

POMIAR WSPÓŁCZYNNIKA PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ ALUMINIUM

- I. Cel ćwiczenia:** pomiar współczynnika przewodności cieplnej aluminium.
- II. Przyrządy:** zestaw doświadczalny złożony z izolowanego aluminiowego walca, grzałki, chłodnicy, czterech termometrów, pompy dozującej.
- III. Literatura:**
- [1] J. L. Kacperski – I pracownia fizyczna.
 - [2] M. Jeżewski – „Fizyka”.
 - [3] T. Rewaja (praca zbiorowa) – Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki na politechnice.
 - [4] Sz. Szczeniowski „Fizyka doświadczalna” cz. II – „Ciepło i fizyka drobinowa”.
 - [5] Encyklopedia fizyki, tom III.

IV. Wprowadzenie

Proces przekazywania energii z jednego układu ciał do drugiego (lub z jednego obszaru ciała do drugiego) w wyniku różnicy temperatur nazywamy przewodnictwem cieplnym.

Przepływ ciepła związany jest z występowaniem gradientu temperatury. Kierunek przepływu jest przeciwny do kierunku wzrostu temperatury. Gęstość strumienia ciepła q wynosi:

$$q = -\chi \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Jest to energia przenoszona w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię, χ nazywamy współczynnikiem przewodności cieplnej. Równanie (1) odnosi się do przypadku jednowymiarowego, tzn. przepływu ciepła wzdłuż osi x . Przepływ ciepła trwa do momentu zrównania się temperatur. Może on odbywać się dzięki następującym zjawiskom fizycznym:

- a) konwekcji
- b) promieniowania,
- c) przewodnictwa.

ad a) **konwekcja (unoszenie)** to przenoszenie energii razem z materią poprzez przemieszczanie się masy cieczy lub gazu.

ad b) **promieniowanie** to wymiana ciepła polegająca na wyemitowaniu (lub pochłonięciu) promieniowania elektromagnetycznego wytworzonego przez atomy lub cząsteczki wzbudzone kosztem ciepła lub energii wewnętrznej ciała (albo odwrotnie – powstaniu energii cieplnej kosztem pochłoniętej energii promienistej).

ad c) **przewodnictwo** to przenoszenie energii w ciele z miejsc o wyższej temperaturze do miejsc o temperaturze niższej polegające na przekazywaniu energii kinetycznej w zderzeniach cząsteczek (więcej o trzech sposobach przekazu ciepła w rozdziale **IX Uzupelnienie**),

W przypadku metali – podstawowy wkład w proces przewodnictwa ciepła wnoszą elektrony, znacznie mniejszy jony siatki krystalicznej. W związku z tym pomiędzy przewodnością elektryczną i cieplną metali istnieje wyraźny związek.

W ogólnym przypadku przewodność cieplna zależy od temperatury.

V. Metoda pomiaru

Rozpatrzmy jednorodny walec o przekroju S , przecięty dwiema prostopadłymi do osi płaszczyznami, odległymi o d . Niech temperatury przekrojów są odpowiednio T_1 i T_2 . Jeśli różnica temperatur $T_1 - T_2$ nie jest zbyt duża, wówczas można przyjąć $\chi = \text{const}$. Całkowity strumień ciepła równy jest iloczynowi gęstości strumienia (wzór 1) i powierzchni przekroju walca:

$$Q = q S = -\chi \frac{dT}{dx} S \quad (2)$$

Jeśli ciepło nie przepływa przez ścianki boczne walca, wówczas strumień pozostaje stały w każdym przekroju prostopadłym do osi. Po scałkowaniu wzoru (2) otrzymujemy:

