

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

**Физические явления
в современных технологиях**

Князева Анна Георгиевна – д.ф.-м.н., профессор

Модуль 1

Введение

Предметом изучения данного курса являются физические свойства веществ разных типов и физические явления (эффекты), определяющие или сопровождающие формирование и модификацию свойств материалов в современных технологиях.

В технических приложениях **эффектом** называют конкретную, измеряемую, устойчивую и потенциально многократно повторяемую причинно-следственную связь, фиксирующую качественно и (или) количественно либо новое свойство объектов *вещественно-полевой природы*, либо существующие взаимосвязи отдельных свойств в форме теоретических или эмпирических математических соотношений величин.

Эффекты подразделяются на **естественнонаучные** (ЕНЭ) и **научно-технические** (НТЭ).

Первые либо отражают законы и закономерности, имеющие феноменологический характер, либо фиксируют взаимосвязи величин

Вторые представляют собой цепочки совместимых ЕНЭ, соответствующих типовым принципам технических систем

В настоящее время **известно около 10000 ЕНЭ и более 1 млн. НТЭ**.

Получая образование в вузе, будущий инженер знакомится с 250-350 ЕНЭ. Однако знания о них не составляют систему, так как соответствующие вопросы изучаются в рамках разных дисциплин (естественнонаучных, общепромышленных, специальных технологических) изолированно друг от друга. В литературе и базах данных информация об эффектах и явлениях также разрознена и отражена фрагментарно.

В результате инженер, разрабатывая принцип действия ТС, в лучшем случае оперирует 30 - 50 эффектами.

Создание концептуально новых поколений технологий и техники требует разработки и использования новых принципов действия. При этом наиболее существенные практические результаты имеют место при включении в структуру принципа действия эффектов, ранее не применявшихся в данной предметной области.

Наиболее общий способ описания физических свойств и явлений на стыках наук может быть основан на современной термодинамике, позволяющей взглянуть на макроскопическую физику современных технологий с единых позиций.

Явления на стыках естественных наук

Существует большое количество феноменологических (т.е. основанных на опыте) законов, описывающих необратимые процессы в форме пропорциональностей

закон Фурье $q = -\lambda_T \nabla T$ (1)

закон Фика $\mathbf{J}_k = -D_k \nabla C_k$ (2)

закон Ома $\mathbf{J}_e = -\kappa_e \nabla \varphi$ (3)

закон Дарси $\mathbf{J}_f = -k_f \nabla p$ (4)

закон Ньютона $\mathbf{F} = -\eta_f \nabla V$ (5)

$\nabla \dots = grad \dots$ –
производная по
направлению.
Строгое определение
– на доске

Все эти процессы по своей природе являются необратимыми. Это означает, что они не могут самопроизвольно протекать как в прямом, так и в обратном направлениях

Математический ликбез

- (I) 1. Постоянная величина. **Параметр.**
2. **Функция. Аргумент. Область определения.**

$$y = f(x)$$

3. Приращение

$$\Delta x = x_1 - x$$

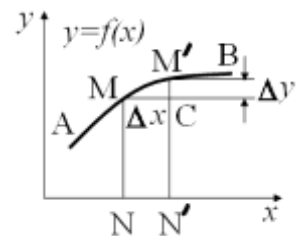
$$y + \Delta y = f(x + \Delta x)$$

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$$

4. Непрерывная функция

5. Производная функции в точке

$$y' = f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{df}{dx}$$



$$z = f(x, y)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x}; \quad \frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}$$

6. В математике, **градиент** функции f это вектор, который указывает направление наискорейшего роста этой функции, и чей модуль равен скорости ее изменения в этом направлении

$$f(x, y, z) : \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right)$$

$$\mathbf{grad}f = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{k} \equiv \nabla f$$

или

$$\mathbf{grad}f = \frac{\partial f}{\partial x_1} \mathbf{e}_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \mathbf{e}_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} \mathbf{e}_3 \equiv \nabla f$$

$$df = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} dx_3 = \mathbf{grad}f \cdot d\mathbf{x}$$

Производная функции по направлению $\mathbf{e}(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{e}} = \frac{\partial f}{\partial x_1} de_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} de_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} de_3 = \nabla f \cdot \mathbf{e}$$

или

$$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{e}} = \|\nabla f\| \cdot \cos \angle \nabla f, \mathbf{e}$$

О непрерывности физических величин

В формулах, обобщающих экспериментально установленные законы, предполагается, что температура, концентрации компонентов, электрический потенциал, давление, скорость (компоненты вектора скорости) – непрерывные функции координат. Но насколько понятие «непрерывности» применимо к реальным объектам?

