Лекция №2. Физические основы надежности

1. Причины изменения работоспособного состояния подвижного состава
2. Процессы механического разрушения твердых тел
3. Изнашивание трущихся поверхностей
4. Электрическое разрушение технических диэлектриков
5. Электрический пробой полупроводника
6. Факторы, влияющие на надежность объектов при их эксплуатации

1. Причины изменения работоспособного состояния подвижного состава

Наиболее часто встречающиеся причины возникновения отказов оборудования подвижного состава:

- Чрезмерные деформации и механические нарушения – нарушение вибропрочности и вибронадежности элементов и конструкций;
- Электрические разрушения диэлектриков и полупроводников – объемный и поверхностный пробой;
- Нарушение коммутационных процессов в аппаратах электрических машин;
- Электромеханическая коррозия, износ, истирание.

Причины снижения надежности электрооборудования, не зависящие ни от режимов его работы, ни от длительности работы:

- Температура окружающей среды;
- Атмосферное давление;
- Загрязнения;
- Иней;
- Снег и т.п.

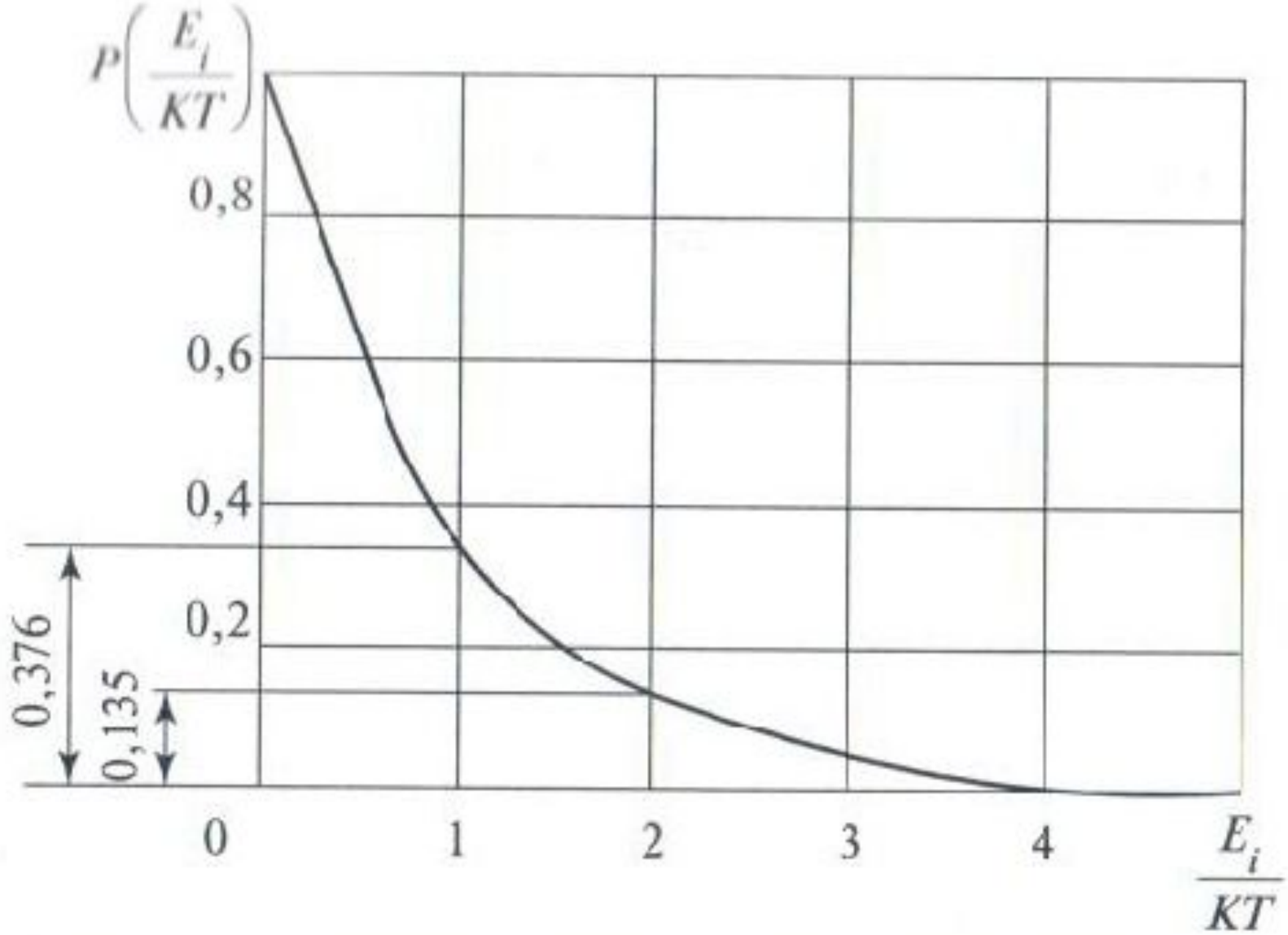
Основу анализа причин отказов составляет изучение их кинетики, т.е. общих закономерностей движения частиц (тел) под действием сил. Эти закономерности определяют процессы изменения свойств и характеристик материалов.