$$T = -\frac{Q}{\chi S} x + \text{const.} \quad (3)$$

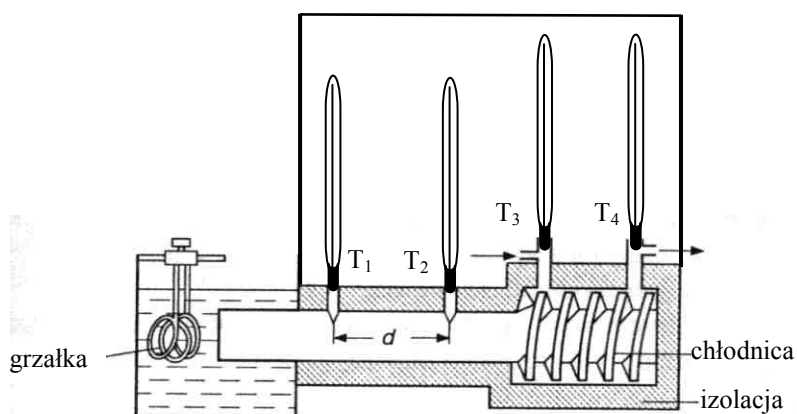
Wykorzystując warunki brzegowe $T = T_1$ dla $x = 0$ i $T = T_2$ dla $x = d$ mamy:

$$Q = \frac{\chi S (T_1 - T_2)}{d} \quad (4)$$

W ciągu czasu t przez każdy przekrój walca pomiędzy płaszczyznami granicznymi przepływa ciepło $Q \cdot t$.

VI. Układ pomiarowy.

Aluminiowy walec w doświadczeniu jest izolowany (rys.1), dlatego też w pierwszym przybliżeniu zaniedbuje się ucieczkę ciepła przez ścianki boczne i uważa się, że strumień na odcinku d pozostaje stały. (Błąd systematyczny związany ze stratami uniknie się jeśli pomiar zostanie wykonany dwukrotnie z wykorzystaniem cieczy chłodzących o różnych ciepłach właściwych. Rozkład temperatur w obu pomiarach powinien być jednakowy).



Rys. 1 Układ doświadczalny do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej metalu.

Jeśli pomiar przeprowadzany jest w warunkach równowagi, to ciepło pobrane przez wodę opływającą chłodnicę jest równe (przy zaniedbaniu strat) ciepłu, które w tym samym czasie przepłynęło pomiędzy płaszczyznami T_1 i T_2 . W takim razie mamy:

$$m c (T_4 - T_3) = \frac{\chi S t (T_1 - T_2)}{d} \quad (5)$$

gdzie m oznacza masę wody, która w czasie t przepłynęła przez chłodnicę, przy czym jej temperatura wzrosła od T_3 do T_4 .

Korzystając z równania (5) można wyznaczyć współczynnik przewodności cieplnej χ :

$$\chi = \frac{mc(T_4 - T_3)d}{St(T_1 - T_2)} \quad (6)$$

Ciepło dostarczone przez grzałkę odbiera woda opływająca chłodnicę. Różnica temperatur wody wypływającej i wpływającej oraz spadek temperatury na odcinku d pręta mierzone są za pomocą termometrów rtęciowych.

VII. Pomiary

1. Zmierzyć odległość d . Obliczyć przekrój walca S w oparciu o dane ($2R$ -średnica walca) podane w układzie doświadczalnym.
2. Włączyć grzałkę oraz po pewnym czasie pompę dozującą i ustawić odpowiednimi przełącznikami pompy prędkość przepływu wody.
3. Po osiągnięciu stanu równowagi zmierzyć temperatury T_1, T_2, T_3, T_4 .
4. Zmierzyć masę m wody przepływającą w stanie równowagi w ciągu czasu t przez chłodnicę. W tym celu podstawić zlewkę do rurki, gdzie wypływa woda z chłodnicy, włączając jednocześnie stoper. Pomiar czasu t zakończyć w momencie zebrania co najmniej 100 g wody, starając się aby była to wartość „okrągła”, np. 1 min, 2 min lub 100 s, 200 s.
5. Punkt 4-ty powtórzyć kilkakrotnie, upewniając się czy stan równowagi nadal się utrzymuje. Obliczyć wartość średnią masy wody.
6. Powyższe pomiary powtórzyć dla innej szybkości przepływu wody przez chłodnicę.

