

Ćwiczenie: A9

Tytuł ćwiczenia: Przewodnictwo ciepłne metali

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studenta z pojęciem ciepła oraz ciepła właściwego, ze zjawiskami transportu ciepłego w metalach, nauczenie zasad działania urządzeń wykorzystujących przepływ ciepła oraz poznanie technik eksperymentalnych umożliwiających pomiar przewodnictwa ciepłego oraz temperatury.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

Ćwiczenie polega na wyznaczeniu współczynnika przewodności ciepłej pręta miedzianego (Cu) lub aluminiowego (Al). W tym celu należy wykonać następujące zadania:

1. Wyznaczyć pojemność cieplną kalorymetru.
2. Wyznaczyć ilość ciepła pobieraną przez kalorymetr napełniony wodą z otoczenia w jednostce czasu.
3. Wykonać pomiary przewodności ciepłej wzdłuż metalowego pręta oraz wyznaczyć współczynnik przewodności ciepłej dla Al lub Cu.

III. Zagadnienia do kolokwium

1. Ciepło właściwe, pojemność cieplna, współczynnik przewodności ciepłej, rozszerzalność cieplna.
2. Pojęcie ciepła w termodynamice, zasady termodynamiki, silniki ciepłne, zjawiska termoelektryczne.
3. Mechanizmy przekazywania ciepła (przewodzenie, konwekcja, promieniowanie).
4. Gęstość strumienia ciepła, równanie/prawo Fouriera, równanie transportu Boltzmanna

$$q = -\lambda \nabla(T) \quad , \quad \frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad , \quad \frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{d^2T}{dx^2}$$

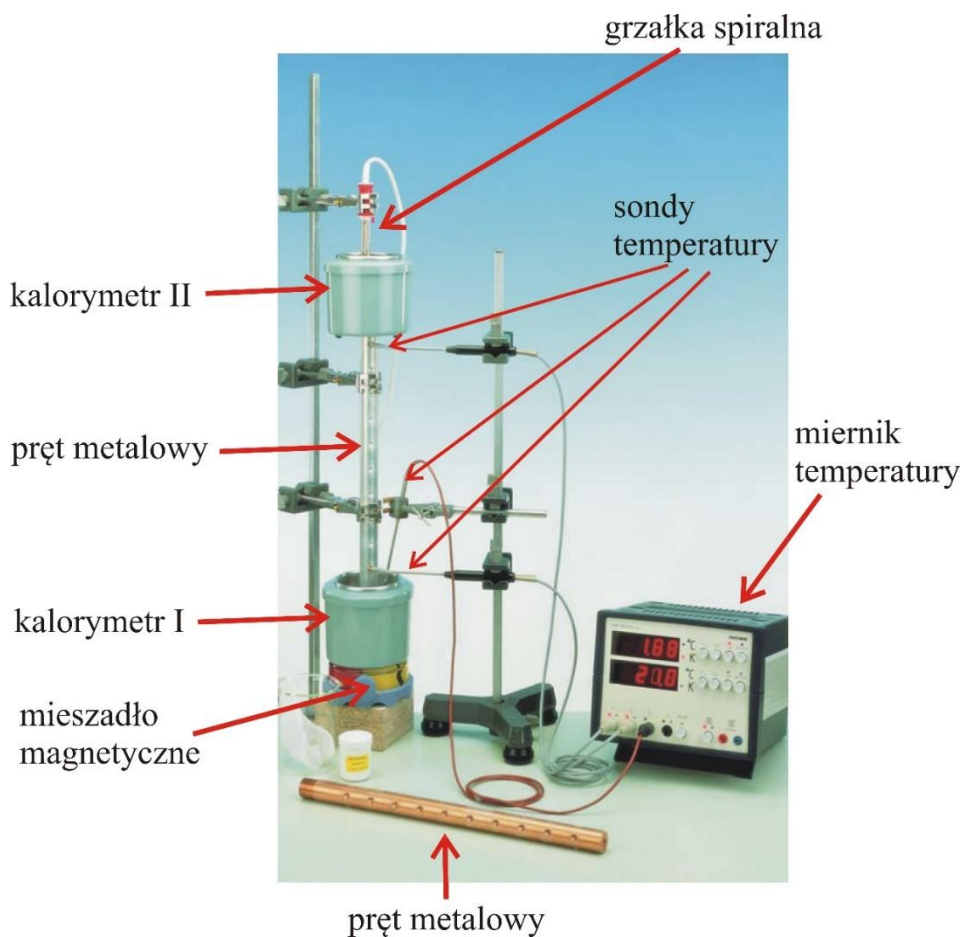
5. Metody pomiaru przewodnictwa ciepłego (statyczne i dynamiczne).
6. Zasada działania elementów aparatury, m.in. sondy temperatury, mieszadła magnetycznego.

IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

Układ do pomiaru przewodnictwa ciepłego metali został przedstawiony na rys. 1.

Składa się on z następujących elementów:

- dwóch kalorymetrów (rys. 2)
- prętów metalowych: aluminiowego i glinianego (rys. 3)
- grzałki spiralnej, 300W, 220-250V (rys. 4)
- cyfrowego miernika temperatury PHYWE (rys. 5)
- sondy zanurzeniowej i dwóch powierzchniowych sond temperatury PT100 (rys. 6)
- mieszadła magnetycznego HI 180 (rys. 7)
- stopera ręcznego 1/100s, statywu z uchwytami, wagi laboratoryjnej



Rys. 1 Schemat układu do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej metalowego pręta



Rys. 2 Kalorymetr I i II, każdy o pojemności 500ml. Jeden z kalorymetrów posiada specjalne wgłębienie wewnątrz do mocowania pręta



Rys. 3 Pręt metalowy (alumiunowy i gliniany) z nacięciami do mocowania sondy temperatury



Rys. 4 Grzałka spiralna, 300W, 220-250V



Rys. 5 Cyfrowy miernik temperatury, PHYWE (instrukcja obsługi w laboratorium)



Rys. 6. Sonda zanurzeniowa (po lewej) i powierzchniowa sonda temperatury PT100 (po prawej)



Rys. 7 Mieszadło magnetyczne HI 180 (instrukcja obsługi w laboratorium)

V. Wykonanie ćwiczenia

(sposób postępowania, schematy blokowe, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

Zadanie I. Wyznaczenie pojemności cieplnej kalorymetru.

Pojemność cieplna kalorymetru związana jest z ilością ciepła jaką trzeba dostarczyć kalorymetrowi z otoczenia, aby zmienić jego temperaturę o 1 stopień. Jeżeli zatem gorącą wodę wlejemy do kalorymetru (o temperaturze pokojowej) to temperatura wody szybko obniży się na skutek wymiany ciepła między wodą i kalorymetrem. Pomiar zmian temperatury wody pozwoli wyznaczyć pojemność cieplną kalorymetru. Aby wyznaczyć pojemność cieplną kalorymetru należy:

1. Odczytać temperaturę powietrza w laboratorium, T_R . Jest to jednocześnie temperatura pustego kalorymetru będącego w równowadze termodynamicznej z otoczeniem.
2. Zważyć kalorymetr I z dokładnością do dziesiątej części grama, m_{kal} .
3. Zagrząć wodę w czajniku elektrycznym do temperatury pomiędzy 60-95°C i wyłączyć czajnik. Temperaturę wody odczytywać sondą zanurzeniową na cyfrowym mierniku temperatury, T_W (ponieważ woda oddaje ciepło do otoczenia to T_W będzie powoli zmniejszała się).
4. Przy ustalonej temperaturze wody w czajniku, T_W , szybkim ruchem wlać ciepłą wodę do kalorymetru I (zapełniając około $\frac{3}{4}$ jego pojemności) i natychmiast przełożyć sondę temperatury do kalorymetru z wodą. Odczytać temperaturę wody bezpośrednio po wleciu jej do kalorymetru, T_M (temperatura mieszania).

Uwaga: ryzyko oparzenia, obłania i zamoczenia elementów aparatury - używać ręczników papierowych.

5. Zważyć kalorymetr I z wodą z dokładnością do dziesiątej części grama, $m_{kal+woda}$.
6. Obliczyć masę wody w kalorymetrze, $m_W = m_{kal+woda} - m_{kal}$

7. Obliczyć pojemność cieplną kalorymetru ze wzoru:
$$C = c_W m_W \frac{T_W - T_M}{T_M - T_R},$$

gdzie $c_W = 4,19 \frac{\text{J}}{\text{g K}}$ jest ciepłem właściwym wody.

Wyznaczanie pojemności cieplnej kalorymetru przeprowadzić według wskazówek prowadzącego zajęcia: najlepiej kilkakrotnie, dla różnych temperatur ciepłej wody. Należy pamiętać o tym, aby kalorymetr przed waniem do niego ciepłej wody pozostawał w równowadze termodynamicznej z otoczeniem (odczekać ok. 20 min. między pomiarami).

Uwaga: Ze względu na małą wartość pojemności cieplnej kalorymetru w porównaniu z pojemnością cieplną pręta metalowego, w wersji uproszczonej ćwiczenia można pominąć zadanie I.

Zadanie II. Wyznaczenie ilość ciepła pobieranej przez kalorymetr z otoczenia w jednostce czasu.

