

Лекция № 1

Предмет – надежность машин

Цель дисциплины - научиться
оценивать надежность
оборудования, разрабатывать и
осуществлять мероприятия по ее
повышению при эксплуатации и
ремонте машин.

Введение

В настоящее время роль надежности оборудования как никогда является важной составляющей при создании новой техники. Это связано прежде всего с тем, что надежность неизменно повышается, т.к. увеличивается скорость движения и вращения . В свою очередь люди хотят иметь уверенность - с оборудованием будет все в порядке и в нужный момент оно не подведет .

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

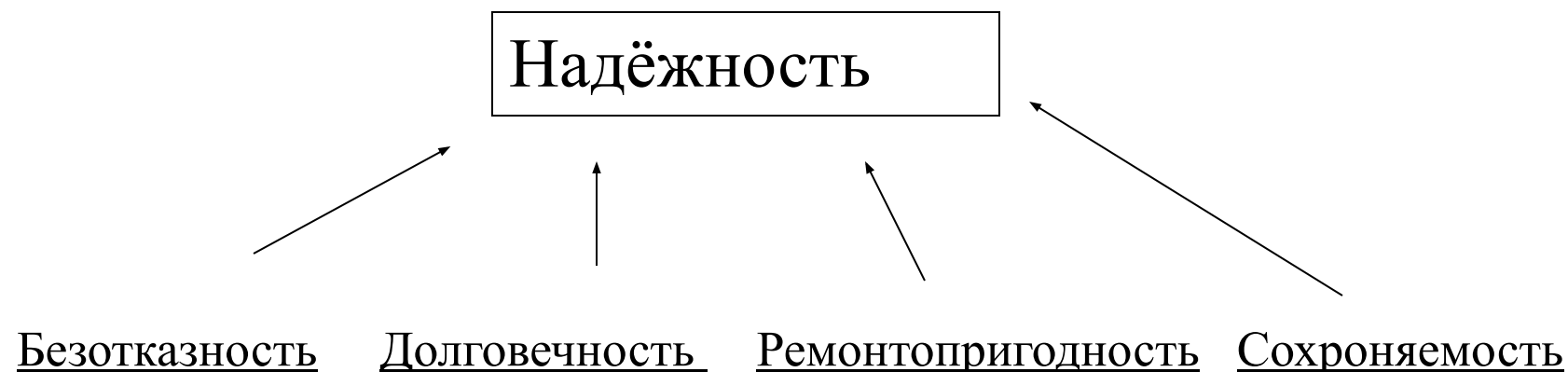


Рис. 1 Свойства надёжности

1 Основные понятия и положения

1.1. Понятия о качестве и надежности машин.

Применительно к теплоэнергетическому оборудованию надежность является важнейшей технико-экономической характеристикой, определяющей стоимость и качество изготовления, ремонта и технической эксплуатации машины.

Значение надежности в жизни машины можно сравнить со значением здоровья в жизни человека. Основным свойством человека является его здоровье. Чем лучше здоровье, чем реже и меньше болеет человек, тем больше он выполнит работы и тем меньше времени и средств затратит на отдых и лечение. В этом смысле «здоровьем» машины является ее надежность, а ее «болезнью» – отказ или потеря работоспособности. По мере «старения» надежность машины, также как и здоровье человека, ухудшается, а стоимость поддержания работоспособности увеличивается.

1.2. Техническое состояние объекта ГОСТ 27.002-83 «Термины и определения».

Исправное — состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Неисправное — состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Работоспособное — состояние объекта, при котором значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

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

Предельное — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению не допустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Указанные определения характеризуются совокупностью значений параметров, описывающих состояние объекта, и качественных признаков, для которых не применяют качественные оценки.

Номенклатуру этих параметров и признаков, а также пределы допустимых их изменений устанавливают в нормативно — технической и конструкторской документации на объект.

Переход объекта из одного состояния в другое обычно происходит в следствии повреждения или отказа.



Рис. 2 Состояние объекта

Дефект – повреждение при котором объект остается работоспособным

Неисправность – повреждение при котором объект становится неработоспособным

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа – признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта, установленные в нормативно – технической и конструкторской документации.

Восстанавливаемый объект – для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно – технической и конструкторской документации.

Невосстанавливаемый объект — объект, для которого в рассматриваемой ситуации приведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно–технической и конструкторской документации.

Ремонтируемый объект — для которого проведение ремонтов предусмотрено нормативно –технической и конструкторской документации.

Неремонтируемый объект — для которого проведение ремонтов не предусмотрено в нормативно –технической документации.

Ремонт — комплекс операций для восстановления работоспособности и ресурса оборудования, или их составных частей (ГОСТ 18322 –78).

Технический ресурс – наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Наработка – продолжительность или объём работы объекта.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

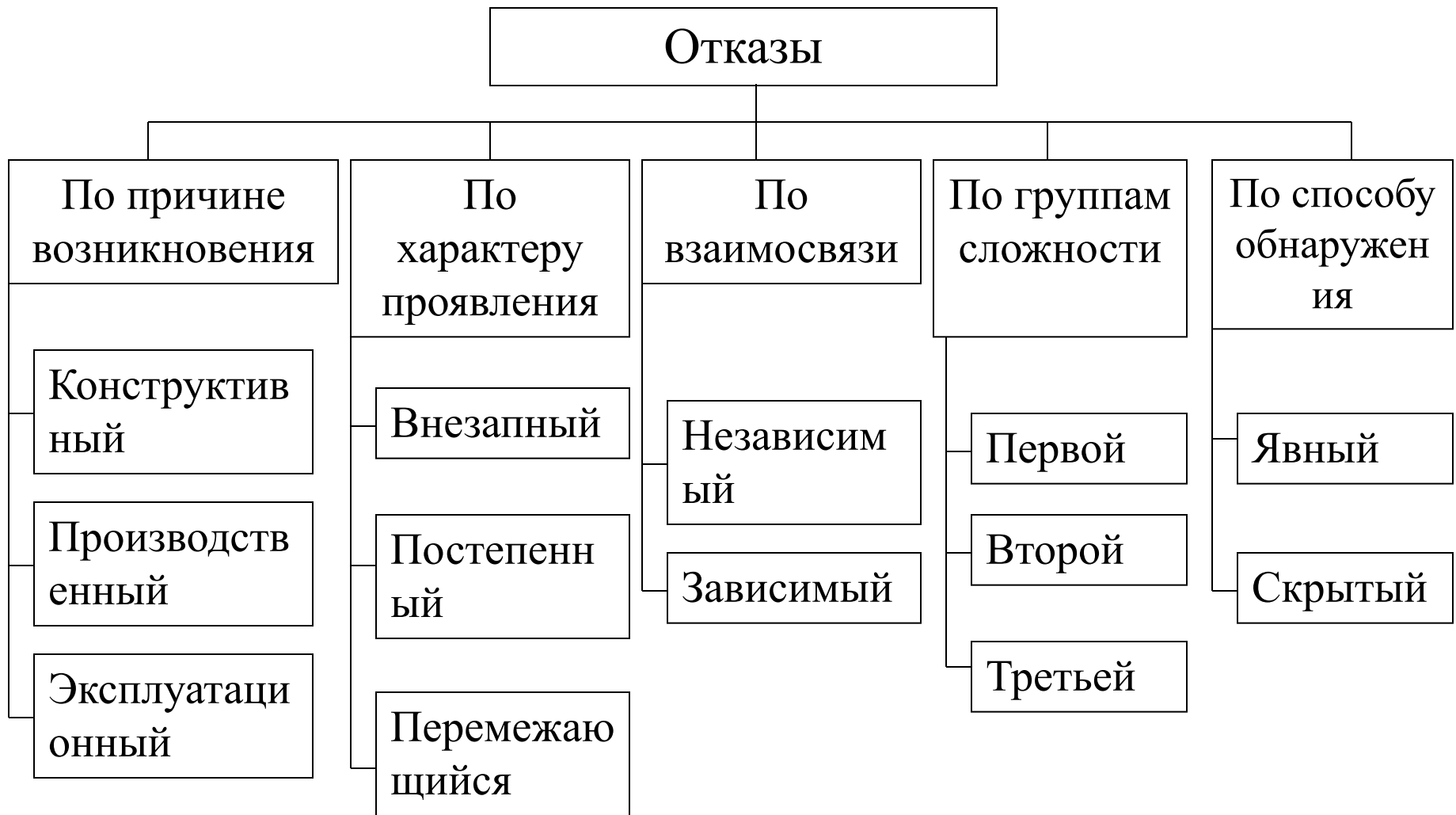


Рис. 3 Классификация отказов

Независимый отказ — отказ объекта, не обусловленный отказом другого объекта.

Зависимый — отказ объекта, обусловленный отказом другого объекта.

Внезапный — отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких значений заданных параметров объекта.

Постепенный — отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Внезапному отказу не предшествует направленное изменение параметров, прогнозировать его практически невозможно. **Пробивание прокладок, усталостные разрушения.**

Постепенный – отказ характеризуется закономерностью изменения заданного эксплуатационного параметра объекта. Это позволяет с высокой вероятностью прогнозировать интервал времени или наработки, где следует ожидать постепенный отказ. **Например, предельный износ деталей и сопряжений.**

Перемежающийся — многократно возникающий самоустраняющийся отказ объекта одного и того же характера.

Конструкционный — отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установочных правил и норм конструирования объекта.

Производственный — отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполнявшегося на ремонтном предприятии.

Эксплуатационный – отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и условий эксплуатации объекта.

Отказы относят к контрольным, производственным или эксплуатационным с целью установления, на какой стадии создания или существования объекта следует провести мероприятия для установления причин отказа.

Ресурсный — отказ, возникший при эксплуатации объекта в соответствии с установленными нормами.

1-ой степени — если восстановление работоспособности не требует разборочно — сборочных операций. Замена доступных деталей. Восстановление работоспособности производится путем замены только неисправной детали.

2-ой степени — производятся разборочно — сборочные операции, но остаточный ресурс остается прежним. А также отказы, устранение которых требует раскрытия внутренних полостей основных агрегатов.

3-ей степени — ведутся значительные разборочно-сборочные операции, при этом проводится оценка технического состояния узлов и деталей с последующим восстановлением межремонтного ресурса машины.

Явный — отказ, легко видимый невооруженным глазом.

Скрытый — отказ, не видимый при внешнем осмотре

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе ТО и ремонта.

Объект может перейти в предельное состояние, оставаясь работоспособным, если, например, его дальнейшее применение по назначению станет недопустимым по требованиям безопасности, экологичности, эффективности и безвредности.

Ремонтопригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтопригодность представляет собой совокупность технологичности при техническом обслуживании и ремонтной технологичности объектов. Затраты времени и труда определяются в заданных условиях выполнения операции технического обслуживания и ремонта в части организации, технологии, материально-технического обеспечения, квалификации персонала и т. д.

Свойства объекта, характеризующие
ремонтпригодность :

[1] Контролепригодность.

[2] Доступность.

[3] Легкостьёмность.

[4] Блочность.

[5] Взаимозаменяемость.

[6] Восстанавливаемость.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять значение показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течении и после хранения и (или) транспортирования.

Зависимость ресурса машин, агрегатов, деталей от качества хранения.

1.3 Оценочные показатели надёжности оборудования.

Показатель надёжности — количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надёжность объекта.

Существует два вида показателей надёжности.

Единичный показатель надёжности — показатель, характеризующий одно из свойств, составляющих надёжность объекта.

Комплексный показатель надёжности — это показатель, характеризующий несколько свойств, составляющих надёжность объекта.

1.3.1.Единичные показатели безотказности.

1.3.1.1.Вероятность безотказной работы — это вероятность того, что пределах заданной наработки отказ объекта не возникает.

Вероятность безотказной работы может применяться как количественный критерий надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов.

Вероятность безотказной работы выражается в долях единицы или в процентах и изменяется от единицы до нуля (Рис.1)

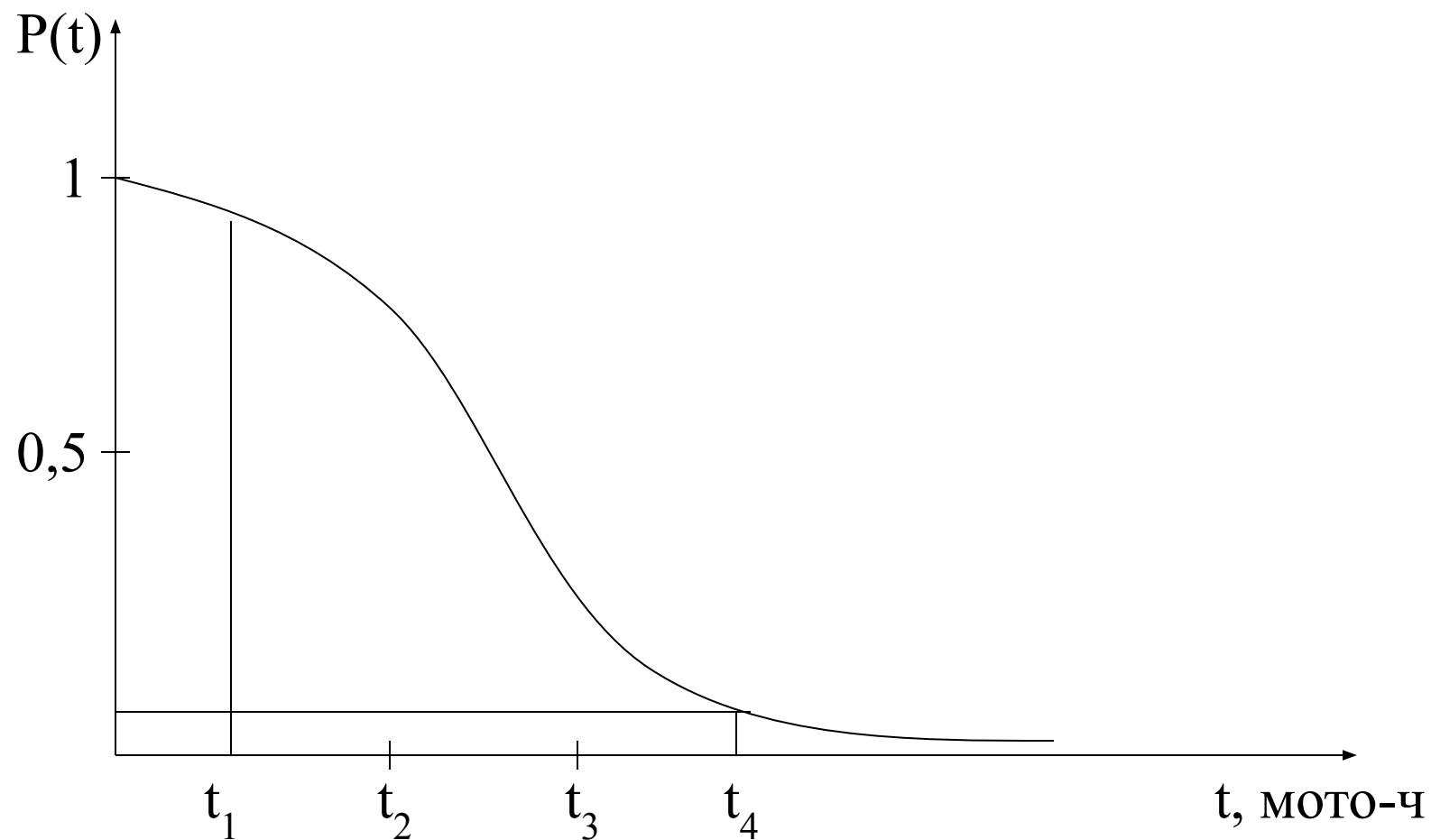


Рис.4 Функция вероятности безотказной работы в зависимости от наработки объекта.

