

Zaawansowane Metody Badań

1. Wyznaczanie przewodnictwa cieplnego wybranych materiałów.

Opracowała
Dr inż. Magdalena Szumera

Kraków, 2011

Wprowadzenie

Badania właściwości cieplnych ciał stanowią dziedzinę wiedzy ważną przy rozpatrywaniu zagadnień wymiany ciepła, przy czym z punktu widzenia przewodzenia ciepła szczególnie istotne znaczenie mają badania współczynnika przewodnictwa cieplnego, dyfuzyjności cieplnej oraz ciepła właściwego substancji stałych, ciekłych i gazowych.

Przewodnictwo cieplne i dyfuzyjność cieplna materiałów są ważnymi parametrami termofizycznymi niezbędnymi przy opisie zjawisk transportu ciepła analizowanych materiałów. Parametry te stanowią podstawę do wykonania dokładnych symulacji pracy, rozkładu pola temperatur w elementach, takich jak układy elektroniczne, turbiny energetycznych czy inne urządzenia sterujące.

Laserowa Metoda Impulsowa jest jedną z najczęściej stosowanych metod umożliwiającą wyznaczenie parametrów termofizycznych takich jak: współczynnik dyfuzyjności cieplnej oraz współczynnik przewodnictwa cieplnego. Krótki czas pomiaru z zachowaniem wysokiej precyzji pomiarowej oraz szeroki zakres dyfuzyjności cieplnej to tylko niektóre zalety tej bezkontaktowej metody. Urządzenia stosowane w obrębie tej metody są przystosowane do pracy w bardzo wysokich temperaturach, nawet do 2800°C, co umożliwia wykonanie pomiaru w ekstremalnych warunkach np. mechanizmów napędowych do statków kosmicznych, gdzie są one testowane pod kątem realnych warunków pracy. To pozwala inżynierom oraz konstruktorom na wykonanie precyzyjnych projektów elementów konstrukcyjnych czyniąc je niezawodnymi i doskonalszymi.

Własności termofizyczne materiałów

Badania właściwości cieplnych ciał stałych obejmują: **przewodnictwo cieplne λ** , w warunkach ustalonych, oraz **dyfuzyjność cieplną a** , w warunkach nieustalonych. Oprócz nich, własności termofizyczne są charakteryzowane również przez **ciepło właściwe c_p** pod stałym ciśnieniem.

Związek między przewodnictwem cieplnym i dyfuzyjnością cieplną jest wyrażony w postaci następującego równania (Parker i in. 1961, Gersten i in. 2001):

$$\lambda = \rho \cdot a \cdot c_p \quad (1)$$

Umożliwia ono określenie przewodnictwa cieplnego w oparciu o niezależne trzy pomiary tj. dyfuzyjności cieplnej a , gęstości ρ oraz ciepła właściwego c_p .

Dyfuzyjność cieplna, współczynnik wyrównywania temperatury, a , m²/s

Dyfuzyjność cieplna może być wyznaczona jedną z wielu metod eksperymentalnych, periodycznych lub impulsowych, opartych na zależności temperatury od czasu (historii temperatury). W grupie Laserowych Metod Impulsowych (LFM – *Laser Flash Methods*) wyróżnić można osiową metodę impulsową (LFMA) z jednowymiarowym przepływem ciepła wzdłuż osi próbki w kształcie krążka (Rysunek 1). Źródło energii stanowi laser. Energia promieniowania laserowego absorbowana przez czołową powierzchnię próbki narusza jej stan równowagi termicznej. Po pewnym czasie temperatura całej próbki wyrównuje się. W wyniku pochłonięcia impulsu promieniowania laserowego o odpowiednio dobranych parametrach, przez przypowierzchniową warstwę materiału, generowane jest powierzchniowe źródło ciepła (Rysunek 1).

Jak wiadomo przewodzenie ciepła opisuje prawo Fouriera (6). Dla stanu ustalonego przewodzenie ciepła w ciele stałym przedstawiono na Rysunku 2. W takiej sytuacji istnieje liniowy rozkład temperatury w funkcji odległości od powierzchni nagrzewanej.

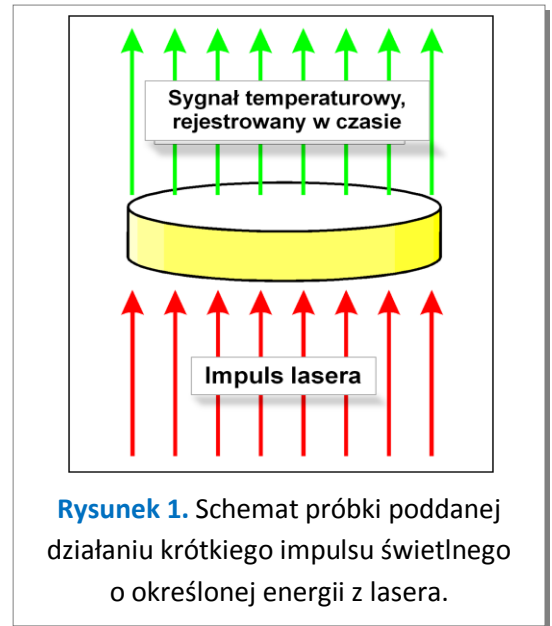
Natomiast w przypadku stanu nieustalonego (Rysunek 3) badana próbka jest izolowana na powierzchni bocznej i zasilana jest ciepłem, równomiernie wydzielanym na powierzchni czołowej ($x = 0$). W takiej sytuacji ciepło rozprzestrzenia się w czasie wzdłuż próbki, która w miarę upływającego czasu staje się coraz cieplejsza. Oczywiście rozkład temperatury wzdłuż próbki zależy od miejsca określonego współrzędną x oraz od czasu t , czyli $T(x, t)$, gdzie T jest bezwzględną temperaturą lub przyrostem temperatury względem stanu poprzedzającego nagrzewanie.

W takiej sytuacji wydatek ciepła, w odróżnieniu od przewodzenia ustalonego, nie jest już stały wzdłuż próbki. Proces przewodzenia ciepła można wtedy opisać następującym równaniem:

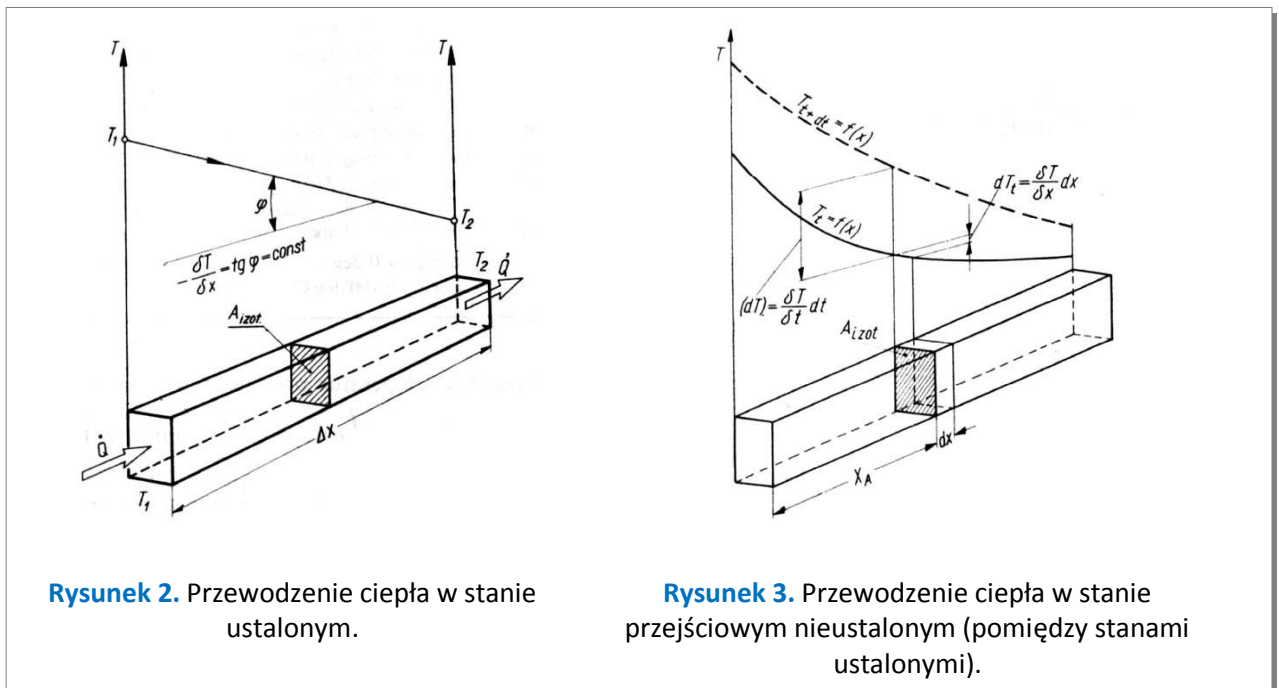
$$\frac{dT(x,t)}{dt} = a \frac{d^2T(x,t)}{dx^2} \quad (2)$$

gdzie

a – dyfuzyjność cieplna (przedstawia ilość ciepła przewodzonego w ciągu sekundy przez powierzchnię o polu metra kwadratowego przy zmianie temperatury w kierunku prostopadłym do tej powierzchni o wartości jeden K/m, m^2/s).



Rysunek 1. Schemat próbki poddanej działaniu krótkiego impulsu świetlnego o określonej energii z lasera.