На самом деле понятие непрерывной величины любой природы есть в действительности абстракция. Наблюдаемые величины либо дискретны по своей сути, но приближенно представляются как непрерывные, если величина «кванта» исследуемой величины относительно мала, либо предположение о непрерывности данной величины является физической гипотезой, достаточной или полезной для решения тех или иных задач. Типичными примерами таких гипотез о непрерывности, не вызывающих сомнений в бытовом сознании (и как гипотез даже не воспринимающихся), являются представления о непрерывном пространстве (расстоянии) и времени – понятиях, которые одновременно относятся и к фундаментальным физическим понятиям.

Диаметр электрона 10^{-11} см

Можно ли ввести понятие меньшего расстояния? - вопрос открытый

Минимальный квант времени можно определить как время, за которое свет (имеющий максимальную известную в природе скорость $3 \cdot 10^{10}$ см/сек) проходит минимально известное в природе расстояние

$$10^{-11} / 3 \cdot 10^{10} \sim 3 \cdot 10^{-21}$$

Существуют ли меньшие промежутки времени, и имеют ли они смысл ?

Квант (от лат. *quantum* — «сколько») — неделимая порция какой-либо величины в физике

Закон Фурье

$$q = -\lambda_T \nabla T \quad (1)$$

$$T = T(x, y, z)$$

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k}$$

Теплопроводность — это перенос теплоты структурными частицами вещества (молекулами, атомами, электронами) в процессе их теплового движения. Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур, **но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества**. Явление теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет температуру тела, передаётся другому телу при их взаимодействии или передаётся из более нагретых областей тела к менее нагретым областям..

Для газа:
$$\lambda_T = \frac{1}{3} C_V \rho \langle V_T \rangle \langle l \rangle$$

C_V - удельная теплоемкость газа при постоянном объеме,
 ρ - плотность газа,
 $\langle V_T \rangle$ - среднеарифметическая скорость теплового движения молекул,
 $\langle l \rangle$ - длина свободного пробега.

Закон Фика

$$\mathbf{J}_k = -D_k \nabla C_k \quad (2)$$

Явление диффузии заключается в том, что происходит самопроизвольное проникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел. Диффузия сводится к обмену масс частиц у этих тел, возникает и продолжается пока существует градиент концентрации

$$C_k = C_k(x, y, z)$$

$$\nabla C_k = \frac{\partial C_k}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial C_k}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial C_k}{\partial z} \mathbf{k}$$

Механизмы диффузии в разных средах - различны. Согласно кинетической теории газа

$$D_k = \frac{1}{3} \langle V_T \rangle \langle l \rangle$$

закон Дарси

$$\mathbf{J}_f = -k_f \nabla p \quad (4)$$

Теория фильтрации - раздел гидродинамики, посвященный исследованию движения жидкостей через пористые среды, то есть тела, пронизанные системой сообщающихся между собой пустот (пор). Пористыми являются многие природные тела: грунты, горные породы, древесина, кожа, кость, мягкие ткани животных, а также искусственные материалы: строительные (бетон, кирпич), пищевые (хлеб), искусственная кожа, керамика, металлические детали, полученные методом порошковой металлургии, и т.д. Пористой является почва, верхний слой грунта, служащий основой земледелия. Уже это простое перечисление показывает ту огромную роль, которую играют пористые среды в жизни людей. Характерная особенность всех этих материалов - способность накапливать в себе жидкость и позволять ей двигаться под действием внешних сил. По крайней мере три важнейших аспекта нашей жизни напрямую зависят от движения жидкостей через пористые среды.

1. Прежде всего это движение жидкостей через пористые биоматериалы в живых организмах.
2. Ту же роль играет движение влаги в почве. В конечном счете именно фильтрующаяся или просачивающаяся в почве вода приносит растениям питательные вещества и служит основой питания всего живого.
3. Наконец, основные источники энергии XX века - нефть и газ добываются из глубоко залегающих подземных пластов. Накопление нефти и газа в этих пористых пластах-коллекторах и основные технологии извлечения (добычи) управляются законами теории фильтрации и служат одним из главных источников ее задач.

$$p = p(x, y, z) \quad \nabla p = \frac{\partial p}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{k}$$

Закон Ньютона

$$\mathbf{F} = -\eta_f \nabla V \quad (5)$$

ЗАКОН ТРЕНИЯ НЬЮТОНА в гидромеханике - эмпирическая формула, выражающая пропорциональность напряжения трения между двумя слоями прямолинейно движущейся вязкой жидкости относительной скорости скольжения этих слоев, т. е. отнесенному к единице длины изменению скорости по нормали к направлению движения. Предложена И. Ньютоном в 1687. В соответствии с этим законом напряжение трения, действующее на поверхности элементарного объема жидкости или газа, пропорционально градиенту скорости du/dy , где u - составляющая скорости жидкости вдоль поверхности, а y - координата, нормальная поверхности:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

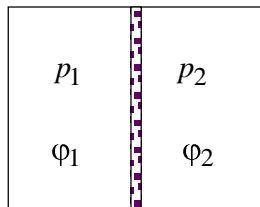
Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом внутреннего трения жидкости или динамическим коэффициентом вязкости

Градиент векторной величины:

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{array} \right\}$$

Когда два или более таких процесса протекают одновременно в одних и тех же областях пространства, они налагаются друг на друга и вызывают появление новых эффектов.