До наработки t_1 вероятность безотказной работы равна ≈ 1

$$P(t_1) = 1 (100\%),$$

$$P(t_4) = 0.1 (10\%)$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ представляет собой безусловную вероятность того, что в интервале от 0 до t не наступит отказ, т.е. вероятность того, что отказ наступит в интервале от “ t ” до “ ∞ ” :

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

[1]

По статистическим данным вероятность безотказной работы об отказах оценивается выражением:

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0} \quad [2]$$

где $\hat{P}(t)$ - статистическая оценка вероятности безотказной работы;

N_0 - число объектов в начале испытания;

$n(t)$ - число отказных объектов за время “ t ”.

На практике иногда более удобной характеристикой может стать вероятность отказа.

1.3.1.2. **Вероятность отказа** – это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки возникает хотя бы один отказ.

Изменяется от “ 0 “ до “ 1 “ , при $t=0$ $Q(t)=0$

$$Q(t)=1-P(t)$$

[3]

Т.е. $Q(t)$ обратно пропорционально $P(t)$

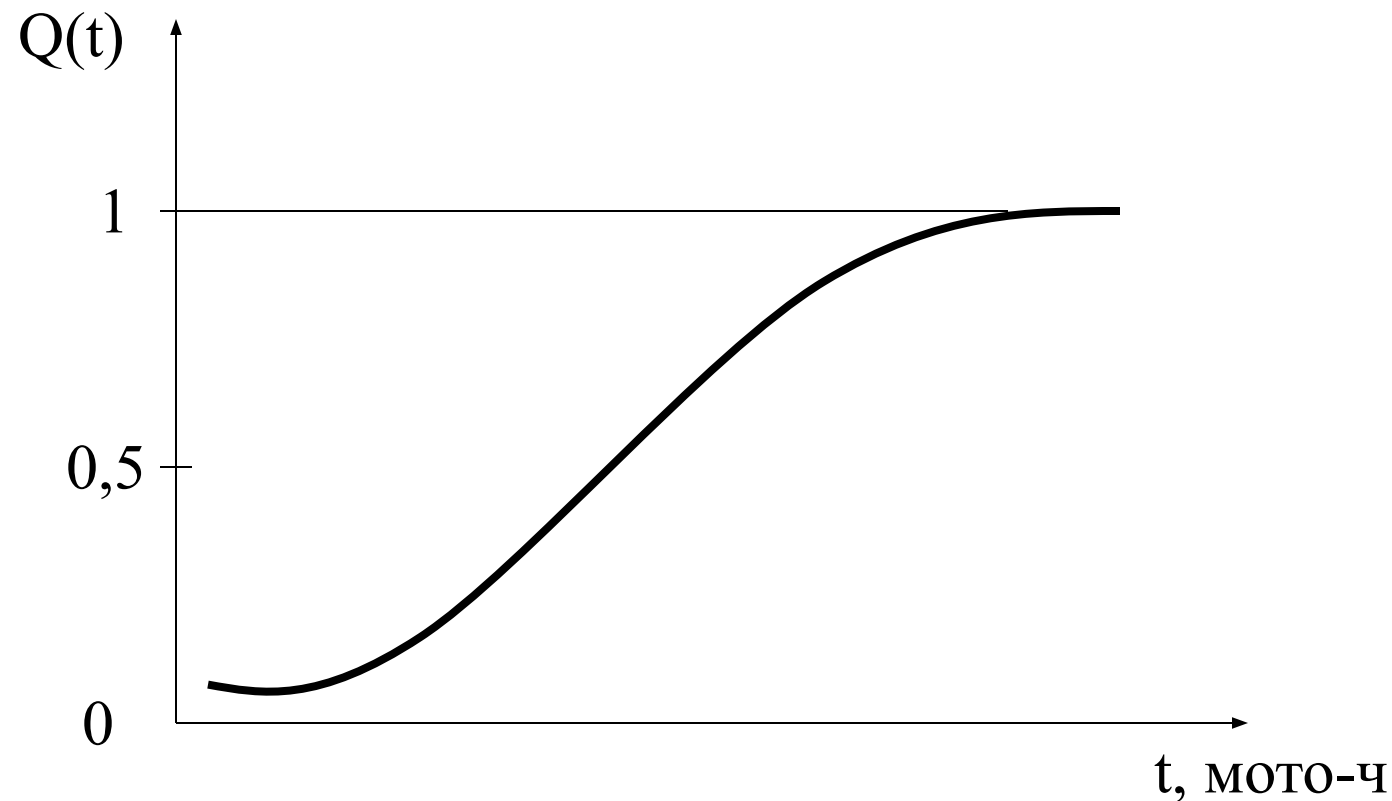


Рис. 5 Функция вероятности отказа в зависимости от наработки

Для статистического определения:

$$Q(t) = 1 - \hat{P}(t) = 1 - \frac{N_o - n(t)}{N_o} = \frac{n(t)}{N_o} \quad [4]$$

где: $n(t)$ – число отказавших объектов за время;

N_o – число объектов в начале испытания.

1.3.1.3. Средняя наработка до отказа — математическое ожидание (среднее значение) наработки до первого отказа.

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad [5]$$

Или

$$T_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad [6]$$

где: t_i — наработка i -го объекта до отказа;
 n — число объектов в начале испытания.

1.3.1.4. **Интенсивность отказов** – условная плотность вероятности возникновения невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возникал.

Физический смысл плотности вероятности отказа – это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени.

$$\lambda = \frac{f(t)}{P(T)}$$

[7]

Интенсивность отказа может определяться по приближенной статистической формуле как отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, работоспособных в данный момент времени:

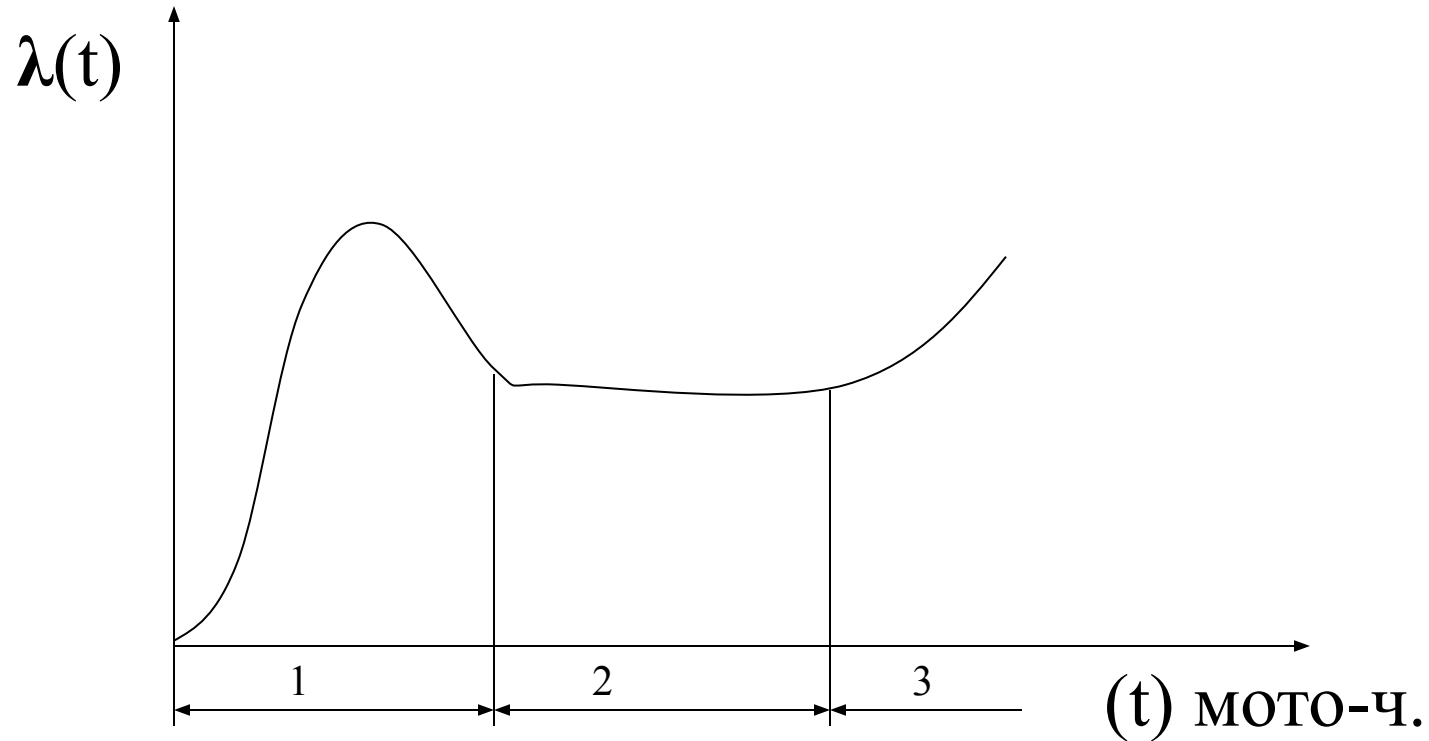


Рис. 6. Зависимость интенсивности отказов от времени

1.3.1.5. **Наработка на отказ** представляет собой среднее значение наработки восстанавливаемых объектов между отказами и показывает, какая наработка в среднем приходится на один отказ (в часах, км. пробега и т.д.).

$$T = \frac{t_2 - t_1}{H(t_2) - H(t_1)} \quad [8]$$

где: $H(t_2)$, $H(t_1)$ — количество отказов на момент времени t_1 и t_2

1.3.1.6. **Параметр потока отказов** — плотность вероятности возникновения отказов восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени или наработки.

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt} \quad \text{- точная формула.} \quad [9]$$

Приближенная формула (для практических расчетов):

$$\omega(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t)}{N\Delta t} = \frac{m_{cp}(t + \Delta t) - m_{cp}(t)}{\Delta t} \quad [10]$$

где: N – число (ремонтируемых) восстанавливаемых объектов;

m_{cp} – среднее число отказов;

Δt - малый интервал наработки от t_1 до t_2 .

$$m_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t)}{N} \quad [11]$$

1.3.2. Единичные показатели долговечности.

Долговечность количественно оценивается с помощью двух групп показателей:

- 1) Ресурса как показателя, связанного с наработкой объекта.
- 2) Срока службы.

Средний ресурс (срок службы) – математическое ожидание ресурса (срока службы).

Назначенный ресурс – суммарная наработка объекта, по достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Этот ресурс чаще всего назначают из соображений безопасности или экономичности.

Пример: Для авиационных двигателей с целью обеспечения безопасности полетов. После отработки назначенного ресурса авиационные двигатели снимают с самолетов и могут использовать их в наземных условиях (например: для защиты садов от заморозков и т.д.).

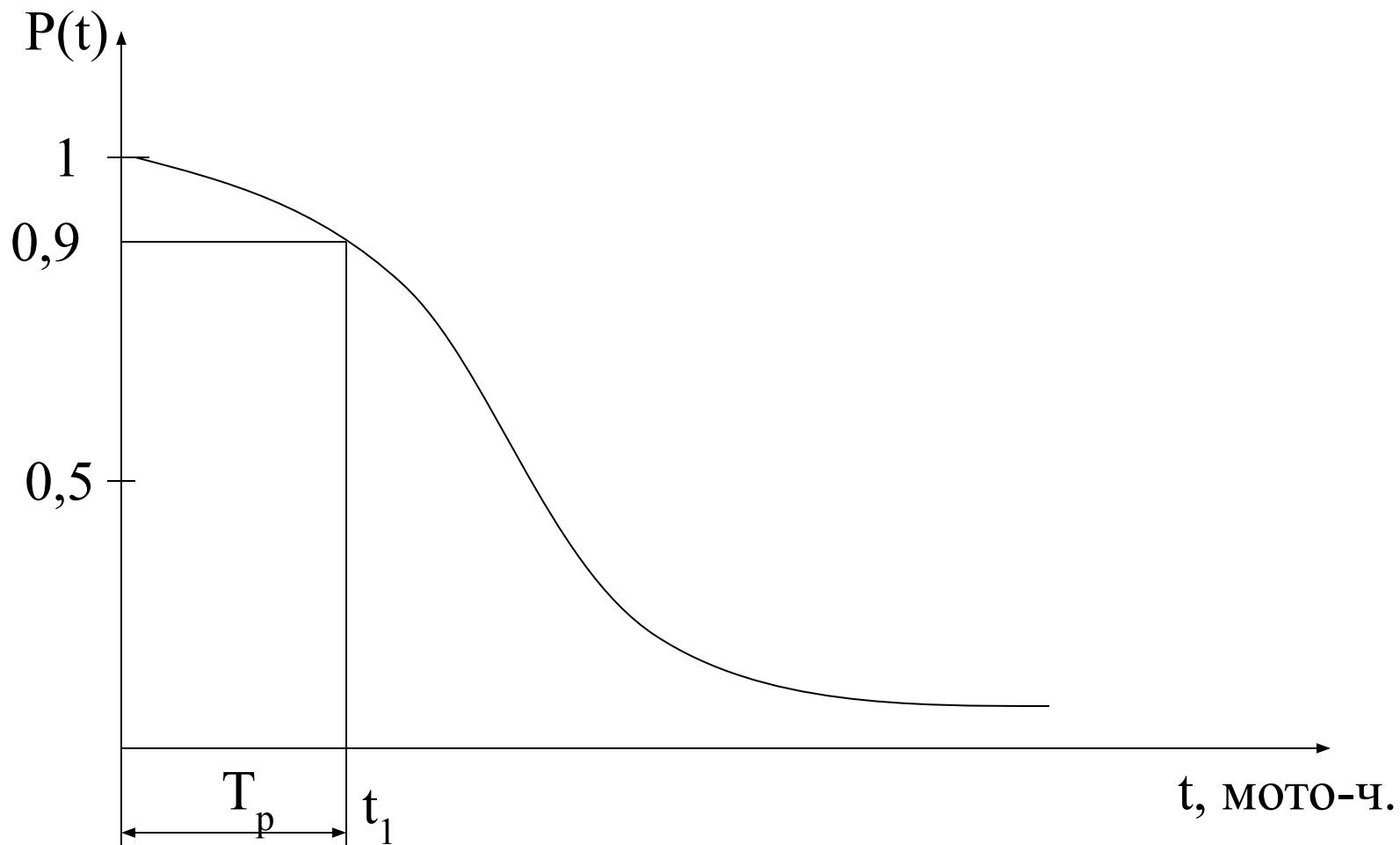
Средний ресурс (срок службы) до ремонта — средний ресурс (срок службы) от начала эксплуатации объекта до его первого ремонта.