Przepływ ciepła występuje zawsze pomiędzy układami nie będącymi w równowadze termodynamicznej. Jeżeli do kalorymetru wlejemy zimną wodę to, po wyrównaniu temperatury wody i kalorymetru, układ zacznie ogrzewać się do temperatury pokojowej pobierając ciepło z otoczenia.

Aby wyznaczyć ilość ciepła pobieranego z otoczenia przez kalorymetr należy:

1. Przygotować mieszaninę wody i lodu w kalorymetrze I (lód umieścić w specjalnym woreczku bawełnianym).
2. Następnie zanurzyć w kalorymetrze sondę temperatury tak, aby nie stykała się z bezpośrednio z lodem i odczekać, aż temperatura mieszaniny spadnie do około $T_0 = 1-2^\circ\text{C}$.
3. Wyjąć woreczek z lodem i rozpocząć pomiary temperatury wody, T , w funkcji czasu przez ok. 30 min. Wyniki zapisać w tabeli 1.

Tabela 1. Pomiar temperatury kalorymetru wypełnionego schłodzoną wodą

t [min]	T [°C]
0	T_0
5	
10	
15	
20	
25	
30	

4. Zważyć kalorymetr z wodą i obliczyć masę wody w kalorymetrze, $m_W = m_{kal+woda} - m_{kal}$
5. Obliczyć ilość ciepła pobranego przez kalorymetr z otoczenia w kolejnych punktach pomiarowych według wzoru:

$$\Delta Q = (c_W m_W + C) \Delta T,$$

gdzie $\Delta T = T - T_0$, a stała C została wyznaczona w zadaniu I.

Wyniki zapisać w tabeli 2.

Tabela 2. Ciepło pobierane przez kalorymetr wypełniony schłodzoną wodą

t [min]	T [°C]	T-T ₀ [°C]	ΔQ [J]
0	T ₀	0	0
5			
10			
15			
20			
25			
30			

6. Sporządzić wykres zależności ΔQ od czasu i metodą najmniejszych kwadratów wpisać prostą w otrzymane punkty. Współczynnik kierunkowy wpisanej prostej (a) odpowiada ilości pobranego przez kalorymetr z wodą ciepła z otoczenia na jednostkę czasu (w ciągu 1min). Ciepło pobrane w dowolnym czasie t (wyrażonym w min.) przez kalorymetr obliczymy ze wzoru:

$$\Delta Q_{sur.} = a \cdot t$$

Zadanie III. Wykonanie pomiarów przewodności cieplnej wzdłuż metalowego pręta oraz wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej dla Al lub Cu.

W metalowym pręcie, którego końce utrzymywane są w różnych temperaturach następuje przepływ ciepła od końca gorętszego do zimniejszego. Przepływ ten charakteryzowany jest przez współczynnik przewodności cieplnej materiału. Aby go wyznaczyć, należy wytworzyć stały gradient temperatury wzdłuż pręta a następnie rejestrować zmianę temperatury końca pręta w czasie, która zmienia się na skutek przepływu ciepła przez pręt i wymiany ciepła z otoczeniem. Postępujemy w następujący sposób:

1. W kalorymetrze I (dolnym) przygotować mieszaninę wody z lodem (lód umieścić w woreczku).
2. Zmontować układ pomiarowy według schematu na rys. 1 wybierając aluminiowy lub miedziany pręt do pomiaru przewodnictwa cieplnego.
 - powierzchniowe sondy temperaturowe zamontować pomiędzy dwoma najdalej rozmieszczonymi nacięciami na pręcie oddalonymi o $l = 0,315\text{m}$. Przy mocowaniu sond użyć specjalnej przewodzącej pasty.
 - sondę zanurzeniową umieścić w kalorymetrze I (dolnym).
 - ustawić cyfrowy miernik temperatury na odczyt dwóch wartości (zob. instrukcja obsługi miernika):
 - (a) różnicy temperatur między sondami powierzchniowymi ΔT
 - (b) temperatury wody w kalorymetrze I.
3. W kalorymetrze II zagotować wodę używając grzałki spiralnej i przez cały czas pomiarów utrzymywać temperaturę $100\text{ }^\circ\text{C}$

Uwaga: Poziom wody w kalorymetrze II musi przykrywać spiralę grzałki. W razie konieczności należy bardzo powoli dolać gorącej wody do kalorymetru tak, aby nie przestała się ona gotować. Najlepiej dolewać wodę zagotowaną wcześniej w czajniku.