Rysunek 2. Przewodzenie ciepła w stanie ustalonym.

Rysunek 3. Przewodzenie ciepła w stanie przejściowym nieustalonym (pomiędzy stanami ustalonymi).

Oznacza to, że dyfuzyjność cieplna a wskazuje szybkość, z jaką przebiegają zmiany temperatury z jednej płaszczyzny do drugiej, czyli przedstawia podatność materiału do wyrównania temperatury

podczas nagrzewania lub ochładzania w określonych miejscach. Dyfuzyjność cieplna informuje również o proporcji między zdolnością danego materiału do przewodzenia ciepła, a jego zdolnością do nagrzewania się.

Odwrotność dyfuzyjności cieplnej $1/a$ jest miarą bezwładności cieplnej materiału.

Ciepło właściwe c_p , $J/g \cdot K$

Zagadnienie wyznaczania ciepła właściwego, przy użyciu różnicowej kalorymetrii skaningowej, został omówiony w instrukcji „Możliwości pomiarowe zestawu do badań termofizycznych materiałów ceramicznych. Wyznaczanie podstawowych parametrów termodynamicznych wybranego materiału”.

Gęstość ρ , g/cm^3

Wyznaczenie gęstości w funkcji temperatury wiąże się z następującym równaniem:

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}(T)\right)^3} \quad (3)$$

gdzie:

ρ_0 - gęstość pozorna materiału¹, g/cm^3

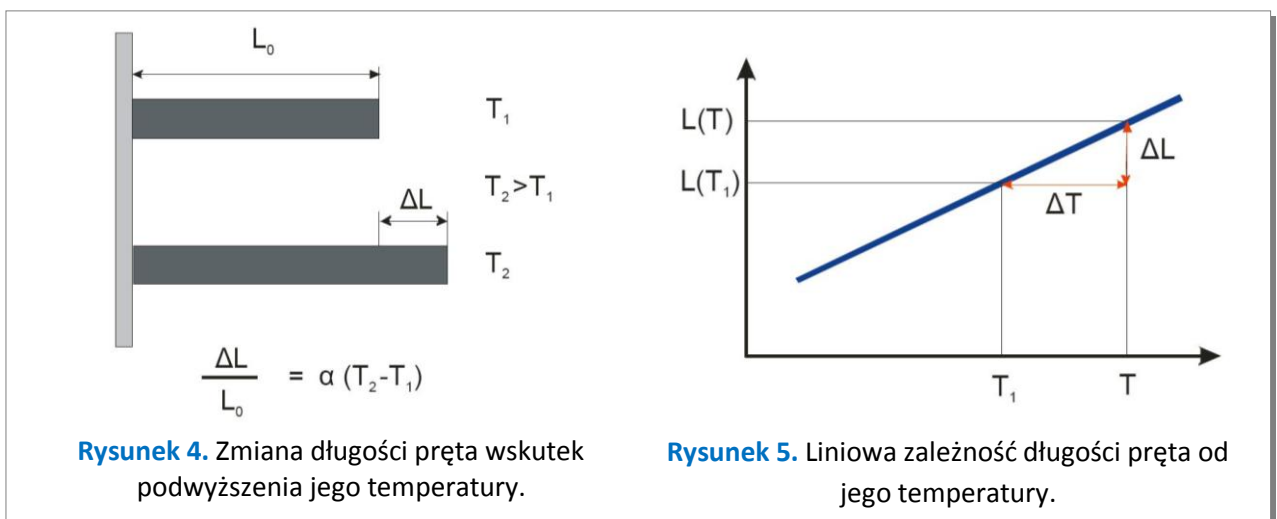
L_0 - początkowa długość próbki, mm

ΔL - przyrost długości próbki w zakresie temperaturowym ($\Delta T = T_K - T_0$), mm

T_0 - temperatura początkowa pomiaru, °C

T_K - temperatura końcowa pomiaru, °C

W celu wyznaczenia parametrów L_0 oraz ΔL badanej próbki wykorzystuje się metodę **dylatometrii**. Ogólnie można stwierdzić, iż w przypadku tej metody rozpatruje się zmianę długości próbki ciała stałego ΔL pojawiającą się pod wpływem zmiany jej temperatury o ΔT (Rysunek 4) przy zachowaniu stałego ciśnienia.



Rysunek 4. Zmiana długości pręta wskutek podwyższenia jego temperatury.

Rysunek 5. Liniowa zależność długości pręta od jego temperatury.

¹ ciężar objętościowy (g/cm^3) – wyraża stosunek masy do objętości wraz z zawartymi w materiale porami (pustkami).

Istotne jest również założenie, że względna zmiana długości próbki jest proporcjonalna do zmiany temperatury (Rysunek 5). Natomiast współczynnik proporcjonalności α ze wzoru na Rysunku 4 jest nazywany **liniowym współczynnikiem rozszerzalności termicznej** (cieplnej). Wymiarem tego współczynnika jest $[1/^\circ\text{C}]$ lub $[1/\text{K}]$.

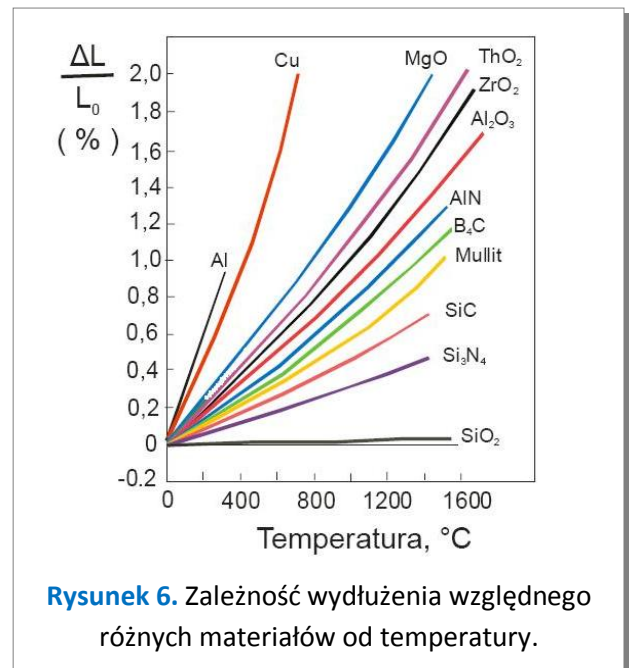
Liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej (α) informuje o ile wzrośnie długość rozpatrywanego materiału po ogrzaniu go o jednostkę temperatury, co wyrażają zależności (symbole są zgodne z tymi podanymi na Rysunku 5):

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \quad (4)$$

$$L(T) = L(T_1) \cdot [1 + \alpha(T - T_1)] \quad (5)$$

Wielkość liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej α jest zazwyczaj uzależniona od temperatury, co przedstawia Rysunek 6 dla wybranych materiałów. Dlatego też najwygodniej jest podawać średnią wartość tego współczynnika obowiązującą w określonym przedziale temperatur, w którym można przyjąć liniowość funkcji względnych zmian długości względem zmian temperatury.

Natomiast w przypadku materiałów, które pod wpływem temperatury wykazują przemiany alotropowe lub polimorficzne, α należy podawać osobno dla poszczególnych faz uwzględniając zakresy temperatur ich występowania.



Rysunek 6. Zależność wydłużenia względnego różnych materiałów od temperatury.

Przewodnictwo ciepłe - Pojęcia podstawowe i zależności

Wymiana ciepła jest zjawiskiem występującym wówczas, gdy istnieje różnica temperatur wewnątrz pewnego układu lub między układami mogącymi wzajemnie na siebie oddziaływać. Zgodnie z II zasadą termodynamiki² następuje wtedy wymiana energii, przy czym część układu czy też układ o temperaturze wyższej oddaje energię układowi o temperaturze niższej. Związki ilościowe określające ilość wymienianej energii podlegają oczywiście I zasadzie termodynamiki³.

Wyróżnia się trzy podstawowe sposoby przenoszenia energii cieplnej: przewodzenie ciepła, konwekcję oraz promieniowanie.

² Wg . Clausiusa "Ciepło nie może samorzutnie przepływać od ciała o temperaturze niższej do ciała o temperaturze wyższej"

³ Zmiana energii wewnętrznej ciała, lub układu ciał jest równa sumie dostarczonego ciepła i pracy wykonanej nad ciałem /układem ciał

Przewodzenie ciepła

To zjawisko polegające na przenoszeniu energii wewnątrz ośrodka materialnego lub z jednego ośrodka do drugiego przy ich bezpośrednim zetknięciu się z miejsc o temperaturze wyższej do miejsc o temperaturze niższej, przy czym poszczególne cząstki rozpatrywanego układu nie wykazują większych zmian położenia.

Mechanizm ten jest typowy dla ciał stałych, gdyż w cieczech i gazach przewodzenie ciepła w czystej postaci występuje rzadko. Mechanizm przewodzenia ciepła jest dość skomplikowany i zależy od stanu skupienia ciała przewodzącego ciepło. W gazach oraz cieczech energia ciepła przewodzonego przenosi się głównie poprzez bezwładne zderzenia cząsteczek, natomiast w ciałach stałych polega ono na przenoszeniu energii przez swobodne elektrony (dobre przewodniki ciepła) oraz poprzez drgania atomów w siatce krystalicznej.

