

Лекция №4

Теплофизические и механические характеристики материалов.

4.1. Понятие температуры. Характерные температуры (плавления, кипения, Кюри, и т.п.) Температуростойкость материалов. Теплостойкость материалов.

4.2. Теплоемкость, теплопроводность, температурные коэффициенты материалов.

4.3. Механические свойства материалов. Удлинение, деформация, модуль упругости. Разрушающие напряжения при различных видах нагрузки.

Теплофизические характеристики материалов очень важны для практики. Действительно, материалы в различных энергетических устройствах и установках работают в различных температурных условиях. Это могут быть климатические условия: солнце, влага, мороз и т.д. Это может быть и нагревание самого материала за счет процессов, происходящих в эксплуатации. Это может быть и материалы для устройства подогрева электрооборудования в холодное время года.

Поэтому важно понимать, как ведут себя материалы при различных температурах, как они могут отводить тепло или аккумулировать тепло.

4.1. Понятие температуры. Характерные температуры (плавления, кипения, Кюри, и т.п.) Температуростойкость материалов. Теплостойкость материалов.

[в начало лекции](#)

Температура - это понятие, введенное для характеристики энергии, которой обладают молекулы вещества. С другой стороны, это физическая характеристика, которая соответствует равновесию при приведении двух тел в контакт. Как и всякая физическая характеристика, она поддается измерению. Общепринятыми, в настоящее время, являются две температурные шкалы - Цельсия и Кельвина. Мера одного градуса у них одинакова, она соответствует (исторически) одной сотой от разницы температур кипения воды и ее плавления. У Цельсия, вы знаете, нуль соответствует точке плавления, а 100°C - точке кипения воды. По шкале Кельвина, или абсолютной шкале температур, нуль соответствует абсолютному нулю, а нулевая температура по шкале Цельсия соответствует 273 K . Значок градуса в этом случае не ставится. Ниже нуля Кельвина температуры в принципе не может быть. Она соответствует абсолютному покою, при этой температуре, согласно классической механике, молекулы и атомы абсолютно неподвижны. В квантовой механике это не совсем так, возможны колебательные движения молекул. Кроме того, некоторые электроны и при этой температуре обладают энергией в силу невозможности занятия энергетических уровней, уже занятых другими электронами. Нулевая температура

в принципе недостижима, предпринимается много попыток достичь минимума температуры в надежде проявления новых свойств материи. На этом пути была обнаружена сверхпроводимость некоторых металлов, сверхтекучесть жидкого гелия, т.н. гелия-II. Я знаю о достижении к настоящему времени, по крайней мере, примерно одной тысячной доли градуса.

Для материалов вводят несколько характерных температурных точек, указывающих работоспособность и поведение материалов при изменении температуры.

Нагревостойкость - максимальная температура, при которой не уменьшается срок службы материала.

По этому параметру все материалы разделены на классы нагревостойкости.

Обозначение класса	Y	A	E	B	F	H	C
Рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	Выше 180

Теплостойкость - температура, при которой происходит ухудшение характеристик при кратковременном ее достижении.

Термостойкость - температура, при которой происходят химические изменения материала.

Морозостойкость - способность работать при пониженных температурах (этот параметр важен для резин).

Горючесть - способность к воспламенению, поддержанию огня, самовоспламенению Это различные степени горючести.

Все эти понятия определяют характерные температуры, при которых меняется какое-либо свойство материала. Есть некоторые температуры, характерные для всех материалов, есть температуры, специфичные для некоторых электротехнических материалов. при которых резко меняются какие-либо характеристики.

Большинству материалов присущи точки плавления, кипения.

 **Точка плавления** - температура, при которой происходит переход из твердого состояния в жидкое. Не обладает точкой плавления жидкий гелий, он даже при нуле Кельвина остается жидким. К наиболее тугоплавким можно отнести вольфрам - 3387 °C, молибден 2622 °C, рений - 3180 °C, тантал - 3000°C. Есть тугоплавкие вещества среди керамик: карбид гафния HfC и карбид тантала TaC имеют точки плавления 2880 °C., нитрид и карбид титана - более 3000 °C.

