствующем управлении самим процессом. Наибольшее число управляемых систем приработки разработано для проведения стендовой обкатки двигателей.

Машины и агрегаты кроме стендовой подвергаются ещё эксплуатационной обкатке. Причём она, как было указано выше, более длительная. Эксплуатационную обкатку проводят в хозяйствах при использовании машин на облегчённых режимах по рекомендациям заводов-изготовителей и ремонтных предприятий. Эти рекомендации предусматривают обкатку двигателя на холостом ходу в течение 2–3 ч, обкатку машины при постепенно возрастающей нагрузке – в течение 30 ч.

## 5.6. Ремонтные мероприятия повышения надёжности

В процессе ремонта машин на всех его этапах, начиная с приёмки в ремонт и заканчивая выдачей из ремонта, стремятся не только сохранить первоначальные показатели надёжности, но и повысить их.

Для достижения этих целей на ремонтных предприятиях реализуется комплекс мероприятий по следующим направлениям.

- **Проведение предремонтного диагностирования** для определения необходимых ремонтных воздействий и разборки соответствующих агрегатов машин. С помощью автоматизированной диагностической системы КИ-13940 для энергонасыщенных тракторов можно измерить 85 параметров технического состояния. При этом прогнозируют техническое состояние и показатели надёжности машин.

- **Обеспечение сохраняемости ремонтного фонда**, поступающего на ремонтные предприятия, достигается организацией складов и площадок, использованием специальных подставок и подкладок, антикоррозионных смазочных материалов и других средств.

- **Выполнение разборочных работ без повреждения и деталей и разуконплектовки соответствующих пар.** Для исключения повреждения деталей при разборке следует использовать съёмники, прессы, стенды и другие средства механизации. Наибольшее применение получили винто-

вые и гидравлические съёмники. При демонтаже подшипников качения нельзя передавать усилие на кольца через тела качения.

Для сохранения комплектов деталей применяют контейнеры. Нельзя разуконкомплектовывать блоки цилиндров и крышки подшипников коленчатого вала, шатуны и их крышки, пары зубчатых колёс конечных и других передач.

- **Выполнение на ремонтных предприятиях качественной очистки машин, агрегатов и деталей от различных загрязнений.** Удаление накали, нагара, асфальтосмолистых и других загрязнений отличается определёнными трудностями и требует использования своевременного оборудования (например, ультразвукового), новых моющих средств, обеспечения соответствующих режимов очистки. Только при высококачественной наружной очистке и промывке масляных каналов в блоке и коленчатом вале можно повысить ресурс двигателя ЯМЗ-240 на 30%.

- **Контроль и дефектация деталей.** Наряду с универсальными измерительными инструментами (микрометрами, индикаторами) следует широко использовать инструменты и средства пневматического контроля, обеспечивающие повышение точности измерений до 0,01–0,001 мм.

Коленчатые валы, коленчатые оси, поворотные цапфы, блоки, гильзы цилиндров и другие детали проверяют на отсутствие скрытых дефектов методами магнитной, люминесцентной, ультразвуковой дефектоскопии и гидравлической прессовки.

Блоки цилиндров, корпуса коробок передач и трансмиссий и другие базисные детали требуют сплошного контроля, не только размеров, но и геометрии их рабочих поверхностей и точности их взаимного расположения, так как во время эксплуатации у этих деталей в результате старения материала, изнашивания, воздействия различных нагрузок и перераспределения внутренних напряжений изменяются размеры, геометрическая форма и взаимное расположение рабочих поверхностей.

Устранение обнаруженных отклонений обеспечивает высокий ресурс не только самой базовой детали, но и всего агрегата.

- **Введение на ремонтных предприятиях входного контроля запасных частей,** так как встречаются случаи несоответствия их размеров, геометрической формы, твёрдости и других параметров чертежам и техническим требованиям.

- **Подбор деталей цилиндропоршневой группы** (поршней, шатунов, поршневых пальцев) по массе.

- **Динамическая балансировка** коленчатых и карданных валов, сцепления, колёс автомобилей и других деталей и сборочных единиц.

- **Обеспечение регламентированных зазоров и натягов** в соединениях, усилий затяжки резьбовых соединений и других требований при сборке агрегатов и машин. Так, зазор между шейкой и вкладышем коленчатого вала двигателя ЯМЗ-240 должен быть 0,056–0,114 мм. Превышение

этого зазора при сборке приводит к снижению ресурса двигателя, уменьшение – к задиру вкладышей при обкатке двигателя.

