

Ćwiczenie 29

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ROZSZERZALNOŚCI CIEPLNEJ METODĄ ELEKTRYCZNĄ

Cel ćwiczenia: pomiar wydłużenia względnego drutu w funkcji temperatury oraz wyznaczenie liniowego współczynnika rozszerzalności cieplnej.

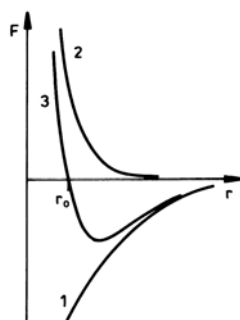
Zagadnienia: oddziaływania międzyatomowe w ciele stałym, zjawisko rozszerzalności cieplnej, współczynnik rozszerzalności termicznej, zasada działania termopary (patrz ćwiczenie 20).

29.1. Wprowadzenie

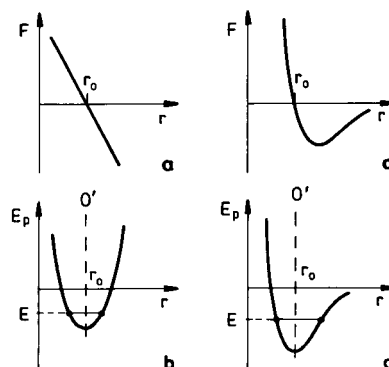
Zjawisko rozszerzalności cieplnej polega na zmianie rozmiarów ciał spowodowanej zmianą temperatury. Zwiększonym rozmiarom ciała odpowiada w obrazie mikroskopowym większa średnia odległość między jego atomami. Wzrost średnich odległości międzyatomowych, towarzyszący wzrostowi temperatury ciała, znajduje uzasadnienie w charakterze wzajemnych oddziaływań między atomami tego ciała.

Doświadczenie wskazuje na istnienie między atomami ciał stałych, cieczy i gazów zarówno sił przyciągania, jak i odpychania. Zależność tych sił od wzajemnej odległości między atomami jest różna dla sił przyciągania i odpychania. Dla bardzo małych odległości przeważają siły odpychania, dla większych - przyciągania. Przykładowy przebieg zależności sił przyciągania F_1 i odpychania F_2 od wzajemnej odległości między dwoma oddziałującymi atomami przedstawiono na rys. 29.1. Na rysunku tym pokazano również zależność siły wypadkowej $F = F_1 + F_2$ od odległości

między atomami. Dla $r = r_0$ siły F_1 i F_2 równoważą się wzajemnie i siła wypadkowa $F = 0$. Gdy odległość między sąsiadującymi atomami staje się mniejsza od r_0 , przeważają siły odpychania; gdy odległość ta jest większa od r_0 - przeważają siły przyciągania. W ten sposób r_0 jest odległością między atomami, odpowiadającą stanowi równowagi, w jakiej znajdowałyby się atomy wówczas, gdyby nie było ruchu cieplnego zakłócającego równowagę.



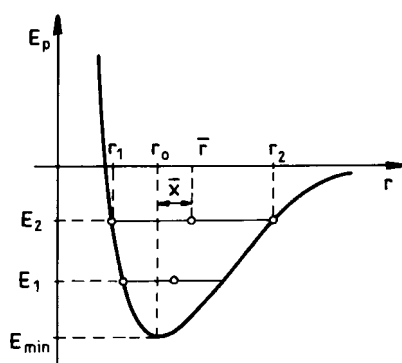
Rys. 29.1.
Siły oddziaływań międzyatomowych w funkcji odległości między cząsteczkami: 1 - siły przyciągania F_1 , 2 - siły odpychania F_2 , 3 - wypadkowa sił F_1 i F_2



Rys. 29.2.
Siły oddziaływań i odpowiadające im energie potencjalne; a i b - siła harmoniczna i odpowiadająca jej energia potencjalna, c i d - siła anharmoniczna i odpowiadająca jej energia potencjalna

Ze wzrostem temperatury zwiększa się amplituda drgań poszczególnych atomów. Gdyby wychylenia z położenia równowagi były w obydwie strony jednakowe, średnia odległość między atomami byłaby niezależna od amplitudy drgań i równa r_0 . Samo zwiększenie amplitudy drgań nie prowadziłoby zatem do zwiększenia objętości ciała. Sytuacja taka wystąpiłaby wówczas, gdyby zależność siły wypadkowej działającej na atom wychylony z położenia równowagi od wielkości tego wychylenia była liniowa, jak na rys. 29.2a. Wówczas krzywa przedstawiająca zależność energii potencjalnej od wzajemnej odległości między atomami byłaby

symetryczna względem osi O' , przechodzącej przez punkt r_0 na rys. 29.2b. W rzeczywistości jednak siła przywracająca atom do położenia równowagi nie ma przebiegu liniowego w otoczeniu punktu r_0 , czego konsekwencją jest asymetria krzywej przedstawiającej zależność energii potencjalnej od wzajemnej odległości między atomami (rys. 29.2c,d). Atom o całkowitej energii równej E drga wokół punktu r_0 , któremu odpowiada minimum energii potencjalnej. Ruch atomu ograniczony jest barierą energii potencjalnej. Cząstka o energii całkowitej równej E nie może znaleźć się w obszarze, któremu odpowiada energia potencjalna większa od E .