Есть материалы, в основном это термопластичные полимеры, которые обладают точкой размягчения, но до плавления дело не доходит, т.к. начинается разрушение полимерных молекул при повышенных температурах. У термореактивных полимеров даже до размягчения дело не доходит, материал раньше начинает разлагаться. Есть сплавы и другие сложные вещества у которых сложный процесс плавления: при некоторой температуре, называемой «солидус» происходит частичное расплавление, т.е. переход части вещества в жидкое состояние. Остальное вещество находится в твердом состоянии. Получается что-то типа кашицы. По мере повышения температуры все большая часть переходит в жидкое состояние, наконец при некоторой температуре,

называемой «ликвидус» произойдет полное расплавление вещества. Например сплав олова и свинца для пайки, называемый попросту «припой», начинает плавиться примерно при 180 °С (точка солидус), а расплавляется примерно при 230 °С (точка ликвидус).

В любых процессах плавления, достижение определенной точки является необходимым, но недостаточным условием плавления. Для того, чтобы расплавить вещество нужно сообщить ему энергию, которая называется теплотой плавления. Она рассчитывается на один грамм (или на одну молекулу).

 **Точка кипения** - температура, при которой происходит переход из жидкого состояния в парообразное. Кипят практически все простые вещества, не кипят сложные органические соединения, они разлагаются при более низких температурах, не доходя до кипения. На точку кипения оказывает значительное влияние давление. Так, например для воды можно сдвинуть точку кипения от 100 °С до 373°С приложением давления в 225 атм. Кипение растворов, т.е. взаимно растворимых друг в друге веществ происходит сложным образом, кипят сразу два компонента, только в паре одного вещества больше, чем другого. Например слабый раствор спирта в воде выкипает так, что в паре спирта больше чем в воде. За счет этого работает перегонка и после конденсации пара получается спирт, но обогащенный водой. Есть смеси выкипающие одновременно, например 96% спирт. Здесь при кипении состав жидкости и состав пара одинаковы. После конденсации пара получается спирт точно такого же состава. Такие смеси называются **azeotropic mixtures**.

Есть температуры специфичные для электротехнических материалов. Например для сегнетоэлектриков вводят т.н. **точку Кюри**. Оказывается, что сегнетоэлектрическое состояние вещества возникает только при пониженных температурах. Существует такая температура для каждого сегнетоэлектрика, выше которой домены не могут существовать и он превращается в параэлектрик. Такая температура называется точкой Кюри. Диэлектрическая проницаемость ниже точки Кюри велика, она слабо нарастает по мере подхода к точке Кюри. После достижения этой точки диэлектрическая проницаемость резко падает. Например, для наиболее распространенного сегнетоэлектрика: титаната бария, точка Кюри 120 °С, для цирконат-титаната свинца 270 °С, для некоторых органических сегнетоэлектриков температура Кюри отрицательна.

Аналогичная температура (и тоже называется точка Кюри) имеется для ферромагнетиков. Поведение магнитной проницаемости подобно поведению диэлектрической проницаемости по мере повышения температуры и подхода к точке Кюри. Единственное отличие - падение магнитной проницаемости с ростом температуры происходит более резко после достижения точки Кюри. Значения точки Кюри для некоторых материалов: железо 770 °С, кобальт 1330°С, эрбий и гольмий (-253°С), керамика - в широком диапазоне температур. Для антиферромагнетиков аналогичная точка называется **точкой Нееля**.

4.2. Теплоемкость, теплопроводность, температурные коэффициенты материалов.



Теплоемкость - это способность накапливать тепловую энергию в материале при его нагревании. Численно удельная теплоемкость равна энергии, которую нужно ввести в единицу массы материала, чтобы нагреть его на один градус. Размерность удельной теплоемкости [Дж/(кг· К)]. Эта величина экстенсивная, т.е. можно говорить о теплоемкости отдельной молекулы или атома, затем просуммировать количество молекул до одного грамма или до одного моля и получить теплоемкость одного грамма или одного моля вещества. Значение теплоемкости зависит от природы материала. Самая высокая теплоемкость у воды $4.2 \cdot 10^3$ Дж/(кг· К) или 4.2 кДж/(кг·К). У подавляющего большинства материалов удельная теплоемкость порядка 1 кДж/(кг· К). Теплоемкость зависит от температуры. Вблизи нуля Кельвина она мала, в рабочем диапазоне температур - слабо меняется с ростом температуры. Какие-либо скачки теплоемкости связаны со структурной перестройкой тел, например с растянутым плавлением таких веществ, как парафин. Здесь можно упомянуть пример с парафиновой прогревающей повязкой, когда тепло долго сохраняется за счет высокой теплоемкости парафина и повязка греет длительное время.