Детали цилиндропоршневой группы двигателей обязательно подготавливают по установленным размерным группам. Поршни перед сборкой подогревают до температуры 70–80 °С. Перед напрессовкой на валы рекомендуется нагревать и подшипники качения.

**- Обеспечение хорошей герметизации агрегатов и сборочных единиц.** Для этого заменяют прокладки и сальниковые уплотнители, устраняют коробление поверхностей разъёмов деталей, восстанавливают резьбовые соединения, используя новые прокладочные материалы типа жидкой полимерной прокладки и полимерные клеевые композиции.

**- Внедрение стендовой обкатки и испытаний агрегатов и машин.** Обкатывают под нагрузкой не только двигатели, но и агрегаты трансмиссии, применяют обкаточные масла и различные присадки.

**- Повышение качества окраски** ремонтируемых машин за счёт лучшей подготовки окрашиваемых поверхностей, применение эффективных грунтов и эмалей, окраски отдельно агрегатов и машин в сборе; внедрение прогрессивных методов окраски гидродинамическим распылителем, в электростатическом поле и др.

**- Обеспечение качества и долговечности восстанавливаемых** деталей путём применения упрочняющих технологий и получения заданного качества поверхностей, особенно на стадии финишных операций обработки и упрочнения.

Используя различные технологические процессы восстановления, особенно металлопокрытиями, и упрочняющую технологию, можно не только восстанавливать потерянные размеры деталей и первоначальные служебные свойства, но и значительно их повышать.

Примером этому может служить создание биметаллических поверхностей у новых деталей и значительное повышение их долговечности (хромированные поршневые кольца, наплавленные клапаны двигателей, рабочие органы сельскохозяйственных машин и др.).

Наиболее перспективными способами восстановления автотракторных деталей является механизированная наплавка в среде защитных газов ( $\text{CO}_2$ , смесях  $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2 + \text{Ar} + \text{He}$ ) порошковыми проволоками, под легированными керамическими флюсами, плазменной дугой, ТВЧ, электрошлаковым способом. Наплавка в газовых средах рекомендуется для восстановления деталей трансмиссии и деталей ходовой части тракторов и автомобилей, особенно в сочетании с упрочняющей технологией.

В качестве электродной проволоки рекомендуется Нп-30ХГСА диаметром 1,6 и 1,2 мм. После наплавки твёрдость НВ300-350, а после упрочнения закалкой с нагревом ТВЧ её значение повышается до НВ560-570.

Наплавка порошковыми проволоками с внутренней защитой позволяет в широких пределах легировать наплавляемый металл и устраняет не-

удобства, связанные с применением специальных защитных сред (флюсов, газов, жидкостей и т. п.). Кроме того, этот вид наплавки даёт возможность получать сравнительно небольшую глубину проплавления основного металла, упрощает технологический процесс, уменьшает трудоёмкость восстановления деталей.

Порошковые проволоки марок ПП-3х5Г2М и ПП-25х5ФМС рекомендуются для восстановления и повышения долговечности деталей высокой твёрдости (HRC 50 и более), то есть коленчатых валов, коленчатых осей, цапф балансиров; марок ПП-ТН250, ППТН1 для деталей средней твёрдости (до HB300), то есть тормозных шкивов, различных осей и валов (по шейкам); марок ПП-АН124, ПП-АН125 – для деталей, подверженных абразивному изнашиванию, твёрдость после наплавки – HB250, после налёпа – HB400-450.

Наплавка под легированными керамическими флюсами АНК-18, АНК-19, К-11 и флюсами-смесями позволяет получать (при использовании дешёвой электродной проволоки) наплавленный металл высокой износостойкости. Они рекомендуются для наплавки опорных катков гусеничных тракторов. В сочетании с проволокой СВ-08 они обеспечивают твёрдость не ниже HRC 45.

Плазменная наплавка характеризуется высокой температурой дуги 20–25 тыс. °С, небольшой глубиной проплавления, возможностью нанесения на изношенные поверхности высоколегированных металлопокрытий различной толщины (0,1–1,0 мм и более), отличающихся значительной износостойкостью. Процесс протекает в защитной среде инертного газа с использованием специальных наплавочных порошков на основе никеля, кобальта, хрома, железа и других элементов, а также с применением в качестве наплавочного материала легированной проволоки.