VIII. Opracowanie wyników.

1. Na podstawie wzoru (6) obliczyć współczynnik przewodności cieplnej aluminium dla obu szybkości przepływu wody przez chłodnicę.
2. Obliczyć niepewność maksymalną $\Delta\chi$ każdej serii pomiarów:

$$\Delta\chi = \pm\chi \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta T_4}{T_4 - T_3} + \frac{\Delta T_3}{T_4 - T_3} + \frac{\Delta T_1}{T_1 - T_2} + \frac{\Delta T_2}{T_1 - T_2} \right) \quad (7)$$

przy czym $\Delta S = \pm 2 S \frac{\Delta R}{R}$.

3. W przypadku, gdy niepewności wszystkich wielkości występujących we wzorze (6) możemy potraktować jako niepewności statystyczne, to niepewność $\Delta\chi$ można policzyć ze wzoru

$$\Delta\chi = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta\chi}{\delta m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\delta\chi}{\delta d} \Delta d\right)^2 + \left(\frac{\delta\chi}{\delta S} \Delta S\right)^2 + \left(\frac{\delta\chi}{\delta t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\delta\chi}{\delta T_1} \Delta T_1\right)^2 + \left(\frac{\delta\chi}{\delta T_2} \Delta T_2\right)^2 + \left(\frac{\delta\chi}{\delta T_3} \Delta T_3\right)^2 + \left(\frac{\delta\chi}{\delta T_4} \Delta T_4\right)^2} \quad (8)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \frac{\delta\chi}{\delta m} &= \frac{c(T_4 - T_3)d}{St(T_1 - T_2)}, & \frac{\delta\chi}{\delta d} &= \frac{cm(T_4 - T_3)}{St(T_1 - T_2)}, & \frac{\delta\chi}{\delta S} &= \frac{-cm(T_4 - T_3)d}{S^2t(T_1 - T_2)}, & \frac{\delta\chi}{\delta t} &= \frac{-cm(T_4 - T_3)d}{St^2(T_1 - T_2)}, \\ \frac{\delta\chi}{\delta T_1} &= \frac{-cm(T_4 - T_3)d}{St(T_1 - T_2)^2}, & \frac{\delta\chi}{\delta T_2} &= \frac{cm(T_4 - T_3)d}{St(T_1 - T_2)^2}, & \frac{\delta\chi}{\delta T_3} &= \frac{-cmd}{St(T_1 - T_2)}, & \frac{\delta\chi}{\delta T_4} &= \frac{cmd}{St(T_1 - T_2)}. \end{aligned}$$

IX Uzupelnienie

a) Konwekcja (unoszenie)

Konwekcja to przenoszenie energii razem z materią przez przemieszczanie się masy cieczy lub gazu. W przypadku, gdy jakaś część cieczy czy gazu zostanie ogrzana, rozszerza się ona, gęstość jej maleje, wskutek czego ciepła porcja cieczy lub gazu wznosi się do góry (zgodnie z prawem Archimedesesa), zaś z sąsiednich miejsc napływają chłodniejsze warstwy. Powstają wówczas tzw. prądy konwekcyjne. Prądy te w zetknięciu z przedmiotami chłodniejszymi oddają im ciepło co jest równoznaczne z ich ogrzaniem.

b) Promieniowanie

Wymiana ciepła przez promieniowanie polega na wyemitowaniu (lub pochłonięciu) promieniowania elektromagnetycznego wytworzonego przez atomy lub cząsteczki wzbudzone kosztem ciepła lub energii wewnętrznej ciała (albo odwrotnie – powstaniu energii cieplnej kosztem pochłoniętej energii promienistej).