Для оценки распределения энергетических уровней частиц используются методы теории вероятностей и математической статистики.

Статистическая вероятность распределения частиц по их энергетическим уровням характеризуется экспоненциальным законом вида

$$P(E_i) = \frac{N_i}{N} = A(T)exp\left(-\frac{E_i}{KT}\right)$$

Энергия активации – минимальное значение энергии необходимое для преодоления энергетического уровня изменения положения частиц в кристаллической решетке твердых тел, обуславливающих изменения их свойств и характеристик.


$P\left(\frac{E_i}{KT}\right)$
0,8
0,6
0,4
0,2
0,376
0,135
0
1
2
3
4
$\frac{E_i}{KT}$

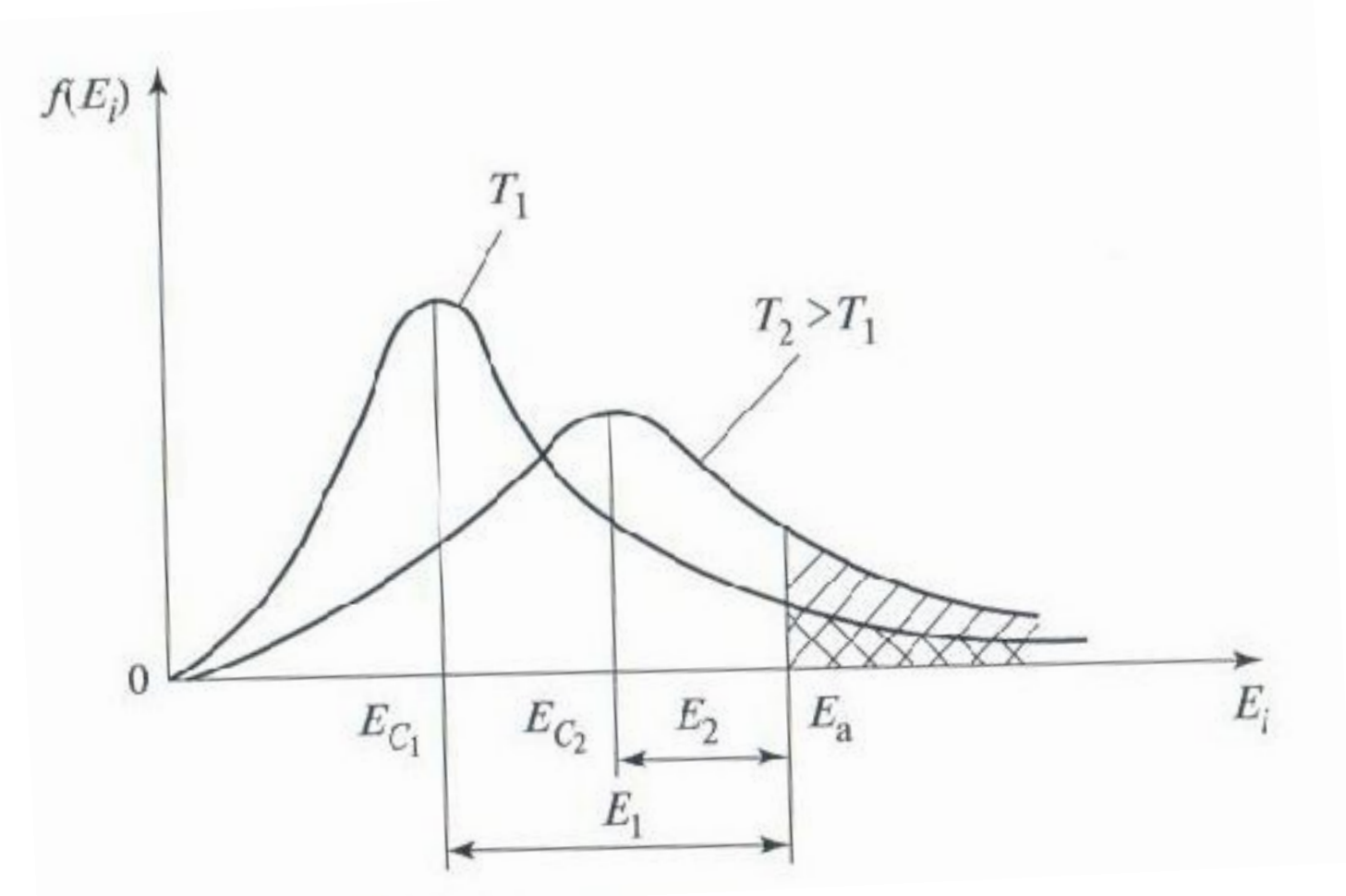
Статистическая вероятность распределения частиц, кинетическая энергия которых больше уровня активации E_a

