

Road to IPhO

Тепловое оксидирование проволоки

Введение

Тепловое оксидирование – это процесс образования оксидной плёнки на металле при повышенных температурах в присутствии кислорода. В данной задаче будет исследоваться оксидирование на поверхности меди.

Физические постоянные

- Универсальная газовая постоянная $R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$.
- Температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha = 5.80 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{К}}$.
- Молярная масса меди $\mu = 63.5 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$

Используемые в задаче обозначения

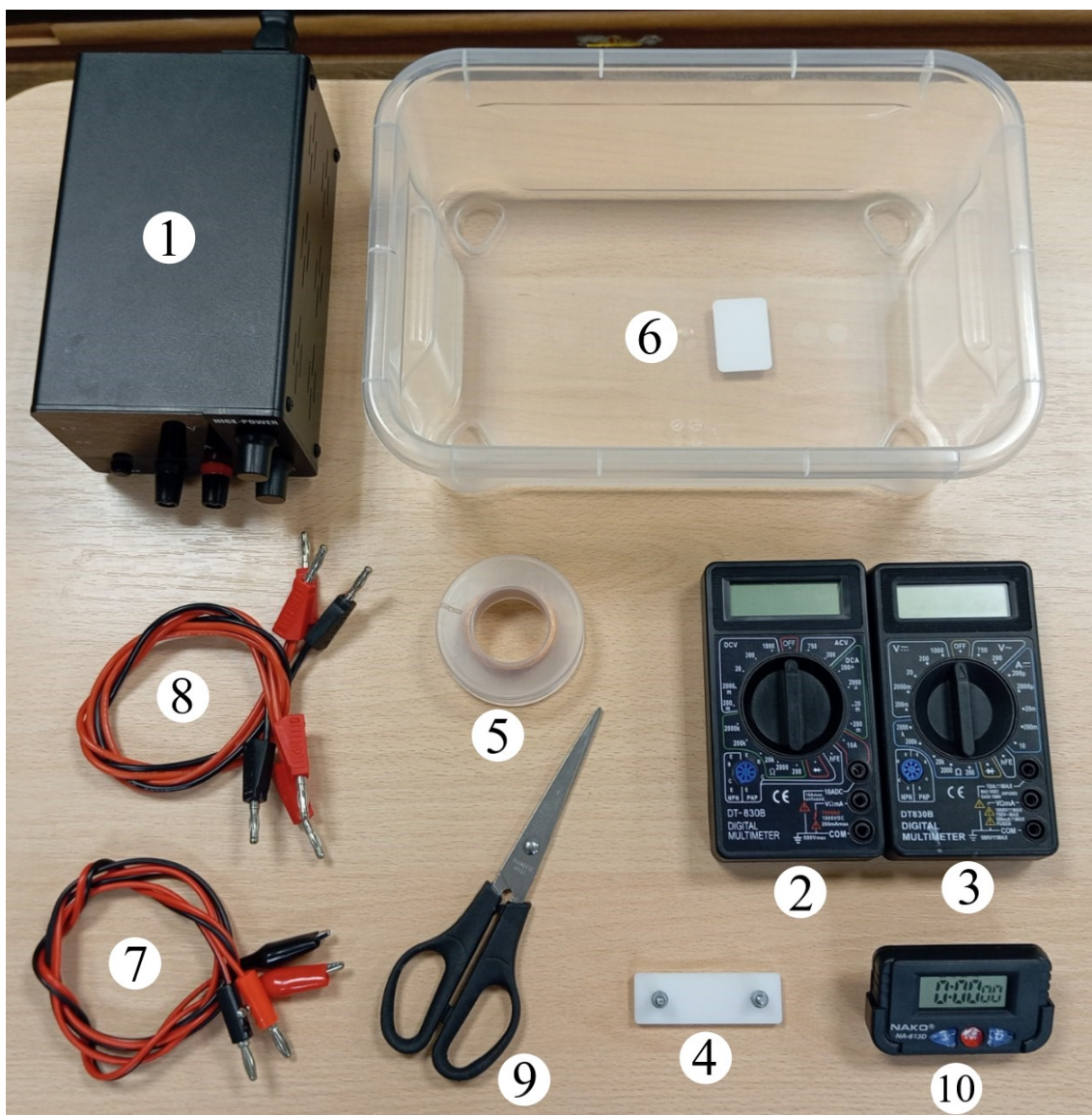
- T – температура проволоки в Кельвинах.
- $T_0 = 295 \text{ К}$ – температура окружающей среды.
- Удельное сопротивление меди: $\rho(T) = \alpha T$.
- Мощность теплотерь в окружающую среду: $P_{out} = \beta S(T - T_0)$, где S – площадь поверхности проволоки, T – её температура, β – коэффициент теплоотдачи.
- $r_0 = 0.05 \text{ мм}$ – радиус выданной проволоки.
- L – длина проволоки.
- I – сила тока через источник.
- U_0 – напряжение на проволоке при $t = 0$.
- U_m – установившееся напряжение на проволоке (в части А, когда оксидирование вносит незначительный вклад).
- $\rho_m = 8920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность меди.
- c_m – удельная теплоемкость меди.
- r – радиус проводящей части проволоки.

