

METODA POMIARU PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ MATERIAŁÓW DOBRZE PRZEWODZĄCYCH CIEPŁO W ASPEKCIE ODPOWIEDNIEGO DOBORU IZOLACJI

MEASUREMENT METHOD OF THERMAL CONDUCTIVITY OF GOOD HEAT CONDUCTORS IN CONTEXT OF THE CHOICE OF THE INSULATION

JOANNA WILK
FRANCISZEK WOLAŃCZYK

POLITECHNIKA RZESZOWSKA
WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy zaprezentowano unikatową metodę pomiaru przewodności cieplnej metali i ich stopów – dobrych przewodników ciepła. Przedstawiona metoda bazuje na uzyskaniu kwazistacjonarnego przystanku temperatury z chwilą osiągnięcia temperatury topnienia substancji, która stanowi odbiornik ciepła podczas ogrzewania próbki badanego materiału. Otrzymane współczynniki przewodzenia ciepła umożliwiają właściwy dobór materiałów izolacyjnych.

ABSTRACT

The paper presents the unique method of the measurement of thermal conductivity of metals and metal alloys, which are good thermal conductors. The method is based on the quasi-stationary temperature fixing when the temperature of the melting of the metrology substance is reached. The metrology substance is the heat collector during the heating of the sample of investigated material. Received results in the form of values of thermal conductivity enable the proper choice of the insulation materials.

Oznaczenia:

a – dyfuzyjność cieplna, m^2/s

A – powierzchnia, m^2

c – ciepło właściwe, $J/(kg \cdot K)$

d – średnica, m

h – współczynnik przejmowania ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$

λ – współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność cieplna), $W/(m \cdot K)$

L – długość, m

P – obwód, m

q – gęstość strumienia ciepła, W/m^2

\dot{Q} – strumień ciepła (moc cieplna), W

t – czas, s

T – temperatura, K ,

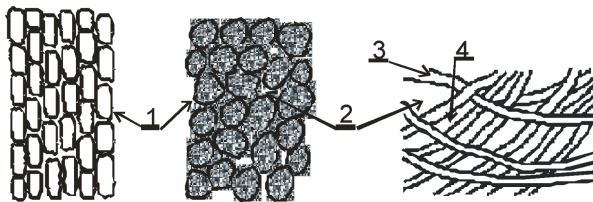
δ – grubość, m

ρ – gęstość, kg/m^3

4.1. Wprowadzenie

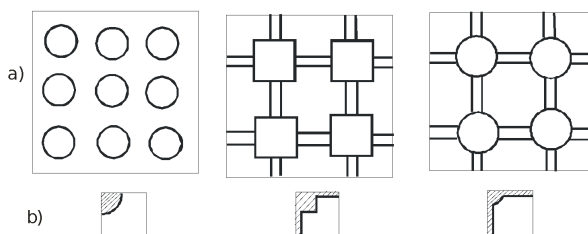
Poprawa efektywności energetycznej różnego rodzaju maszyn i urządzeń wykorzystywanych w przemyśle, a także obiektów budowlanych, jest w dużej mierze związana z ograniczeniem strat ciepła

poprzez stosowanie pokryć z materiałów izolacyjnych. Dobór odpowiednich osłon wymaga przede wszystkim znajomości właściwości termofizycznych materiałów, z których budowane są izolacje. Do wyznaczenia strat ciepła niezbędna jest znajomość oporów cieplnych (termicznych) zależnych od współczynników przewodzenia ciepła, które charakteryzują elementy rozpatrywanego urządzenia. Istotne staje się wobec tego określenie przewodności cieplnej nie tylko materiału izolacji, ale również tworzyw, z jakich wykonywane są elementy kotłów energetycznych, pieców, rurociągów, zbiorników, czy też innych urządzeń w instalacjach przemysłowych i energetycznych. Materiały te to głównie metale i ich stopy. Ze względu na szybki rozwój nowoczesnych surowców dla przemysłu i budownictwa, cały czas istnieje potrzeba dalszych pomiarów współczynników przewodzenia ciepła. W przypadku wyznaczania przewodności cieplnej materiałów izolacyjnych, w pierwszej kolejności stosowana jest metoda oparta na zjawisku ustalonego przewodzenia ciepła. Odpowiednią procedurę ujmuje PN ISO-8302:1999 [1]. Jej istotę stanowi opis metody określania – w stanie ustalonym – właściwości cieplnych materiałów za pomocą aparatu płytowego z osłoniętą płytą grzejną. Natomiast w przypadku dobrych przewodników ciepła pojawia się trudność bezpośredniego pomiaru λ . Zastosowanie metody ustalonego strumienia ciepła jest praktycznie niemożliwe ze względu na występujące duże gradienty temperatury. Wykorzystywane są metody alternatywne, bazujące na zjawiskach nieustalonych lub też metody pośrednie, zgodnie z którymi mierzone są inne właściwości termofizyczne. Na ich podstawie wyliczany jest współczynnik przewodzenia ciepła. Są to jednak metody niekiedy skomplikowane, wymagające specjalnej i drogiej aparatury. Dlatego sposób zaprezentowany w niniejszej pracy może okazać się bardzo przydatny podczas jego dalszego stosowania. Wyznaczając współczynniki przewodzenia ciepła różnych materiałów, należy zwrócić uwagę na to, iż wartości λ warunkuje wiele czynników. Przewodność cieplna metali oraz ich stopów zależy przede wszystkim od technologii ich otrzymywania. To właśnie ona decyduje o ilości zanieczyszczeń. Drugim czynnikiem wpływającym na wartości λ jest obróbka termiczna, która ma wpływ na strukturę metalu. Z kolei przewodność cieplna materiałów stosowanych do zabezpieczeń izolacyjnych jest silnie powiązana z niejednorodnością tychże materiałów. Cecha ta wynika z budowy izolacji – materiały izolacyjne tworzą mieszaniny fazy stałej i płynnej. Fazę stałą stanowią elementy ciała stałego (włókna, ziarna), faza płynna to natomiast płyn (zazwyczaj gaz) wypełniający przestrzeń między elementami stałymi (rysunek 4.1). W takim przypadku λ może przyjmować różne wartości w różnych punktach materiału izolacyjnego. Dzieje się tak ze względu na występowanie różnorodnych mechanizmów transportu ciepła. Będą do nich należeć: przewodzenie ciepła przez ziarna czy włókna ciała stałego, przewodzenie ciepła w obszarach wypełnionych płynem (gazem), konwekcja swobodna w tychże obszarach przy dostatecznie dużych ich wymiarach, a także promieniowanie oraz transport ciepła związany z wymianą masy.