Пример



↑
капилляр, вентиль,
пористая
перегородка или
проницаемая
мембрана

В жидкости содержатся подвижные заряженные частицы. Состав подсистем и их температура предполагаются вначале одинаковыми

объемный поток вещества $\mathbf{J}_f = -k_f \nabla p$

Объемный поток электрического заряда $\mathbf{J}_e = -\kappa_e \nabla \varphi$ (1825)

Явления электропроводности и фильтрации накладываются друг на друга, и возникают «побочный эффект» - *перенос вещества под действием перепада электрического потенциала (эффект Реуса или электроосмос)* (1809) .

$\mathbf{J}_m = -L_{me} \nabla \varphi$ (6) эмпирический подход

Другим эффектом, сопровождающим наложение указанных процессов, является *перенос электрического заряда под действием перепада давления (потокопроводность – необщепринятое название)*.

$\mathbf{I} = -L_{em} \nabla p$ (7)

Наблюдаются также эффекты, обратные электроосмосу или потокопроводности, в частности, **возникновение разности потенциалов при фильтрации жидкости**, несущей свободный заряд (**эффект Квинке**, 1859). Этот эффект наблюдается и в однокомпонентных системах, например в ртути, и проявляется в появлении разности потенциалов при ее продавливании через систему стеклянных капилляров (А. Клемм, 1958). Величина $\Delta\varphi$ при этом называется потенциалом потока.

Никаких указаний о взаимосвязи между явлениями **электроосмоса** и **потокопроводности** эмпирическое описание не содержит

Ситуация еще более осложняется, когда мембрана проницаема для одних (k-х) компонентов и непроницаема для других веществ.

В простейшей бинарной системе $\mathbf{J}_k = -D_k \nabla C_k$ $C_1 + C_2 = const$

Если диффузия накладывается на процесс электропроводности, опять возникают "побочные" эффекты. Одним из них является **электрофорез** - перенос коллоидных частиц под действием приложенного напряжения. В отсутствие полупроницаемых мембран указанный процесс называется **электролизом**.

$$\mathbf{J}_k = -L_{ek} \nabla \varphi \quad (8)$$

где L_{ke} - коэффициент электроосмотической диффузии k-го вещества

Другим «побочным» явлением является **осмос** и **бародиффузия** - перенос k-х веществ под действием соответственно перепада давлений на мембране

$$\mathbf{J}_k = -L_{kf} \nabla p \quad (9)$$

L_{kf} коэффициент осмотической фильтрации

Еще более сложным является случай, когда в системе отсутствует тепловое равновесие, т.е. имеются перепады температуры.

Кроме явления теплопроводности, перепад температур вызывает целый ряд «побочных» эффектов

термодиффузия $\mathbf{J}_k = -D_{kT} \nabla T$ (10)

термоосмос Феддерсен (1872) (отличается лишь наличием полупроницаемых мембран)

Другую группу явлений составляют **термоэлектрические** эффекты. **Термоэлектрические явления** широко используются в технике для измерения температур, в термоэлектрических преобразователях тепловой энергии и в холодильной технике.

Это – **эффекты Зеебека** (1823), **Пельтье** (1834) и **Томсона** (1854)

Эффект Зеебека - возникновение электрического тока под действием перепада температур

$$I = - L_{\text{eq}} \Delta T, \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

L_{eq} - термоэлектрический коэффициент

Эффект Пельтье - поглощение или выделение тепла на горячем спае термопары при пропускании через него тока

Эффект Томсона - выделение тепла одним из электродов термопары и поглощение его другим электродом при прохождении тока через термопару

При наличии магнитных полей к термоэлектрическим явлениям добавляется целая группа **терромагнитных** и **гальваномагнитных** явлений.

К первым относятся изменение коэффициентов теплопроводности в магнитном поле **\mathbf{B}** и возникновение градиента температуры и ЭДС в направлении, перпендикулярном потоку тепла, под действием поперечного магнитного поля **\mathbf{B}** (эффекты Риги- Ледука (1887) и Эттинсгаузена - Нернста (1886)).

К гальваномагнитным явлениям относятся возникновение под действием магнитного поля ЭДС в направлении, перпендикулярном электрическому току **\mathbf{I}** (**эффект Холла**); возникновение градиента температур и ЭДС в направлении, перпендикулярном электрическому току (эффекты Эттинсгаузена (1887) и Нернста (1887)).