Средний ресурс (срок службы) между ремонтами — средний ресурс (срок службы) между смежными ремонтами объекта.

Средний ресурс (срок службы) до списания — средний ресурс (срок службы) объекта от начала эксплуатации до его списания, обусловленного предельным состоянием.

Гамма-процентный ресурс — наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Гамма-процентный ресурс имеет большое практическое значение, так как в результате неизбежного рассеивания долговечности объекта при изменяющихся нагрузках и переменных условиях эксплуатации их долговечность — величина статистическая. Определяется она экспериментально по данным о долговечности большой группы объектов.



На рисунке 90% ресурс соответствует t_1 .

Если ресурс изделий имеет распределение с плотностью вероятности $f(t)$, то гамма-процентный ресурс t_γ находят из уравнения.

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}$$

Гамма-процентный ресурс как оценочный показатель вечности позволяет значительно сократить время испытаний оборудования или их агрегатов, так как испытания ведут до исчерпания ресурса у сравнительно небольшого количества (10...20%) машин. При этом величина гамма-процентного ресурса будет соответственно равна $t_{\gamma 1}=90\%$ и $t_{\gamma 2}=80\%$.

На основании гамма-процентного ресурса оценивают качество новых и отремонтированных объектов и их агрегатов.

Средне квадратическое отношение найдём так:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{t}_{\text{cp}})^2} = \sqrt{\frac{1}{12} (1530^2 + 1030^2 + 830^2 + 530^2 + 330^2 + 230^2 + 30^2 + 270^2 + 570^2 + 870^2 + 970^2 + 1470^2)} \approx 860 \text{ мото - ч.}$$

Коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma}{\hat{t}_{\text{cp}}} = \frac{860}{4530} \approx 0,19$$

Далее выбираем необходимый закон распределения, в данном случае нормальный закон распределения Гаусса т.к. $\nu < 0.33$.

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

1.3.3. Единичные показатели сохраняемости.

Средний срок сохраняемости, т.е. математическое ожидание срока сохраняемости.

Гамма – процентный срок сохраняемости, т.е. срок сохраняемости, который будет достигнут объектом с заданной вероятностью γ процентов.

1.3.4. Единичные показатели ремонтпригодности.

1.3.4.1. Среднее время восстановления, т.е.

математическое ожидание времени восстановления работоспособности. При наличии статистических данных среднее время восстановления определяется так:

$$\hat{T}_b = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{bi} \quad [12]$$

где m - число обнаруженных и устранённых отказов объектов,

t_{bi} - время восстановления отказа.

В качестве характеристики рассеивания времени восстановления используется $\hat{S}$ - дисперсия,

σ - ср. кв. отклонение.

1.3.4.2. Средние удельные затраты времени на ТО и ремонт

$$\hat{B}_{cp} = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{B_{tyi} + B_{эoi} + B_{pi}}{T_{др(мр)}} \left[\frac{\text{ч.}}{\text{ед.нараб.}} \right] \quad [13]$$

1.3.4.3 Средние удельные затраты труда на ТО и ремонт.

$$\bar{P}_{pn} = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{P_{ty} + P_{эoi} + P_{pi}}{T_{др(мр)}} \quad (\text{чел.*ч})/\text{ед.нар.} \quad [14]$$

1.3.4.4. Средние удельные затраты денежных средств.

$$\bar{D}_{РП} = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{D_{ТУI} + D_{ЭОI} + D_{PI}}{T_{ДР(МР)}} \text{ руб./ед.нар-ки} \quad [15]$$

где: B_1 ; P_1 ; D_1 – суммарные затраты соответственно времени (ч), труда (чел. * ч) и денег (руб.) на проведение технических уходов (ТУ) устранение эксплуатационных отказов (ЭО), и ремонт (Р) за доремонтный или межремонтный период работы i -й машины;

N - количество наблюдаемых машин (шт.).

1.4. Комплексные показатели надежности.

Показатели обеспечения и оценки надежности, предусмотренные ГОСТ, следующие.

1.4.1 Коэффициент готовности K_r показывает вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых использование объекта по назначению не предусматривается.

Коэффициент статистически определяется:

$$K_{\Gamma} = \frac{\bar{T}_0}{(\bar{T}_0 + T_B)} \quad [16]$$

где $\bar{T}_0$ - средняя наработка на отказ;

$\bar{T}_B$ - среднее время восстановления;

K_{Γ} - показывает долю, которую составляет время работы от суммарного времени, расходуемого на работу и восстановление, т.е. характеризует одновременно два различных свойства объекта: его безотказность и ремонтпригодность, а поэтому является комплексным $K_{\Gamma}=0,7...0,9$

1.4.2. Коэффициент технического использования.

$K_{т.и.}$ – отношение математического ожидания времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени пребывания объекта в работоспособном состоянии, времени простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и времени ремонта за тот же период эксплуатации.

Статистически определяется так:

$$\hat{K}_{\text{т.и.}} = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{T_{\text{экспл}}} \quad [17]$$

где ε_i – продолжительность работоспособного состояния;
 $T_{\text{экспл}}$ – продолжительность эксплуатации, состоящей
из интервалов времени работы, технического
обслуживания и ремонта.

Если $T_{\text{экспл}}$ различно для каждого объекта, то $K_{\text{т.и.}}$ считается так:

$$K_{\text{т.и.}} = \frac{t_{\text{сум}}}{t_{\text{сум}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{вос}} + t_{\text{то}}} \quad [18]$$

где $t_{\text{сум}}$ – суммарная наработка всех объектов пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации;

$t_{\text{рем}}, t_{\text{то}}, t_{\text{вос}}$ суммарное время простоев из-за планового и внепланового ремонта, технического обслуживания и восстановления за тот же период эксплуатации.

Если разделить числитель и знаменатель на m ,
число общих отказов за рассматриваемый период, то

$$K_{\text{т.и.}} = \frac{T}{T + T_{\text{в}} + T_{\text{н}}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{в}}}{T} + \frac{T_{\text{н}}}{T}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{г}}} + \frac{T_{\text{н}}}{T}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{г}}} + K_{\text{н}}} \quad [19]$$

где $T_{\text{н}}$ – среднее время, затрачиваемое при техническом обслуживании (профилактике) на один отказ;

Коэффициент профилактики:

$$K_{\text{н}} = \frac{T_{\text{н}}}{T} = \frac{t_{\text{обсл}}}{t_{\text{сум}}} \quad [20]$$

1.4.3 Коэффициент оперативной готовности

$K_{o.g.}$ – вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течении заданного интервала времени.

Под режимом ожидания понимается нахождение объекта при полной или облегченной нагрузке без выполнения основных функций.

$$\boxed{K_{o.g.} = K_{г} * P(t_p)} \quad [21]$$

где $P(t_p)$ – вероятность безотказной работы в течение времени (t_p);

$K_{o.g.}$ – может характеризовать надежность техники

1.4.4 Коэффициент сохранения эффективности –

отношение значения показателя эффективности за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода эксплуатации не возникают.

$K_{с.э.}$ – характеризует степень влияния отказов элементов объекта на эффективность его применения по назначению.

Показатель качества, характеризующий эффективность выполнения объектом его функций, в зависимости от продолжительности его эксплуатации.

Основные задачи, решаемые инженером-теплоэнергетиком с применением знаний надежности оборудования.

1. Определение и планирование годовых наработок.
2. Доремонтных и межремонтных ресурсов машин.
3. Определение количества и стоимости при устранение эксплуатационных отказов.
4. Определение календарных сроков постановки оборудования в ремонт.
5. Прогнозирование полных и остаточных ресурсов оборудования и их деталей и сопряжений.

Особое значение надежность играет в настоящее время, т.к. своевременное прогнозирование работоспособности техники влияет наиболее существенно, в связи с тем, что ее количество на предприятиях сократилось, а внезапный выход из строя машины ведет к непоправимым последствиям, т.к. заменить другой быстро ее нельзя.

II. Физические основы

надежности.

2.1 Факторы, снижающие надежность машин.

Со временем машины улучшаются. В современных машинах причина различных изменений (повреждений и разрушений) деталей - это воздействие на них различных видов энергии (механической, тепловой, химической, электромагнитной) в виде различных полей и сред тех или иных параметров.

Детали применяемого оборудования разрушаются под действием :

внешние факторы

а) Физических полей P, U и T несущих нагрузок и скоростей.

б) Химических полей, кислотной и щелочной сред.

в) Совместное воздействие химических и физических полей.

Разрушенный объект — утративший свои функциональные свойства.

внутренние факторы разрушений.

а) Усталость материала.

б) Объемная газовая коррозия.

Эти причины возникают в результате естественного старения. Они приводят к короблению деталей, образованию трещин, изменению макро и микроразмеров или полному разрушению.

2. Трение и смазка деталей оборудования.

При взаимодействии двух тел, возникает трение. Практически все виды трения предусматривают наличие слоя, который является смазкой.

Смазку применяют для снижения трения. Применяют как жидкие так густые смазочные материалы.

Изнашивание деталей машин зависит от условий их эксплуатации, вида и характера трения.

Виды трения. Принято различать трение покоя, движения, скольжения, качения и трение качения с проскальзыванием.

Трение скольжения характеризуется тем, что скорости соприкасающихся деталей в точках касания различных по значению и направлению либо только по значению или только по направлению.

Трение качения характеризуется условиями, когда скорости соприкасающихся деталей в точках касания одинаковы по значению и направлению.

Для определения силы трения качения Кулон предложил формулу :

$$T = \frac{K}{R} * P \quad [22]$$

где: K — коэффициент трения качения, м;

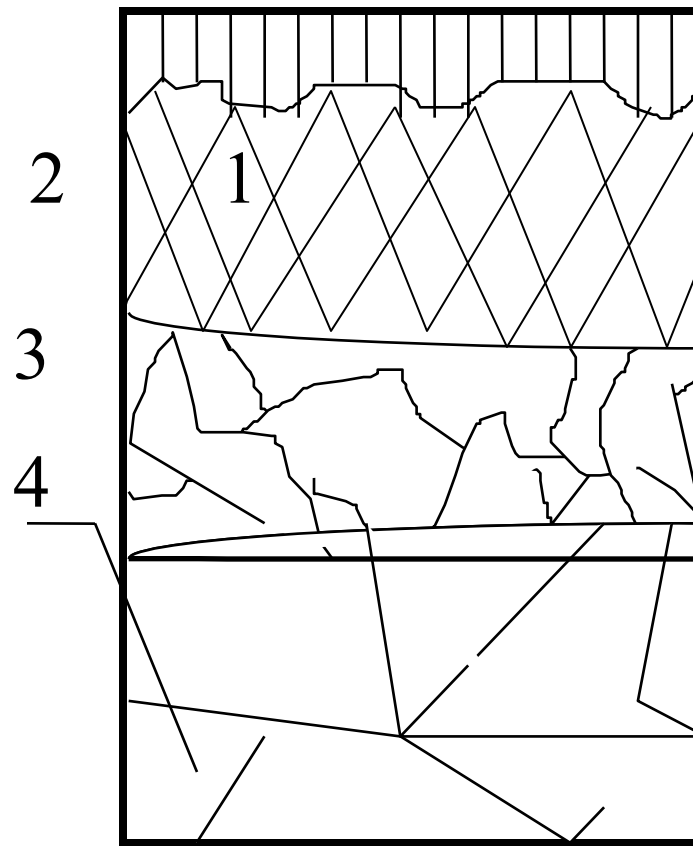
R — радиус цилиндра, м;

P — сила, с которой цилиндр давит на плоскость, н.

Сила трения качения обуславливается упругими свойствами материала, в зависимости от которых изменяется коэффициент K , и от радиуса цилиндра. Формула справедлива только для определенных условий работы детали.

По характеру протекания процесса различают сухое трение, граничное и жидкостное.

Сухое трение, т.е. трение без смазки поверхностей почти не встречается в природе, т.к. при воздействии среды, в которой работает сопряжение, на поверхности металлических деталей образуются адсорбированные слои, т.е. слой масла, воды и газов.



- 1.- адсорбирующий слой масла, воды и газов.
- 2.- слой пониженной твердости.
- 3.- упрочненный слой повышенной твердости.
- 4.- основной не деформируемый металл.

Исключения составляют сопряжения, работающие без смазки при отсутствии влаги и периодическом попадании сухих абразивных частиц.

Граничное трение — такое, когда на трущейся поверхности находится слой жидкости, имеющий особые свойства, отличающиеся от объемных свойств жидкости при жидкостном трении.

Жидкостное трение — такое, когда трущиеся поверхности деталей разделены слоем жидкости с объемными свойствами жидкостей.

В процессе работы сопряжения общая сила трения будет суммой сил, возникающих в результате работы различных частей поверхности в различных режимах трения. Отсюда общая площадь, участвующая в трении,

$$S = S_c + S_{гр} + S_{ж} \quad [23]$$

где: S_c – площадь поверхности, работающая в режиме сухого трения.;

$S_{гр}$ – площадь поверхности, работающая в режиме граничного трения;

$S_{ж}$ – площадь поверхности, работающая в режиме жидкостного трения.

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

Теории трения:

а) Механическая. Впервые закон трения был сформулирован французским физиком Амонтоном в 1699 году и выражен равенством:

$$F = \mu * N$$

[24]

где: F - сила трения, Н;

μ - коэффициент трения;

N - нормальная нагрузка, Н.

Затем, в 1785 году французский физик Ш.О.Кулон ввел в это равенство постоянное слагаемое, учитывающее адгезионное схватывание поверхностей

$$F = A + \mu * N$$

[25]

где: A - постоянное слагаемое (выводится экспериментально).

Английский физик Ф.Р. Боунден предложил для силы трения выражение:

$$F = F_c + F_n = \theta * S_{\phi} + \tau * S \quad [26]$$

где: F_c – сопротивление срезу металлических соединений, в Н;

F_n – сопротивление пластическому вытеснению более твердым металлом менее твердым, в Н;

τ – удельное сопротивление вытеснению металла;

θ – касательное напряжение срезу, Па;

S_{ϕ} – фактическая плотность контакта, м²;

S - поперечное сечение дорожки трения, м².