Przewodzeniem ciepła rządzi prawo Fouriera, zgodnie, z którym natężenie strumienia cieplnego jest proporcjonalne do gradientu temperatury mierzonego wzdłuż kierunku przepływu ciepła. Matematycznie prawo to ma postać:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

Współczynnik proporcjonalności λ to *przewodnictwo cieplne* i jest wielkością charakterystyczną dla danego ośrodka pod względem jego zdolności do przewodzenia ciepła ($\lambda = [\frac{W}{m} \cdot K]$). Co wynika z równania (6).

Natomiast jeżeli F oznacza wielkość powierzchni mierzonej prostopadle do kierunku przepływu ciepła, to ilość ciepła przewodzonego w ciągu jednostki czasu przez tę powierzchnię wynosi:

$$Q_h = -\lambda F \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

Konwekcja

Zjawisko to występuje, gdy poszczególne cząstki ciała, w którym przenosi się ciepło, zmieniają swoje położenie. Jest ono charakterystyczne dla płynów i gazów, a przenoszenie energii odbywa się poprzez mieszanie się płynu, a także w niewielkim stopniu przez przewodzenie. Koniecznym warunkiem dla konwekcji jest ruch ośrodka. Analiza zagadnień konwekcji wymaga znajomości warunków przepływu płynu, w którym zachodzi wymiana ciepła (konwekcja wymuszona, konwekcja swobodna).

Częstym przypadkiem jest wymiana ciepła między ścianką stałą a przepływającym koło niej płynem (cieczą, gazem). Wtedy wymiana ciepła w płynie odbywa się na drodze konwekcji, natomiast przy samej ściance istnieje bardzo cienka warstewka, w której wymiana ciepła odbywa się na zasadzie przewodzenia. Przy ustalonej wymianie ciepła stałe natężenie strumienia cieplnego q przenoszone jest ze ścianki do środka strumienia płynu i im jest większa intensywność przenoszenia ciepła, tym mniejszy jest spadek temperatury przypadający na jednostkę długości, w kierunku prostopadłym do ścianki. Przy samej ściance występuje dość znaczny spadek temperatury spowodowany tym, że w cienkiej warstewce przyściennej decydująca rolę odgrywa przewodzenie, czyli wymiana ciepła jest mniej intensywna niż w strumieniu cieczy oddalonym od ścianki, gdzie występuje także konwekcja.

Zjawisko wymiany ciepła między ścianką a przepływającym obok strumieniem płynu nosi nazwę *przejmowania ciepła*. Opisuje je równanie Newtona:

$$q = c(T_w - T_f) \quad (8)$$

gdzie:

T_w - temperatura ścianki.

T_f - temperatura płynu w dość dużej odległości od ścianki, przy czym sposób określania T_f jest zwykle dokładnie określony.

c - intensywność wymiany ciepła – współczynnik przejmowania ciepła ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

Równanie Newtona ma co prawda prostą postać ale określenie współczynnika c jest bardzo trudne, gdyż zjawiska konwekcji są na ogół skomplikowane.

Promieniowanie ciepła

To zjawisko polegające na przenoszeniu energii przez kwanty promieniowania elektromagnetycznego o pewnym zakresie długości fali. W odróżnieniu od przewodzenia ciepła i konwekcji, promieniowanie nie wymaga ośrodka materialnego, w którym mogłoby się rozchodzić, gdyż może się ono również rozchodzić w próżni. Energia promieniowania przenosi się z prędkością równą prędkości światła, co wynika z elektromagnetycznego pochodzenia tej energii. Z charakteru zależności ilości energii wypromieniowanej od temperatury ciała wysyłającego ją wynika, że wymiana ciepła przez promieniowanie może być często pomijana przy umiarkowanych temperaturach, natomiast jej wpływ staje się coraz większy w miarę wzrostu temperatury ciał wymieniających ciepło.

Istotnym zagadnieniem są również procesy ustalonej i nieustalonej wymiany ciepła. *Ustalona wymiana ciepła* zachodzi, gdy rozkład temperatur w rozpatrywanym układzie nie ulega zmianom w czasie oraz gdy stałe są ilości przenoszonego ciepła. Natomiast w procesie *nieustalonej wymiany ciepła* rozkład temperatur oraz ilość wymienianego ciepła ulega zmianom w czasie.

Głównym celem zagadnień związanych z wymianą ciepła jest określenie ilości ciepła Q przenoszonej w rozpatrywanym układzie, ograniczonym zwykle pewną powierzchnią F . Miarą przekazywanego ciepła jest natężenie strumienia cieplnego q .

$$q = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_h}{\Delta F} \quad (9)$$

gdzie: ΔQ_h - ilość ciepła przenoszonego przez element powierzchni ΔF i odniesioną do jednostki czasu.

Czyli natężenie strumienia cieplnego jest równe ilości ciepła wymienionego w ciągu jednostki czasu przez 1 m^2 powierzchni przy ustalonej wymianie ciepła i równomiernym przenoszeniu ciepła przez całą powierzchnię grzejną (W/m^2).

Mechanizm promieniowania ciepła odbywa się zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana zgodnie, z którym energia wypromieniowana przez ciało doskonale czarne⁴ jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej tego ciała. Matematycznie przedstawia się to następująco:

$$q = C_0 \left(\frac{\theta}{100} \right)^4 \quad (10)$$

⁴ Hipotetyczne ciało, które pochłania całą energię promieniowania padającą na nie, nic nie przepuszczając i nie odbijając.

Gdzie C_0 to tzw. stała promieniowania ciała doskonale czarnego. Natomiast ciepło wypromieniowane przez powierzchnię F w ciągu jednostki czasu wynosi:

$$Q_h = C_0 F \left(\frac{\theta}{100}\right)^4 \quad (11)$$

Oczywiście ciała rzeczywiste nie są ciałami doskonale czarnymi i w tej samej temperaturze wypromieniowują mniej energii niż ciało doskonale czarne. W sytuacji, gdy stosunek ilości energii wypromieniowanej przez ciało doskonale czarne w tych samych warunkach nie zależy od długości fali promieniowania, to ciało takie nosi nazwę ciała szarego. Wymiana ciepła między ciałami szarymi opisana jest następującym równaniem:

$$Q_{1-2} = C_0 F_1 \phi_{1-2} \left[\left(\frac{\theta_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_2}{100}\right)^4 \right] \quad (12)$$

gdzie:

θ_1, θ_2 - temperatury bezwzględne ciał wymieniających ciepło,

F_1 - powierzchnia ciała o temperaturze θ_1 ,

ϕ_{1-2} - współczynnik odchylenia własności ciał od własności ciała doskonale czarnego oraz układ geometryczny obu ciał.

Wpływ podstawowych czynników na przewodnictwo cieplne ciał stałych, ciekłych i gazowych

Mechanizm przewodzenia ciepła nie jest dokładnie zbadany. Zależy w dużej mierze od wielu czynników m.in. od stanu skupienia ośrodka, od składu chemicznego, wielkości ziaren czy wielkości porów w materiale. Istotne znaczenie ma również to czy obecne w materiale pory są otwarte czy zamknięte. Przewodnictwo cieplne materiałów zależy również od kierunku przepływu ciepła. Będzie różna dla tego samego materiału włóknistego, gdy ciepło będzie przepływać wzdłuż i inne, gdy ciepło będzie przepływać prostopadle do jego włókien.

Przewodnictwo cieplne gazów

Proces przewodzenia ciepła w gazach polega na dyfuzji cząsteczek gazu przechodzących z obszaru o wyższej temperaturze do obszaru o temperaturze niższej i odwrotnie. Na podstawie założeń kinetycznej teorii gazów, ich przewodnictwo cieplne λ można powiązać z ciepłem właściwym c_v oraz lepkością μ , następującą zależnością:

$$\lambda = c_v \mu \quad (13)$$

Natomiast równanie uwzględniające ilość atomów i stopni swobody cząsteczki gazu oraz energię tej cząsteczki, wygląda następująco:

$$\lambda = \epsilon c_v \mu \quad (14)$$

gdzie ϵ jest współczynnikiem, którego wielkość zależy od ilości atomów w cząsteczce gazu oraz od jego budowy. Jego wartość maleje wraz ze wzrostem ilości atomów w cząsteczce (Tabela 1)

Tabela 1

	ϵ
Dla gazów jednoatomowych	2.5
Dla gazów dwuatomowych o pomijalnie małej energii oscylacji cząsteczek tj. np. O ₂ , N ₂	1.9
Dla gazów dwuatomowych o znacznej energii oscylacji cząsteczek	1.75

Wartości liczbowe przewodnictwa cieplnego gazów zawierają się w granicach $\lambda = 0.005-0.6$ W/mK.

Przewodnictwo cieplne gazów rośnie wraz ze wzrostem temperatury (Rysunek 7), natomiast jest niezależna od ciśnienia, z wyjątkiem bardzo wysokich (od 200 000 Pa) i bardzo niskich (poniżej 2666 Pa) ciśnień.

