



**ĆWICZENIE
29**

**WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ROZSZERZALNOŚCI
TERMICZNEJ ORAZ BADANIE PROCESÓW PRZEKAZYWANIA
CIEPŁA**

Cel ćwiczenia: pomiar wydłużenia drutu w funkcji temperatury oraz wyznaczenie liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej; zapoznanie się z procesami wymiany ciepła oraz wyznaczenie efektywnego współczynnika przenikania ciepła

Zagadnienia: oddziaływania międzyatomowe w ciele stałym, zjawisko rozszerzalności cieplnej, współczynnik rozszerzalności termicznej, mechanizmy wymiany ciepła

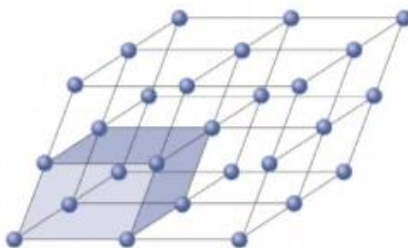
1 Wprowadzenie

1.1 Zjawisko rozszerzalności cieplnej

Zjawisko rozszerzalności cieplnej w ujęciu makroskopowym polega na zmianie rozmiarów ciał spowodowanej zmianą temperatury. Zwiększonym rozmiarom ciała odpowiada w obrazie mikroskopowym większa średnia odległość między jego atomami. Wzrost średnich odległości międzyatomowych w ciele jest spowodowany wzrostem jego temperatury.

Zjawisko rozszerzalności cieplnej może być zjawiskiem pożądanym albo niepożądanym w przyrodzie. Przykładowo, niepożądanym efektem zjawiska rozszerzalności cieplnej mamy do czynienia np. wtedy, kiedy w upalny dzień szyny kolejowe ulegają odkształceniu / wygięciu. Innym przykładem może być zjawisko kurczenia się linii energetycznych czy przewodów telefonicznych zimą, co może prowadzić do ich zerwania, dlatego też są luźno zawieszane i tworzą charakterystyczne łuki, dzięki czemu nie zrywają się w zimie. Zjawisko rozszerzalności cieplnej stosuje się w miernictwie i technice oraz w urządzeniach takich jak: termostaty bimetaliczne, żelazka, czajniki czy termostaty cieczowe w samochodach.

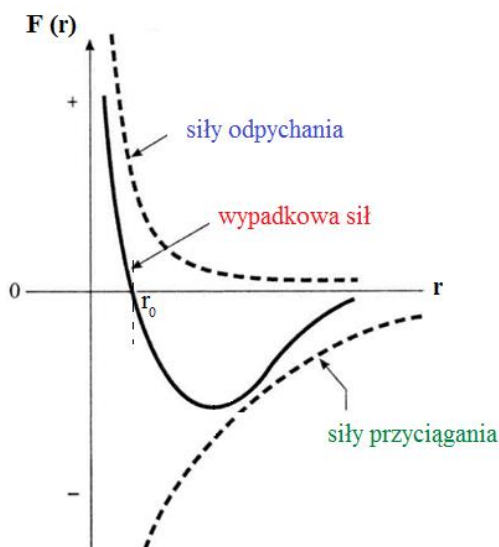
Aby wyjaśnić zjawisko rozszerzalności cieplnej w przypadku ciał stałych posłużyć się można modelem budowy ciała stałego. Ciała stałe mają budowę krystaliczną lub amorficzną (bezpostaciową). Kryształy składają się z atomów lub cząsteczek rozmieszczonych w przestrzeni ciała stałego w sposób uporządkowany, tworząc tzw. sieć krystaliczną (Rys. 1). Wzajemne odległości atomów wynoszą około 10^{-10} m.



Rys. 1. Model prostej sieci krystalicznej, przedstawiający kryształ składający się z tzw. komórek elementarnych (jedna dla przykładu zaznaczona kolorem niebieskim). W narożnikach każdej z komórek elementarnych znajdują się atomy (niebieskie kulki).