$$P(E_a) = \frac{\sqrt{E_a}}{\sqrt{\pi}} exp\left(-\frac{E_a}{KT}\right)$$

Приведенные уравнения являются универсальными для описания кинетики физико-химических процессов, т.к. подавляющее большинство из них протекает, как это установлено экспериментально, таким образом, что перенос (или концентрация) вещества в ходе процесса пропорционален скорости его протекания. При этом распределение скорости процесса

$$\nu = Cexp\left(-\frac{E_a}{KT}\right)$$

Характерной особенностью зависимости статистической вероятности распределения частиц, кинетическая энергия которых больше уровня активации – резкое увеличение скорости процесса с ростом температуры. Это объясняется увеличением доли частиц, энергия которых превышает энергию активации данного процесса.



Использование положений кинетики для анализа происходящих в материале физико-химических процессов открывает новые возможности обоснованного выбора материала в зависимости от условий его работы, поиска технологических путей повышения надежности, безотказности устройств, разработки методик ускоренных испытаний, прогнозирования безотказности и т.п.

2. Процессы механического разрушения твердых тел

Показатели безотказности могут быть представлены функциями физических характеристик и параметров элементов, а также функциями скорости их изменения в зависимости от различных факторов.

Установлено, что скорость процесса механического разрушения твердого тела и долговечность зависят от структуры и свойств тела, напряжения, возникающего под действием нагрузки и температуры. Экспериментально доказана следующая связь между временем, отсчитываемым с момента приложения к образцу постоянно нагрузки до его разрушения, напряжением в нем и его температурой:

$$\tau = \tau_0 exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{KT}\right)$$

Процесс разрушения представляет собой ряд элементарных событий, связанных с тепловым движением атомов и молекул. Начальный процесс разрушения – образование трещин – происходит вследствие разрыва межатомных связей в кристаллической решетке металла.

Скорость развития трещины, определенная экспериментально соответствует средней скорости процесса разрушения

$$\nu = \tau_0^{-1} exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{KT}\right)$$

Условие разрушения образца принимает вид

$$\int_0^{t_{\text{пр}}} \frac{dt}{\tau_i\left(\sigma_i(t)\right)} = 1$$

При расчете процессов механического разрушения конструкций оборудования подвижного состава под действием изменяющихся во времени нагрузок следует иметь в виду три условия, определяющие точность такого расчета:

- Степень идеализации режимов нагружения
- Обоснование прочностных характеристик материала конструкции с учетом технологии и качества его изготовления
- Степень соответствия расчетной модели действительной конструкции

Для случайных процессов нагружения, имеющих широкополосный спектр напряжений, понятия амплитуды и частоты теряют смысл, поэтому пользуются гипотезой линейного суммирования накопленных повреждений:

$$D = \int_0^n \frac{dn}{N_w}$$

Наиболее эффективным путем определения усталостной прочности конструкции является сочетание аналитических методов расчета с натурными испытаниями на усталость головных образцов этих конструкций.