Przewodnictwo cieplne cieczy

Dla cieczy przewodnictwo cieplne, podobnie jak dla gazów, spowodowana jest bezładnym ruchem atomów i cząsteczek oraz związanym z tym przekazywaniem energii w czasie ich zderzeń. Równanie opisujące tą wielkość przedstawia się następująco:

$$\lambda = 3 \frac{B}{N} u_a \frac{1}{D^2} \quad (15)$$

gdzie:

B – stała gazowa bezwzględna,

N – liczba Avogadra,

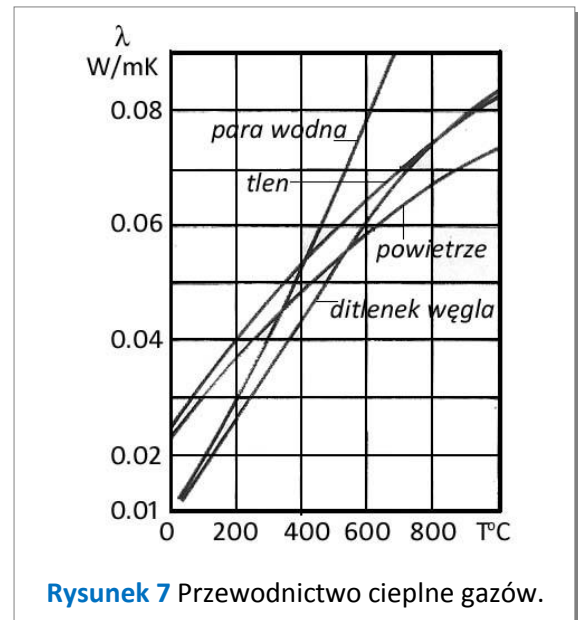
u_a – prędkość rozchodzenia się dźwięku,

D – średnia odległość środków cząsteczek cieczy przylegających do siebie.

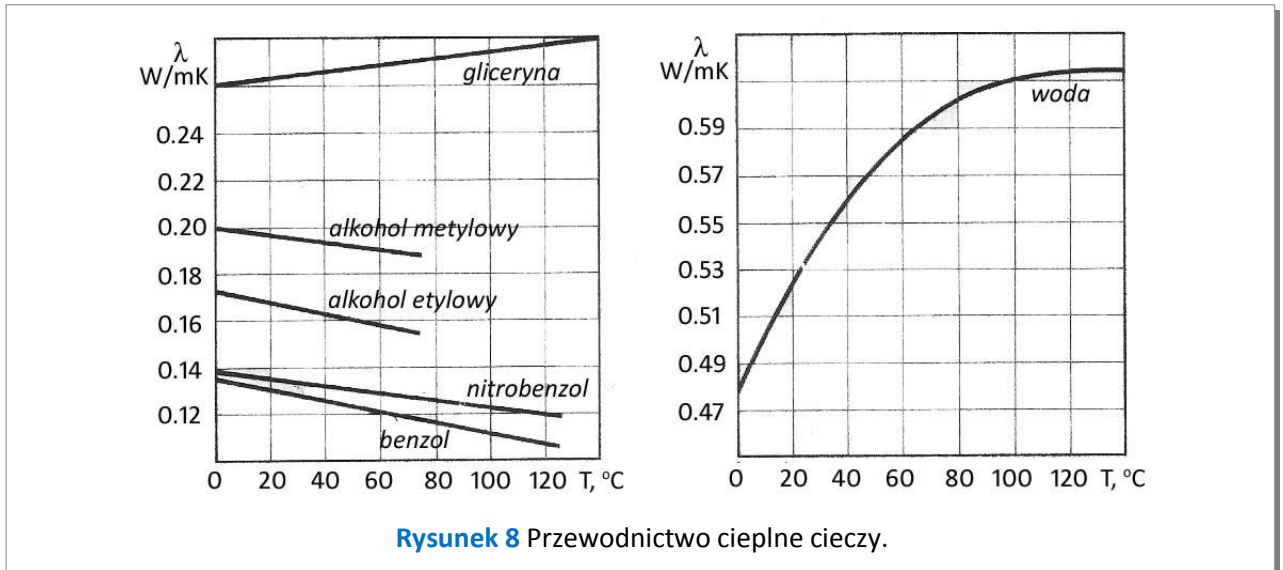
Wartości liczbowe λ dla cieczy zawierają się w granicach $\lambda = 0.08-0.7$ W/mK, oczywiście za wyjątkiem ciekłych metali. Ich przewodnictwo cieplne jest mniejsze niż metali w stanie stałym ale bardzo duże w porównaniu do innych cieczy. Należy pamiętać, że wraz ze wzrostem temperatury przewodnictwo cieczy maleje, a wyjątek stanowią gliceryna oraz woda (Rysunek 8).

Przewodnictwo cieplne ciał stałych

Przewodnictwo cieplne ciał stałych zawiera się w szerokich granicach, od 0.02-2.9 W/mK (dla najlepszych materiałów izolacyjnych) do 420 W/mK dla najlepszych przewodników ciepła, czyli metali.



Rysunek 7 Przewodnictwo cieplne gazów.



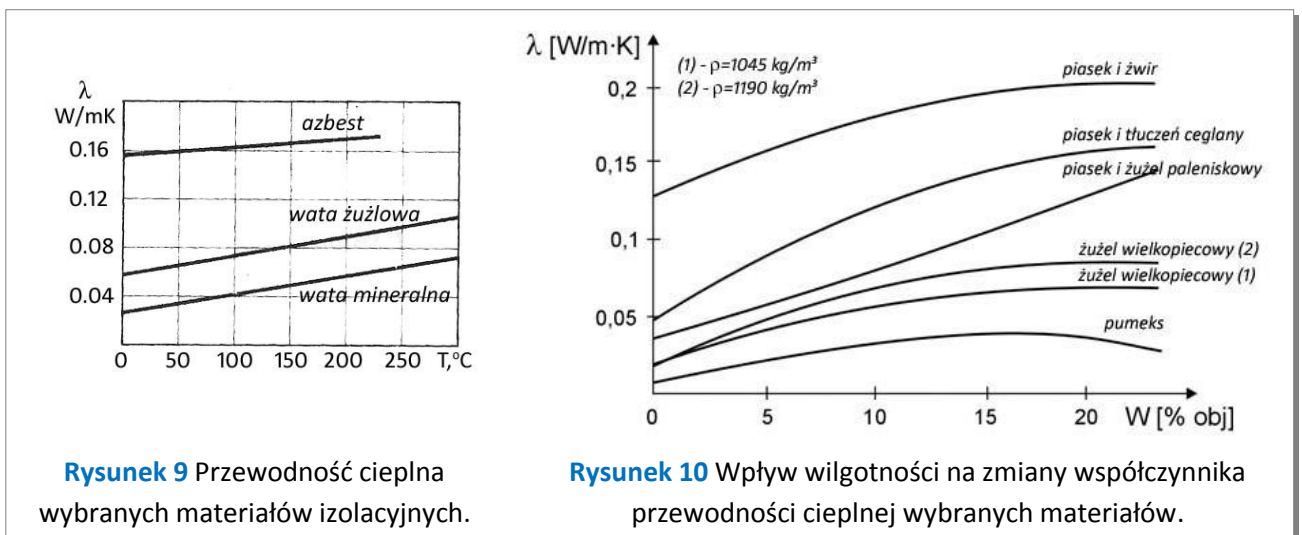
Rysunek 8 Przewodność cieplna cieczy.

Należy pamiętać, że wartości liczbowe λ zależą od budowy ciała, zarówno od jego składu chemicznego, jak i struktury. Przykłady przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2

Materiał	Współczynnik, %	
	W stanie krystalicznym	W stanie bezpostaciowym
SiO ₂	32.5	1.39
MgO	152.0	0.97
Al ₂ O ₃	37.7	0.68

Przewodność cieplna materiałów izolacyjnych i budowlanych jest niewielkie. Związane jest to z tym, że zwykle są to materiały porowate, których pory wypełnione są powietrzem. One z kolei pełnią rolę izolatora. Należy pamiętać, o tym, że im mniejszy jest ciężar objętościowy takiego materiału, tym jego przewodność cieplna jest mniejsza. Natomiast gdy pory są duże i są wypełnione powietrzem może to spowodować powstanie konwekcji w porach i tym samym wpłynąć na zwiększenie przewodności cieplnej materiału (Rysunek 9).



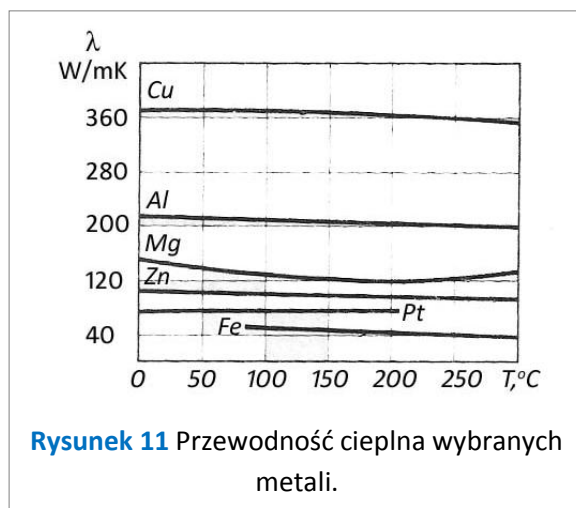
Rysunek 9 Przewodność cieplna wybranych materiałów izolacyjnych.

Rysunek 10 Wpływ wilgotności na zmiany współczynnika przewodności cieplnej wybranych materiałów.

Należy pamiętać również o roli wilgoci, jaką wywiera ona na przewodnictwo cieplne materiałów porowatych. Przewodnictwo cieplne materiałów wilgotnych jest znacznie większe niż materiału suchego. Wpływ wilgotności na zmianę współczynnika przewodnictwa cieplnego w wybranych materiałach porowatych przedstawiono na Rysunku 10.