Atomy w sieci krystalicznej wykonują drgania wokół swoich położeń równowagi. Amplitudy tych drgań jak również średnie odległości między atomami zwykle rosną wraz ze wzrostem temperatury, co powoduje, że ciało stałe rozszerza się. Wzrost średnich odległości międzyatomowych należy powiązać ze wzajemnymi oddziaływaniami między atomami ciała

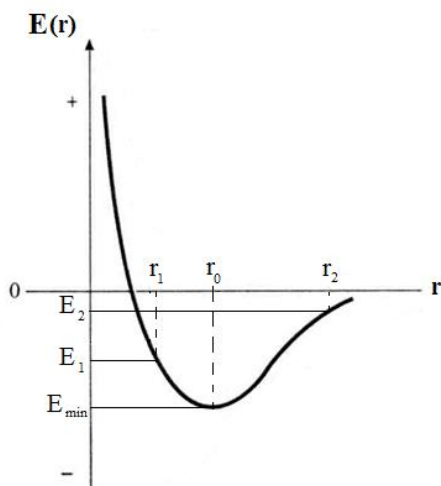
stałego. Rys. 2 przedstawia wykres sił oddziaływania pomiędzy dwoma atomami w zależności od ich wzajemnej odległości r .



Rys. 2. Wykres zależności sił oddziaływań międzyatomowych $F(r)$ w funkcji odległości między dwoma atomami r . Symbolem r_0 oznaczono położenie równowagi atomu.

Między atomami ciał stałych istnieją zarówno siły przyciągania, jak i odpychania. Z powyższego rysunku widać, że dla $r = r_0$ siły odpychania i przyciągania równoważą się i siła wypadkowa jest równa zero. W takim przypadku atom nie zmienia swojego położenia równowagi. Z kolei mówi się o wychyleniu atomów z położenia równowagi, gdy $r > r_0$ - przeważają wówczas siły przyciągania ($F(r) < 0$, tzn. zwrot siły przeciwny do zwrotu osi r), oraz dla $r < r_0$ - przeważają siły odpychania ($F(r) > 0$).

Na podstawie zależności $F(r)$ można wyznaczyć zależność energii potencjalnej w funkcji odległości między dwoma atomami $E_p(r)$. Wykres $E_p(r)$ przedstawia Rys. 3.



Rys. 3. Wykres zależności energii potencjalnej w funkcji odległości między dwoma atomami.

Atom o całkowitej energii E drga wokół punktu r_0 , któremu odpowiada minimum energii potencjalnej (E_{min}). Drgania atomów powodują zmiany ich wzajemnych odległości w przedziale od r_1 do r_2 . Zatem atomy poruszają się w przedziale od r_1 do r_2 . Jak widać na Rys. 3, ze względu na asymetrię krzywej $E_p(r)$, w wyższej temperaturze środek drgań przesunął się w prawo w stosunku do położenia równowagi r_0 , co odpowiada wzrostowi średniej odległości pomiędzy sąsiadującymi atomami. Krzywe na rysunkach 2 i 3 przedstawiają siły i energie wzajemnych

oddziaływać tylko dwu atomów, aczkolwiek należy mieć na uwadze, że każdy atom oddziałuje z wieloma atomami jednocześnie. Powodowany zmianą temperatury wzrost odległości sąsiednich atomów jest mały, ale zwielokrotniony przez liczbę atomów daje obserwowalną doświadczalnie zmianę wymiaru ciała.

Zależność $F(r)$ w pobliżu położenia równowagi r_0 opisujemy przybliżoną zależnością:

$$F = -cx + bx^2, \quad (1)$$

gdzie c i b są stałymi. Człon $F = -cx$, występujący w równaniu (1), odnosi się do drgań harmonicznym, natomiast $F = bx^2$ jest członem nieliniowym, opisującym odstępstwa od harmonicznego charakteru drgań. Przyjmując opisaną równaniem (1) zależność siły oddziaływań międzyatomowych od wzajemnej odległości między atomami można pokazać, że w wyniku drgań cieplnych średnia odległość między atomami ciała stałego różni się od r_0 o wartość \bar{x} , proporcjonalną do temperatury bezwzględnej ciała:

$$\bar{x} = \frac{bkT}{c}, \quad (2)$$

gdzie: k – stała Boltzmanna, T – temperatura bezwzględna.