б) Молекулярная. Русский физик Б.В.Дерягин (1941 гг.) развил молекулярную теорию трения и предложил закон трения в таком виде:

$$F = \mu_1 * S * (P_0 + P)$$

[27]

где: F – сила трения, Н;

S – площадь истинного контакта, м^2 ;

μ_1 – коэффициент трения;

P_0 – удельная сила молекулярного взаимодействия, Па

$P = \frac{N}{S}$ удельное давление, Па.

Причина возникновения трения — атомные взаимодействия поверхностей, образующих сопряжения. При этом под действием внешнего давления электронные оболочки атомов настолько сближаются, что развиваются отталкивающие силы. Сила, которая преодолевает возникающее отталкивающее атомные силы, и становится силой трения.

в) Молекулярно-механическая. Советский физик И.В. Крагельский (1946 год) разработал молекулярно-механическую теорию трения

$$F = \tau_{\text{мех}} + \tau_{\text{мол}} = \alpha * S_{\text{ф}} + \beta * N \quad [28]$$

где: $\tau_{\text{мех}}$ — составляющая силы трения механического происхождения, Н;

$\tau_{\text{мол}}$ — составляющая силы трения молекулярного происхождения, Н;

$S_{\text{ф}}$ — фактическая площадь контакта, м²;

N - давление, Па;

α и β - величины, определяемые из опыта.

г) Гидродинамическая теория трения.

Учеными М.П. Петровым (1883 г.), Н.Е. Жуковским (1886-1889 гг.), С.А. Чаплыгиным (1894-1896 гг.), О. Рейнольдсом (1886 г.), А. Зоммерфельдом (1931 г.), Е. М. Гутьяром и другими разработаны основы гидродинамической теории трения.

Петров предложил формулу для определения силы трения:

$$F = \frac{\eta * V * S}{h} \quad [29]$$

где: F — сила вязкого сдвига в нагруженной части подшипника, Н;

η — абсолютная вязкость масла, Па* с;

V — относительная скорость перемещения трущихся поверхностей, м/с;

S — площадь поверхностей, скользящих одна относительно другой, м²;

h — толщина масляного слоя, м.

Для определения наивыгоднейшего зазора, при котором обеспечивается оптимальная толщина масляного слоя, профессор В.И. Казанцев (1940 г.) основываясь на гидродинамическую теорию трения, предложил формулу:

$$S_{\text{наив}} = 0,467 * d * \sqrt{\frac{n * \eta}{k * c}} \quad [30]$$

где: d – диаметр вала, м;

n – частота вращения вала, об/с;

η – абсолютная вязкость масла, Па/с;

k – удельное давление, Па;

c – поправка на удельную длину подшипника (по Гюмбелю)

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

Максимально допустимый зазор можно определить по формуле:

$$S_{\max} = \frac{S_{\text{наив}}^2}{4\delta} \quad [31]$$

где: δ — величина, зависящая от неровности поверхности вала и подшипника и размера абразивных частиц, находящихся между трущимися поверхностями.

д.) Классификация изнашиваний

Процессы изнашивания деталей оборудования сопровождаются сложными физико-химическими явлениями и многообразием, влияющих на них факторов.

В соответствии с ГОСТ 16429-70 изнашивания разделяют на следующие виды:

Молекулярно-механическое изнашивание — такое, при котором механическое воздействие сопровождается одновременно воздействием молекулярных или атомных сил на поверхности детали.

Механическое изнашивание- такое при котором вследствие механического воздействия изменяются форма и объем трущихся частей без существенных физических и химических изменений.

Коррозионно-механическое — характеризуется механическим изнашиванием в сопровождении с существенными химическими изменениями поверхностей, т.е. при трении материал вступает в химическое взаимодействие со средой.

Абразивное изнашивание — такое, при котором механическое изнашивание материала происходит в результате режущего и царапающего действия твердых тел или частиц.

Абразивное изнашивание отличается от процесса резания металлов в основном некоторыми специфическими особенностями: геометрическими размерами абразивных частиц, малыми сечениями срезаемой стружки и т.п.

Различают гидроабразивное и газоабразивное изнашивание, т.е. изнашивание в результате воздействия твердых тел или частиц, увлекаемых потоком жидкости или газа.

Усталостное изнашивание — такое, при котором изменение поверхности трения или отдельных ее участков происходит в результате повторного деформирования микрообъема материала, приводящего к возникновению трещин и отделению частиц.

Основные показатели усталостного изнашивания — глубина деформируемого слоя на поверхностях трения (глубина усталостных трещин и впадин) и интенсивность пластической деформации металла.

Усталостное изнашивание зависит от удельных давлений сопряжений, частоты циклов нагрузки, размеров, формы и свойств металлодеталей.

Поверхностные слои разрушаются из-за усталости металла.

Первые трещины возникают под $\angle = 30^\circ$.

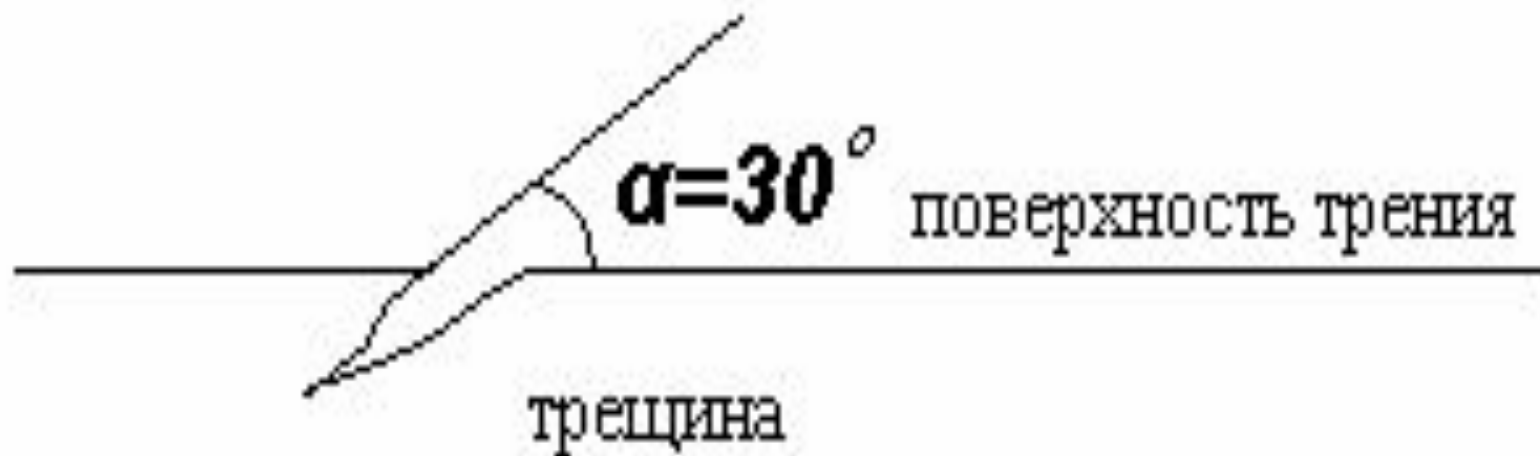


Рис. 7 Усталостное изнашивание

Увеличения трещин происходит вследствие концентрации напряжений из-за коррозии металла и расклинивающего действия масла.

Окислительное изнашивание-процесс, при котором в результате взаимодействия материала с кислородом воздуха на поверхности трения образуются пленки окислов.



Рис. 8 Окислительное изнашивание

В первой фазе (образование твердых растворов) трущиеся поверхности изнашиваются вследствие постоянного образования и уноса поверхностных пленок. Во второй фазе (образование химических соединений) трущиеся поверхности изнашиваются вследствие периодического образования и выкрашивания хрупкого слоя.

Эрозионное изнашивание - такое, при котором износ поверхности детали происходит в результате воздействия потока жидкости или газа.

Кавитационное изнашивание - характеризуется повреждением поверхности детали при относительном ее движении в жидкости в условиях кавитации. При этом пузырьки газа разрываются вблизи поверхности, что создает местное повышение давления или температуры, образуя язвы.



Рис.9 Кавитационное изнашивание

Изнашивание в результате схватывания (при заедании) – глубинное вырывание материала, перенос его с одной поверхности трения на другую и воздействие возникающих неровностей на сопряженную поверхность.

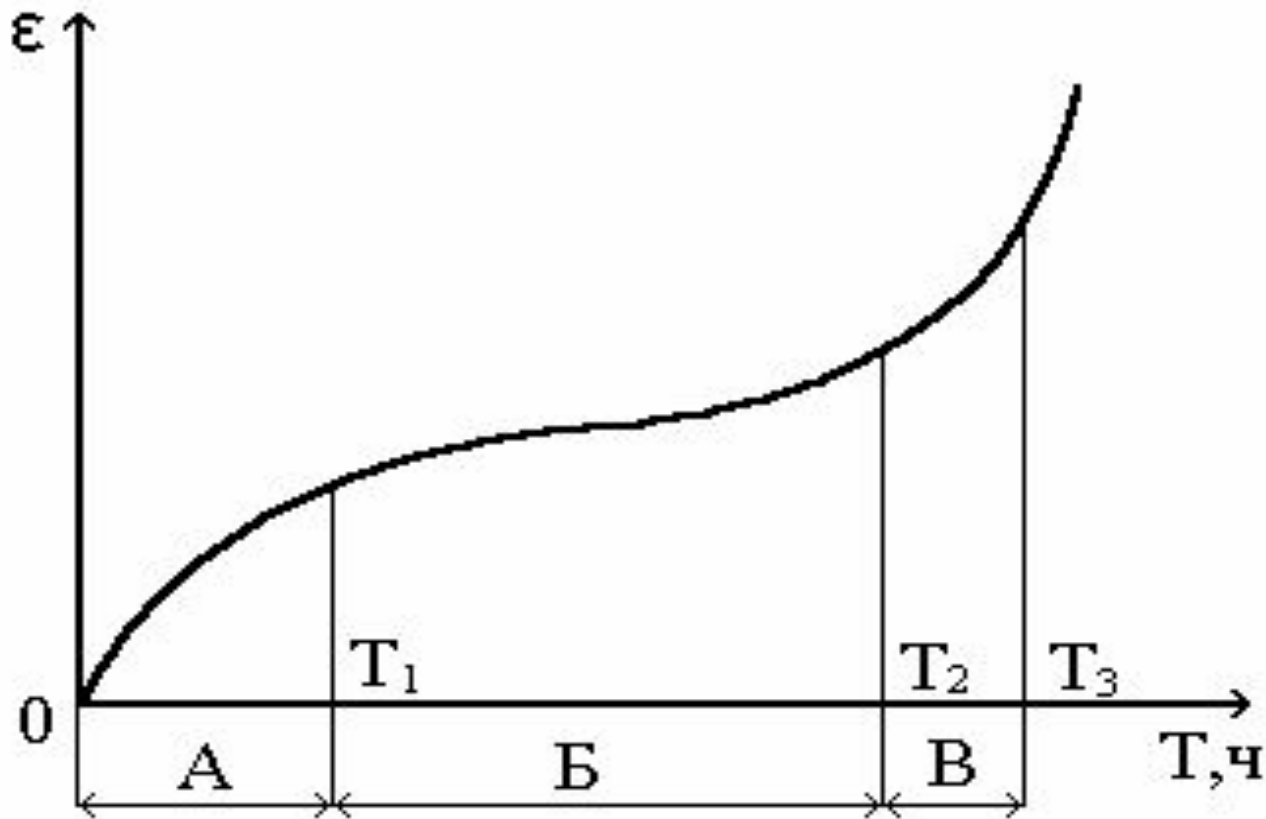
Характеристики и закономерности изнашивания.

Изнашивание - процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала. (мм/ч, мм/км, мм/кг).

Износ - результат процесса изнашивания (мкм, мм)

$$\varepsilon = \int_0^{T_i} f_{\varepsilon} dT \quad [33]$$

где: f_{ε} – функция, характеризующая процесс изнашивания;
 T – время.



A - приработка

B - период нормальной работы

V - период форсированного износа

По Казарцеву: $A+B$ - период естественного изнашивания.

V - период аварийного изнашивания.

Рис. 10 Классическая кривая процесса изнашивания

В период В предельные значения износа, в этот момент времени необходимо провести восстановление детали.

Период А: $f_{\varepsilon_1} = k_1 * T_{0-T_1}^n$ [34]

Период Б: (прямая) $f_{\varepsilon_2} = k_1 * T_1^n + k_2 (T_2 - T_1)$ [35]

Период В: $f_{\varepsilon_3} = k_1 * T_1^n + k_2 (T_2 - T_1) + k_3 (T_3 - T_2)^m$ [36]

Общий износ до ремонта :

$$\varepsilon_3 = k_1 * T_1^n + k_2 (T_2 - T_1) + k_3 (T_3 - T_2)^m \quad [37]$$

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности.

