

Paweł Laskoś

I rok fizyki ogólnej

poniedziałek, 10:30-12:45

6 marca 2005

prowadzący: dr Maria Błaszczyszyn

## Ćwiczenie 25

### Wyznaczanie współczynnika rozszerzalności cieplnej metali za pomocą dylatometru

Przyrządy pomiarowe:

- Taśma miernicza wyskalowana co  $\Delta L = 1\text{mm}$ .
- Czujnik mikrometryczny o dokładności pomiaru  $\Delta\lambda = 0,01\text{mm}$ .
- Termometr i barometr, o dokładności pomiaru odpowiednio  $\Delta p = 10\text{Pa}$ ,  $\Delta T = 0,5^\circ\text{C}$

*Uwaga: Zaparafowany oryginał zapisów pomiarów – w załączniku.*

Wskazania termometru i barometru (niezmienne w trakcie trwania doświadczenia):  
 $p = 99,56\text{kPa}$ ,  $T = 21^\circ\text{C}$ .

Tabela pomiarów długości rurek wykonywanych w temperaturze otoczenia za pomocą taśmy mierniczej oraz ich wydłużenia – wykonywanych w temperaturze wrzenia wody za pomocą dylatometru:

wielkość	nr serii	rurka 1	rurka 2	rurka 3	rurka 4
$L[\text{cm}]$	1	75,3	75,5	75,4	75,4
	2	75,4	75,5	75,3	75,3
	3	75,2	75,3	75,5	75,5
	4	75,2	75,5	75,4	75,4
	5	75,3	75,5	75,2	75,4
	6	75,4	75,3	75,3	75,3
	7	75,4	75,4	75,3	75,2
	8	75,3	75,3	75,3	75,4
	9	75,4	75,2	75,4	75,5
	10	75,3	75,3	75,3	75,3
$\lambda[\text{mm}]$	1	1,13	0,98	0,64	0,95
	2	1,07	0,92	0,67	0,95
	3	1,08	0,95	0,67	0,88

*Wyniki:* Wyznaczona temperatura wrzenia wody przy zmierzonym ciśnieniu:  $T_w = 99,5989(2)^\circ\text{C}$ . Wartości współczynników rozszerzalności dla kolejnych rurek [ $10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ]:  $a_1 = 18,1(1)$ ,  $a_2 = 16,2(1)$ ,  $a_3 = 11,3(1)$ ,  $a_4 = 15,9(1)$ .

## Opis teoretyczny

Jednym z częściej obserwowanych w życiu codziennym zjawisk związanych z cząsteczkową naturą materii jest rozszerzalność cieplna – zarówno liniowa jak i objętościowa

– ciało. Większość substancji zmienia swoją długość zgodnie ze wzorem

$$\frac{\lambda}{L_0} = aT,$$

gdzie  $T$  jest temperaturą ciała zmierzoną w stopniach Celsjusza,  $L_0$  – długością ciała w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ ,  $\lambda$  – wydłużeniem ciała, zaś  $a$  – stałym współczynnikiem rozszerzalności objętościowej, zależnym od rodzaju substancji.

Metale mają strukturę krystaliczną, jednak nie występują w niej aniony i kationy jak w kryształach jonowych, lecz wyłącznie dodatnie jony metalu, znajdujące się w polu sił elektromagnetycznych wytworzonych przez chmurę swobodnych elektronów.

Zjawisko rozszerzalności cieplnej wynika z oddziaływań elektromagnetycznych pomiędzy cząstkami substancji. Cząstki odpychają i przyciągają się wzajemnie, zaś wartość tych sił (zwanymi siłami van der Waalsa) dla gazów rzeczywistych, które dobrze opisują również zachowanie struktur krystalicznych, wyraża się wzorem

$$F = F_{odp} + F_{prz} = \frac{A}{x^{13}} - \frac{B}{x^7},$$

gdzie  $A, B$  są wyznaczanymi doświadczalnie dla każdej substancji stałymi. Dla każdej cząsteczki istnieje położenie o minimalnej energii potencjalnej względem pozostałych cząsteczek, zaś jej energia wewnętrzna przekłada się na oscylacje wokół tego położenia. Wzrost temperatury, czyli wzrost energii wewnętrznej zwiększa amplitudę oscylacji, a co za tym idzie – średnią odległość pomiędzy sąsiednimi cząstkami.