Индукционная наплавка токами высокой частоты (ТВЧ) эффективно используется для нанесения износостойких слоёв толщиной 0,3–2,5 мм на плоские детали: лемехи, лапы культиваторов, ножи бульдозеров и др. в качестве наплавочных порошков применяются сормайт, смесь ФБХ-6-2 и псевдосплавы ПС-4. Наплавку выполняют с использованием плавящихся флюсов АН-348А, ОСЦ-45 и др. Индукционная наплавка лемехов и лап культиваторов твёрдыми сплавами повышает их срок службы в 3–4 раза и обеспечивает самозатачивание режущих поверхностей в процессе работы.

В связи с тем, что у деталей, восстановленных наплавкой, снижены значения динамической и циклической прочности и в наплавленном металле, особенно легированном, возможно появление трещин, в ремонтной практике применяются технологические приёмы, повышающие эксплуатационные свойства, безотказность и долговечность этих деталей. К ним относятся: поверхностная закалка с нагревом ТВЧ, газовым пламенем или плазменной дугой; поверхностное пластическое деформирование; элек-

тротеханическая и химико-термическая обработка; термохимическая обработка в процессе наплавки.

Эти технологические приёмы позволяют повысить твёрдость и износостойкость наплавленных деталей в среднем в два раза, контактную и усталостную прочность, значения которых достигают уровня новых деталей.

Ремонтные предприятия сельского хозяйства успешно применяют износостойкое хромирование для восстановления и упрочнения деталей топливной аппаратуры и гидросистем, толкателей, поршневых пальцев автотракторных двигателей, крестовин карданных валов и дифференциалов и других, а также железнение (осталивание) и другие способы.

Широко применяются в ремонтной практике полимерные материалы для заделки трещин и пробоев блоков цилиндров ДВС, корпусных деталей трансмиссий машин, приклеивания фрикционных накладок эпоксидными композициями и клеями и т. д.

Клеи на основе модифицированных фенолоформальдегидных смол отличаются высокими прочностными характеристиками, хорошей водо-, масло- и бензостойкостью, но используются в настоящее время, в основном, для наклеивания тормозных накладок и изготовления герметиков для промазки разъёмов корпусных деталей. В остальных областях эти клеи вытесняются не содержащими растворители эпоксидными и полиуретановыми.

Клеи на основе эпоксидных смол отверждаются как при обычных, так и при повышенных температурах, образуя материалы с хорошими физико-механическими характеристиками и высокой адгезией к металлам и многим неметаллическим материалам. Эпоксидные клеи обладают хорошей водо-, масло- и бензостойкостью. Различают эпоксидные клеи холодного и горячего отверждения. Эпоксидные композиции холодного отверждения получили наиболее широкое распространение при ремонте автомобилей.

В таблицах 8, 9 и 10 приведены составы эпоксидных композиций, клеев и рекомендации по их применению.

## Составы эпоксидных композиций

Номер состава	Массовая доля компонентов, ч				
	Эпоксидная смола		Пластифи- катор — дибутил- фталат	Отвердитель — полиэти- ленполиамин	Наполнители
	ЭД-16	ЭД-20			
1	100	—	10...15	10	—
2	100	—	20	10	—
3	100	—	15	10	Алюминиевый порошок, 25
4	—	100	20...25	11...12	Алюминиевая пудра, 7...10
5	100	—	15	10	То же, 25
6	100	—	10...15	10	Цемент, 120
7	100	—	20	10...11	Молотая слюда, 50
8	100	—	20	10...11	То же, 40, алюмин. пудра, 10
9	100	—	20	10...11	Молотая слюда, 30, чугунный по- рошок, 50
10	100	—	15	10...11	Графит, 50
11	100	—	15	10...11	Чугунный порошок, 19, молотая слюда, 20
12	100	—	15	10...11	Оксид железа, 150, молотая слюда, 20
13	—	100	25	11...12	Железный порошок, 150...200, алюминиевый порошок, 10
14	—	100	20...25	11...12	Железный порошок, 70, молотая слюда, 80, алюминиевый порошок, 7...10
15	—	100	25	11...12	Чугунный порошок, 60, молотая слюда, 70, газовая сажа, 30
16	—	100	20...25	11...12	Молотая слюда, 120
17	100	—	15	10...11	Железный порошок, 160
18	100	—	20	11	То же, 150, графит, 20
19	—	100	20...25	11...12	Молотая слюда, 80...100, алюми- ниевый порошок, 15...25
20	100	—	60	10...11	Газовая сажа, 35
21	100	—	50	10...11	Молотая слюда, 70...80