Zwiększenie średniej odległości między atomami ciała podczas jego nagrzewania jest przyczyną liniowej i objętościowej rozszerzalności ciała. W celu ilościowego opisu zjawiska liniowej rozszerzalności cieplnej wprowadza się pojęcie współczynnika rozszerzalności liniowej, który można zdefiniować za pomocą następującego równania:

$$\alpha = \frac{1}{r_0} \frac{d\bar{x}}{dT}. \quad (3)$$

Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej informuje o jaki ułamek wzrasta długość obiektu wraz ze wzrostem temperatury o jeden stopień. Wstawiając do równania (3) $d\bar{x}/dT$ obliczone z równania (2) uzyskamy:

$$\alpha = \frac{bk}{r_0c}. \quad (4)$$

W ten sposób można obliczyć wartości współczynników α dla różnych materiałów. W Tabeli 1 przedstawiono przykładowe wartości współczynników rozszerzalności liniowej α dla kilku wybranych materiałów.

Tabela 1. Wartości współczynnika rozszerzalności liniowej wybranych substancji.

Substancja	α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	Substancja	α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
Lód (0°C)	51	Stal	11
Ołów	29	Szkło	9
Aluminium	23	Diament	1.2
Mosiądz	19	Kwarc	0.5
Miedź	17	Beton	12

Kolejne zadanie dotyczy procesów wymiany ciepła. Należy podkreślić, iż procesy przekazywania ciepła są bardzo ważne dla wielu kierunków inżynierskich np. budownictwa, mechaniki, fizyki czy inżynierii biomedycznej. Ponadto, istnieje wiele urządzeń (jak np. chłodnica samochodowa, podgrzewacz wody), których główną funkcją jest wymiana ciepła pomiędzy dwoma (lub więcej) płynami. Jest to ogólny termin odnoszący się do szerokiej grupy urządzeń różniących się

przeznaczeniem, budową i sposobem realizacji przepływu ciepła, dlatego konieczne jest usystematyzowanie wiedzy na temat ww. zjawisk.

1.2 Procesy wymiany ciepła – pojęcia podstawowe

Wymiana ciepła to pojęcie obejmujące cały kompleks zagadnień przenoszenia ciepła między ciałami – lub między częściami tego samego ciała, uwarunkowany występowaniem różnicy temperatur. Kierunek przebiegu zjawiska jest określony przez drugą zasadę termodynamiki. Zgodnie z nią energia w postaci ciepła jest przekazywana z obszaru o wyższej temperaturze do obszaru o niższej temperaturze, przy czym wymiana ta podlega prawu zachowania energii.

Głównym celem, przy rozwiązywaniu zagadnień przekazywania ciepła, jest obliczanie strumienia cieplnego dQ/dt [J/s=W] przenoszonego w rozpatrywanym układzie. Rozróżniamy trzy podstawowe mechanizmy wymiany ciepła: **konwekcję**, **promieniowanie** i **przewodzenie**.

Konwekcja jest to sposób przenoszenia ciepła „prądami” występującymi w cieczach i gazach, odbywa się dzięki mieszaniu się strug albo drobin o różnej temperaturze. Proces ten wynika z lokalnych różnic gęstości płynu. Podstawowym prawem opisującym konwekcję jest prawo Newtona:

$$\frac{dQ}{dt} = h_{eff} \cdot S \cdot (T - T_0) , \quad (5)$$

gdzie: h_{eff} – efektywny współczynnik wnikania ciepła [W/(m²*K)], który jest funkcją wielu parametrów, jak np.: prędkości strugi, gęstości płynu, lepkości, T – temperatura powierzchni badanego ciała, T_0 – temperatura otoczenia (początkowa).

