

Otylia PASECKA

POMIARY KONDUKTYWNOŚCI CIEPLNEJ RUR CIENKOŚCIENNYCH WYKONANYCH Z MATERIAŁÓW DOBRZE PRZEWODZĄCYCH CIEPŁO

Streszczenie. W artykule przedstawiono ogólną zasadę pomiaru konduktywności cieplnej. Dla rozważanego modelu fizycznego, składającego się z cienkościennej rury i grzejnika, określono warunki wymiany ciepła. Przez rurę przepływa płyn o stałych właściwościach fizycznych i o stałym przepływie objętości. Na rurze nawinięty jest grzejnik elektryczny o odpowiedniej długości. Podano zależności pozwalające na obliczenie konduktywności cieplnej rury.

MEASUREMENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY OF THIN-WALLED PIPES MADE OF MATERIALS CONDUCTING HEAT

Summary. The general principle of thermal conductivity measurement has been presented in the paper. Conditions of heat exchange for the considered physical model consisting of a thin-walled pipe and a heater have been determined. It has been assumed that a fluid with constant physical properties and constant volume flow flows through the pipe. An electric heater of appropriate length is wound around the pipe. Relations enabling to calculate the pipe thermal conductivity have been given as well.

1. WSTĘP

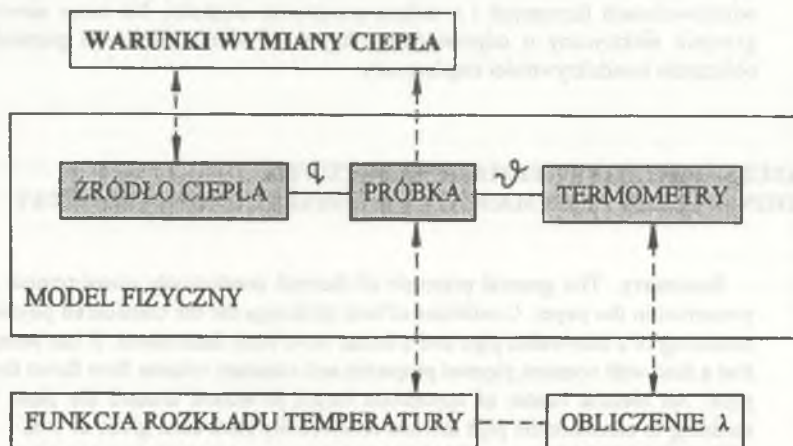
Konduktywność cieplna (przewodność cieplna właściwa) rur cienkościennych wykonanych z materiałów dobrze przewodzących ciepło jest istotnym parametrem związanym z konstrukcją przepływomierzy cieplnych bezkontaktowych. Wartości konduktywności cieplnej podawane w tablicach fizycznych różnią się znacznie od wartości rzeczywistych ze względu na skład chemiczny materiału rury. Ponadto konduktywność cieplna zależy od temperatury i dlatego zakresy temperatur w pomiarach konduktywności cieplnej i w pomiarach przepływu powinny być zbliżone.

2. OGÓLNA ZASADA POMIARU KONDUKTYWNOŚCI CIEPLNEJ

OGólny schemat ilustrujący zasadę pomiaru konduktywności cieplnej przedstawiony jest na rys. 1.

Badana próbka jest ciałem stałym, jednorodnym i izotropowym. Ze źródła ciepła do próbki doprowadzony jest strumień ciepła q .

Źródło ciepła i próbka są ze sobą ściśle związane warunkami wymiany ciepła i tworzą podstawowy model fizyczny, dla którego należy rozwiązać ogólne równanie przewodnictwa cieplnego wraz z odpowiednimi warunkami granicznymi. W wyniku rozwiązania otrzymuje się funkcję rozkładu temperatury próbki, następnie określa się punkty pomiaru temperatury i oblicza się konduktywność cieplną λ . Pomiary konduktywności cieplnej są więc pomiarami pośrednimi.