Każde ciało o temperaturze wyższej niż 0 kelwinów staje się źródłem promieniowania, którego długości fal rozciągają się w sposób ciągły od bardzo małych do coraz większych wartości. Jeżeli temperatura ciała jest niższa od ok. 773 K (500°C) promieniowanie jest niewidoczne dla oka ludzkiego i nosi nazwę promieniowania cieplnego. Promieniowanie to o zakresie długości fal 800 nm – 10⁶ nm stanowi część ogólnego promieniowania elektromagnetycznego. Ten zakres długości fal nazywany jest promieniowaniem podczerwonym. Jeżeli ciało ma temperaturę wyższą od 773 K emituje również promieniowanie w zakresie widzialnym. Natężenie promieniowania świetlnego rośnie wraz ze wzrostem temperatury ciała, podobnie jak i natężenie promieniowania podczerwonego.

c) Przewodnictwo cieplne

Przenoszenie energii w ciele z miejsc o wyższej temperaturze do miejsc o temperaturze niższej polegające na przekazywaniu energii kinetycznej w zderzeniach cząsteczek to przewodnictwo cieplne. Przekaz energii poprzez zderzenia cząsteczek dotyczy głównie gazów i cieczy. W metalach jony dodatnie tworzą regularny i okresowy przestrzenny układ zwany strukturą krystaliczną lub siecią krystaliczną. Przekazywanie ciepła odbywa się za pośrednictwem swobodnych elektronów (nośników prądu) i fononów (drżania termiczne sieci krystalicznej można przedstawić jako zbiór skończonej liczby drgań tworzących w wyniku interferencji paczki fal zwane fononami). Sieć krystaliczną rozpatruje się jako objętość wypełnioną gazem fononowym, do którego stosują się prawa kinetycznej teorii gazów.

W przypadku ogólnym współczynnik przewodnictwa χ jest sumą współczynników przewodnictwa sieciowego χ_s i elektronowego χ_e :

$$\chi = \chi_s + \chi_e$$

W zwykłych temperaturach $\chi_e \gg \chi_s$.

Jeśli do strumienia elektronów zastosuje się metodę kinetycznej teorii gazów oraz założy, że ich średnia droga swobodna nie zależy od prędkości, to współczynnik przewodnictwa elektronowego jest równy:

$$\chi_e = 3/2(k/e)^2\sigma T \quad (9)$$

gdzie e – ładunek elektronu, k – stała Boltzmana, σ – przewodność elektryczna.

Równanie to wyraża prawo Wiedemanna- Franza.

Przy wyprowadzaniu zależności przyjęto, że elektrony podlegają rozkładowi Boltzmann'a:

$$f(E) = A \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (10)$$

gdzie $f(E)$ jest prawdopodobieństwem tego, że elektron posiada energię E , A jest stałą.

Model gazu elektronowego nie wytłumaczył zbyt niskiej z klasycznego punktu widzenia, wartości ciepła właściwego metali. Elektrony zachowują się inaczej niż cząsteczki zwykłego gazu. Podlegają zakazowi Pauliego: dwa elektrony nie mogą znajdować się w jednakowym stanie kwantowym tzn. nie mogą mieć jednakowych czterech liczb kwantowych n, l, m, s . Teoria kwantowo-mechaniczna w oparciu o statystykę Fermiego–Diraca

$$f(E) \sim \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (11)$$

(gdzie E_F oznacza tzw. energię Fermiego), daje zależność

$$\chi_e = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 \sigma T \quad (12)$$

W przypadku temperatur $T < \theta_D$ (temperatura Debye'a) zależność (9) lub (12) między χ_e i σ przestaje obowiązywać z powodu oddziaływań elektronów z fononami. Jednak dla temperatur w pobliżu 0 K oddziaływanie elektronów z fononami jest tak małe, że znowu mamy $\chi_e \sim \sigma T$.

Spośród wszystkich metali tylko Bi (bizmut) i Sb (antymon) mają χ_s bliskie wartości χ_e , co tłumaczy małą przewodność elektryczną tych metali.

Substancje o dużej przewodności χ są dobrymi przewodnikami ciepła.