Скорость изнашивания:

$$\underline{A:} \quad U_{\varepsilon_1} = \frac{df_{\varepsilon_1}}{dT} = k_1 * n * T_{T_1}^{n-1} \quad 38$$

$$\underline{Б:} \quad U_{\varepsilon_2} = \frac{df_{\varepsilon_2}}{dT} = k_2 \quad 39$$

$$\underline{В:} \quad U_{\varepsilon_2} = \frac{df_{\varepsilon_3}}{dT} = k_3 * m * (T_3 - T_2)^{m-1} \quad 40$$

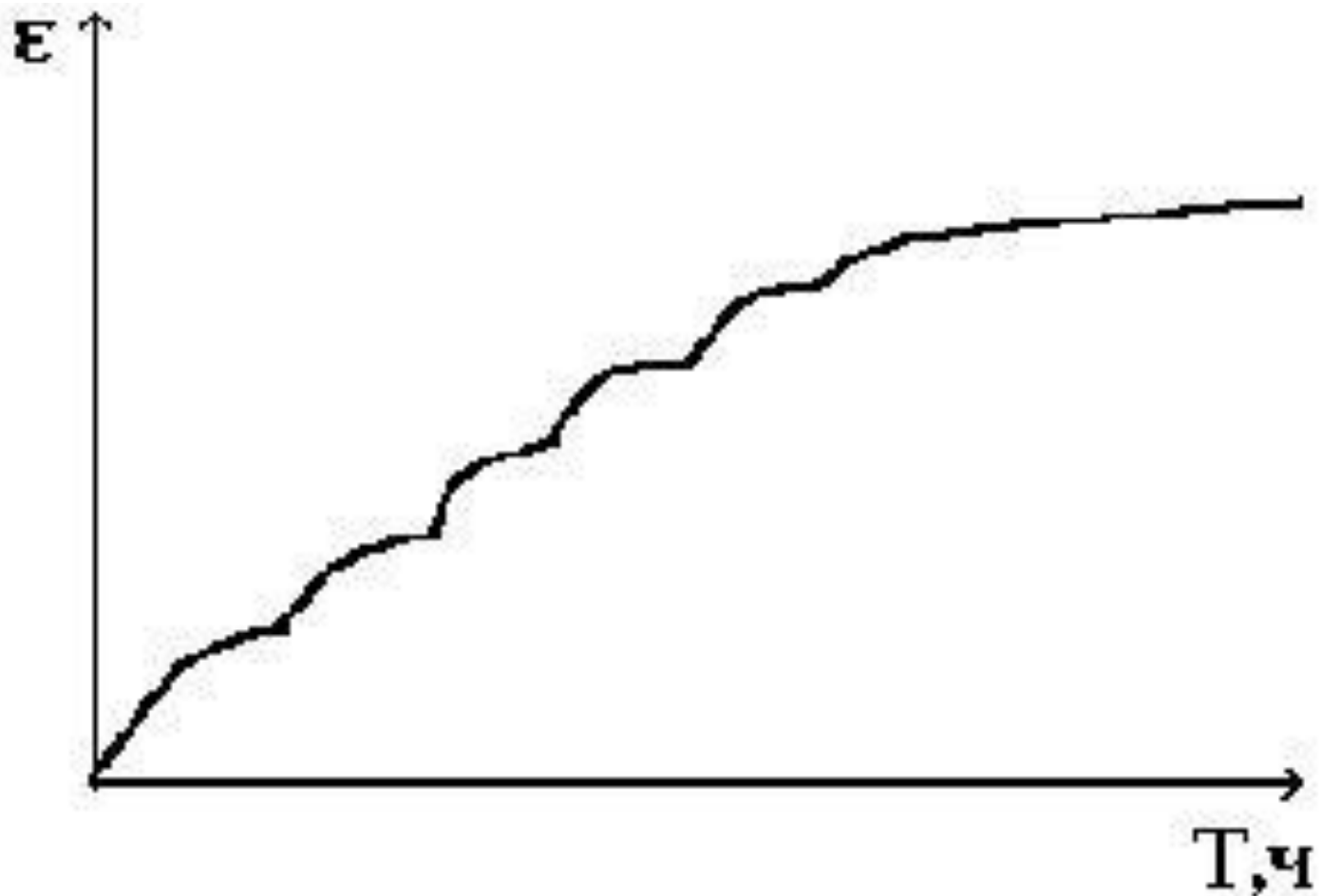


Рис. 11 Действительная кривая скорости изнашивания (ступенчатая)

Характеристики механо-физико-химического изнашивания.

Износ металлов зависит от большого числа факторов, воздействующих с разной силой и в разных направлениях не только на ход изнашивания, но и на характер и степень влияния каждого фактора.

Механо-физико-химическое изнашивание имеет две формы:

1. Характеризуется образованием на поверхности трения твердых растворов кислорода, водорода и азота и тонких прослоек их соединений с металлом.

2. Характеризуется образованием химических соединений металлов с активными элементами химического поля: кислородом, водородом, азотом и др.

Фазы процесса:

1. Непосредственный механический контакт трущихся поверхностей или через среду и образование равномерного слоя деформированного активированного металла.

2. Химическая реакция активированного слоя металла с активными элементами (компонентами) среды и как результат образования ослабленных вторичных структур, толщина которых в зависимости от условий их возникновения находится в пределах 0.01...0.02 мкм.

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

Предельного износа деталь достигнет, если накопит m разрушений пленки вторичных структур.

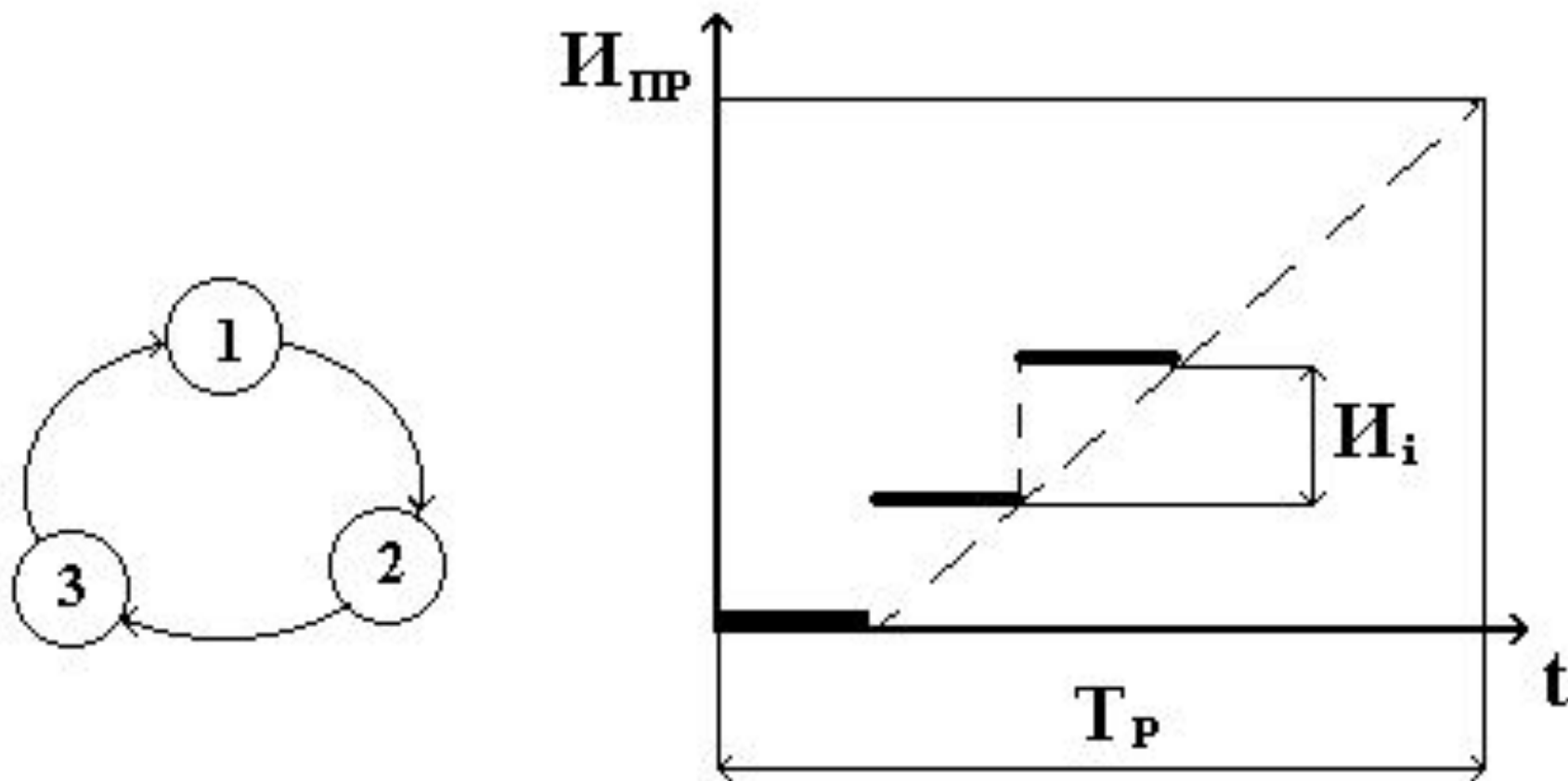


Рис. 12 Схема механо-физико-химического изнашивания

Факторы, влияющие на интенсивность изнашивания.

1. Вид трения.
2. Характер трения.
3. Среда работы сопряжения.
4. Площадь контакта.
5. Характер движения.
6. Вид движения.
7. Характер нагрузки.
8. Величина нагрузки.
9. Скорость перемещения трущихся поверхностей.
10. Температура.

При обработке деталей на поверхности имеются неровности.

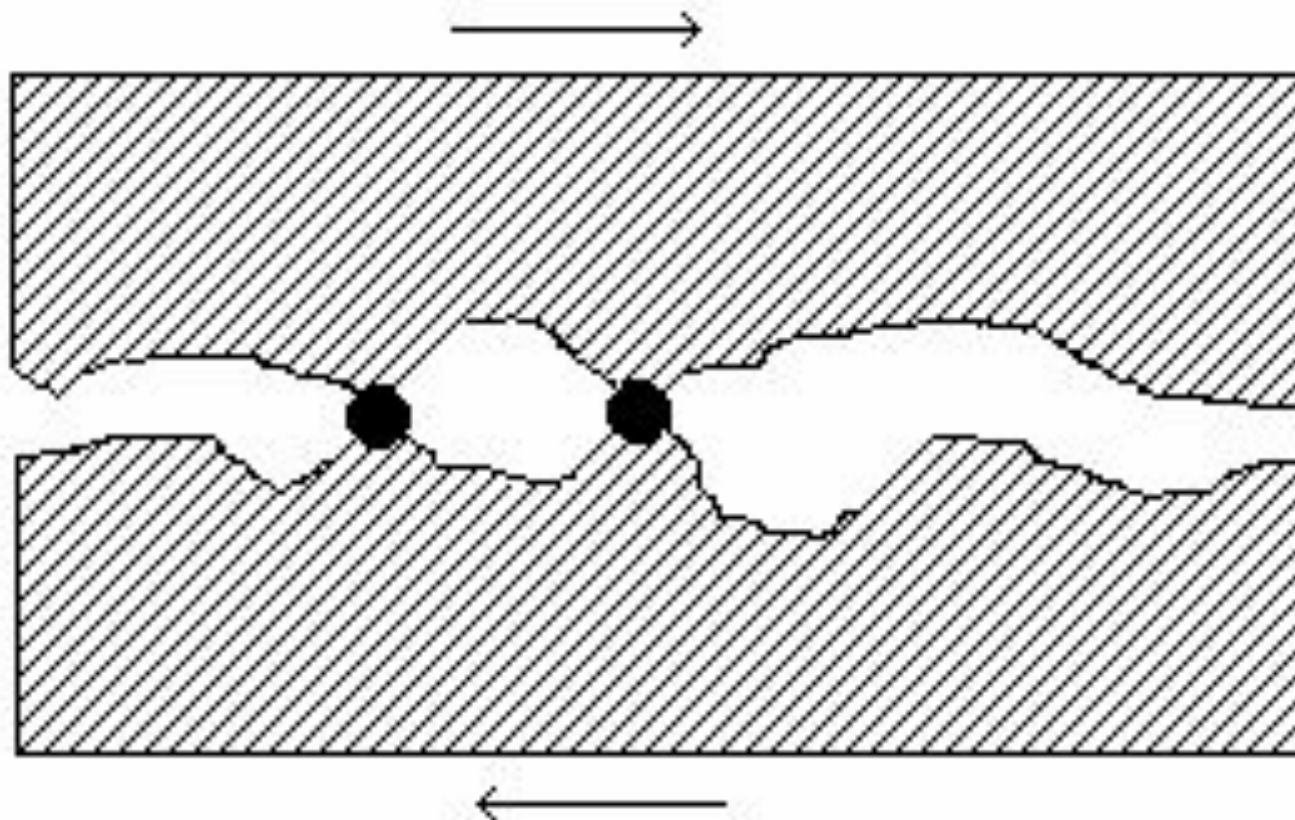


Рис. 13 Процесс изнашивания при попадании абразивных частиц

Приработка: происходит стирание микро неровностей до оптимального значения. Но микро неровности необходимы: для смазки и являются микро холодильниками для выступов. При тщательной обработке неровности маленькие, но на это требуются большие затраты. Обработка должна быть оптимальной.

Выкрашивание: процесс образования ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании.

Царапание: (абразивное изнашивание) - это разрушение поверхностей деталей более твердыми частицами.

При царапании износ прямо пропорционален пути трения.

Абразив заклинивается в более мягком материале и царапает сопрягаемую деталь.

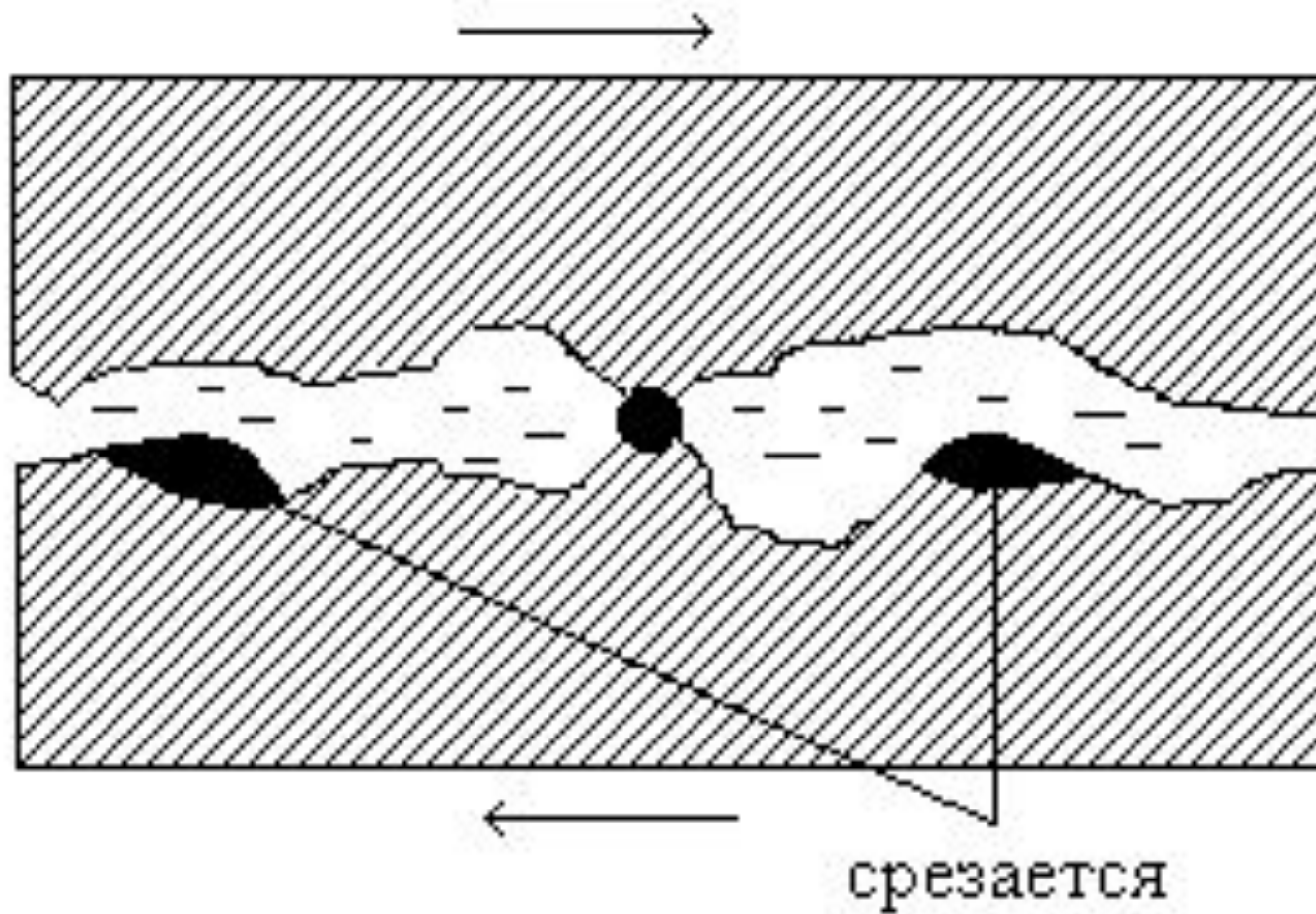


Рис. 15 Абразивное изнашивание (царапание)

Усталостное выкрашивание: это результат многократного перенапряжения поверхности деталей в следствии одновременного действия трения качения и скольжения.