Примечания

- Все температуры в данной задаче выражаются в Кельвинах.
- Образцы проволоки, которые вы используете для измерений, будут иметь разную длину L .

Road to IPhO

Оборудование

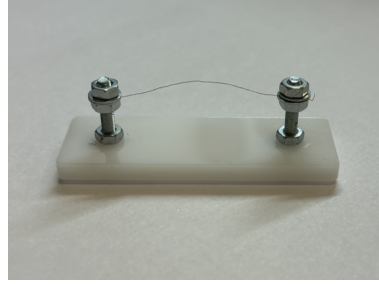


1. Источник постоянного тока
2. Мультиметр в режиме вольтметра
3. Мультиметр в режиме амперметра¹
4. Измерительный стенд
5. Отрезок медной проволоки
6. Контейнер
7. Соединительный провод банан–крокодил (2 шт.)
8. Соединительный провод банан–банан (3 шт.)
9. Ножницы
10. Секундомер

¹Если через амперметр пропустить ток больше, чем предполагает выбранный на нем режим, амперметр может прийти в негодность. **НОВЫЕ АМПЕРМЕТРЫ ВЫДАВАТЬСЯ НЕ БУДУТ.**

Road to IPhO

Проволоку в измерительном стенде предполагается закреплять, как показано на рисунке ниже.



ВАЖНО! Если через проволоку течет ток $I > 1.5$ А, то на её поверхности медь замещается на непроводящий оксид (как в части **В**). Поэтому если вы значительное время (> 10 с) пропускали через проволоку ток $I > 1.5$ А, то она уже **НЕ БУДЕТ** по свойствам эквивалентна новой. Далее, в рамках этой задачи, всюду, где предлагается измерить что-либо с проволокой, подразумевается, что измерения надо проводить на **новой проволоке**. Разумно рассчитывать используемые количества проволоки в ваших измерениях, новые отрезки медной проволоки выдаваться **НЕ БУДУТ**.

Часть А. Остывание в воздухе (5.0 баллов)

В данной части задачи исследуется процесс нагрева проволоки на небольших токах (до 1.5 А), при которых в силу небольшой температуры проволоки окисидирование будет вносить малый вклад. Поэтому **в рамках этой части** считайте, что у проволоки не меняются геометрические размеры, и можно не менять её между измерениями.

A1 Установите ток через источник 1.4 А. Подуйте на проволоку и выберите в листах ответов верный вариант. **0.2**
Объясните почему так произошло.

Далее при всех измерениях накрывайте проволоку контейнером, так чтобы потоки воздуха не повлияли на ваши измерения. Причем проволоку нужно расположить посередине контейнера, чтобы максимально отдалить от щелей под контейнером.

A2 Снимите зависимость установившегося напряжения U_m через проволоку от силы тока $I < 1.5$ А через проволоку. Сделайте не менее 15 измерений. **0.6**

A3 Теоретически получите зависимость $T(U)$. Ответ выразите через α, I, L, r_0, T, U . **0.2**

A4 Запишите уравнение теплового баланса для проволоки. Ответ выразите через $U, I, c_m, L, r_0, \rho_m, \beta, T, T_0, \frac{dT}{dt}$. **0.3**

A5 Теоретически свяжите установившееся напряжение U_m и силу тока I через проволоку. Ответ запишите через $\alpha, T_0, r_0, L, \beta, U_m, I$. **0.3**

A6 Постройте график зависимости U_m и I в таких осях, в которых он будет линейным. Из графика получите значение коэффициента теплоотдачи β . **1.2**

Примечание. Если выполнить этот пункт не удалось, далее используйте значение $\beta = 350 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ и **явно укажите это в решении**.