Rys. 4.1. Modele materiałów izolacyjnych [2]: 1 – ziarna, 2 – pory wypełnione gazem, 3 – włókna, 4 – powietrze

W przypadku ośrodków niejednorodnych, których przewodność cieplna może przyjmować różne wartości w różnych punktach ciała, na ogół operuje się pojęciem efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła λ_{ef} .



Rys. 4.2. Szkice przykładowych komórek służących do wyznaczania efektywnej przewodności cieplnej [2]: a) widok komórek, b) elementarna komórka

Przewodność ta dotyczy obszaru przewyższającego znacznie wymiary niejednorodności, choć do wyznaczenia λ_{ef} na drodze teoretycznej rozważa się odpowiednio mały obszar materiału izolacji. Na podstawie analizy szeregowych i równoległych połączeń oporów cieplnych w powtarzalnym fragmencie zwanym komórką (zawiera ona jeden element i przynależną objętość fazy płynu), rozważa się przepływ ciepła przy danym spadku temperatury. Przykłady omawianych obszarów izolacji ukazuje rysunek numer 4.2. Na zjawiska transportu ciepła przez materiał izolacji mają zatem wpływ przewodzenie, konwekcja, promieniowanie i migracja płynu. Zasadniczą rolę odgrywa przewodzenie ciepła przez ziarno i gaz zamknięty w porach. Konwekcja i promieniowanie pełnią mniejszą rolę, szczególnie w materiałach o małej średnicy porów.

Różnorodność czynników wpływających na wielkość współczynnika przewodzenia ciepła jest przyczyną braku wystarczająco dokładnej praktyki do wyznaczania λ ciał stałych. Aby uwzględnić wpływ domieszek oraz technologii produkcji przy rozwiązywaniu zagadnień przewodzenia ciepła w elementach urządzeń technicznych, należy posługiwać się danymi uzyskanymi z pomiarów przewodności cieplnej próbek materiałów wykonanych bezpośrednio z elementu poddanego wcześniej całkowitemu procesowi technologicznemu. Może wówczas zaistnieć trudność związana z odpowiednim wykonaniem próbki, m.in. z uzyskaniem właściwych wymiarów oraz gładkości powierzchni. Sytuacja taka ma na przykład miejsce podczas wytwarzania izolacji rurowych, kiedy zakrzywienie powierzchni powoduje zmiany w strukturze rozpatrywanego materiału, a tym samym zmieniają się jego właściwości termofizyczne. Wskazane jest wówczas stosowanie aparatu rurowego, który jednak zdecydowanie podwyższa koszty badań ze względu na konieczność dokonywania zmian konstrukcyjnych dla różnych średnic badanych rur.

Innym przykładem są systemy elektroniczne, w których mogą występować znaczne objętościowe strumienie ciepła wynikające z małych rozmiarów urządzeń. W takich przypadkach bardzo istotne jest właściwe określenie przewodności cieplnej stosowanych materiałów. Jednak metody klasyczne nie sprawdzają się w takich sytuacjach ze względu na zmiany właściwości materiałów podczas pracy urządzeń. Poszukuje się metod alternatywnych, bazujących na zjawiskach nieustalanej wymiany ciepła. Dzięki nim możliwe jest wyznaczenie właściwości termofizycznych materiałów poprzez aplikację rozwiązań analitycznych dla danych geometrii, a także wykonywanie pomiarów bezpośrednio podczas pracy urządzeń [3, 4].

4.2. Metody wyznaczania przewodności cieplnej ciał stałych

W niniejszej części artykułu zasygnalizowana zostanie tematyka ogólnie znanych i najczęściej stosowanych metod określania przewodności cieplnej materiałów wykorzystywanych w przemyśle i budownictwie. Ponieważ rozważania dotyczą tylko ciał stałych, odwołano się do metody ustalonego strumienia ciepła oraz procedury bazującej na pomiarze dyfuzyjności cieplnej w warunkach nieustalanej wymiany ciepła.