Первоначально появляется трещина, которая под действием масла расклинивается, замыкается и происходит отрыв металла с поверхности.

Этот процесс - результат высоких контактных напряжений.

Факторы изнашивания необходимо иметь в определенных границах, для оптимальной величины износа.

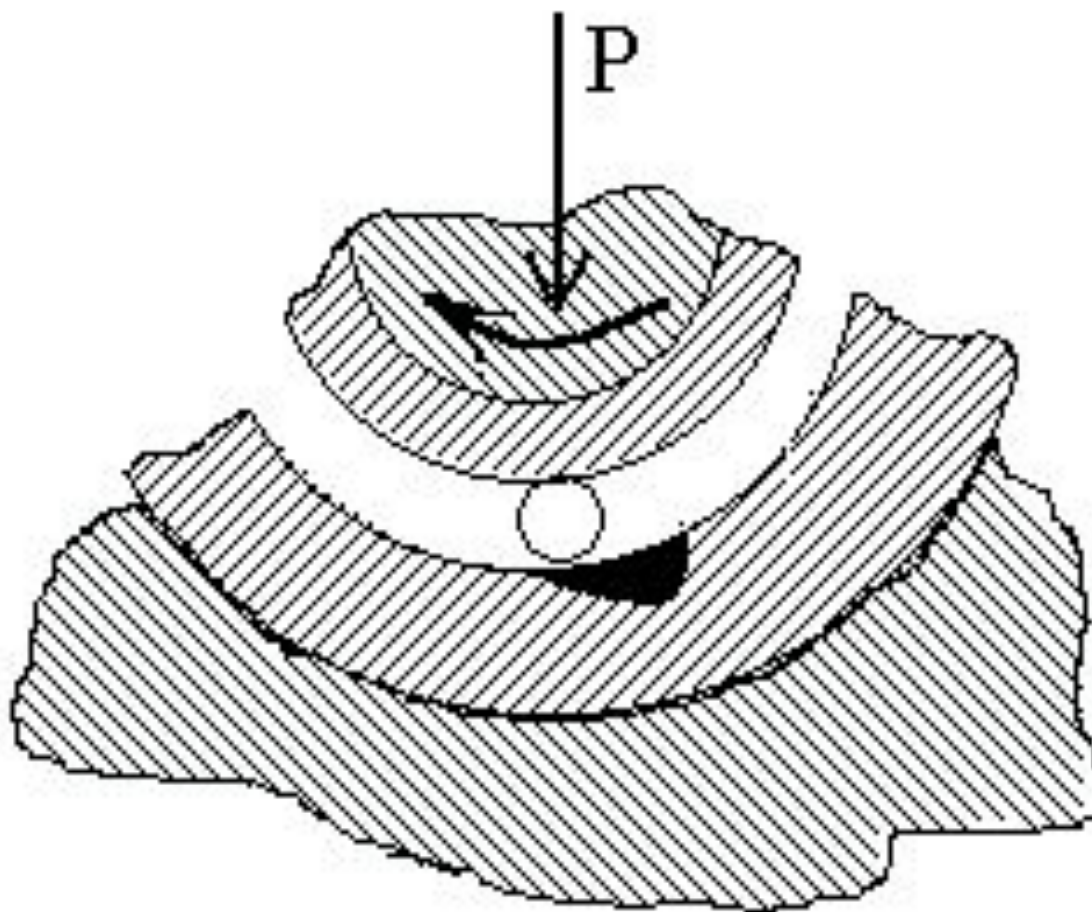


Рис. 16 Усталостное выкрашивание

2.2 Методы и средства изучения износов.

2.2.1 Микрометраж деталей.

Оборудование или узел разбирают и детали замеряют при помощи измерительного инструмента в местах предположительного износа. Фактические размеры записываются в журнал. Подобная операция продлевается многократно. По данным журнала строится кривая износа для каждой детали.

Недостатки: неточность при измерении; увеличивается износ при разборке и сборке; происходит приработка; не выдерживается температура и давление мерительных стержней.

2.2.2. Профилографирование.

Используют профилографы, которыми определяют изменение состояния поверхности и износа на определенных участках детали.

Используется при малом износе.

2.2.3. Взвешивание.

Износ определяют периодическим взвешиванием деталей и сравнением их массы с массой деталей до работы.

Недостатки: не дает возможности выявить изношенные участки и характер их износа.

2.2.4. Определение износа по количеству железа в масле.

Берут пробы масла периодически и определяют количество железа в нем.

Недостаток невозможность конкретно определить, какие детали изнашиваются быстрее.

Преимущество не требуется разборки агрегата.

2.2.5. Определение износа радиоактивными изотопами.

При изготовлении деталей в сплав вводят радиоактивный изотоп или в изготовленной детали вставляют цилиндрики из радиоактивного металла. Счетчиком радиоактивных частиц определяют их количество в пробах масла.

Недостатки: нельзя определить характер износа.

Преимущества: быстро и точно определяется износ конкретной детали.

2.2.6. Определение износа при помощи отпечатков и вырезанных лунок.

На деталях делают углубление алмазными пирамидами или вырезают лунку алмазными резцами. Периодически измеряют размеры диагоналей отпечатков или длину лунки при помощи микроскопа, и определяют износ детали на данном участке.

Преимущества: при частичной разборке узла определяется размер и характер износа деталей.

2.3. Методы повышения износостойкости.

2.3.1. Тщательное и своевременное проведение ТО и ремонтов, соблюдение правил хранения, обкатки новых и отремонтированных машин.

2.3.2. а) Тщательная механическая обработка поверхностей (шлифованием, разворачиванием и тонким точением);

б) Нанесение на поверхность износостойких покрытий (хромирование, наплавка твердых сплавов и т. д.);

в) Упрочнение поверхности цементацией, сплошной и поверхностной закалкой;

г) Тщательной приработкой восстановленных деталей.

2.3.3. Уменьшение процессов смятия.

Для этого проводя механическую обработку, повышают твердость наплавкой твердыми сплавами, закалкой, цементацией.

2.3.4. При абразивном износе покрывают детали хромом (детали топливной аппаратуры), наплавка твердых сплавов, закалка током высокой частоты (ТВЧ).

2.3.5. Тщательный подбор зазора в сопряжении.

2.3.6. Повышение усталостной прочности

2.4 Другие виды повреждений деталей.

2.4.1 Коррозия — это разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней средой.

а) **Химическая** — возникает при действии на металлы кислот, ядохимикатов, газов и других веществ;

б) **Электро-химическая** — взаимодействие разных металлов и их сплавов во влажной среде.

2.4.2 Электроэрозионное разрушение деталей.

Подвержены детали, работающие в условиях искровых разрядов.

Электроны, вылетающие с катода, выбивают с поверхности анода частицы металла.

2.4.3. Образование нагара.

Детали, подверженные действию сильно нагретых газов и продуктов сгорания топлива и масла, образуются твердые отложения, толщина которых зависит от характера разложения топлива и смазочных материалов при высоких температурах.

2.4.4. Образование накипи.

Представляет собой отложение малорастворимых в воде солей и механических примесей, находящихся в воде. Теплопроводность накипи в 50-100 раз ниже металла.

Соли: CaCO_3 , MgCO_3 , CaSO_4 , MgSO_4 , CaSiO_3 и т.п.

2.4.5. Пластические деформации.

При воздействии на деталь силовых, температурных и других факторов, вызывающих в отдельных участках деталей напряжения, превышающие предел упругости, происходит пластическое деформирование отдельных участков или всей детали.

Детали изгибаются, скручиваются, искривляются.

2.4.6. Потеря упругости.

При потери упругости детали становятся непригодными, сохраняя форму и размеры.

2.4.7. Потеря намагниченности.

Под действием электрических полей, встряски и нагрева детали, приборы и т.д. теряют свои магнитные свойства при сохранении формы и размеров.

2.5. Изнашивание и повреждения деталей машин как случайные процессы.

Величина изнашивания деталей и сопряжений являются случайными величинами в силу ряда причин:

- 1) разнообразие и непостоянство условий эксплуатации;
- 2) нестабильность качества новых и отремонтированных машин (узлов, агрегатов).

Поэтому по каждому сопряжению проводится испытание и собирается статистическая информация.

2.6. Предельные значения износов деталей и сопряжений.

Предельный износ (зазор) – такой, при котором наступает предельное состояние детали или сопряжения, и их дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена во избежание аварийной поломки или резкого ухудшения технических или экономических характеристик машины.

$T_{до}$ – остаточный ресурс

$T_{мр}$ – межремонтный ресурс

$T_{дп}$ – допустимый ресурс

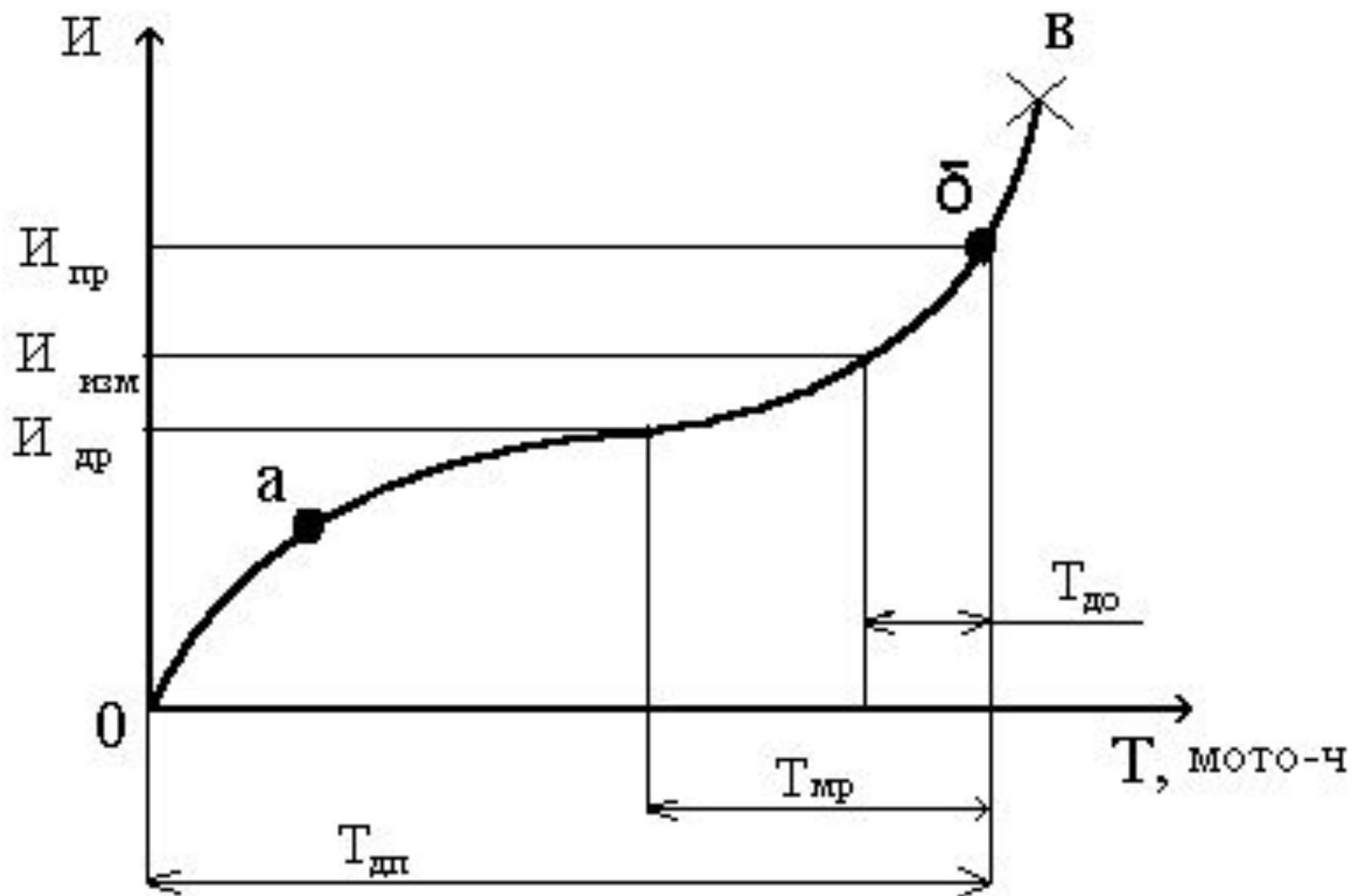


Рис. 18 Классическая кривая процесса изнашивания

2.7. Критерии определения предельного состояния деталей.

1.Экономические.

Уменьшение производительности, увеличение расхода СМ, уменьшение мощности.

2. Качественные.

3. Технические.

Нарушение безотказной работы деталей машин.

Критерии предельного износа рекомендуется устанавливать в зависимости от того, какое влияние оказывает износ деталей на работу машин.

Рассматривается три случая:

1. В результате износа оборудование не может больше функционировать, т.е. становится не работоспособной.

2. Износ приводит к попаданию в зону интенсивного выхода из строя машины и ее деталей. При этом возникают удары, происходит форсированное изнашивание поверхностей, возникают вибрации, повышается температура узлов.