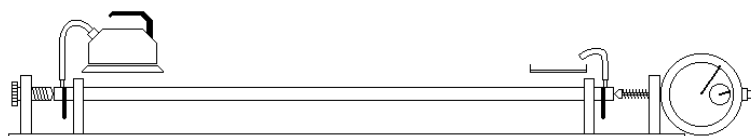
Różnice rozszerzalności cieplnej pomiędzy różnymi substancjami powoduje m. in. takie zjawiska jak wietrzenie skał, czy anomalne zmiany gęstości wody w temperaturach  $0 \div 4^\circ\text{C}$ . Skutki tego zjawiska to naprężone i pękające zimą linie przesyłowe prądu, wyginające się szyny latem. Musi być ono brane pod uwagę przy budowie mostów, ale również przyrządów mierniczych, przeznaczonych do działania w warunkach zmiennej temperatury. Dzięki niemu jednak możliwe jest działanie m.in. termometrów bimetalicznych i innych urządzeń.

Szczególnie mały współczynnik rozszerzalności cieplnej wykazuje stop żelaza z niklem – inwar, oraz stopy zwane superinwarami. Nieliczne tylko substancje (takie jak szkło Corning 9600) mają ujemną rozszerzalność cieplną.

## Opis doświadczenia

Próbki metali, których rozszerzalność temperaturową mierzy się w doświadczeniu, mają postać długich rur z drewnianymi uchwytami i przyłączami do gumowych węży, którymi doprowadza się i odprowadza parę wodną. Rury umieszcza się na specjalnym statywie, tak, aby jeden ich koniec opierał się o śrubę regulacyjną, drugi zaś w miarę rozszerzania się próbki wypychał stopkę czujnika mikrometrycznego. Czujnik posiada dwie wskazówki – większa z nich pokazuje na obrotowej skali głównej przesunięcie czujnika z dokładnością do  $0,01\text{mm}$ . Pełen obrót większej wskazówki to przesunięcie o  $1\text{mm}$  – i ilość obrotów pokazuje mniejsza wskazówka. Cały układ nazywa się dylatometrem.

Poniższy schemat przedstawia układ pomiarowy. Na statywie ułożona jest rurka z badanego metalu. Z czajnika stojącego na elektrycznej płytce grzejnej doprowadzana jest do rurki para wodna za pomocą gumowego węża, tak też jest odprowadzany jej nadmiar do szalki Petriego ze skroploną parą.



W pierwszej fazie doświadczenia za pomocą taśmy mierniczej zmierzono odległość między końcami rurek – wykonano po 10 pomiarów dla każdej rurki. W drugiej fazie przeprowadzono po 3 serie pomiarów wydłużenia rurek. Pomiar przeprowadzany był następująco: rurkę z nałożonym węzłem odprowadzającym układano na statywie pomiędzy śrubą regulacyjną (na schemacie z lewej) a czujnikiem mikrometrycznym. Śrubę regulowano położenie rurki tak, by mała wskazówka wskazywała 0 na wewnętrznej skali. Zewnętrzną, obrotową skalę przekręcano tak, by duża wskazówka również wskazywała 0. Ostrożnie (by w miarę możliwości nie naruszyć ułożenia rurki) nakładano za pomocą szczypiec węzł doprowadzający parę. W miarę, jak temperatura rurki zwiększała się, obserwowano wzrost wskazań czujnika. Kiedy wskazanie dylatometru stabilizowało się (rurka osiągała maksymalną temperaturę – wrzenia wody), notowano odczyt czujnika, odłączano płytkę grzejącą od prądu, zdejmowano za pomocą szczypiec gumowe węże, i za pomocą drewnianych uchwytych odkładano rurkę do ostygnięcia.

## Opracowanie wyników pomiarów

Temperaturę wrzenia wody w zmierzonym ciśnieniu można obliczyć ze wzoru podanego na [http://en.wikipedia.org/wiki/Vapor\\_pressure#Water](http://en.wikipedia.org/wiki/Vapor_pressure#Water) ( $T_w$ [°C],  $p$ [Pa]):

$$\begin{aligned} T_w &= 100 + 0,00002772(p - 101000) - 1,24 \cdot 10^{-9}(p - 101000)^2 = \\ &= 100 + 0,00002772(99560 - 101000) - 1,24 \cdot 10^{-9}(99560 - 101000)^2 \approx 99,598, \end{aligned}$$

zaś niepewność wyniku, zgodnie ze wzorem 15 instrukcji ONP ( $u(p)$ [Pa] =  $\frac{10}{\sqrt{3}} \approx 5,77$ ):

$$u_c(T_w) = \sqrt{\left(\frac{dT_w}{dp}\right)^2 u(p)^2} = |0,0002772 - 1,24 \cdot 10^{-9}(2 \cdot 99560 - 2 \cdot 101000)|5,77 \approx 0,002.$$