Podstawowym sposobem, stosowanym w pomiarach współczynnika przewodzenia ciepła materiałów charakteryzujących się dużym oporem termicznym, jest metoda stacjonarna, oparta na zjawiskach ustalonego przewodzenia ciepła. Bazuje ona na prawie Fouriera, którego matematyczną postać można przedstawić w następujący sposób [5]

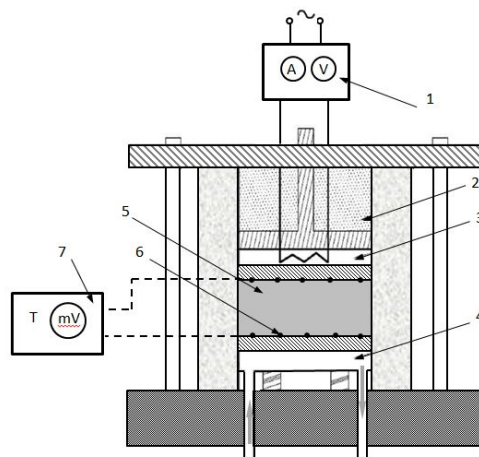
$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad , \quad (4.1)$$

gdzie wyrażenie jest gradientem temperatury mierzonym wzdłuż kierunku przepływu ciepła. Rozpatrując zagadnienie ustalonego przewodzenia ciepła przez przegrodę płaską, przy założeniu jednowymiarowego zjawiska przekazywania ciepła, równanie (4.1) przyjmuje postać

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad , \quad (4.2)$$

gdzie δ jest grubością przegrody, natomiast T_1 i T_2 to temperatura na powierzchniach rozpatrywanej płaskiej ścianki. W takim przypadku gęstość strumienia ciepła jest równa stosunkowi mocy cieplnej przekazywanej przez przegrodę oraz powierzchni przegrody $q = \dot{Q}/A$.

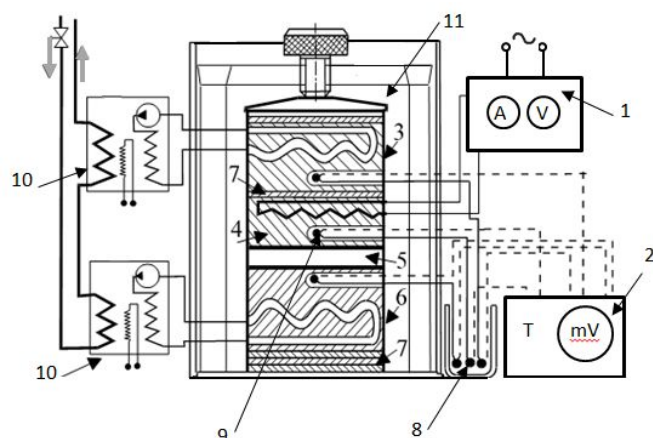
W stosowanych rozwiązaniach praktycznych moc cieplna \dot{Q} przewodzona przez badany materiał jest równa mocy elektrycznej grzałki, która stanowi źródło podwyższonej temperatury T_2 na jednej z powierzchni rozpatrywanej przegrody. Wyrażenie (4.2) daje podstawę do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła aparatem płytowym. Jak już wspomniano wcześniej, procedurę pomiarową opisuje PN ISO-8302:1999 [1].



Rys. 4.3. Schemat aparatu płytowego do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych [6]: 1 – autotransformator, 2 – izolacja z wełny mineralnej, 3 – grzałka elektryczna, 4 – wymiennik ciepła (chłodnica), 5 – badana próbka materiału, 6 – termoelementy, 7 – pomiar i rejestracja temperatury

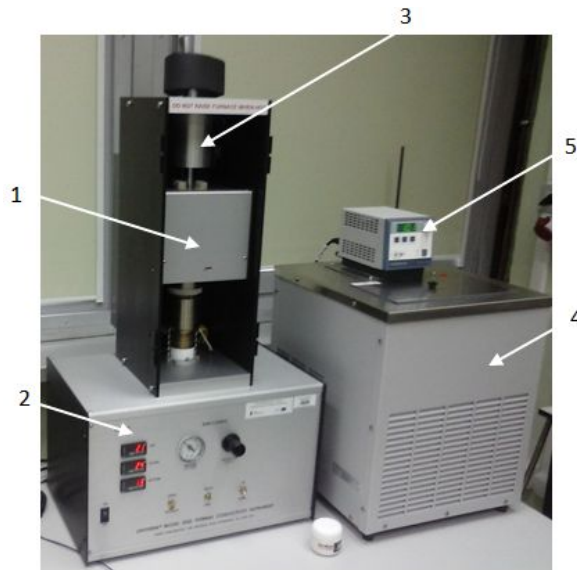
Przykład zastosowania aparatu w pomiarach przewodności cieplnej materiałów budowlanych zaprezentowano w artykule *Badanie wpływu dodatku zmiennofazowego na właściwości cieplne wybranego materiału budowlanego* [6]. Rysunek numer 4.3 przedstawia schemat stanowiska, na którym wyznaczano λ mieszaniny tynku gipsowego i organicznego materiału zmiennofazowego.

Inny przykład wykorzystania metody ustalonego strumienia ciepła w aparacie płytowym prezentuje rysunek 4.4. Pokazany na schemacie aparat jest wykorzystywany w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Rzeszowskiej do pomiarów przewodności cieplnej materiałów izolacyjnych. We wspomnianym przyrządzie, dla zapewnienia jednokierunkowego przepływu ciepła z grzejnika przez badaną próbkę do chłodnicy, nad grzejnikiem elektrycznym, za cienką warstwą korka, znajduje się płytka ogrzewana ciepłą wodą o temperaturze równej temperaturze grzejnika.