Среди гальваномагнитных явлений особую роль играет эффект Холла, используемый в МГД генераторах электрической энергии, в измерительной технике (магнитные датчики Холла) и т.д.

Различные подходы к описанию явлений на стыках различных дисциплин

Феноменологический подход. Существует несколько подходов к изучению явлений на стыках естественных наук. Один из них - чисто эмпирический (феноменологический) подход. При чисто эмпирическом описании эффекты наложения описываются путем добавления новых членов к упомянутым выше законам.

Недостатком эмпирического подхода является отсутствие общей теории таких процессов, которая указывала бы на связь двух или более налагающихся процессов, позволяла предсказать количество возможных эффектов такого рода, систематизировать их, дать методологически единое их описание, установить факторы, влияющие на величину этих эффектов и возможность их практического использования.

Справедливости ради надо заметить, что большинство из упомянутых явлений рассматриваются и в **статистической механике** и в кинетической теории. Эти теории дают более глубокое физическое описание явлений и потому более удобны для физиков. Однако они **базируются на известных моделях молекул** и применимы лишь для ограниченного круга явлений. По этой причине они не обеспечили разработку макроскопической теории необратимых процессов, приемлемой для инженеров.

Определения

Такой теорией стала термодинамика необратимых процессов (ТНП)

1. Всякий материальный объект, всякое тело, состоящее из большого числа частиц, называется **термодинамической системой**.
2. **Тело** – вещество, взятое в определенном объеме и характеризующееся физическими признаками, которые могут быть измерены (масса, объем, давление, температура). Классическая термодинамика рассматривает такие тела как целое.
3. Макроскопические признаки, характеризующие макроскопическую систему и ее отношение к окружающим телам, называются **макроскопическими параметрами**
4. Различают **параметры внешние и внутренние**. Первые – определяются положением тел, не входящих в изучаемую систему; вторые – определяются совокупным движением и распределением в пространстве входящих в систему частиц.
5. Совокупность независимых макроскопических параметров определяет **состояние системы**

6. Величины, не зависящие от предыстории системы и полностью определяемые ее состоянием в данный момент, называются **функциями состояния**.

Термодинамическими переменными называются величины, количественно выражающие термодинамические свойства системы. Переменные, значения которых фиксированы при рассмотрении конкретной задачи, называются **термодинамическими параметрами**. Набор термодинамических переменных состояния определяется не только физической природой изучаемой системы и ее преобразованиями, но также схемой, принятой для ее описания, т.е. в некотором смысле является субъективным.

7. Если все признаки, характеризующие изучаемое тело, одинаковы во всех его частях, то говорят, что **тело – однородно**. Если тело представляет собой смесь веществ, то говорят, что оно химически неоднородно. О химически однородном теле (материале) говорят лишь тогда, если все вещества в разных частях тела присутствуют в равных пропорциях.

8. Состояние системы называется **стационарным (установившимся)**, если параметры системы с течением времени не изменяются. Если свойства системы постоянны в каждой точке (не зависят от координат, но зависят от времени), то состояние такой системы называется однородным.

Если, в системе не только все параметры не изменяются во времени, но и нет никаких стационарных потоков за счет действия каких-либо внешних источников, то такое состояние системы называется **равновесным**.

9. Если некоторые параметры системы меняются со временем, то говорят, что в такой системе **происходит процесс**.

Процесс перехода из неравновесного состояния в равновесное называется **релаксацией**. Промежуток времени, в течение которого система возвращается в состояние равновесия, называется **временем релаксации**.

Процесс, включающий в себя только равновесные состояния, называется равновесным. Иначе, **равновесным (квазистатическим) называется процесс**, протекающий бесконечно медленно по сравнению со временем релаксации системы к термодинамическому равновесию. Стационарный процесс может быть неравновесным.

10. Различают **изолированные системы**, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни массой; **закрытые** (или замкнутые) термодинамические системы, которые обмениваются с окружающей средой энергией, но не массой, и **открытые** термодинамические системы, обменивающиеся со средой и энергией, и массой.

Классическая термодинамика, изучающая равновесные (обратимые) процессы, для необратимых процессов устанавливает лишь неравенства, которые указывают возможные направления этих процессов.

В термодинамике необратимых процессов системы, в которых такие процессы протекают, рассматриваются как **непрерывные среды**, а их параметры состояния – как непрерывные функции координат (x, y, z) и времени t .

Температура $T = T(x, y, z, t)$

Массовые концентрации компонентов $C_k = C_k(x, y, z, t)$

Давление $p = p(x, y, z, t)$

Компоненты вектора скорости $u, v, w = u, v, w(x, y, z, t)$

Термомеханика = Термодинамика необратимых процессов + Механика сплошной среды, теория поля, вариационные принципы

Теория дифференциальных уравнений в частных производных