W przypadku współczynnika przewodnictwa cieplnego materiałów porowatych mamy na myśli tzw. efektywny współczynnik przewodnictwa cieplnego λ_{ef} . O jego wartości decydują wartości współczynników przewodnictwa cieplnego szkieletu ciała porowatego λ_s oraz płynu wypełniającego jego pory λ_p (ciecz, gaz, mieszanina cieczy i gazu).

Metale w stanie stałym mają duże przewodnictwo cieplne, co wynika z tego, że przewodzenie ciepła zachodzi w nich głównie wskutek ruchu strumienia swobodnych elektronów (Rysunek 11). Przewodnictwo cieplne metali maleje ze wzrostem temperatury. Ciepło najlepiej przewodzi srebro (418 W/mK), potem miedź (397 W/mK), złoto (297 W/mK) oraz aluminium (221 W/mK).



Rysunek 11 Przewodność cieplna wybranych metali.

Metody wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła

W obrębie wyznaczania λ istnieją metody ustalonego i nieustalonego przepływu ciepła. Łatwiejsze w wykonaniu są pierwsze z nich, jednak wymagają długiego czasu ustalania równowagi cieplnej.

Ustalony przepływ ciepła

Jednopłytkowy aparat Poensgena – Metoda polega na umieszczeniu badanego materiału w formie płyty pomiędzy powierzchniowym źródłem ciepła i powierzchnią chłodzącą. Zasada działania urządzenia polega na przepuszczeniu przez próbkę określonego strumienia ciepła oraz zmierzeniu różnic temperatur powstałych przy ustalonym przepływie ciepła na powierzchniach doprowadzenia i odprowadzenia ciepła (Rysunek 12).

Dwupłytkowy aparat Poensgena – Aparat wykorzystywany jest do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła materiałów stałych, sypkich i włóknistych o małym współczynniku przewodzenia ciepła. Dwie jednakowe próbki w formie płyt umieszcza się po obu stronach grzejnika – Rysunek 13. W przypadku tej metody rzeczywistą wartość λ wyznacza się po ustaleniu równowagi termicznej przyrządu oraz próbki, czyli gdy wartość współczynnika nie będzie się zmieniał przez okres około 1 godziny.

$$\lambda_{sr} = \frac{q\delta}{\Delta v} \quad (16)$$

gdzie:

λ_{sr} - średni współczynnik przewodzenia ciepła między temperaturami v_d i v_w ;

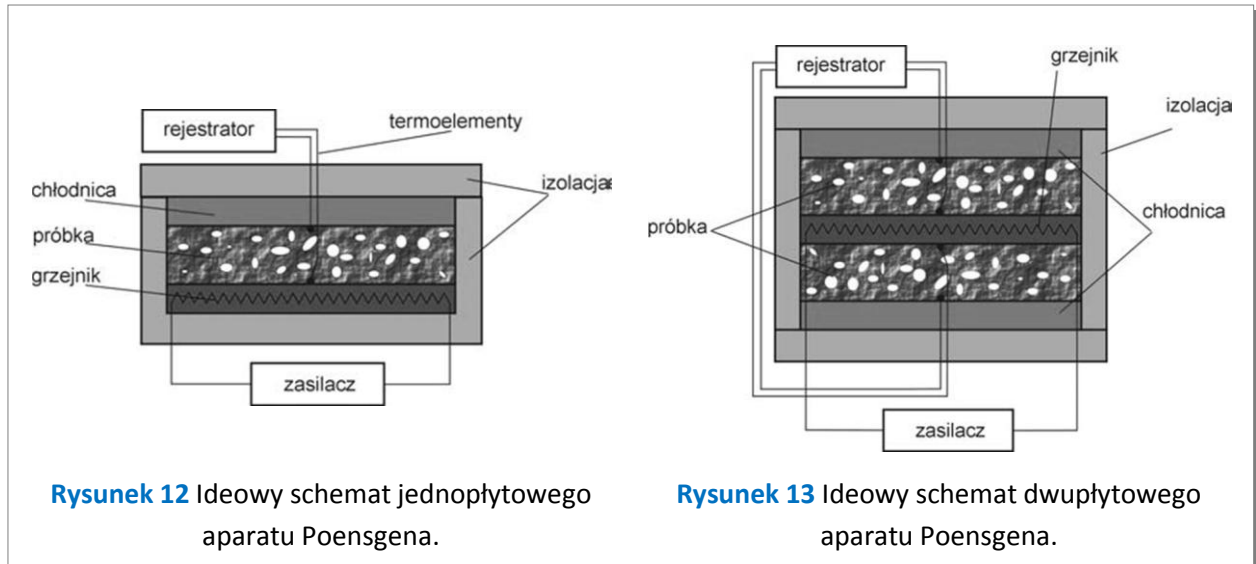
$\Delta v = v_d - v_w$ - temperatury na dopływie i wypływie strumienia ciepła;

δ - grubość przegrody,

q - zagęszczenie strumienia ciepła ($q = \frac{Q}{A}$)

Q - strumień ciepła,

A - pole powierzchni przekroju przegrody



Rysunek 12 Ideowy schemat jedno płytowego aparatu Poensgena.

Rysunek 13 Ideowy schemat dwupłytkowego aparatu Poensgena.

Nieustalony przepływ ciepła

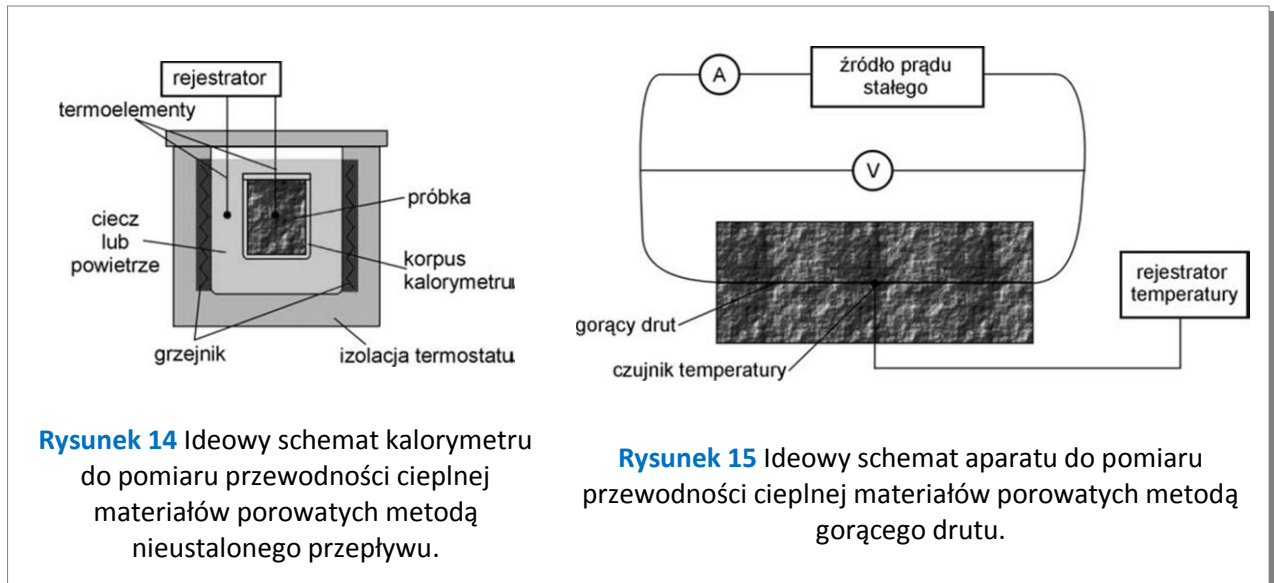
W tym przypadku zwykle stosuje się teorię uporządkowanego strumienia ciepła lub metody fal cieplnych.

Metoda lambdakalorymetru – Metoda polega na umieszczeniu badanego materiału w kalorymetrze (Rysunek 14), który po wcześniejszym nagraniu chłodzi się. W tym czasie bada się szybkość chłodzenia kalorymetru mierząc w określonych przedziałach czasowych różnicę pomiędzy chłodzonym ciałem a powietrzem. W wyniku tego otrzymuje się szybkość chłodzenia i na podstawie teorii uporządkowanego przepływu ciepła wyznacza się współczynnik przewodzenia ciepła. Metoda ta wymaga znajomości wartości dyfuzyjności cieplnej oraz ciepła właściwego badanego materiału lub współczynnika wnikania ciepła. Parametry te wyznaczone są również eksperymentalnie poprzez umieszczenie kalorymetru w cieczy.

Metoda gorącego drutu – Metoda polega na umieszczeniu w badanej próbce drutu o określonej oporności, przez który przepuszcza się prąd stały o znanym natężeniu. Przepływ prądu powoduje wzrost temperatury w drucie, który staje się liniowym źródłem ciepła w badanym materiale. Pomiar przyrostu temperatury w czasie mierzy się albo na samym drucie albo w ściśle określonej odległości od niego (Rysunek 15).