Rys. 29.3. Energia potencjalna oddziaływań między-atomowych w funkcji odległości między atomami

Jak widać z rysunków 29.2d i 29.3 maksymalne wychylenia atomu z położenia równowagi nie są symetryczne względem E_0 . Wraz ze wzrostem energii obszar dostępny dla danego atomu, zawarty między r_1 i r_2 , poszerza się, co odpowiada większej amplitudzie drgań, a średnie położenie atomu \bar{r} względem najbliższego sąsiada przesuwa się ku wartościom większym od r_0 (rys. 29.3).

Przedstawiony obraz jest oczywiście bardzo uproszczony. Krzywe na rysunkach 29.1 i 29.3 przedstawiają siły i energie wzajemnych oddziaływań tylko dwu atomów i to w przypadku, gdy nie tworzą one wiązania chemicznego. Tymczasem charakter oddziaływań międzyatomowych w ciałach stałych i cieczech jest bardziej złożony.

Każdy atom oddziałuje z wieloma atomami jednocześnie. Można jednak z pewnym przybliżeniem rozwiązać zagadnienie rozszerzalności cieplnej

ciał, zakładając określoną zależność siły wzajemnego oddziaływania między atomami od wielkości wychylenia atomu z położenia równowagi.

Siła wzajemnego oddziaływania między atomami ciała stałego nie zależy od przemieszczenia x atomu z położenia równowagi według równania $F = -cx$ (c - współczynnik sprężystości), lecz zawiera także składniki nieliniowe, opisujące odstępstwa od harmonicznego charakteru drgań. Przyjmijmy w pierwszym przybliżeniu, że siła działająca na atom wychylony z położenia równowagi wyraża się zależnością

$$F = -cx + bx^2. \quad (29.1)$$

Przyjmując opisaną równaniem (29.1) zależność siły oddziaływań międzyatomowych od wzajemnej odległości między atomami można pokazać [1], 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

$$\bar{x} = \frac{bkT}{c^2}, \quad (29.2)$$

przy czym: k - stała Boltzmanna, T - temperatura bezwzględna, b i c - współczynniki występujące w równaniu (29.1).

Zwiększenie średniej odległości między atomami ciała stałego podczas jego nagrzewania jest przyczyną liniowej i objętościowej rozszerzalności ciała. W celu ilościowego ujęcia zjawiska rozszerzalności cieplnej ciał stałych wprowadza się pojęcie współczynnika rozszerzalności liniowej. Współczynnik rozszerzalności liniowej α można zdefiniować równaniem

$$\alpha = \frac{1}{r_0} \frac{d\bar{x}}{dT}. \quad (29.3)$$

Wstawiając do równania (29.3) $d\bar{x}/dT$ obliczone z równania (29.2) uzyskamy

$$\alpha = \frac{bk}{r_0 c^2}.$$

Obliczone w ten sposób dla różnych materiałów wartości współczynników α nie zależą od temperatury i są zgodne co do rzędu wielkości z wartościami otrzymanymi doświadczalnie. Należy jednak pamiętać, że otrzymano je przy założeniu, że odchylenie od harmonicznego charakteru drgań opisuje składnik bx^2 w równaniu (29.1). Jeśli składnik anharmoniczny będzie zawierał także wyższe potęgi x , to charakter zależności współczynnika rozszerzalności liniowej od temperatury będzie bardziej złożony. Zwykle dla wyższych temperatur wartości współczynników rozszerzalności cieplnej ciał są większe.

29.2. Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Badanie rozszerzalności cieplnej ciał stałych jest oparte zwykle na prawie opisującym zależność długości ciała od temperatury

$$l_t = l_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (29.4)$$

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.