Теплоемкость газов хорошо изучена теоретически. Для газов даже введено два типа теплоемкости: при постоянном давлении C_p и при постоянном объеме C_v . Обычно рассматривают теплоемкость, приходящуюся на одну молекулу.

Тогда для одноатомного газа $C_p = 5/2 kT$, а $C_v = 3/2 kT$. Почему при постоянном давлении труднее нагревать молекулы? Ясно, что при этом газ расширяется, значит нужна дополнительная энергия, чтобы нагревать газ при постоянном давлении. Отметим, что для многоатомных газов теплоемкость выше, т.к. при нагревании требуется энергия на возбуждения вращения молекул, колебания и т.п.

Приведем выражение для тепловой энергии материала:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1), \quad (4.1)$$

где m -масса материала, T_2, T_1 конечная и начальная температуры.

Это выражение можно переписать для локальных, удельных, параметров:

$$Q/V = c \cdot d \cdot (T_2 - T_1), \quad (4.2)$$

где Q/V - удельное выделение энергии (в единице объема), d - плотность материала.

Выражения (4.1 - 4.2) позволяют определить изменение температуры материала в процессе его работы, например за счет потерь энергии, протекания тока или какого-либо другого процесса. Энерговыведение Q задается конкретными процессами, протекающими в материале.



Теплопроводность определяет способность передать тепловую энергию через материал. Это тоже важная характеристика, она характеризуется коэффициентом теплопроводности λ . Численно он равен потоку q проходящему через площадку единичной площади, при перепаде на ее гранях температуры 1 °С. Лучше всего передают тепло металлы, так у меди $\lambda = 400$ Вт/(м К), для серебра чуть больше (418), для алюминия

200 Вт/(м К), для нержавеющей стали примерно 20 Вт/(м К), для простых сталей примерно в два раза выше.

У других материалов теплопроводность значительно ниже. Например у бетона $\lambda = 0.6$ Вт/(м К), у трансформаторного масла $\lambda = 0.13$ Вт/(м К), для воздуха $\lambda = 3,67 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м К). В справочниках часто приводят в устаревших единицах, например кал/(см·сек·°С); для перевода в систему единиц СИ нужно умножить на $4.18 \cdot 10^2$.

Для газов и жидкостей обычная теплопроводность играет незначительную роль. В этом случае главную роль играют **конвекция** и **излучение**.

Конвекция возникает из-за того, что нагретые жидкость или газ расширяются, их плотность уменьшается, они начинают «всплывать» под действием выталкивающей силы Архимеда. За счет этого возникают локальные течения, которые эффективно уносят тепло из нагретой зоны. В теплотехнике развит аппарат расчета теплопроводности при учете конвекции. Грубо, можно сказать, что конвекция увеличивает теплопроводность в несколько раз.

Тепловое излучение также важно, особенно при повышенных температурах. Основное выражение, используемое в оценках имеет вид:

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma T^4,$$

где ε - коэффициент серости излучающего материала, σ - постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴). Коэффициент серости зависит от сорта материала, в особенности от его теплопроводности и состояния поверхности. Для металлов этот коэффициент невелик, он меняется от единиц до десятков процентов, в зависимости от шероховатости поверхности, причем более шероховатой поверхности соответствует больший коэффициент серости. Для красок (исключая специальные с электропроводными компонентами), ε находится в диапазоне 80 - 95%. Оценки показывают, что этот фактор становится главным при температурах порядка 100 градусов и выше.

Самая высокая теплопроводность в нормальном диапазоне температур может быть достигнута путем переноса теплоты испарения. Если где-то испарить жидкость, а затем ее конденсировать в другом месте, то теплота испарения заберет часть тепла от нагретого участка и передаст его при конденсации в другом месте. Это эквивалентно теплопроводности от одного места до другого. Оценки показывают, что эквивалентная теплопроводность может превысить теплопроводность меди примерно в пять тысяч раз.

Температурные коэффициенты.

Практически все свойства материалов зависят от температуры. Обычно это учитывается введением т.н. температурного коэффициента. Строго математически для какого-либо свойства x он вводится выражением

$$T_{kx} = \frac{1}{x} \left(\frac{dx}{dT} \right) \quad (4.3)$$

где x может быть любой характеристикой материала. Размерность любого температурного коэффициента - 1/К. Например возьмем в качестве x размер l образца материала. Тогда

$$\alpha_{kl} = \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dT} \right) \quad (4.4)$$

означает температурный коэффициент расширения материала. Если взять диэлектрическую проницаемость, то это будет температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, если взять удельное сопротивление, то это будет температурный коэффициент удельного сопротивления.