Metoda fali cieplnej – Metoda służy do bezpośredniego pomiaru dyfuzyjności cieplnej a . Znając jej wartość oraz gęstość i ciepło właściwe badanego materiału wyznacza się wartość współczynnika przewodzenia ciepła. Badana próbka ma kształt pręta (Rysunek 16), generuje się falę cieplną poprzez cykliczne zmiany temperatury na brzegu próbki. W wyniku pomiarów temperatury przynajmniej

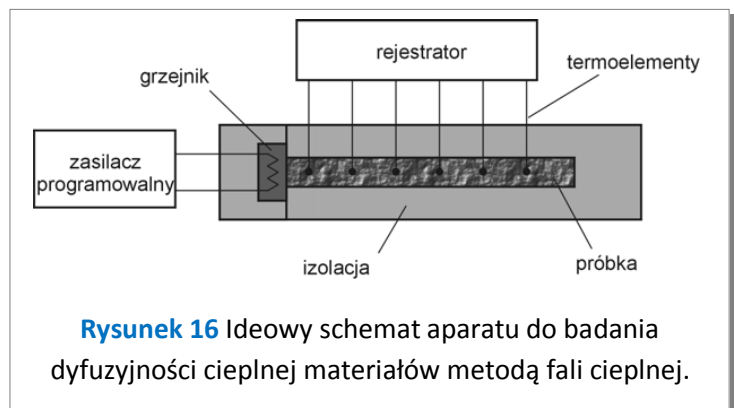
w dwóch punktach próbki, wyznacza się charakterystyczne parametry fali oscylacji temperatury tj. intensywność jej tłumienia oraz przesunięcie fazowe sygnałów.



Rysunek 14 Ideowy schemat kalorymetru do pomiaru przewodności cieplnej materiałów porowatych metodą nieustalonego przepływu.

Rysunek 15 Ideowy schemat aparatu do pomiaru przewodności cieplnej materiałów porowatych metodą gorącego drutu.

Metoda impulsu laserowego – Metoda ta stanowi odmianę metody fali cieplnej, która znajduje zastosowanie dla materiałów o dużym współczynniku przewodnictwa cieplnego oraz gdy wymagane są niewielkie rozmiary próbek oraz szybki czas pomiaru. Badany materiał w kształcie płyty doprowadza się do temperatury pomiaru, a następnie w jego kierunku skierowuje się krótki impuls świetlny o określonej energii lasera. Ciepło rozchodzi się w materiale powodując wzrost temperatury po drugiej stronie powierzchni płyty, gdzie jest ona mierzona za pomocą czujnika podczerwieni. Impuls ciepła po przejściu przez próbkę niesie w sobie informację o jej własnościach termofizycznych. Zmiany temperatury na powierzchni przeciwnej do naświetlanej promieniowaniem laserowym powierzchni próbki, nazywane historią temperatury, stanowią podstawę do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej. Właśnie ten fakt wykorzystuje się m.in. w Laserowej Metodzie Impulsowej (LFM). Zakres wartości dyfuzyjności cieplnej a i klasy materiałów badanych za jej pomocą przedstawiono na Rysunku 17.



Rysunek 16 Ideowy schemat aparatu do badania dyfuzyjności cieplnej materiałów metodą fali cieplnej.

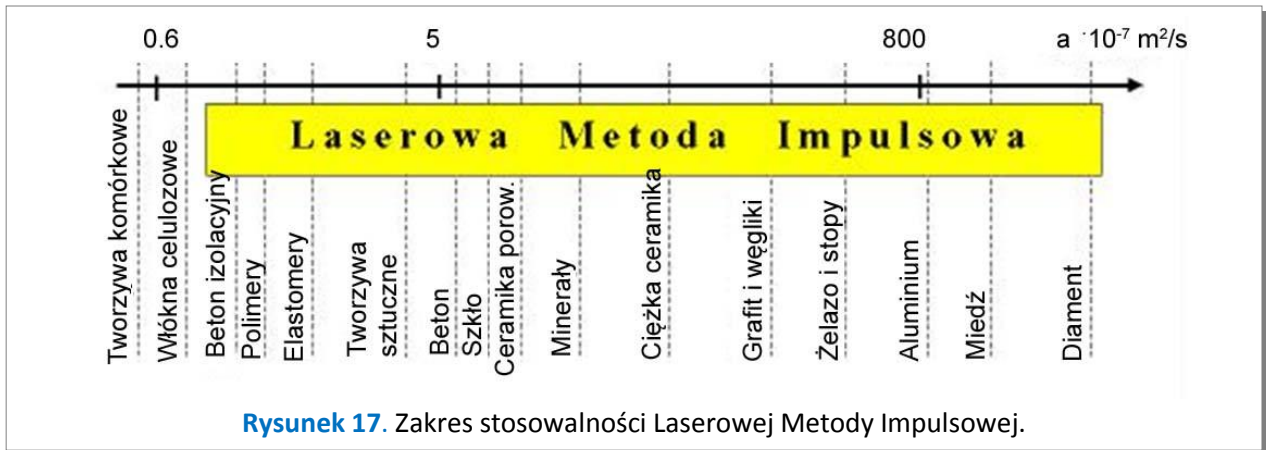
W omawianej metodzie współczynnik a wyznacza się korzystając z następującej zależności:

$$a = 0.1388 \frac{L^2}{t_{1/2}} \quad (17)$$

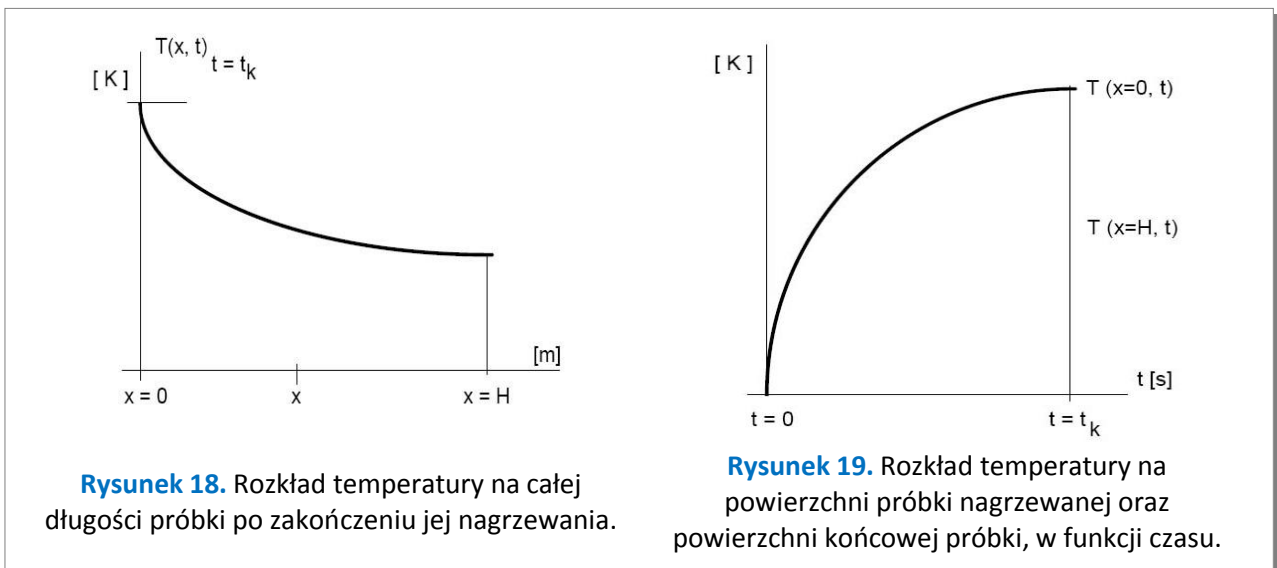
gdzie:

L - grubość badanej próbki, mm;

$t_{1/2}$ – czas, po którym tylna powierzchnia próbki osiągnie połowę swego maksymalnego przyrostu temperatury ΔT , s.



Na Rysunkach 18 i 19 przedstawiono kolejno rozkład temperatury na całej długości próbki po zakończeniu jej nagrzewania oraz rozkład temperatury na powierzchni próbki nagrzewanej oraz powierzchni końcowej próbki, w funkcji czasu.



Rysunek 20 przedstawia transport ciepła w badanym materiale zarejestrowany metodą LFM.

Ponieważ teoria zakłada idealne warunki pomiaru, dość trudne do spełnienia w warunkach laboratoryjnych, pomiary przeprowadzone bezpośrednio w oparciu o tę teorię obarczone są zwykle błędami, w związku z czym szereg prac poświęcono opracowaniu metod korekcji tych błędów. Metody korekcji błędów wywołanych przez radiacyjne straty ciepła zostały opracowane przez Cowana⁵, Heckmana⁶, Clarka i Taylora⁷ Cape'a i Lehmana⁸ oraz Jamesa⁹. Badania nad tym problemem trwają w dalszym ciągu (np. [J. Appl. Phys., vol 75 (1994) 2325]). Natomiast wystąpienie efektu skończonego czasu trwania impulsu analizowali Cape i Lehman oraz Clark i Taylor¹⁰. Beedham