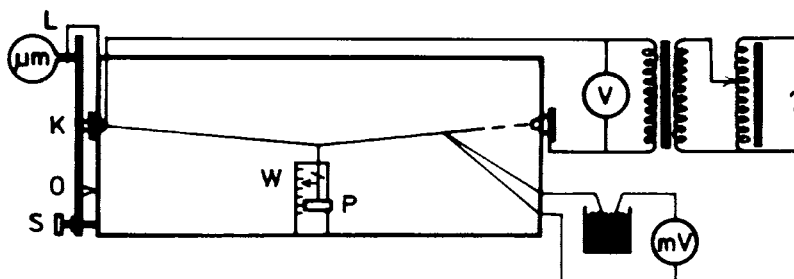
Przekształcenie ostatniego równania do postaci

$$\frac{l_T - l_0}{l_0} = \alpha\Delta T \quad (29.5)$$

daje wygodną formę wyznaczenia współczynnika α na podstawie zmierzonej zależności względnego wydłużenia od przyrostu temperatury. Wartość współczynnika rozszerzalności liniowej jest bowiem równa tangensowi kąta

nachylenia krzywej na wykresie, przedstawiającym zależność wydłużenia względnego $\Delta l / l_0$ od przyrostu temperatury ΔT .

Istota metod stosowanych do badania rozszerzalności liniowej sprowadza się do ogrzewania próbki i pomiaru jej wydłużenia. Przyrosty długości, spowodowane wzrostem temperatury ciał stałych są zwykle niewielkie. W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności pomiaru stosuje się zwykle próbki w kształcie długich prętów oraz specjalne metody zapewniające dużą dokładność pomiaru przyrostu długości.



Rys. 29.4. Schemat układu pomiarowego

W proponowanym ćwiczeniu próbka ma kształt drutu (rys. 29.4). Podwyższenie temperatury drutu osiąga się w wyniku ogrzewania go prądem elektrycznym, który bezpośrednio przezeń przepływa. Temperaturę drutu mierzy się za pomocą termopary (miedź-konstantan), której jedno spojenie jest przymocowane do badanego drutu, drugie umieszczone w naczyniu Dewara, zawierającym mieszaninę lodu i wody. Siła elektromotoryczna wytworzona w obwodzie termopary powoduje przepływ prądu, którego natężenie jest wprost proporcjonalne do różnicy temperatur między dwoma spojeniami termopary. Wartości natężenia prądu wskazuje galwanometr, który może być zastąpiony miernikiem cyfrowym wyskalowanym w jednostkach temperatury.

Temperatura drutu musi być stała na całej długości. W miarę wzrostu długości drutu zwiększa się niebezpieczeństwo wystąpienia pewnego

gradientu temperatury wzdłuż próbki. Aby wyeliminować niekorzystny wpływ przypadkowych ruchów powietrza, badany drut zamocowuje się w oszklonej gablocie.

Środek drutu jest obciążony ciężarkiem P , powodującym stałe niewielkie jego naprężenie. W czasie ogrzewania drutu jego długość zwiększa się i ciężarek P opada (zwiększa się strzałka ugięcia drutu). Pomiaru wydłużenia dokonuje się czujnikiem mikrometrycznym z zastosowaniem odpowiedniej przekładni mechanicznej. Jeden koniec badanego drutu jest zamocowany w połowie długości ramienia dźwigni OL (rys. 29.4), którego koniec L pozostaje w kontakcie z trzpieniem czujnika mikrometrycznego. Za pomocą śruby S można spowodować obrót dźwigni wokół osi O , aż do uzyskania pierwotnej strzałki ugięcia badanego drutu, co osiąga się przez sprowadzenie wskazówki W do wyjściowego położenia na skali. Ze względu na sposób zamocowania drutu do dźwigni (w połowie długości jej ramienia) rzeczywiste przyrosty długości badanego drutu są dwukrotnie mniejsze od odczytanych na skali czujnika mikrometrycznego.

29.3. Zadania do wykonania

A) Pomiary

Zestawić układ pomiarowy według schematu przedstawionego na rys. 29.4. Zwiększając stopniowo natężenie prądu w obwodzie wykonać pomiary przyrostu długości drutu w funkcji temperatury w zakresie od pokojowej do około 150° C.

B) Opracowanie wyników

Sporządzić wykres zależności $\Delta l / l_0 = f(\Delta T)$. Na wykres nanieść prostokąty błędów. Z nachylenia wykresu wyznaczyć współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej badanego materiału. Oszacować błąd wyznaczenia współczynnika rozszerzalności termicznej. Opracowując wyniki warto skorzystać z regresji liniowej, a obliczenia wykonać

korzystając z programu komputerowego **regresja.pas** lub dowolnego arkusza kalkulacyjnego (patrz rozdział 5, cz. I skryptu).

Literatura:

1. C. Kittel, W. D. Knight, M. A. Ruderman, Mechanika, PWN, Rozdz. 7,
Uzupełnienie 2: Oscylator anharmoniczny