Rys. 4.4. Aparat płytowy z dodatkową płytką grzejącą: 1 – autotransformator, 2 – pomiar i rejestracja temperatury, 3 – płytka grzejąca, 4 – grzałka elektryczna, 5 – badana próbka materiału, 6 – chłodnica wodna, 7 – warstwa korka, 8 – temperatura odniesienia, 9 – termoelementy, 10 – ultratermostaty, 11 – izolacja styropianowa

Wyznaczanie przewodności cieplnej za pomocą procedury, która wykorzystuje zagadnienie jednowymiarowego przewodzenia ciepła przez przegrodę płaską, zostało również ujęte w standardzie ASTM E1530 [7]. Istota pomiaru jest równoważna do zawartej w PN ISO-8302:1999 [1]. Różnice polegają na oprzyrządowaniu aparatów pracujących zgodnie ze standardem ASTM E1530 [7], dzięki którym ma zostać zapewniona wysoka dokładność badania. Przykład stanowi urządzenie do pomiaru λ materiałów o dużym oporze cieplnym – Unitherm™ Model 2022, którym dysponuje Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Rzeszowskiej. Ogólny widok stanowiska pomiarowego prezentuje fotografia na rysunku 4.5.



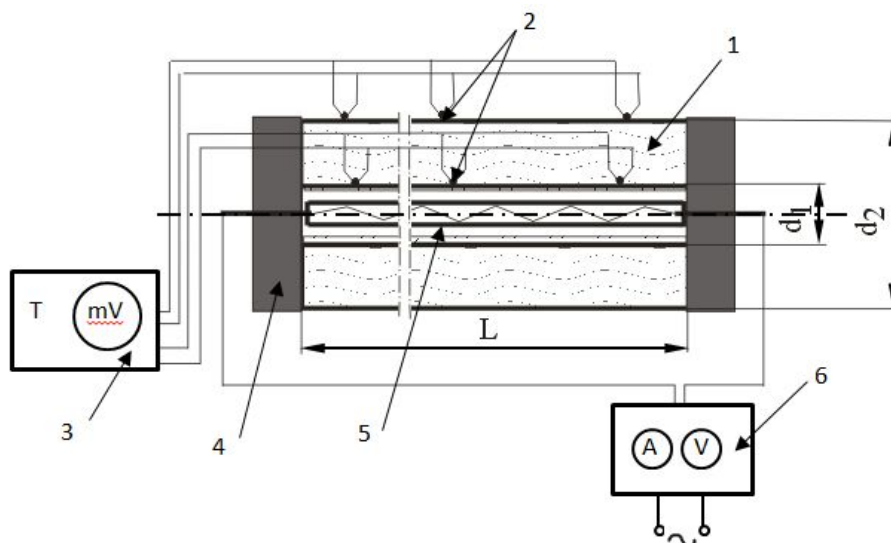
Rys. 4.5. Stanowisko do pomiaru przewodności cieplnej aparatem Unitherm™ Model 2022; 1 – moduł z badaną próbką materiału oraz płytką ogrzewaną i chłodzoną, 2 – układ kontrolno-pomiarowy, 3 – cylinder pneumatyczny zapewniający stałe obciążenie ściskające, 4 – ultratermostat, 5 – zasilacz

Przedstawione powyżej metody pozwalają na bezpośredni pomiar przewodności cieplnej materiałów charakteryzujących się małym współczynnikiem λ oraz możliwością utworzenia płaskiej próbki o odpowiedniej geometrii. W przypadku aparatu z dodatkową płytą grzejącą, próbkę stanowi element prostopadłościenny z kwadratową powierzchnią wymiany ciepła. Przy pomiarze aparatem płytowym pokazanym na rysunku 4.4 oraz aparatem Unitherm™ Model 2022 należy wykonać próbkę w kształcie walca. Wymiary poprzeczne próbek są stosunkowo duże. W aparacie z dodatkową płytą bok kwadratu jest równy 50 mm, natomiast próbki walcowe muszą mieć średnice równe odpowiednio 150 mm w aparacie pracującym zgodnie z PN ISO-8302:1999 [1] oraz 50,8 mm (2 cale) dla aparatu Unitherm™ Model 2022. Wykonanie próbek danych rozmiarów jest niekiedy niemożliwe. Przykładem będą materiały izolacyjne wytwarzane w postaci rurowej. W takim przypadku uzyskanie odpowiednio płaskiej próbki do badań mogłoby zniekształcić strukturę wewnętrzną materiału, a tym samym zmienić jego właściwości termofizyczne. Najdokładniejszą metodą jest wówczas zastosowanie aparatu rurowego, którego schemat zaprezentowano na rysunku numer 4.6. Przewodność cieplną izolacji rurowej wyznacza się z zależności (4.4), która opisuje ustalony strumień ciepła przewodzony promieniowo – od wewnętrznej powierzchni izolacji (o temperaturze T_1), nałożonej na cienkościenną rurę metalową z elektrycznym grzejnikiem, do powierzchni zewnętrznej (o temperaturze T_2). Moc cieplna przewodzona przez ściankę cylindryczną wynika z całkowania równania przedstawiającego prawo Fouriera w postaci

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (4.3)$$

gdzie A to powierzchnia pobocznic walca zmienna w kierunku przewodzenia ciepła, a r – współrzędna promieniowa. Ostatecznie:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (4.4)$$



Rys. 4.6. Aparat rurowy; 1 – badana izolacja rurowa, 2 – termoelementy, 3 – pomiar i rejestracja temperatury, 4 – izolacja powierzchni czołowych, 5 – grzejnik elektryczny, 6 – autotransformator

Zastosowanie powyższej metody w badaniach przewodności cieplnej materiałów na izolacje rurowe wymaga dostosowania średnicy rury grzejnej do wewnętrznej średnicy izolacji. Wiąże się to ze zmianą konstrukcji aparatu, a tym samym ze zwiększeniem kosztów badań.