Przekazywanie ciepła przez promieniowanie polega na emitowaniu przez ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego fal elektromagnetycznych. W wyniku promieniowania termicznego energia wewnętrzna ciała przekształca się w energię fal elektromagnetycznych, które po napotkaniu ciał lub części tego samego ciała częściowo lub całkowicie są pochłaniane i przekształcane w energię wewnętrzną. Jeżeli ilość energii wypromieniowanej przez powierzchnię jest różna od ilości pochłoniętej to następuje wymiana ciepła. Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmann wyemitowany przez ciało strumień energii rośnie proporcjonalnie do czwartej potęgi temperatury. W tym przypadku równanie opisujące przekazywanie ciepła przez radiację jest następujące:

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon \cdot \sigma_c \cdot S \cdot (T^4 - T_0^4) , \quad (6)$$

gdzie: ε – współczynnik emisyjności, σ_c – stała Stefana-Boltzmann równa 5.67×10^{-8} [W*m⁻²*K⁻⁴].

Przewodzenie ciepła jest to wymiana ciepła pomiędzy bezpośrednio stykającymi się częściami jednego lub różnych ciał, polegająca na przekazywaniu energii kinetycznej przez cząsteczki wykonujące mikroskopowy ruch. Główną przyczyną przewodzenia ciepła przez ciało jest występowanie różnicy temperatur między jego częściami. Ten rodzaj wymiany ciepła odbywa się w gazach, cieczach i ciałach stałych. Wyrażenie opisujące ten efekt ma postać:

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot S \cdot \frac{T - T_0}{l} , \quad (7)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m*K)], l – długość badanego ciała.

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Badając zjawisko rozszerzalności cieplnej ciał stałych wyznaczamy zależność zmiany jego długości od temperatury. Ze wzoru (8) wynika zależność długości ciała l od temperatury T :

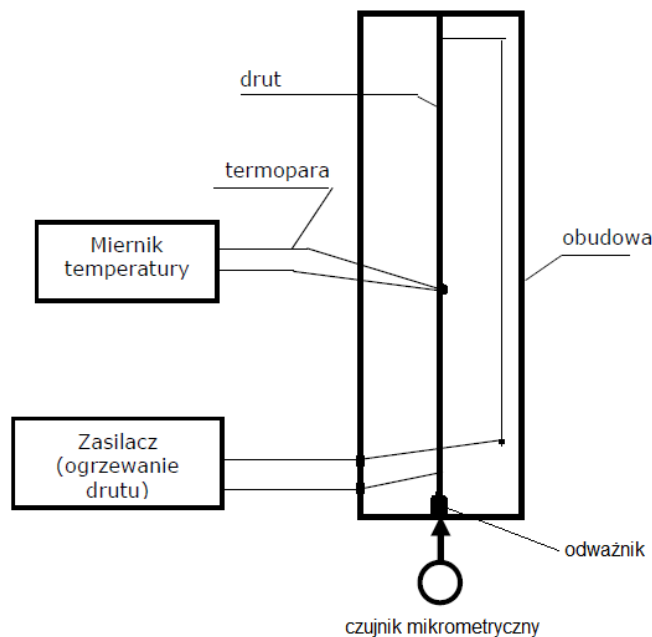
$$l_t = l_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (8)$$

gdzie: l_t – długość ciała w temperaturze T , l_0 – długość ciała w temperaturze T_0 , $\Delta T = T - T_0$, α – współczynnik rozszerzalności liniowej. Powyższe równanie jest prawdziwe w pewnym zakresie temperatur. Przekształcając równanie (8) do następującej postaci:

$$\frac{l_t - l_0}{l_0} = \alpha\Delta T, \quad (9)$$

otrzymujemy wyrażenie, z którego wynika, że na podstawie zmierzonej zależności wydłużenia ciała od przyrostu temperatury (ΔT) możemy wyznaczyć współczynnik rozszerzalności liniowej α licząc wcześniej względne wydłużenie ciała $\left(\frac{l_t - l_0}{l_0}\right)$. Wartość współczynnika α jest bowiem równa współczynnikowi kierunkowemu nachylenia prostej na wykresie przedstawiającym zależność względnego wydłużenia ciała $\Delta l/l_0$ od przyrostu temperatury ΔT .

Metoda pomiaru polega na ogrzewaniu próbki i pomiarze jej wydłużenia. Przyrosty długości spowodowane są wzrostem temperatury ciała. Schemat układu pomiarowego do badania rozszerzalności liniowej przedstawia Rys. 4.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego.