A7 Используя результаты пунктов **A3** и **A4**, получите теоретическую зависимость напряжения на проволоке U от времени t . Ответ выразите через $U_0, \alpha, \beta, I, r_0, L, T_0, \rho_m, c_m, U, t$. **0.6**

Road to IPhO

A8 Снимите зависимость напряжения на проволоке от времени в диапазоне 0–5 с после подключения к источнику при силе тока через него $I = 1.0$ А. Укажите характерное время, за которое напряжение на проволоке устанавливается. **1.0**

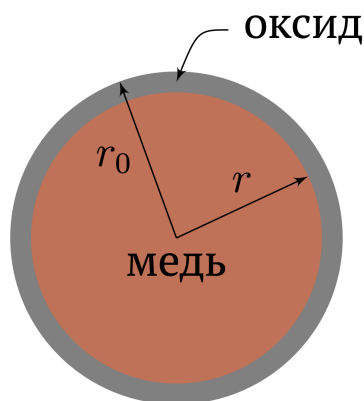
Примечание. Для выполнения этого пункта разрешается использовать смартфон, поместив работающий секундомер рядом с вольтметром и засняв процесс установления напряжения.

A9 Постройте линеаризованный график зависимости U от t , измеренной в пункте **A8**. Из графика определите удельную теплоемкость меди c_M . **0.5**

A10 Современная теория теплоемкости твердых тел утверждает, что молярная теплоемкость твёрдых тел примерно равна $3R$. Оцените удельную теплоемкость c_M^{th} исходя из этой теории. **0.1**

Часть В. Термическое оксидирование (7.0 баллов)

В этой части задачи будет исследоваться оксидирование меди. При нагреве медь замещается на непроводящий оксид, из-за чего сопротивление проволоки увеличивается. Однако тепловые свойства оксида точно такие же как и у меди, а значит эффективная площадь, с которой тепло передаётся воздуху, не изменяется.



Измерения в части **В** проводите по следующему алгоритму:

1. Вставьте новую проволоку в измерительный стенд.
2. Выберите и укажите силу тока I_n в диапазоне $[2.0; 2.6]$ А, при которой будете проводить измерение. n – номер измеряемого образца проволоки.
3. Измерьте сопротивление проволоки при комнатной температуре R_n , используя токи меньше 100 мА (чтобы проволока не нагревалась).
4. Снимите зависимость напряжения на проволоке от времени в диапазоне 0 – 300 с или до перегорания проволоки, при силе тока через проволоку $I_n \in [2.0; 2.6]$ А.
5. **Постройте график** измеренной зависимости и проведите прямую $U(t) = U_0 + \gamma(I_n)t$ по начальному линейному участку графика. **Рассчитайте** численное значение $\gamma(I_n)$.
6. Снимите проволоку и больше её для измерений не используйте.

B1 Проведите измерения, согласно алгоритму выше, для 5-ти различных значений I из указанного диапазона. **4.0**

Road to IPhO

Характерное время, полученное в пункте **A8**, мало, поэтому считайте, что проволока в каждый момент времени находится в термодинамическом равновесии, то есть процесс квазистатический.

B2 Выразите длину L_n образца проволоки с номером n через α, T_0, r_0, R_n . По полученным ранее данным пересчитайте L_n . **0.1**

B3 Выразите температуру проволоки T через I, β, L, U, r_0, T_0 . **0.1**

B4 Выразите напряжение на проволоке U через $I, \alpha, L, T(U)$ и радиус проводящей части проволоки $r(t)$. **0.1**

B5 Используя результаты пунктов **B3** и **B4**, получите теоретическую зависимость $r(t)$. Ответ выразите через $I, L, \alpha, \beta, T_0, r_0, t, \gamma(I), U_0$. **0.7**

B6 Разложите полученное $r(t)$ в ряд Тейлора по степеням t до линейного члена: $r(t) = r_0 - \delta t$. Выразите δ через $r_0, \gamma(I), \alpha, T_0, L, I, U_0$. **0.5**

Модель Дила–Гроува – это математическая модель, описывающая рост оксидных слоёв на поверхности нагретого металла. Согласно этой модели:

$$\frac{dX_o}{dt} = B e^{-E_A/RT}$$

где $X_o(t) = r_0 - r(t)$ – толщина оксидного слоя в момент времени t ; B – некая константа; E_A – молярная энергии активации (минимальное количество энергии на 1 моль вещества, которое должно быть доступно реагентам для возникновения химической реакции); T – температура проволоки. Указанное уравнение выполняется до тех пор, пока слой оксида очень тонкий, с толщиной порядка толщины оксидной плёнки на медной проволоке, хранящейся при комнатной температуре.

B8 Укажите размерность E_A . **0.2**

B9 Найдите E_A . **1.3**