Alternatywną technikę pomiarową stanowi metoda niestacjonarna, bazująca na pomiarze dyfuzyjności cieplnej. Dyfuzyjność cieplna jest definiowana jako iloraz przewodności cieplnej oraz iloczynu ciepła właściwego i gęstości:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (4.5)$$

Dodatkowo należy zatem mierzyć gęstość i ciepło właściwe materiału.

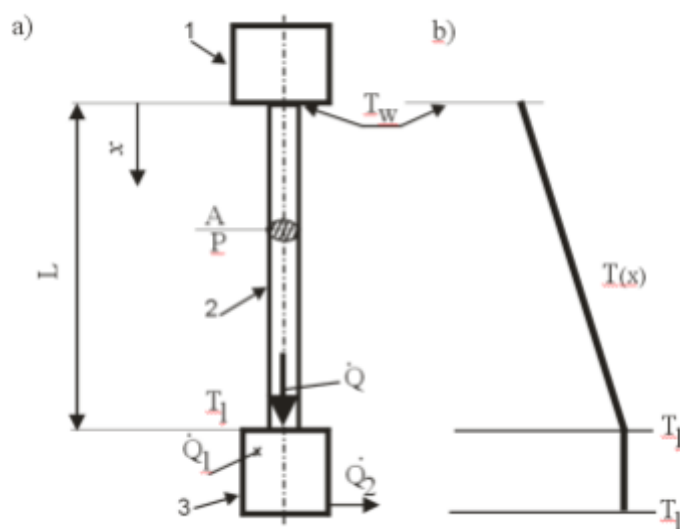
Stosowane metody pomiaru dyfuzyjności cieplnej polegają na dostarczeniu zmiennego w czasie strumienia ciepła do próbki materiału, a następnie na badaniu zmian temperatury w różnych punktach próbki. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie a na podstawie rozwiązania równania nieustalonego przewodzenia ciepła przy danych warunkach brzegowych związanych z geometrią próbki. W rozwiązaniach technicznych profesjonalnych aparatów do pomiaru a istotny jest sposób wytworzenia strumienia ciepła. Jako źródło fali cieplnej może być wykorzystywany promień lasera. Metoda nosi wówczas nazwę *laser flash*. Przykład stanowi laserowe urządzenie NETZSCH LFA 427, które wchodzi w skład wyposażenia Katedry Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Rzeszowskiej. Wykonywane na nim badania dyfuzyjności termicznej są zgodne ze standardami ASTM E1530 i PN-EN 821-2:2002 [8, 9]. Próbki materiałów stanowią prostokątne kwadraty o boku 10 mm lub 12,5 mm. Grubość próbek zależy od rodzaju materiału – dla izolatorów mogą to być cienkie warstwy grubości rzędu 1 mm. W przypadku dobrych przewodników maksymalna grubość to 6 mm. Jest ona uwarunkowana mocą sygnału impulsu laserowego. Aby określić współczynnik przewodzenia ciepła, należy znać ciepło właściwe oraz gęstość badanych materiałów. Dane te mogą pochodzić z dostępnych baz danych albo z tablic właściwości termofizycznych materiałów o zbliżonych właściwościach. Mogą być również wyznaczone eksperymentalnie. Do pomiarów ciepła właściwego wykorzystuje się różnicowy kalorymetr skaningowy, natomiast gęstość może być określona metodą ważenia.

Przytoczone techniki pomiarowe badań przewodności cieplnej, zarówno materiałów izolacyjnych, jak i dobrych przewodników ciepła, nie zawsze mogą być zastosowane. Problem stanowią głównie materiały dobrze przewodzące, w przypadku których można wykorzystać jedynie metodę pośrednią bazującą na pomiarze dyfuzyjności termicznej. Zaprezentowany w kolejnym rozdziale sposób badania umożliwia – w sposób bezpośredni – pomiar przewodności cieplnej metali i ich stopów, dobrych przewodników ciepła.

4.3. Metoda wyznaczania przewodności cieplnej metali i ich stopów oparta na kwazistacjonarnym przystanku temperatury

W niniejszej części artykułu opisana zostanie metoda pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła metali i ich stopów oparta na kwazistacjonarnym przystanku temperatury. Stosuje się ją w Katedrze Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Rzeszowskiej i wykorzystuje do pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła λ dobrych przewodników ciepła.