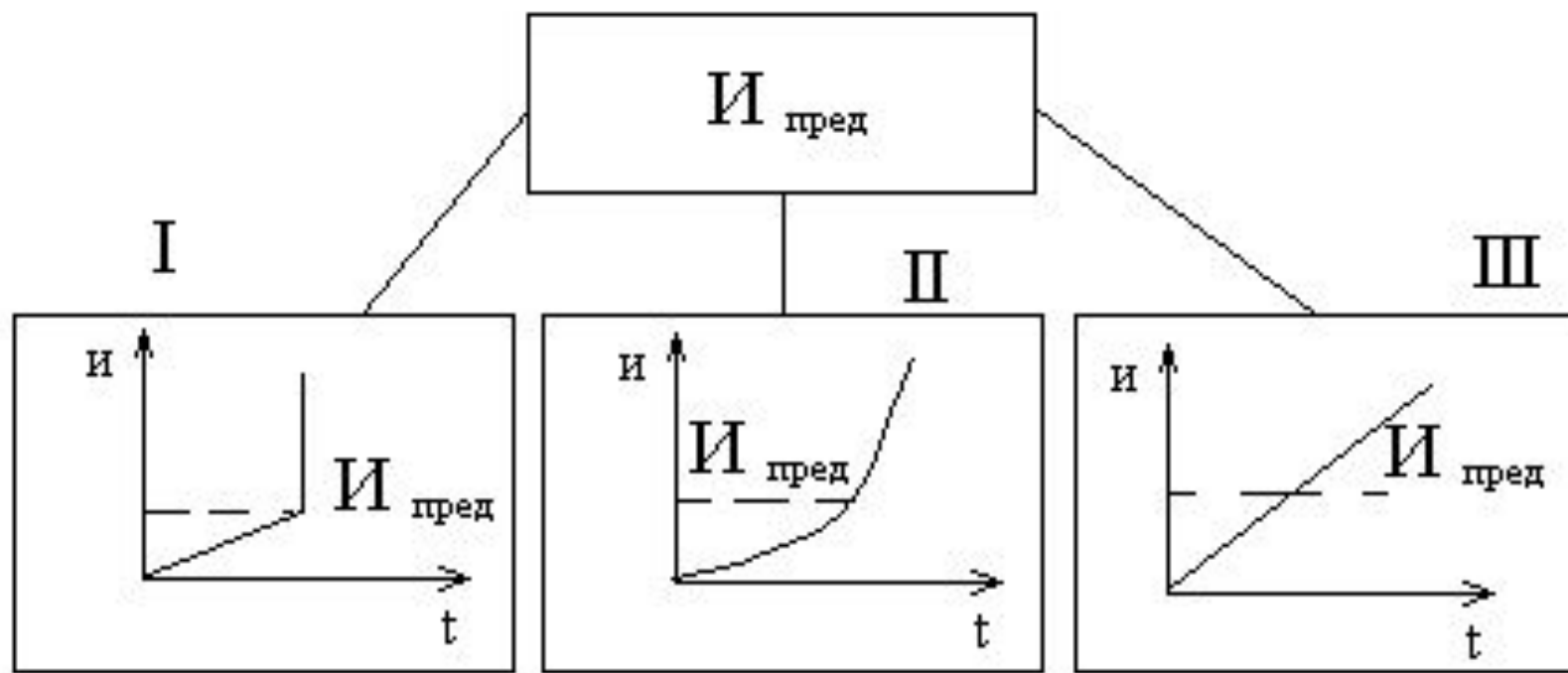


Рис. 19 Критерии предельного износа деталей машин

3. В результате износа характеристики машины выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (снижается точность работы, падает производительность и КПД и т.д.).

Для определения наработки (ресурса) T - деталей необходимо иметь кривую износа деталей в зависимости от наработки и значения предельного износа.

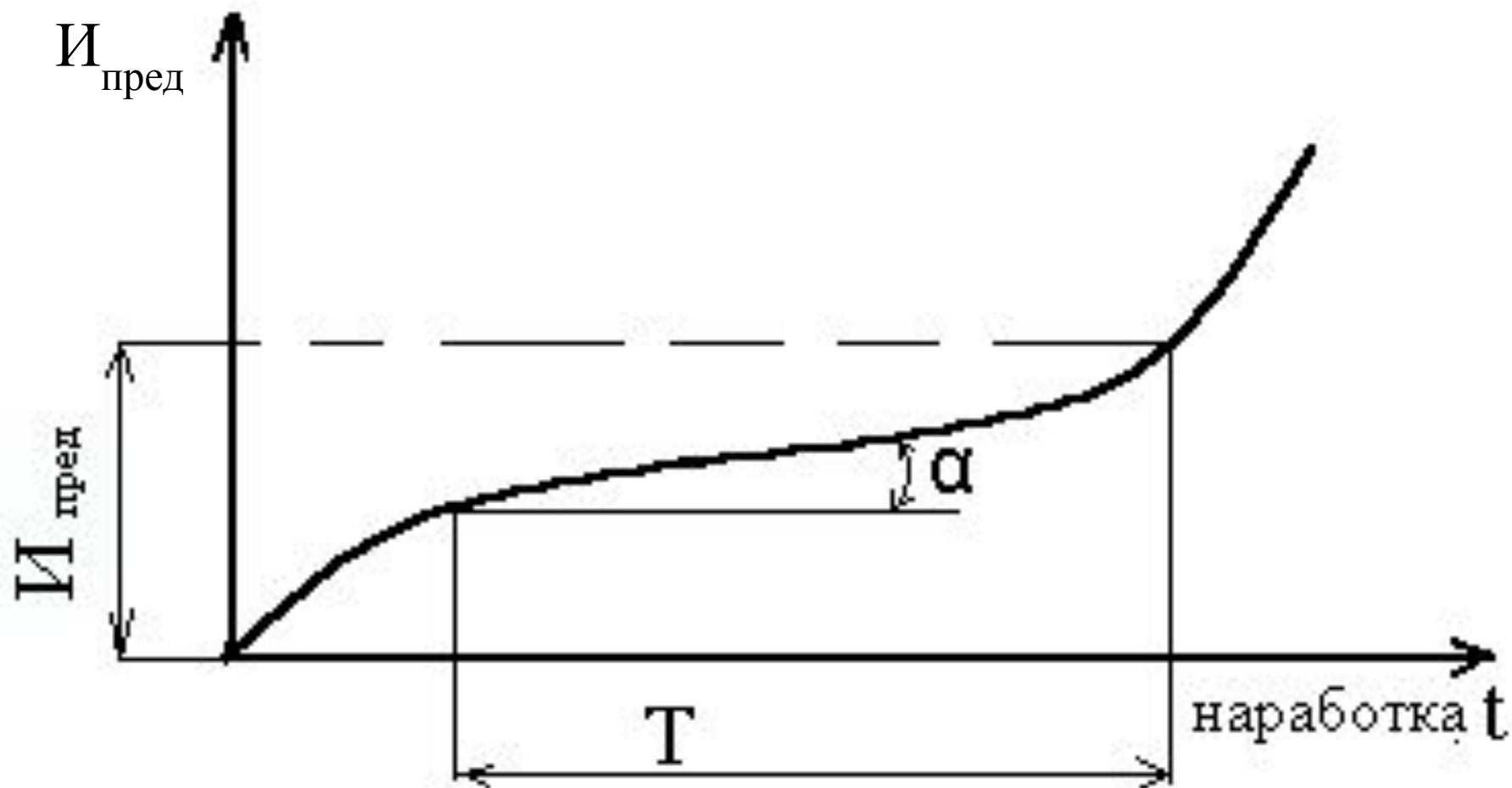


Рис. 20 Классическая кривая процесса изнашивания

$$T = \frac{I_{\text{пред}}}{v}$$

[41]

где: v – случайная функция, характеризующая скорость изнашивания сопряжения.

С другой стороны:

$$v = \frac{dI}{dt} = f(P, v_{\text{ск}}, k_{\text{т}}, k_{\text{э}})$$

[42]

т.е. функция, зависящая от нагрузки, скорости скольжения, технологических и эксплуатационных факторов.

Наравне с предельным износом существует допустимый износ.

Допустимый износ (зазор) - такой, при котором остаточный ресурс равен межремонтному.

Исходя из определения можно сделать такую схему износа детали.

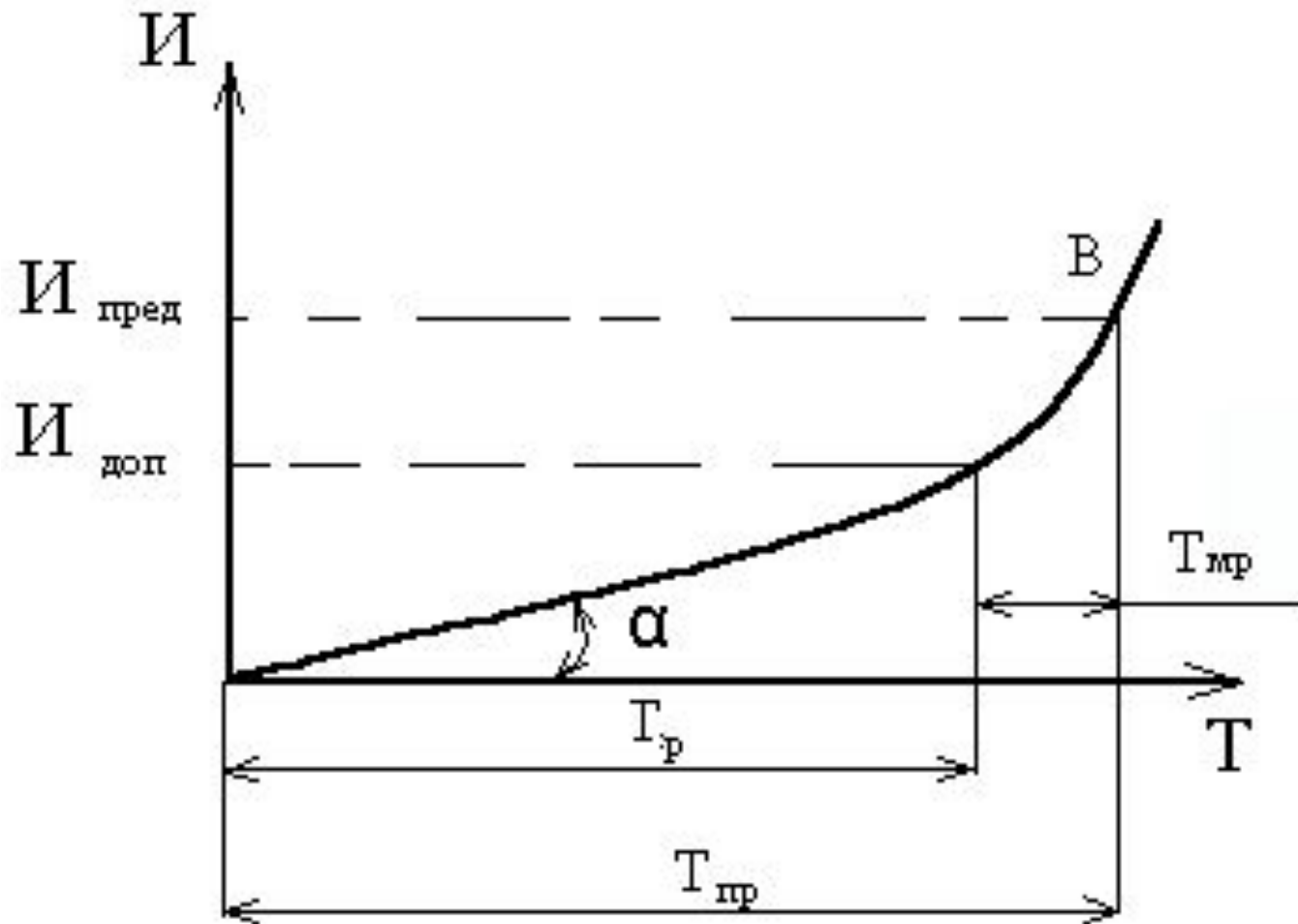


Рис. 21 Классическая кривая процесса изнашивания

$$\boxed{T_{\text{мр}} = T_{\text{ос}}} \quad [43]$$

Допустимые износы $I_{\text{доп}}$ меньше предельных $I_{\text{пред}}$

$$\boxed{I_{\text{доп}} < I_{\text{пред}}} \quad [44]$$

т.к. . деталь не должна выйти из строя в течении последующей межремонтной наработки $T_{\text{мр}}$.

За период межремонтной наработки износ детали увеличивается на:

$$\boxed{\gamma * T_{\text{мр}}} \quad [45]$$

Значит

$$\boxed{I_{\text{пред}} = I_{\text{доп}} + \gamma * T_{\text{мр}}} \quad [46]$$

Учитывая, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \gamma = \frac{I_{\text{доп}}}{T_p}$$

[47]

то

$$I_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{пред}}}{1 + \frac{T_{\text{мр}}}{T_p}}$$

[48]

Учитывая, что γ – случайная величина, то на практике пользуются вероятностными показателями T_p , σ и др.

Графически значения предельных и допустимых величин можно представить так:

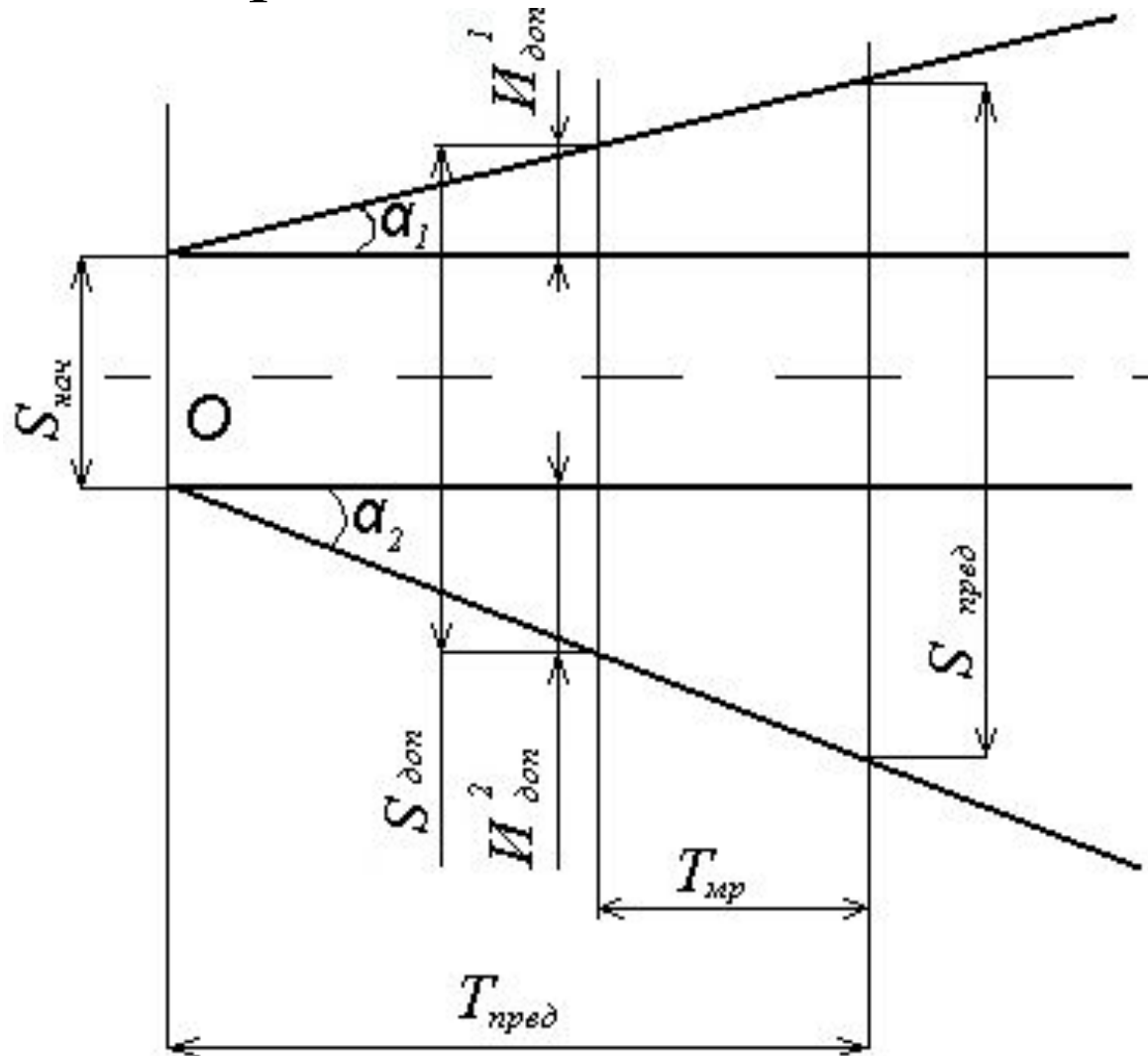


Рис. 22 Графическое обоснование предельного и допустимого зазора (износа) сопряжения

Выводы:

1. Угол α характеризует скорость изнашивания. Наклон линии износа позволяет характеризовать скорость изнашивания.