В практике обычно пользуются линейным приближением, считая изменение характеристики с температурой малым, по сравнению с основным значением. Для этого случая можно выписать температурную зависимость в явном виде.

Для удельного сопротивления $\rho(T) = \rho(T_0)(1 + \alpha_{\rho}(T-T_0))$ (4.5)

Для размера тела $l(T) = l(T_0)(1 + \alpha_{kl}(T-T_0))$ (4.6)

Для диэлектрической проницаемости $\varepsilon(T) = \varepsilon(T_0)(1 + \alpha_{\varepsilon}(T-T_0))$ (4.7)

Для магнитной проницаемости $\mu(T) = \mu(T_0)(1 + \alpha_{\mu}(T-T_0))$ (4.8)

Конкретные значения температурных коэффициентов материалов можно найти в справочниках. В случае сильного изменения характеристик с температурой (например диэлектрической проницаемости в случае сегнетоэлектриков, или магнитной проницаемости в случае ферромагнетиков) линейным приближением пользоваться нельзя. В этих случаях следует воспользоваться таблицами или графиками.

4.3. Механические свойства материалов. Удлинение, деформация, модуль упругости. Разрушающие напряжения при различных видах нагрузки.

в начало лекции

В процессе эксплуатации на материал действуют механические нагрузки. Основные виды нагрузки: сжатие, растяжение, сдвиг, кручение.



Изменения размеров и формы тела под действием нагрузок называются деформациями. Их легко проиллюстрировать на примере стержня.

Если к стержню площадью s приложить силу F вдоль оси, то его продольный размер l и поперечный размер r изменятся

$$\Delta l / l = \sigma / E, \quad (4.9)$$

$$\Delta r / r = -\sigma \nu / E, \quad (4.10)$$

где $p = F/s$ - механическое напряжение, E - модуль Юнга или модуль всестороннего сжатия (или растяжения), σ - коэффициент Пуассона. Размерности p, E - Н/м^2 , σ - безразмерна.

Если сила сжимает стержень, то на стержень действует давление, продольное удлинение отрицательно, зато поперечное положительно. В случае растягивающей силы, т.е. действия напряжения - наоборот. Удлинение вдоль стержня, положительно, а поперек - отрицательно. При снятии нагрузки исходные размеры восстанавливаются. Такие деформации называются упругими.



Выражение (4.4) показывает линейную связь нагрузки с удлинением.

⚠ Это выражение называется законом Гука. Он характерен для упругих деформаций.

По мере увеличения нагрузки пропорциональность между изменением размера и нагрузкой перестает выполняться. Примерно при этих же нагрузках, после их снятия исходный размер полностью не восстанавливается.

⚠ Предел упругости ($\sigma_{0.05}$) - напряжение, при котором остаточная деформация не превышает 0.05%.

⚠ Предел текучести ($\sigma_{0.2}$) - напряжение, при котором происходит удлинение до 0.2% без увеличения нагрузки.

⚠ Предел прочности или временное сопротивление σ_B -напряжение, соответствующее максимальной нагрузке.

Помимо указанных видов деформации при натяжении рассматривают механическую прочность при разных видах нагрузки, например при сжатии, при изгибе. Механизм разрушения во всех случаях заключается в появлении и прорастании трещин. Различают два вида разрушения - хрупкое и вязкое. При хрупком разрушении деформации малы и скорость разрушения велика. В некоторых случаях она достигает скорости километров в секунду. При вязком разрушении перед трещиной существует значительная пластическая деформация и скорость распространения трещины мала.

⚠ Пластическая деформация - часть деформации, которая остается после снятия нагрузки.

Твердость материала. Свойство материала противостоять деформации при локальном контакте называется твердостью. Существует множество шкал твердости. Например шкала Мооса. Она применяется в основном для минералов. По ней выбраны десять материалов, каждый из ряда царапает все нижележащие и царапается вышележащими. Наибольшую твердость имеет алмаз, затем идет корунд и т.д. Нефрит имеет пятую позицию, сталь, в зависимости от закалки и типа - пятую или шестую. Известняк - третью.

Другие шкалы: Бригнелля, Роквелла, Виккерса и т.д. основаны на вдавливании в материал шарика или алмазной призмы и измерении размеров полученной ямки. Далее по специальным таблицам определяют соответствующую твердость.