Istota badania bazuje na rozwiązaniu zagadnienia przewodzenia ciepła w okrągłym żebrze modelującym próbkę badanego materiału. Przewodzenie odbywa się w tzw. stanie kwazistacjonarnym, które wynika z chwilowego ustalenia się pola temperatury. Badana próbka (rysunek 4.7a) umieszczona jest pionowo pomiędzy dwoma zasobnikami ciepła, zwanymi dalej termodami. Z termody górnej (grzejnika elektrycznego) dopływa strumień ciepły, który wywołuje wzrost temperatury próbki oraz termody dolnej (odbiornika ciepła). Wykorzystywana jest przemiana fazowa substancji metrologicznej umiejscowionej w chłodnicy (termoda dolna). Proces przepływu ciepła trwa do momentu osiągnięcia temperatury topnienia metalu (substancji metrologicznej) zawartego w termodzie dolnej. Następuje ustalenie się temperatury w termodzie dolnej oraz wzdłuż próbki (rysunek 4.7b), trwające przez pewien czas (t), w którym metal ulegnie całkowitemu stopieniu. Ustanowiony stan, nazwany kwazistacjonarnym, polega na tym, że ciepło doprowadzone do próbki od termody górnej jest w całości przejmowane przez termodę dolną w czasie topnienia substancji metrologicznej. Niezbędny do obliczeń współczynnika przewodzenia ciepła czas (t) odpowiada tzw. przystankowi temperatury na wykresie zależności zmian temperatury od czasu. Rejestracja zmian temperatury odbiornika ciepła w czasie umożliwi określenie t .



Rys. 4.7. Schemat pomiarowy wyznaczania przewodności cieplnej metodą kwazistacjonarnego przystanku temperatury: a) próbka umieszczona między termodami: 1 – grzałka elektryczna (termoda górna), 2 – badana próbka materiału, 3 – chłodnica z substancją metrologiczną (termoda dolna); b) rozkład temperatury

W zaistniałym stanie kwazistacjonarnym strumień ciepły (moc cieplna) \dot{Q} dopływający do termody dolnej jest równy

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \frac{m_{cl}\Delta h_{cl}}{t} + \dot{Q}_2, \quad (4.6)$$

gdzie:

\dot{Q}_1 – moc cieplna tworzona przy topnieniu masy m_{cl} substancji o entalpii topnienia Δh_{cl} w czasie t ,

\dot{Q}_2 – moc cieplna tracona z powierzchni termody dolnej.

Jeśli badaną próbkę w kształcie pręta potraktujemy jako żebro o długości L oraz stałym polu przekroju poprzecznego A i stałym obwodzie P , rozkład nadwyżki temperatury wzdłuż pręta – w stanie kwazistacjonarnym – będzie równy [10]

$$\frac{T(x) - T_f}{T_w - T_f} = \cosh x - \left(\frac{\frac{Q}{A}}{(T_w - T_f) \lambda \times m \times \cosh mL} + \operatorname{tgh} mL \right) \sinh mx \quad (4.7)$$

gdzie parametr m opisuje zależność

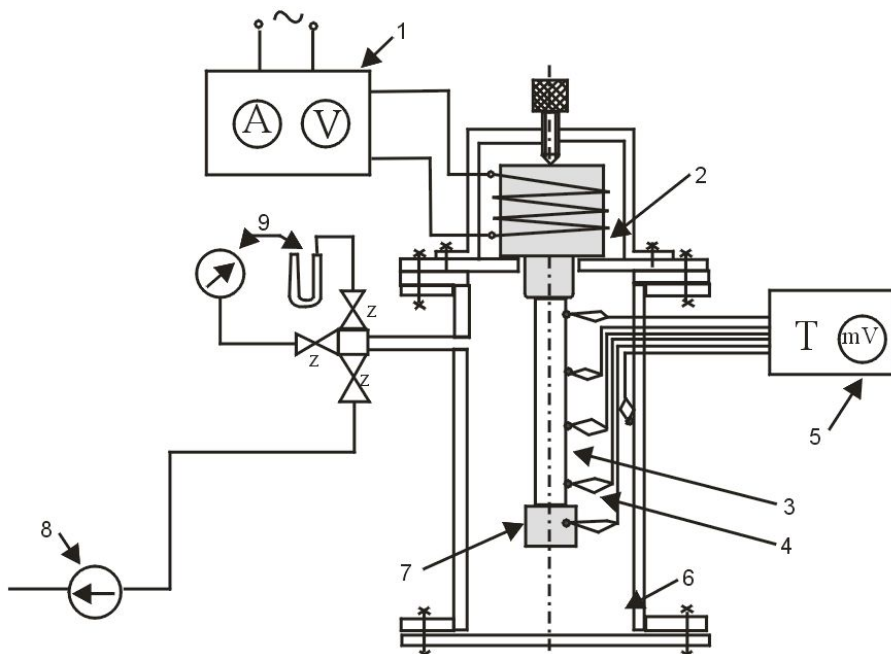
$$m = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A}} \quad (4.8)$$

T_w jest temperaturą u nasady żebra równą temperaturze termody górnej, T_f stanowi temperaturę otoczenia. Współczynnik przejmowania ciepła h występujący w równaniu (4.8) jest zależny od mechanizmu przekazywania ciepła do otoczenia. Jeżeli badany element znajduje się w atmosferze powietrza, ciepło jest oddawane na drodze promieniowania i konwekcji swobodnej. Wówczas współczynnik h stanowi zastępczy współczynnik przejmowania ciepła będący sumą współczynników radiacyjnego oraz konwekcyjnego. Współczynniki te oblicza się z odpowiednich wzorów dostępnych w literaturze [5]. Jeżeli atmosferę otaczającą badaną próbkę stanowi próżnia (tak jak w rozwiązaniu wskazanym na rysunku 4.8) i wymiana ciepła odbywa się jedynie przez promieniowanie, występuje wówczas współczynnik radiacyjny, a temperatura T_f jest równa temperaturze ścian pojemnika zawierającego próżnię.