Наиболее характерные повреждения механического оборудования, деталей и узлов подвижного состава:

1. Остаточная деформация (поверхности катания бандажей, рельсов, напряженные болты, подшипники скольжения)
2. Вязкий излом (связи и анкерные болты, несущие элементы мостовых ферм и других пространственных конструкции, напряженные болты)
3. Хрупкий излом (сварные соединения, фасонные детали, болты, валики, чугунные отливки)
4. Усталостный излом (валы, оси, шатуны, болты, сварные соединения, подвергающиеся длительному действию многократного повторяющихся нагрузок)
5. Истирание металлических пар (подшипники скольжения, валы, оси, направляющие, крейцкопфы, кулисы, цепные передачи, поршневые кольца, втулки)

6. Усталостное выкрашивание (зубчатые передачи, подшипники качения, рельсы и бандажи подвижного состава)
7. Абразивный износ (плунжерные пары, открытые зубчатые передачи, пескометы)
8. Заедание (шестерни зубчатых передач, подшипники скольжения)
9. Жидкостная эрозия (запорные и регулирующие элементы аппаратуры трубопроводов, рабочие органы питающих насосов, рабочие камеры гидротурбин)
10. Кавитация (детали гидротурбин, детали машин, подвергающихся водяному охлаждению, трубопроводы)
11. Атмосферная коррозия (кабины и кузова, детали машин, подвергающиеся действию атмосферных осадков и влажного воздуха)

12. Газовая коррозия (детали котельных топок газовых турбин, клапаны двигателей внутреннего сгорания, электрические нагревательные элементы)
13. Коррозионная усталость (оси и штоки насосов, рессоры и другие детали, испытывающие знакопеременные нагрузки в коррозионных средах, детали подвергающиеся действию выхлопных газов)
14. Коррозионное растрескивание (напряженные детали котлов, находящиеся под действием концентрированных щелочных растворов, детали, изготовленные из латуни, магниевых сплавов)
15. Коррозия или трение (болтовые и заклепочные соединения, посадочные поверхности подшипников качения, шестерни, детали находящиеся в подвижном контакте)

3. Изнашивание трущихся поверхностей

Различают следующие основные виды износа от трения:

1. Износ схватыванием первого рода (молекулярное)
2. Износ схватыванием второго рода (тепловое)
3. Абразивный износ
4. Осповидный износ
5. Окислительный износ

Износ схватыванием первого рода имеет место при трении скольжения с малыми скоростями и удельных давлениях, превышающих предел текучести металла на участках фактического контакта при отсутствии смазки и слоя окислов.

Износ схватыванием второго рода возникает при трении скольжения с большими скоростями и большими удельными давлениями, вызывающими рост температуры в поверхностных слоях трущихся металлов.

Абразивный износ наблюдается при трении скольжения и определяется наличием абразивных частиц на поверхности трения. Твердые абразивные частицы при взаимном перемещении деталей срезают частицы металла, что и объясняет изнашивание поверхностей.

Осповидный износ наблюдается только при трении качения и при нагрузках, превышающих предел текучести материала. Осповидный износ – результат упрочения и разупрочнения металла, он вызывает явление усталости в поверхностных слоях.

Окислительный износ возможен как при трении скольжения, так и при трении качения. Образовавшиеся на поверхности трения твердые и хрупкие слои окислов разрушаются и выкрашиваются при взаимном перемещении поверхностей.

Разработана классификация причин разрушения поверхностей при трении, в соответствии с которой износ трущихся поверхностей представляет собой:

- Результат механических зацеплений неровностей сопряженных поверхностей, разрушающихся при их взаимно перемещении;
- Процесс усталостного разрушения шероховатых поверхностей в результате воздействия переменных напряжений, возникающих вследствие взаимодействия трущихся поверхностей или переменных давлений в слое смазки;
- Изменение поверхностного слоя металла, вызываемого деформацией и наклепом, а также напряжениями в переходной зоне;
- Следствие взаимодействия трущихся поверхностей с окружающей газовой средой и образования хрупких слоев окислов, легко разрушающихся и отделяющихся от металла;

- Результат молекулярного схватывания металлов в местах действительного контакта, разрушающихся при взаимном перемещении поверхностей;
- Разрушение, которое наступает при взаимном перемещении металлических поверхностей, сваренных в точках контакта, при высоких температурах, развивающихся в процессе трения.