⁵ J. Appl. Phys., vol. 14 (1963) 926

⁶ J. Appl. Phys., vol. 44 (1973) 1455

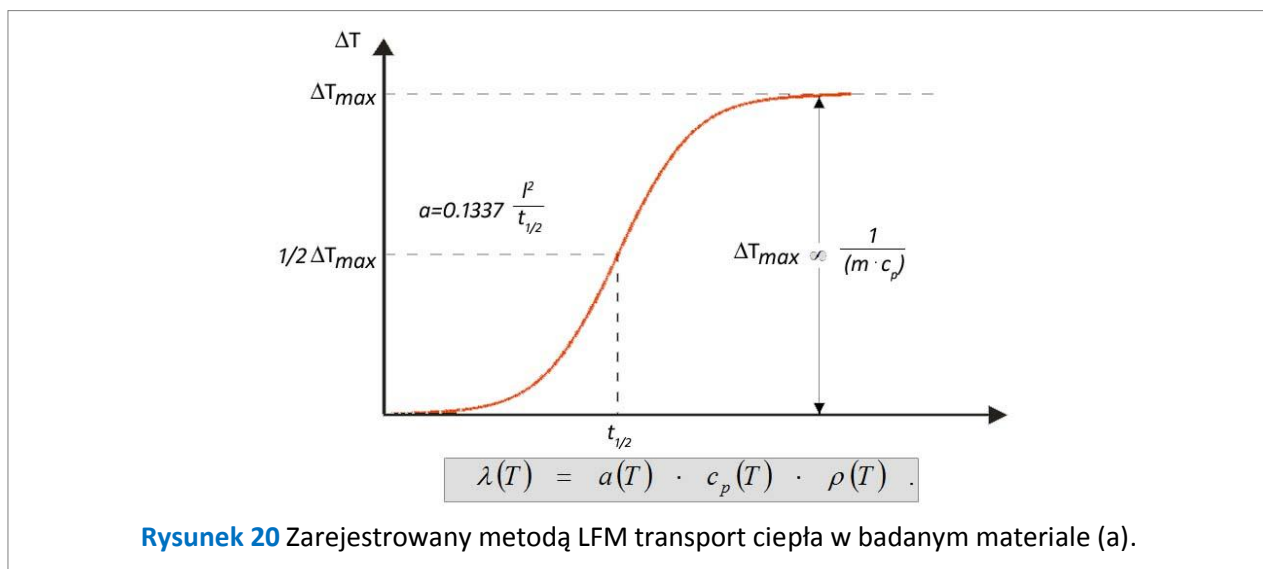
⁷ J. Appl. Phys., vol. 46 (1975) 714

⁸ J. Appl. Phys. vol. 34 (1963) 1909

⁹ J. Appl. Phys., vol. 51 (1980) 4666

¹⁰ High Press. vol. 6 (1974) 62

i Dalrymple¹¹, MacKay i Schriempf¹² i Taylor¹³ badali również wpływ niejednorodnego powierzchniowego źródła ciepła na kształt historii temperatury oraz dokładność wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej i stwierdzili, że dla poprawności osiągniętych wyników istotna jest jedynie jednorodność źródła ciepła w jego centralnej części.



Znajomość dyfuzyjności cieplnej materiałów ma istotne znaczenie w analizie wytrzymałościowej konstrukcji metalowych pracujących w zmiennych warunkach termicznych. Jest również istotna w obliczeniach cieplnych wymienników i wielu innych dziedzinach.

Wyznaczenie dyfuzyjności cieplnej, gęstości ρ oraz ciepła właściwego c_p umożliwia (zgodnie z równaniem (1)) poznanie przewodnictwa cieplnego badanych materiałów.

Możliwości pomiarowe zestawu do badań termofizycznych materiałów ceramicznych

LFA 427

Urządzenie **LFA 427** postępuje się laserową metodą impulsową do pomiaru przewodnictwa cieplnego (dyfuzyjności cieplnej). Charakteryzuje się ono wysoką precyzją i powtarzalnością, krótkimi czasami pomiaru, a także możliwością wykonywania badań dla próbek o różnym kształcie i przekroju. Pozwala na wykonywanie pomiarów próbek stałych i ciekłych, jak również 2 i 3 warstwowych laminatów. Umożliwia wykonywanie pomiarów w atmosferze inertyjnej aż do temperatury 2000°C.

Oprogramowanie sterujące **LFA 427** (*NETZSCH Proteus® Software for Thermal Analysis*) pozwala na:

1. Dokładną korekcję długości pulsu oraz jego mapping;
2. Korekcję strat cieplnych zgodnie z modelami literaturowymi;
3. Nieliniową regresję dla dopasowania Cowana;

¹¹ Rev. Htes Temp. et Refract., vol. 7 (1970) 278

¹² J. Appl. Phys., vol. 47 (1976) 1668

¹³ Rev. Htes Temp. et Refract., vol. 12 (1975) 141

4. Wykorzystanie modelu Cape-Lehmanna uwzględniającego straty ciepła w różnych kierunkach
5. Automatyczne wybranie odpowiedniego modelu matematycznego z możliwością przedstawienia wszystkich modeli na jednym wykresie;
6. Określenie ciepła właściwego;
7. Korekcję efektu promieniowania;
8. Analizę wyników pomiarów dla 2 i 3 warstwowych laminatów;
9. Analizę wyników pomiarów dla próbek stałych o różnych wymiarach;
10. Analizę wyników pomiarów dla próbek ciekłych;

Parametry urządzenia:

- Przedział temperaturowy pomiaru: 18°C - 2000°C
- Szybkość grzania / chłodzenia: 0.01 K/min - 50 K/min
- Moc lasera: 20 J/puls (możliwość regulacji mocy i długości pulsu)
- Bezkontaktowy pomiar wzrostu temperatury poprzez detektor IR
- Przedział pomiarowy dyfuzyjności cieplnej: 0,01 mm²/s - 1000 mm²/s
- Przedział pomiarowy przewodnictwa cieplnego: 0,1 W/mK - 2000 W/mK
- Nośnik próbek: Al₂O₃, grafit
- Atmosfera: Argon

Wymiary próbek:

- okrągłe: średnica: 6 mm - 12,7 mm, grubość: 0,1 mm - 6 mm;
- prostokątne: 10 mm x 10 mm x (grubość) 0,1 mm - 6 mm

DIL 402 C

Dylatometr DIL 402 C firmy NETZSCH zapewnia wysoki stopień dokładności, powtarzalności i stabilności temperaturowej.

Oprogramowanie sterujące dylatometrem (*NETZSCH Proteus® Software for Thermal Analysis*) umożliwia wyznaczenie *współczynnika rozszerzalności cieplnej (CTE)*, *temperatury topnienia*, *punktu mięknięcia*, rejestrację *skurczu podczas spiekania* i wielu innych parametrów zależnych od zmian wydłużenia próbki w funkcji temperatury czy czasu.

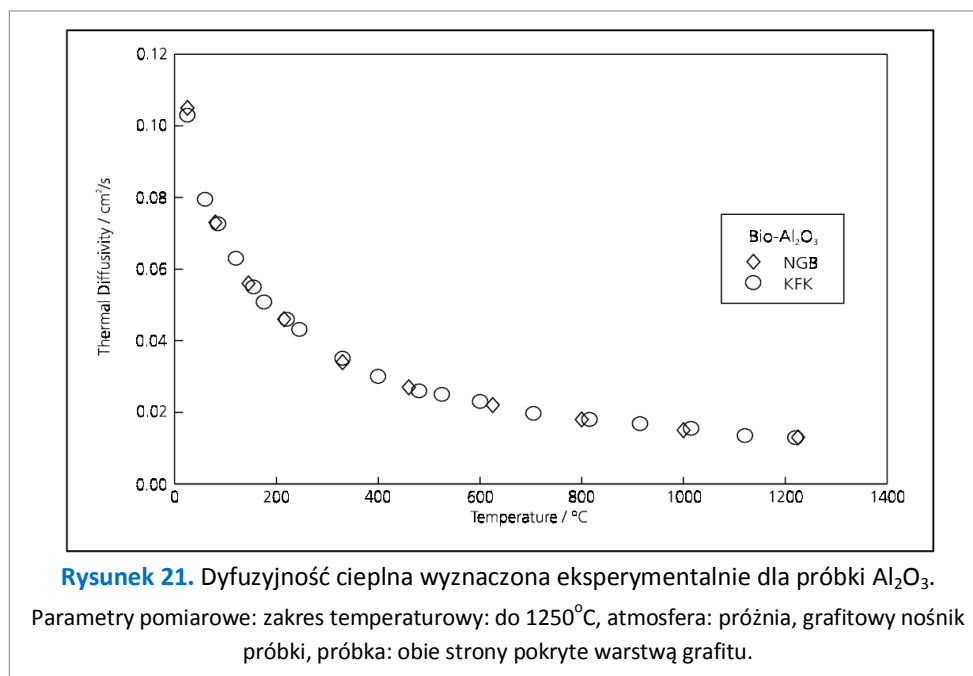
Parametry urządzenia:

- Zakres temperatury: 20°C - 1600°C
- Szybkość grzania / chłodzenia: 0.01 K/min - 50 K/min
- Uchwyty próbek i podstawki: kwarc < 1100°C, Al₂O₃ < 1600°C
- Zakres pomiarowy dylatomtru: ± 500/5000 μm
- Długość próbek: max. 50 mm
- Średnica próbek: max. 12 mm
- Siła docisku do próbki od 15 - 45 cN,
- Atmosfery statyczne, dynamiczne lub próżnia

Przykłady zastosowania aparatury do wyznaczania przewodnictwa cieplnego wybranych materiałów

Al_2O_3 (Rysunek 21)

Tlenek glinu Al_2O_3 ze względu na swoje właściwości znalazł szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Szczególnie jednak jest on wykorzystywany w produkcji aluminium czy jako materiał ścierny (twardość w skali Mosha 9), jak również do produkcji materiałów ogniotrwałych ze względu na wysoką temperaturę topnienia (2053^{14} – 2072^{15} °C). Dyfuzyjność cieplna jest parametrem wymaganym przy produkcji i projektowaniu materiałów pracujących w wysokich temperaturach, a dodatkowa informacja o ciepłe właściwych czy gęstości wytworzonego materiału umożliwia wyznaczenie wartości jego przewodnictwa cieplnego. Na Rysunku 21 przedstawiono doskonałą zgodność pomiarową parametru „a” dla Al_2O_3 wyznaczoną w dwóch niezależnych ośrodkach badawczych.