Mając określoną dzięki pomiarowi masę substancji metrologicznej m_{cb} , a także wartości temperatur T_w i T_f oraz moc przekazywaną do termody dolnej i uwzględnivszy zależność (4.8), z równania (4.7) wyznacza się – na drodze iteracyjnej – wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ .

4.3.1. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska pomiarowego przeznaczonego do badań przewodności cieplnej metali i ich stopów metodą kwazistacjonarnego przystanku temperatury zaprezentowano na rysunku 4.8. W skład stanowiska wchodzi naczynie próżniowe, w którym umieszczone są termody górna i dolna. Próbka badanego materiału w kształcie walcowego pręta o średnicy 6 mm jest usytuowana pomiędzy termodami. Długość pręta jest dowolna, zależy ona od przewidywanej przewodności badanego materiału. Zestaw termoelementów służy do pomiaru temperatury wzdłuż próbki oraz temperatury ściany naczynia odpowiadającej temperaturze otoczenia T_f . Pompa próżniowa, dzięki układowi zaworów, zapewnia próżnię o wartości 2 mm Hg. Moc elektryczna podawana do grzejnika (termody górnej) jest sterowana za pomocą autotransformatora. Zastosowana w prezentowanej metodzie substancja metrologiczna w postaci metalu gal pozwala na osiągnięcie gęstości przewodzonej przez próbkę mocy cieplnej rzędu 20 kW/m² [11]. Jest to niemożliwe w przypadku stosowania aparatu płytowego, w którym gęstość mocy cieplnej osiąga wartość 1 kW/m². Obliczony względny błąd pomiaru waha się w zakresie 4-5%.



Rys. 4.8. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła metali i ich stopów metodą kwazistacjonarnym przystanku temperatury: 1 – autotransformator, 2 – grzejnik elektryczna (termoda górna),

3 – badana próbka materiału, 4 – termoelementy, 5 – pomiar i rejestracja temperatury, 6 – naczynie próżniowe, 7 – chłodnica (termoda dolna), 8 – pompa próżniowa, 9 – układ zaworów oraz pomiar ciśnienia

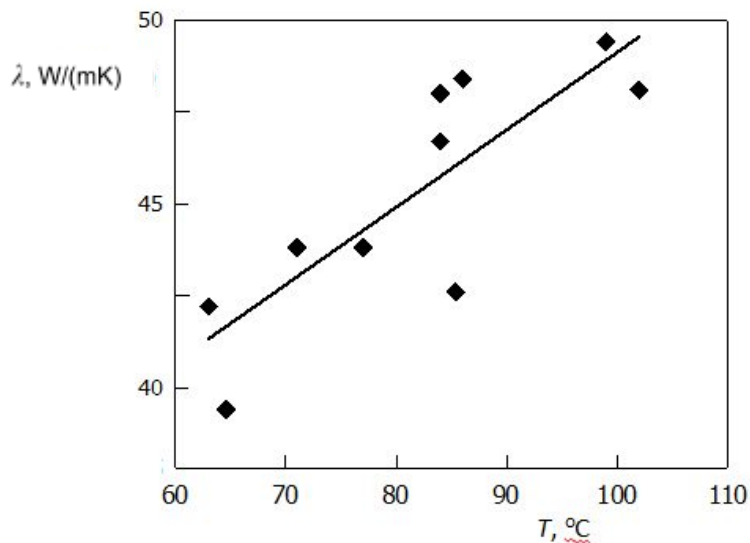
4.3.2. Przykładowe wyniki badań

Metoda kwazistacjonarnego przystanku temperatury posłużyła do badań przewodności cieplnej m.in. takich materiałów jak niskostopowe stale szybkoctnące [12], stopy tytanu [13], a także kompozyty na osnowie grafitu [14]. Niepublikowane wyniki pomiarów λ dla brązu aluminiowego zestawiono poniżej. Dla potrzeb pomiaru zostały wykonane trzy walcowe próbki. Ich średnica wynosiła 6 mm, ich długość była równa odpowiednio: 30,2 mm dla pierwszej próbki, 33,5 mm – dla drugiej oraz 29,2 mm – dla trzeciej. Wyniki badań przewodności cieplnej zamieszczono w tabeli 4.1. Zawiera ona również wartości temperatury styku próbki z termodą górną T_w oraz średniej temperatury próbki T_{sr} .

Próbka nr 1			Próbka nr 2			Próbka nr 3		
λ , W/(m·K)	T_{sr} , °C	T_w , °C	λ , W/(m·K)	T_{sr} , °C	T_w , °C	λ , W/(m·K)	T_{sr} , °C	T_w , °C
43,8	71	100	42,2	63	80	43,8	77	103
46,7	84	120	39,4	64,5	84	48	84	111
–	–	–	42,6	85,4	117	48,4	86	115
–	–	–	48,1	102	137	49,4	99	144

Tab. 4.1. Współczynniki przewodzenia ciepła brązu aluminiowego

Uzyskane wyniki, wraz z ich aproksymacją liniową, zestawiono na rysunku 4.9 w formie wykresu zależności współczynnika przewodzenia ciepła od średniej temperatury próbki.