2. Размер $S_{\text{доп}}$, будет соответствовать значению допустимого зазора сопряжения, при котором детали с износом можно без восстановления оставить на машине, т. к. они отработают ресурс до следующего ремонта.

3. В том случае, когда в сопряжении одна деталь изнашивается намного быстрее другой, то для восстановления начального зазора и допустимого заменяют быстро изнашиваемую деталь при условии безопасной работы старой детали.

2.8 Теоретическое обоснование предельного изменения зазоров в сопряжении.

Основываясь на материалах гидродинамической теории трения, уравнения Рейнольдса для расхода жидкости при условии перепада давления, выводах профессора Н.П.Петрова (1883г.) имеем следующее.

В момент, когда сопряжение неподвижно, то под действием веса вала, вал опускается на вкладыш и в т. М зазор равен нулю. Но когда вал начнет вращаться, то под действием масляного клина вал приподнимается и между валом и вкладышем образуется масляная прослойка. Это необходимое условие жидкостного трения.

При этом, центр вала сместится в сторону направления его движения из т.О в т.О₁, образуется эксцентриситет e .

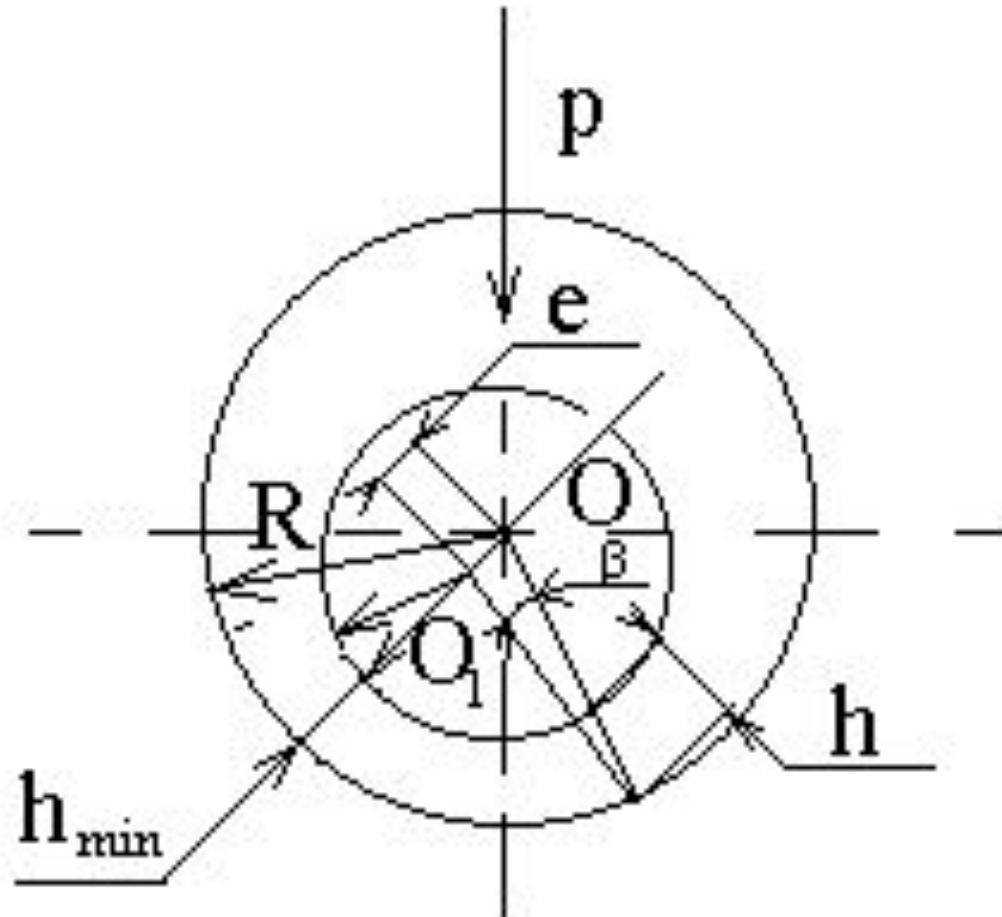


Рис. 23 Схема вращения вала

Проделав необходимые математические преобразования имеем, что

$$h_{\min} = \frac{d^2 * \eta * n}{18,36 * k * S * c} \quad [49]$$

$h_{\min}$ – толщина слоя смазки в [мм] в самом узком месте клиновидной щели;

d – диаметр вала, [мм];

k – нагрузка на вал в [кг/м²];

S – зазор (разность диаметров подшипника и вала) [мм];

n – число оборотов вала в минуту;

η – абсолютная вязкость масла в (кг*сек)/м²

$$c = \frac{d+1}{1} - (\text{поправка для учета длины подшипника})$$

где l — длина подшипника

По чертежу, $h_{\min} = R - r - e$, а разность радиусов дает

$R - r$ — половину зазора в сопряжении

$$(D - d = S \Rightarrow R - r = \frac{S}{2})$$

$$\lambda = \frac{2 * e}{S} - \text{относительный эксцентриситет} \quad [50]$$

e — абсолютный эксцентриситет.

Проделав исследование по трению в подшипниках с современной смазкой установили: при $\lambda=0,5 \Rightarrow F_{\text{тр}} \rightarrow \min$ (при $\lambda < 0,5$ $F_{\text{тр}}$ увеличивается)

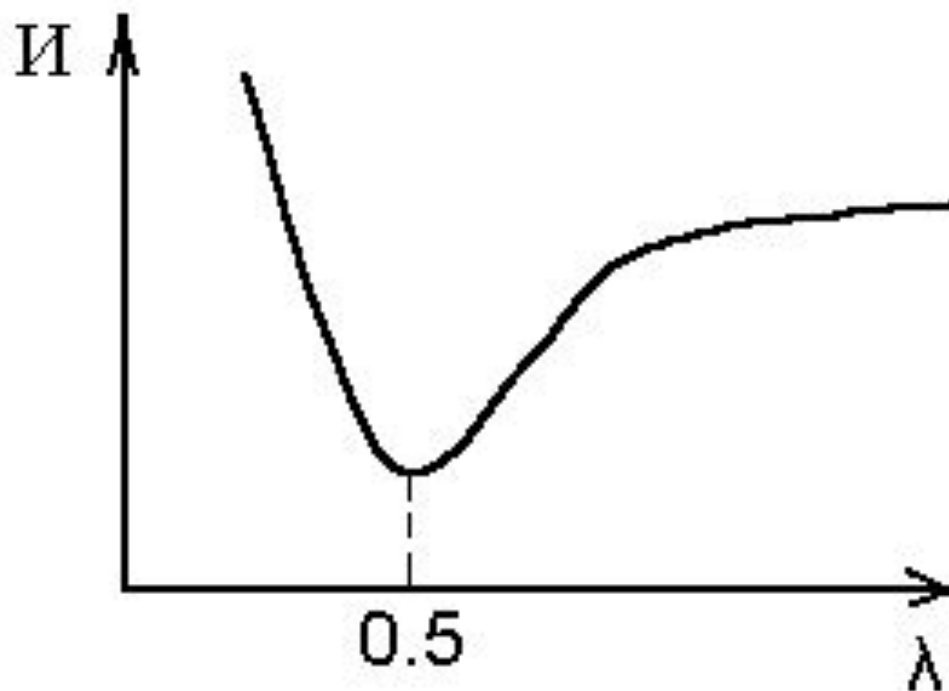


Рис. 24 График зависимости силы трения от относительного эксцентриситета

$$0,5 = \frac{2 * e}{S} \Rightarrow e = \frac{S}{4}$$

[51]

при этом

$$h_{\min} = e = \frac{S_{\text{наив}}}{4} \leftarrow h_{\min} = \frac{S}{2} - \frac{S}{4} = \frac{S}{4}$$

[52]

Значит, в этом случае будет и наименьший зазор в сопряжении (допустимый), следовательно приравнивая ищем:

$$\frac{S_{\text{наив}}}{4} = \frac{d^2 * \eta * n}{18,36 * k * S_{\text{наив}} * c}$$

[53]

$$S_{\text{наив}}^2 = \frac{4 * d^2 * \eta * n}{18,36 * k * c}$$

[54]

$$S_{\text{н}} = 0,467 * d * \sqrt{\frac{\eta * n}{k * c}}$$

- наивыгоднейший зазор в сопряжении [55]

Очевидно, что чем меньше величина h_{min} , тем ближе поверхности подходят друг к другу и тем больше опасений, что эти поверхности начнут соприкасаться и изнашивать друг друга.

С увеличением вязкости масла η , d и n , h_{min} возрастает.

При уменьшении $h_{\min}$ нарушение жидкостного слоя начинается с момента, когда:

$$h_{\min} = \delta_n + \delta_b \quad [56]$$

где δ_n – высота неровностей подшипника, мм

δ_b – высота неровностей вала, мм.

Если $\delta_n + \delta_b = \delta$ обозначить в то же время

$$h_{\min} = \frac{S_{\text{наив}}}{4}$$

[57]

$$\frac{S_{\text{наив}}}{4} = \frac{n * \eta * d^2}{18.36 * k * S_{\text{наив}} * c}$$

[58]

При максимальном зазоре $S_{\max} \Rightarrow h_{\min} = \delta$

Значит

$$\delta = \frac{n * \eta_{\text{д}}}{18.36 * k * S_{\max} * c} \quad [59]$$

Разделив (55) на (56) получим:

$$\frac{S_{\text{наив}}}{4 * \delta} = \frac{S_{\max}}{S_{\text{наив}}} \quad [60]$$

откуда

$$S_{\max} = \frac{S_{\text{наив}}^2}{4 * \delta} \quad [61]$$

Таким образом, зависимости $S_{\text{наив}}$ и S_{max} позволяют установить для конкретного сопряжения типа «вал-подшипник», значения зазоров, в пределах которых имеет место нормальная работа сопряжения.

Для практических расчетов величина δ берется из условия попадания абразивных частиц и пыли, т.е. если абразив больше $(\delta_n + \delta_b)$, то берется значение δ абразивных частиц, находящихся в смазке.

Теоретические обоснования предельного изменения формы деталей в сопряжениях «вал — подшипник скольжения».

Предельное состояние определится смещением точки С вниз от первоначального уровня.

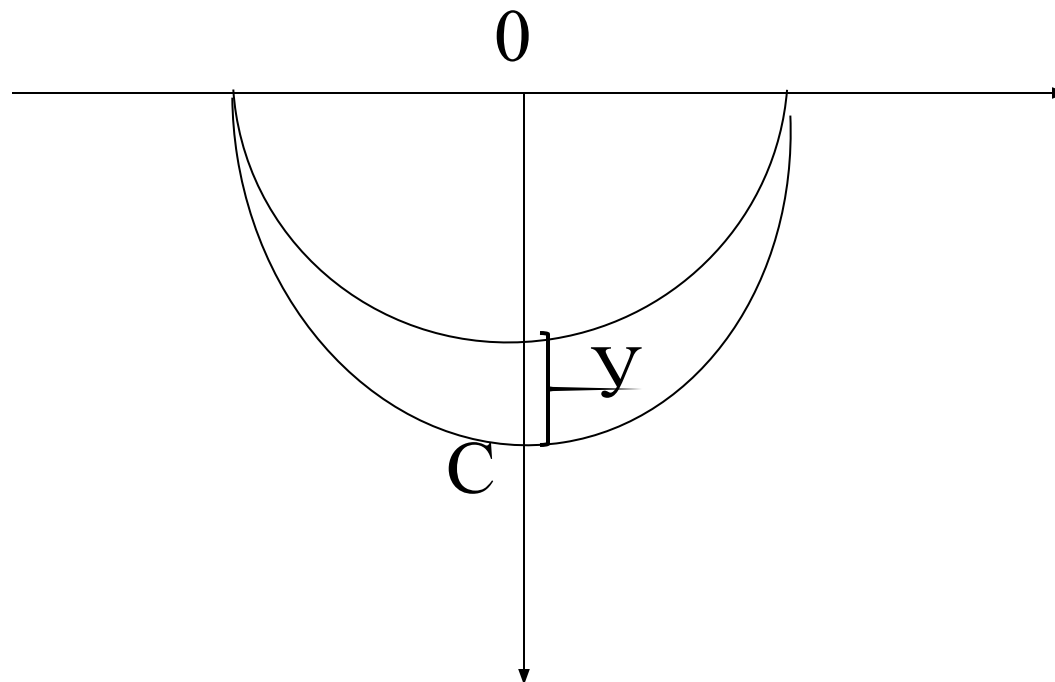


Рис. 25 Схема определения наибольшего изменения формы деталей сопряжения

$S=2(R-r)$ – начальный зазор в сопряжении;

R – начальный радиус подшипника (до износа);

r – начальный радиус вала (до износа);

Y – предельно допустимый износ подшипника.

$$Y = \frac{0,5S}{2,5 - \varepsilon} \quad [62]$$

ε – коэффициент показывает во сколько раз вал изнашивается быстрее подшипника.

Выводы:

1. При $\epsilon < 2,5$ условие жидкостного трения нарушается.

2. $\epsilon > 2,5$ условие жидкостного трения не нарушается т.е. вращающаяся деталь изнашивается в 2,5 раза и более, растущее искажение геометрической формы неподвижной детали не нарушит условия жидкостного трения.

Для нового сопряжения:

$$Y=0,2S_{\text{нач}} \quad [63]$$

Это означает, что овализация новой детали должна быть менее $0,2 S_{\text{нач}}$. Если $S_{\text{нач}}$ составляет 0,05 мм для какого либо сопряжения, то овализация шеек вала после обработки должна быть меньше 0,01 мм. Если такую точность обработки выдержать не удаётся, то не следует делать такой зазор. Поэтому в настоящее время идёт тенденция в сторону увеличения качества обработки, а следовательно уменьшению зазоров, а как следствие из этого, повышается ресурс сопряжения.