W tabeli przedstawiono średnie wyniki pomiarów bezpośrednich, oraz wartości  $a$  obliczone ze wzoru  $a = \frac{\lambda}{LT}$ :

	$T_0$ [°C]	$L$ [mm]	$T_w$ [°C]	$\lambda$ [mm]	$a$ [ $10^{-6} \text{C}^{-1}$ ]	$u_c(a)$ [ $10^{-6} \text{C}^{-1}$ ]
rurka 1	21,0	753,2	98,598	1,09	18,6	0,12
rurka 2	21,0	753,8	98,598	0,95	16,2	0,12
rurka 3	21,0	753,4	98,598	0,66	11,3	0,11
rurka 4	21,0	753,7	98,598	0,93	15,9	0,12

Obliczone metodą typu B standardowe niepewności pomiarów bezpośrednich to:

$$\begin{aligned} u(L) &= \frac{1\text{mm}}{\sqrt{3}} \approx 0,58\text{mm}, \\ u(\lambda) &= \frac{0,01\text{mm}}{\sqrt{3}} \approx 0,0058\text{mm}. \end{aligned}$$

Standardowa niepewność pomiaru różnicy temperatur równa jest większej ze standardowych niepewności pomiaru każdej z krańcowych temperatur, czyli:

$$u(T) = \frac{0,5^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0,29^\circ\text{C}.$$

Zgodnie ze wzorem 15 instrukcji ONP mamy:

$$\begin{aligned} u_c(a) &= \sqrt{\left(\frac{da}{d\lambda}\right)^2 u(\lambda)^2 + \left(\frac{da}{dL}\right)^2 u(L)^2 + \left(\frac{da}{dT}\right)^2 u(T)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{u(\lambda)}{LT}\right)^2 + \left(\frac{\lambda u(L)}{TL^2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda u(T)}{LT^2}\right)^2} = \frac{1}{LT} \sqrt{u(\lambda)^2 + \left(\lambda \frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\lambda \frac{u(T)}{T}\right)^2}. \end{aligned}$$

Wartości wyliczone dla każdej rurki zamieszczono w tabeli (małe różnice wynikają z zaokrągleń).

## Wnioski

Wśród metali i stopów, z których wykonane zostały rurki (mosiądz, miedź, stal, glin) najlepiej dopasowane są rurka 1 (mosiądz, wartość tablicowa – 18-21), rurka 2 (miedź, wartość tablicowa – 16,2) oraz rurka 3 (stal, wartość tablicowa – 12). Rurka 4 zgodnie z doświadczeniem nie jest wykonana z glinu (znacznie różniąc się wartość tablicowa – 22,4). Materiały o zbliżonym do 15,9 współczynniku to brąz, konstantan, kwarc, marmur i złoto.

Dane doświadczalne spaczone są przez różnicę między faktyczną maksymalną temperaturą, jaką osiągały rurki, a temperaturą wrzenia wody. Różnica ta spowodowana była utratą ciepła przez parę na długości węża doprowadzającego. Kolejnym czynnikiem obniżającym jakość pomiarów mogło być niedostateczne wystygnięcie rurek pomiędzy nagrzewaniem. Negatywny wpływ miał też mało dokładny pomiar długości rurek, nie tyle z powodu użycia mało dokładnej taśmy mierniczej, ile raczej z faktu deformacji mechanicznych i nierównoległości końców rurek. Również pomiary czujnikiem mikrometrycznym dalekie były od doskonałości – sprężyna napinająca stopkę była słaba i nie spełniała najlepiej swej funkcji.

Wobec istnienia rozrzutu pomiarów bezpośrednich, wskazane byłoby skorzystanie z metody A wyliczenia niepewności standardowej.

W stosunku do rurek 1-3 wyniki są zadowalające, gdyż wyliczone wartości współczynnika rozszerzalności zgadzają się z rozpoznaniem materiału według ciężaru i koloru. Zastanawiająca i trudna do wyjaśnienia jest duża rozbieżność między tablicową i wyznaczoną doświadczalnie wartością współczynnika rozszerzalności czwartej rurki.