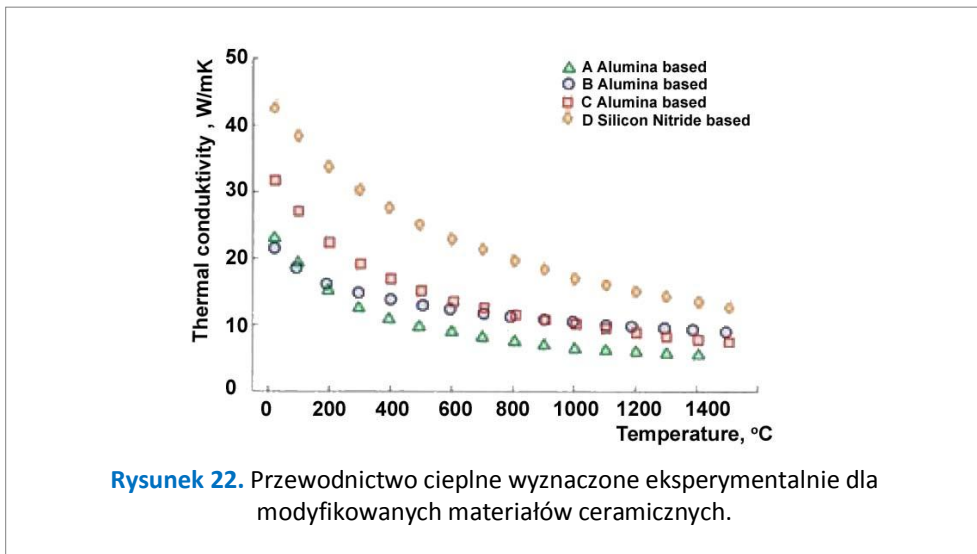


Ceramiczne materiały skrawiające (Rysunek 22)

W związku z tym, że ceramika znajduje coraz szersze zastosowanie w produkcji materiałów przeznaczonych do obróbki skrawaniem, obecnie ma miejsce intensywny rozwój badań nad modyfikacją jej składu i właściwości. Materiały ceramiczne cechują się dobrą własnościami zapewniającymi dobrą przyczepność oraz odporność chemiczną. Niestety ich odporność na szoki termiczne jest niezadawalająca i konieczna jest modyfikacja ich składu, właściwości i struktury. Dlatego też dyfuzyjność cieplna czy przewodnictwo cieplne tego typu materiałów są jednymi z ważniejszych parametrów decydujących o możliwości ich dalszego wykorzystania.

¹⁴ CRC Handbook of Chemistry and Physics, 83th ed.; s. 4-2; CRC Press LLC: Boca Raton, 2003

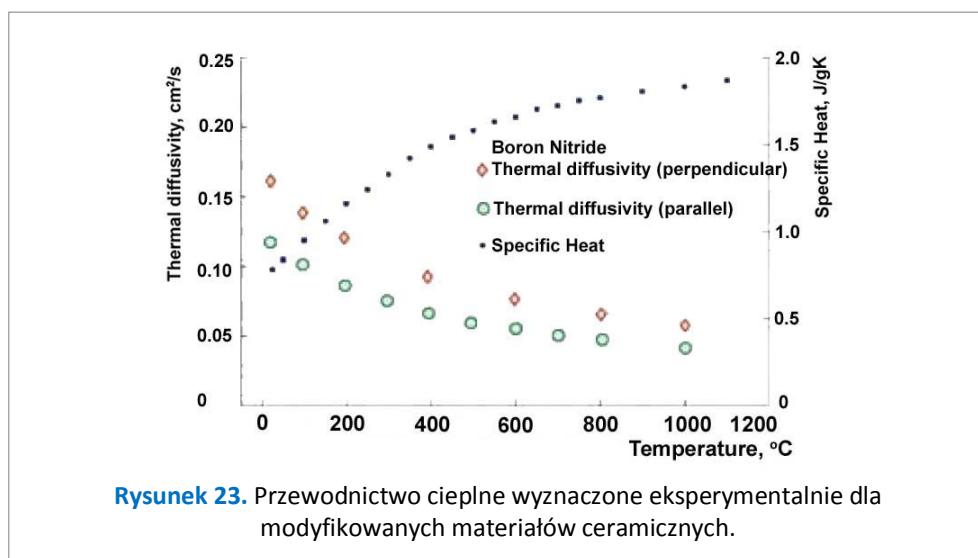
¹⁵ CRC Handbook of Chemistry and Physics, 73th ed.; s. 4-36; CRC Press LLC: Boca Raton, 1993



Rysunek 22 przedstawia zależność przewodnictwa temperaturowego czterech modyfikowanych materiałów ceramicznych w funkcji temperatury. Matrycą dla ceramiki A, B oraz C było Al_2O_3 z różnymi dodatkami, natomiast skład próbki D był oparty na Si_3N_4 . Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że właśnie próbka D cechuje się najwyższymi wartościami przewodnictwa cieplnego, co pozwala jej na pracę w warunkach narażonych na częste zmiany temperatury (chłodzenie cieczą), podczas gdy próbki A oraz B nie mogą być chłodzone w ten właśnie sposób. Próbka C może być chłodzona cieczą ale tylko w niskich temperaturach.

Azotek boru (Rysunek 23)

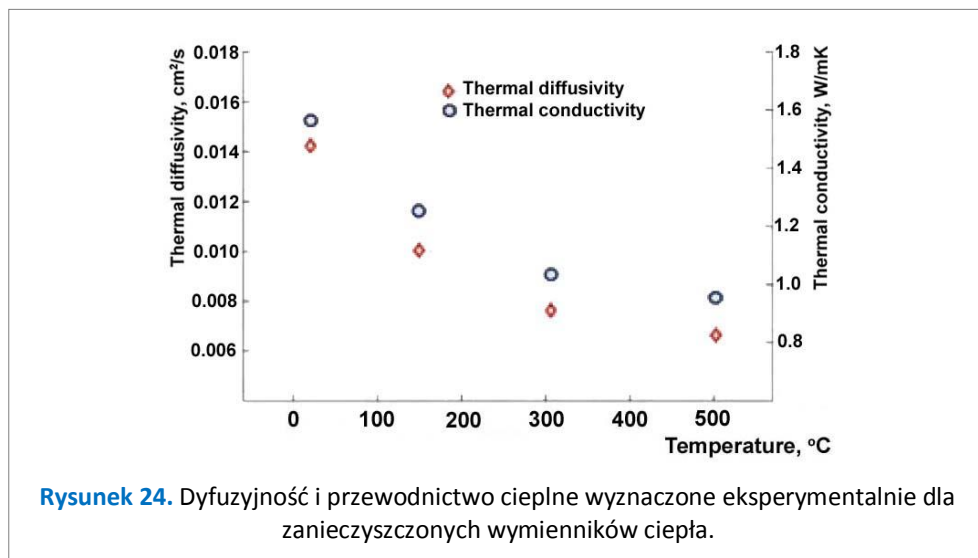
Czysty heksagonalny azotek boru jest miękkim materiałem (podobnym zresztą do grafitu), cechującym się doskonałymi właściwościami izolacyjnymi do temperatury 2000°C . Dlatego też, bardzo często jest używany jako wysokotemperaturowy materiał izolacyjny. Azotek boru jest również odporny na szoki termiczne.



Na Rysunku 23 przedstawiono ciepło właściwe oraz dyfuzyjność cieplną azotku boru prasowanego na gorąco (gęstość 2.1 g/cm^3). Ze względu na jego strukturę, dyfuzyjność cieplna materiału prasowanego równolegle jest niższa niż w przypadku materiału prasowanego prostopadle, co oczywiście gwarantuje mu jego doskonałe właściwości.

Wymienniki ciepła (Rysunek 24)

Z upływem czasu powierzchnia wymienników ciepła pokrywa się różnego rodzaju osadem - zanieczyszczeniem. Powodują one powstanie dodatkowych oporów przepływu ciepła, a tym samym obniżenie wydajności samych wymienników. W celu ilościowego określenia wpływu tego typu zanieczyszczenia na sprawność wymienników ciepła konieczne jest kontrolowanie i badanie ich dyfuzyjności cieplnej (\Rightarrow przewodnictwa cieplnego). Na Rysunku 24 przedstawiono wpływ zanieczyszczeń na wartość dyfuzyjności cieplnej wymienników ciepła w funkcji temperatury.



Literatura

1. Bogumił Staniszewski, Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne, PWN, Warszawa, 1980.
2. Praca zbiorowa pod red. Andrzeja Ambrozika, Laboratorium z termodynamiki i dynamiki przepływów, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 1995.
3. Praca zbiorowa, Pomiary cieplne cz. I, Podstawowe pomiary cieplne, Wyd. Nauk.-Tech., Warszawa, 1995.
4. Jacek Banaszak, Wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła w materiałach porowatych.
5. Tadeusz Pieczonka, Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych, Kraków, 2010.
6. <http://www.if.p.lodz.pl/tomasz.wojtatowicz>
7. <http://lodd.p.lodz.pl/ekon/>
8. www.netzsch-thermal-analysis.com