Rys. 4.9. Przewodność cieplna brązu aluminiowego w funkcji temperatury

Uzyskanie odpowiedniego zakresu temperatur w pomiarach było możliwe dzięki zastosowaniu dwóch substancji metrologicznych charakteryzujących się znacznymi różnicami wartości temperatury topnienia. Były to gal (temperatury niższe) oraz cyna (temperatury wyższe). Większy zakres pomiarowy można otrzymać, stosując na wypełnienie termody dolnej również ołów i antymon. Zagadnienia związane z określeniem wpływu stosunku pojemności cieplnej termody dolnej – wypełnionej odpowiednią

substancją metrologiczną – do pojemności cieplnej badanej próbki analizowano w pracy *Pojemność cieplna w pomiarze przewodności cieplnej metali metodą kwazistacjonarnego przystanku temperatury. Termodynamika i wymiana ciepła w badaniach procesów ciepłno-przepływowych* [15].

4.4 Podsumowanie

Znajomość właściwości termofizycznych, w tym przewodności cieplnej, materiałów stosowanych w budowie urządzeń oraz systemów energetycznych ma istotne znaczenie w aspekcie ograniczenia strat ciepła. Dotyczy to m.in. różnego rodzaju elementów konstrukcji (podpór rurociągów, łączników i innych), które są źródłem miejscowych strat ciepła. Również właściwy dobór materiałów izolacyjnych wymaga wiedzy na temat właściwości elementów pokrywanych izolacjami. Coraz powszechniej stosowane symulacje numeryczne wykorzystywane w procesach konstrukcyjnych także wymagają znajomości konkretnych danych materiałowych. Ze względu na to, że wciąż tworzone są nowoczesne materiały dla przemysłu i energetyki, wciąż istnieje potrzeba badań ich właściwości.

W pracy zaprezentowano wyjątkową – na tle powszechnie stosowanych – metodę pomiaru współczynnika przewodzenia. Opiera się ona na zjawisku przemiany fazowej substancji metrologicznej, która stanowi odbiornik ciepła przekazywanego od próbki badanego materiału. Metoda ta, zwana metodą kwazistacjonarną albo też metodą kwazistacjonarnego przystanku temperatury, łączy cechy metody stacjonarnej i metody bazującej na zjawiskach nieustalonych. Wiąże się to przede wszystkim z krótkim czasem trwania pomiaru – jak w metodzie niestacjonarnej. Z drugiej strony czas ten obejmuje proces ustalony, który wynika z uzyskania przystanku temperaturowego dla substancji podlegającej przemianie fazowej. Przedstawiona metoda ma zastosowanie do badań dobrych przewodników ciepła. Jest ona stosunkowo prosta, nie wymaga skomplikowanej aparatury pomiarowej, dzięki czemu może stanowić atrakcyjną (tańszą) alternatywę w stosunku do metody niestacjonarnej, bazującej na profesjonalnych aparatach.

LITERATURA:

- [1] PN ISO-8302:1999 *Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym – Aparat płytowy z osłoniętą płytą grzejną.*
- [2] C. T. Hsu, P. Cheng, K. W. Wong, *A Lumped-Parameter Model for Stagnant Thermal Conductivity of Spatially Periodic Porous Media*, "Journal of Heat Transfer" 1995, vol.117, p. 264-269.
- [3] F. Różak, R. Smusz, M. Węglarski, J. Wilk, F. Wolańczyk, *Identyfikacja właściwości cieplnych rezystorów grubowarstwowych*, XII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Kraków 2004, s. 721-731.
- [4] R. Smusz, J. Wilk, *The Temperature Field in Thick-film Micromodule Operated at Pulse Regime*, "Heat and Mass Transfer" 2007, vol. 44, p. 23-32.
- [5] B. Staniszewski, *Wymiana ciepła*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.
- [6] E. Skawińska, *Badanie wpływu dodatku zmiennofazowego na właściwości cieplne wybranego materiału budowlanego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 2015, nr 3, zeszyt 87, s. 245-250.
- [7] ASTM E1530 – *Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique.*
- [8] ASTM E1461 - 07 *Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method.*
- [9] PN-EN 821-2:2002 *Część 2: Oznaczanie dyfuzyjności cieplnej metodą impulsu laserowego (lub impulsu cieplnego).*
- [10] F. Wolańczyk, *Quasistacjonarna metoda pomiaru przewodności cieplnej metali i ich stopów*, VIII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Białowieża 1992, s.517-524.
- [11] F. Wolańczyk, *Gallium as A Metrology Substance for Measuring Thermal Conductivity of Metals*, XXII International Symposium Research – Education – Technology, Brema 2015, p.131-134.
- [12] F. Wolańczyk, *The Investigation of Thermal Conductivity of Low-alloyed High Speed Steels*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 2010, nr 277, zeszyt 81, s. 141-144.
- [13] F. Wolańczyk, *The Thermal Conductivity of Some Chosen Titanium Alloys Typically Used in The Design of Turbomachinery*, IX Międzynarodowa Konferencja – Przepływowe maszyny wirnikowe, Rzeszów – Myczkowce, 2003, s.335-340.

- [14] F. Wolańczyk, *Thermal Conductivity Measurements of Graphite and Graphite-glass Composite* [w:] *Proceedings of The International Scientific Conference „Mechanika 2000”*, t. 1, Rzeszów 2000, s.463-468.
- [15] F. Wolańczyk, *Pojemność cieplna w pomiarze przewodności cieplnej metali metodą kwazistacjonarnego przystanku temperatury* [w:] *Termodynamika i wymiana ciepła w badaniach procesów ciepło-przepływowych*, pod red. R. Smusza, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2014, s. 419-437.