### Рекомендации по применению эпоксидных композиций

Детали	Устраняемые повреждения	Рекомендуемые композиции (по таблице 12.3)
Блок цилиндров двигателя	Трещины различной длины, пробоины. Износ посадочных мест под вкладыши коренных подшипников	9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18
Головка цилиндров	Трещины, пробоины, коррозия по контуру отверстий рубашки охлаждения	11, 12, 13, 14, 17
Поддон картера двигателя	Трещины и пробоины	11, 13, 17
Картеры сцепления, коробки передач, блок цилиндров компрессора	То же	9, 14, 17
Кузов, кабина, детали оперения автомобиля	Вмятины, пробоины	20, 21
Масляный радиатор	Трещины и пробоины на стенках бачков	9, 11, 19
Водяной радиатор	То же	16, 19
Топливный бак	Течь в местах сварки, пробоины, сквозная коррозия на стенках	3, 4, 7
Шариковый подшипник — гнездо корпуса; шариковый подшипник — вал; ось — корпусная деталь; втулка — корпусная деталь	Износ посадочной поверхности до зазора: не более 0,1 мм более 0,1 мм	1, 2, 4, 11, 13, 18
Шпильки — корпус	Износ до зазора не более 0,3 мм	1, 2, 4
Пластмассовые детали электрооборудования	Трещины, отколы	1, 2, 7, 19

### Клеи и герметики, используемые при ремонте автомобилей

Вид ремонта	Марка, ГОСТ, ТУ	Основа
Наклейка тормозных накладок	ВС-10Т ГОСТ 22345077	Фенолформальдегидная смола, поливинилацеталь, алкоксисалан
Заделка трещин и пробоин, ремонт резьб под шпильки, восстановление посадочных мест под подшипники	ЭД-10, ЭД-20 ТУ 6-15-662-85	Эпоксидная смола с наполнителем
Рихтовка и заделка сварных швов	ПЭ-0089, Хемпропол П ТУ 6-10-5050-86	Полиэфирная смола
Фиксация резьбовых и гладких соединений	Унигерм-6 ТУ 6-01-1326-86 Анатерм 8К ТУ 6-01-2-726-84	Эфиры акриловой и метакриловой кислот
Ремонт камер шин	РПД ТУ 38.104346-82	Эпоксидно-каучуковая
Ремонт глушителя и выпускных труб	ЭПК-11 ТУ 6-10-1998-85	То же
Автогерметики-прокладки	КЛТ-75Т ТУ 38-103-606-86, Эластосил 137-83, ВАТТ-3 ТУ 6-02-1237-83	Кремнийорганические каучуки
Герметизация остекления кузова	51-Г6 ГОСТ 23744-79	На основе полиизобутилена
Приклеивание дверных резиновых уплотнителей	88 Н ТУ 38-1051061-82 88 НП-43 ТУ 38-1052681-87	Каучук Наирит СРБК  Каучук Наирит РНП
Приклеивание обивки и тканей	ГИПК-219 ТУ 6-05-251-21-78	Раствор хлоропренового каучука и модифицированной фенолформальдегидной смолы
Антикоррозионная защита кузова	БМП-1 ТУ 6-05-251-21-78	На основе битума