W niniejszym ćwiczeniu próbka ma kształt drutu (Rys. 4). Podwyższenie temperatury drutu osiąga się poprzez ogrzewanie go prądem elektrycznym, który bezpośrednio przezeń przepływa. Wartości natężenia prądu wskazuje zasilacz prądu stałego. Z kolei wartości napięcia przykładanego do drutu odczytujemy z woltomierza. Temperaturę drutu mierzy się za pomocą termopary, która podłączona jest do cyfrowego miernika temperatury. Temperatura drutu musi być stała na całej jego długości, dlatego aby wyeliminować niekorzystny wpływ powietrza, badany drut zamocowuje się w obudowie z przezroczystym oknem. Każdorazowa zmiana

natężenia prądu powoduje zwiększenie temperatury drutu. Odczytu temperatury należy dokonać po jej ustabilizowaniu się, co następuje wtedy, gdy ciepło Joule'a wydzielone w drucie w jednostce czasu jest równe energii przekazywanej do otoczenia. Drut jest obciążony odważnikiem, powodującym stałe niewielkie jego naprężenie. W czasie ogrzewania drutu jego długość zwiększa się i odważnik opada. Pomiaru wydłużenia dokonuje się czujnikiem mikrometrycznym (zob. materiały w zakładce Pomoce Dydaktyczne - Zasady posługiwania się przyrządami pomiarowymi).

3 Zadania do wykonania

A) Pomiary: Zestawić układ pomiarowy według schematu przedstawionego na Rys. 4. Włączyć miernik temperatury i odczytać temperaturę początkową. Zmierzyć średnicę drutu. Zwiększając stopniowo natężenie prądu w obwodzie (co 0.2A do temperatury 80°C, co 0.1A powyżej 80°C do chwili osiągnięcia temperatury ok. 120°C). Dla zadanej wartości natężenia prądu notować wartości napięcia zasilającego oraz temperatury po jej ustabilizowaniu się. W trakcie pomiarów odczytywać wartości przyrostu długości drutu w funkcji temperatury w zakresie od temperatury pokojowej do około 120°C. Otworzyć ściankę komory pomiarowej do połowy wysokości i powtórzyć wszystkie pomiary.

B) Opracowanie wyników: Sporządzić wykres zależności względnego wydłużenia ciała od przyrostu temperatury $\Delta l/l_0=f(\Delta T)$ dla zamkniętej i otwartej komory pomiarowej. Na wykres nanieść tzw. prostokąty niepewności. Metodą regresji liniowej wyznaczyć współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej badanego drutu α . Oszacować jego niepewność. Porównać wartości α w obydwu przypadkach. Znajdąc wartość α ocenić z jakiego materiału wykonany był badany w doświadczeniu drut.

Sporządzić wykres zależności mocy od różnicy temperatur $P=f(\Delta T)$ dla obydwu przypadków – tj. zamkniętej i otwartej komory pomiarowej. Na początku, środku i końcowej części wykresu nanieść niepewności pomiarów mocy. Wyjaśnić dlaczego wykres zależności mocy od temperatury jest nieliniowy, a moc potrzebna do utrzymania zadanej temperatury jest większa w przypadku otwartej komory pomiarowej.

4 Pytania:

- (1) Przedstawić graficznie i omówić oddziaływania międzyatomowe w ciele stałym (siła, energia).
- (2) Na czym polega zjawisko rozszerzalności cieplnej w ujęciu makroskopowym i mikroskopowym?
- (3) Zdefiniować termiczny współczynnik rozszerzalności liniowej (jednostka). Czy współczynnik ten jest wielkością stałą dla danego ciała?
- (4) Omówić sposób wyznaczenia termicznego współczynnika rozszerzalności liniowej.
- (5) Scharakteryzować mechanizmy wymiany ciepła.
- (6) Wyjaśnić dlaczego moc potrzebna do uzyskania danej temperatury jest większa wtedy gdy komora pomiarowa jest otwarta.

Literatura:

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki, cz 2.*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
2. Czesław Bobrowski, *Fizyka – krótki kurs*, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1998.
3. C. Kittel, *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
4. Stefan Wiśniewski, Tomasz S. Wiśniewski, *Wymiana ciepła*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1994.