Wykonać pomiary zmian gradientu temperatury ΔT wzdłuż pręta w czasie, aż do ustabilizowania się różnic temperatur na poziomie co najmniej $25\text{ }^\circ\text{C}$. Odczytać również temperaturę wody w dolnym kalorymetrze T_{kal} . Wyniki zapisać w tabeli 3:

Tabela 3. Pomiar temperatury kalorymetru w kontakcie z metalowym prętem

t [min]	ΔT [°C]	T_{kal} [°C]
0		
5		
10		
15		
20		
25		
30		
40	25,40	4,2

4. Pomiar przewodności cieplnej wzdłuż pręta.
- wyjąć woreczek z lodem z kalorymetru I (dolnego)
 - włączyć mieszadło magnetyczne
 - odczekać 2-3 minuty aż gradient temperatury wzdłuż pręta ustali się na nowo – niewielki wzrost gradientu temperatury występuje w wyniku zmieszania wody, która stykała się bezpośrednio z lodem z pozostałą, cieplejszą wodą.
 - jeśli gradient temperatury ΔT zaczyna maleć rozpocząć pomiary temperatury wody w funkcji czasu ze skokiem co 1 lub 2 minuty przez ok. 15 min. Wyniki zapisać w tabeli 4.

Tabela 4. Pomiar zmian temperatury na końcach metalowego pręta i w kalorymetrze

t [min]	ΔT [°C]	T_{kal} [°C]	ΔT_{kal} [°C]
0			0
1			
2			
15			

ΔT_{kal} oznacza zmianę temperatury kalorymetru względem $t=0$

5. Po wykonaniu pomiarów zważyć kalorymetr z wodą i magnetycznym elementem mieszającym (walec magnetyczny), następnie zważyć sam element mieszający i obliczyć masę wody, jaka znajdowała się w kalorymetrze I, m_w .
6. Obliczyć współczynnik przewodnictwa cieplnego pręta korzystając ze wzoru:

$$\lambda = \frac{\Delta Q_{\text{pret}}}{A \frac{\Delta T}{l}}$$

gdzie $A = 4,98 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ jest polem przekroju poprzecznego pręta a odległość między sondami pomiarowymi wynosi $l = 0,315 \text{ m}$. ΔQ_{pret} jest ciepłem przekazany do kalorymetru I tylko przez pręt.

Zmiana temperatury wody w dolnym kalorymetrze nastąpiła w wyniku pobrania ciepła z otoczenia oraz przez pręt metalowy:

$$\Delta Q_{total} = \Delta Q_{pręt} + \Delta Q_{sur.}$$

Z powyższego równania znajdziemy ciepło przekazane przez pręt $\Delta Q_{pręt}$, gdyż całkowite ciepło możemy policzyć ze wzoru:

$$\Delta Q_{total} = (c_W m_W + C) \Delta T_{kal}$$

natomiast $\Delta Q_{sur.}$ jest wyliczone ze znajomości współczynnika kierunkowego prostej z zadania II.

Wykonane obliczenia zapisujemy w tabeli:

Tabela 5.

t [s]	ΔT [°C]	ΔT_{kal} [°C]	ΔQ_{sur} [J]	ΔQ_{total} [J]	$\Delta Q_{pręt}$ [J]	λ [J/Ksm]
0	29,84	0	0	0	0	-
600	26,52	4,9	1821,2	7159,9	5338,7	212,2

Obliczamy wartość średnią współczynnika przewodnictwa cieplnego pręta λ .

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy

Niepewność pojemności cieplnej kalorymetru opracować metodą różniczkową. Przy wyznaczaniu niepewności uwzględnić parowanie gorącej wody (zmiana masy) oraz ciągły spadek temperatury wody w wyniku oddawania ciepła do otoczenia.

Na niepewność ciepła pobranego z otoczenia przez kalorymetr w danym czasie wpływa niepewność współczynnika prostej wpisanej metodą najmniejszych kwadratów, $\Delta Q_{sur.} = a \cdot t$, oraz niepewność pomiaru czasu (jeśli mierzona stoperem z racji dość długich czasów można ją zaniedbać).

Za niepewność współczynnika przewodnictwa cieplnego pręta λ przyjmując jego maksymalne odchylenie od wartości średniej.

Uzyskane wyniki należy porównać z danymi literaturowymi i omówić przyczyny ich ewentualnej niezgodności.

Literatura

- [1] Sz. Szczeniowski.: *Fizyka doświadczalna*, cz. 2, PWN, Warszawa
- [2] I. W. Sawieliew, *Wykłady z fizyki*, t. 2, PWN, Warszawa, 2002
- [3] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, t. II, PWN, Warszawa, 2014.
- [4] H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna wspomagana komputerem*, PWN, Warszawa
- [5] Materiały firmy PHYWE Systeme GmbH & Co. KG (dostępne w laboratorium)