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Артемьев, Ю. А.* Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1981.
2. *Артемьев, Ю. А.* Основы надежности сельскохозяйственной техники. М.: МИИСП, 1973.
3. *Гаркунов, Д. Н.* Триботехника. М.: Машиностроение, 1989.
4. *Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С.* Триботехника. Учеб.пособ. М.: КноРус, 2013.-408с.
5. *Грошев, Л. М.* Надежность сельскохозяйственной техники / Л. М. Грошев, Н. Ф. Дмитриченко, Т. И. Рыбак. Киев: Урожай, 1990.
6. *Дмитриченко, Н. Ф.* Антикоррозионные смазочные материалы / Н. Ф. Дмитриченко, П. С. Маковецкий. Киев: Урожай, 1991.
7. *Ермолов, Л. С.* Основы надежности сельскохозяйственной техники / Л. С. Ермолов, В. М. Кряжков, В. Е. Черкун. М.: Колос, 1982.
8. *Зорин В.А.* Основы работоспособности технических систем. Учебник. М.; ИЦ Академия, 2015. – 208 с.
9. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве / под ред. С. С. Черепанова. М.: ГОСНИТИ, 1985.
10. *Крагельский, И. В.* Узлы трения машин / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. М.: Машиностроение, 1984.
11. *Крылов, Н. А.* Долговечность узлов трения самолетов / Н. А. Крылов, М. Е. Хаймзон. М.: Транспорт, 1976.
12. Надежность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. М.: Машиностроение, 1986–1990.
13. Надёжность и ремонт машин. Курс лекций. [электронный ресурс] : Учеб.пособ. /Авт. сост. Я.Ф.Ракин; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2012. – 61с. Режим доступа : <http://novsu.bibliotech.ru>.
14. Положение о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта: М.: «Транспорт», 1988. – 73с.
15. *Ракин, Я. Ф.* Эксплуатация подшипниковых узлов машин. М.: Росагропромиздат, 1990.
16. Трение, изнашивание и смазка. М.: Машиностроение, 1979.
17. *Шевчук, В. П.* Трактор ДТ-175С / В. П. Шевчук, Я. Ф. Ракин, С. П. Свиначев и др.; под ред. Я. Ф. Ракина. М.: Агропромиздат, 1995.
18. Эксплуатационные материалы: [электронный ресурс] Метод. Указ. к лаб. работам / Сост.Я.Ф.Ракин; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2013. – 55 с.
19. *Яковлев, Б. П.* Защита сельскохозяйственной техники от коррозии. М.: Колос, 1982.
20. Смирнов А.В. Автомобильные эксплуатационные материалы Часть II. Специальные жидкости. Применение автомобильных эксплуатационных материалов. Учеб.пособие/НовГУ имени Ярослава Мудрого-Новгород, 1999-143с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ХАРАКТЕРИСТИКА И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ. ....	4
1.1 Основные понятия о надежности. ....	4
1.2. Термины и определения. ....	7
1.3. Оценочные показатели надежности. ....	9
1.4. Причины снижения надежности и потери работоспособности машин .....	16
2. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА И УСТАЛОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ .....	27
2.1 Контакт рабочих поверхностей .....	27
2.2 Структура поверхностного слоя детали .....	29
2.3. Условия развития усталостных процессов. ....	32
2.4. Механизм усталостного изнашивания и разрушения материала .....	35
3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ. ....	40
3.1. Общая закономерность изнашивания .....	40
3.2. Виды и теории трения .....	44
3.3. Виды изнашивания реальных деталей машин .....	48
3.4. Стадии изнашивания и предельные износы сопряжений деталей .....	51
4. ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАШИН .....	60
4.1. Назначение и классификация смазочных материалов .....	60
4.2. Механизм смазочного действия масел .....	61
4.3. Изменение эксплуатационных свойств смазочных материалов в процессе работы .....	64
4.4. Восстановление работоспособности машин с помощью присадок к маслам .....	71
5. УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МАШИН .....	75
5.1. Цель, задачи, сущность управления .....	75
5.2. Система технического обслуживания и ремонта машин. ....	77
5.3. Система и программа обеспечения работоспособности и надежности машин .....	85
5.4. Испытание машин на надежность .....	94
5.5. Эксплуатационные мероприятия повышения надёжности .....	96
5.6. Ремонтные мероприятия повышения надёжности .....	100
Литература .....	108
Оглавление .....	109

*Учебное издание*

# **НАДЕЖНОСТЬ И РЕМОНТ МАШИН**

*Учебное пособие*

Автор-составитель  
**Ракин Яков Федорович**

Компьютерная верстка

---

Изд. лиц. ЛР № 020815 от 21.09.98.

Подписано в печать 05.03.2012. Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16.

Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,8. Тираж 150 экз. Заказ №

Издательско-полиграфический центр Новгородского  
государственного университета им. Ярослава Мудрого.

173003, Великий Новгород, ул. Б. Санкт-Петербургская, 41.

Отпечатано в ИПЦ НовГУ. 173003, Великий Новгород,  
ул. Б. Санкт-Петербургская, 41.