Rys. 1. Zasada pomiaru konduktywności cieplnej

Fig. 1. The principle of thermal conductivity measurement

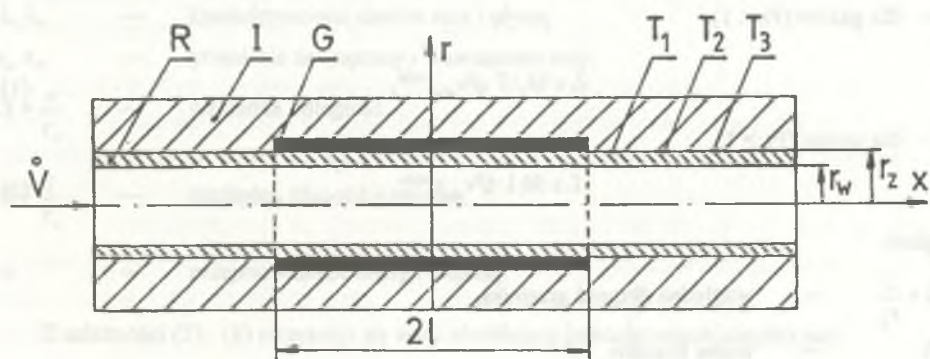
W praktyce wybiera się takie modele fizyczne, dla których rozwiązanie równania przewodnictwa cieplnego jest możliwe. Sprowadza się to najczęściej do zagadnień jednowymiarowej wymiany ciepła w warunkach ustalonych w czasie [3]. W tym celu należy przeprowadzić analizę modelu fizycznego i zapewnić odpowiednie warunki wymiany ciepła. W szczególności należy określić:

- kierunek przewodzenia i powierzchnię wymiany ciepła,
- straty ciepła do otoczenia i sposób izolacji cieplnej lub kompensacji strat,
- powierzchnie izotermiczne i sposoby zapewnienia stałej temperatury.

Funkcja rozkładu temperatury próbki zależy od jej kształtu i wymiarów geometrycznych, kondukcyjności cieplnej λ oraz od strumienia cieplnego.

3. MODEL FIZYCZNY

Badana próbka (rys.2) jest rurą cienkościenną o grubości ($r_z - r_w$) wykonaną z materiału dobrze przewodzącego ciepło (miedź, aluminium). Wartość kondukcyjności cieplnej dobrych przewodników ciepła wynosi $\lambda = (200 \dots 400) \text{ W/mK}$.



Rys.2. Model fizyczny rury cienkościennej i grzejnika. R — rura, I — izolacja cieplna, G — grzejnik, T_1, T_2, T_3 — punkty pomiaru temperatury

Fig.2. Physical model of a thin-walled pipe and a heater: R — pipe, I — heat insulation, G — heater, T_1, T_2, T_3 — points of temperature measurement

W celu zapewnienia odpowiednich warunków wymiany ciepła, zgodnie z zasadą ogólną przedstawianą w punkcie 2, wymiary podłużne rury powinny być dużo większe od jej średnicy. Kierunek przewodzenia ciepła powinien być podłużny, ponieważ gradient temperatury rury w kierunku poprzecznym jest bardzo mały, rzędu setnych części Kelvina [2]. Powierzchnia wymiany ciepła, ze względu na małą powierzchnię przekroju poprzecznego rury, powinna znajdować się na powierzchni rury. Ze względów praktycznych powinna to być powierzchnia zewnętrzna na której można nawinąć grzejnik elektryczny. Straty ciepła do otoczenia są pomijalnie małe w porównaniu z mocą grzejnika elektrycznego, jeżeli zapewni się dobrą izolację cieplną na zewnątrz rury. Powierzchnie izotermiczne rury są powierzchniami przekroju poprzecznego na początku i na końcu rury. Pozostaje więc do określenia charakter wymiany ciepła na wewnętrznej powierzchni rury.

Analiza teoretyczna oraz wyniki badań [1, 2] pozwalają na określenie charakteru wymiany ciepła na powierzchni wewnętrznej rury. Zakłada się, że przez rurę przepływa płyn (gaz lub ciecz) o stałych właściwościach fizycznych i stałej wartości przepływu objętości V , przy czym charakter przepływu powinien być laminarny.

Charakter przepływu nie jest jednak warunkiem wystarczającym do rozwiązania problemu. Bardzo istotnym parametrem jest długość grzejnika. Płyn o temperaturze początkowej θ_p , wpływający w strefę grzejnika jest podgrzewany, a profil temperatury i prędkości płynu jest niestabilizowany. Według badań stabilizacji profilu temperatury i prędkości [2] wymagane długości grzejnika w zakresie liczb Pecleta $10^3 \leq Pe \leq 10^6$ powinny wynosić:

— dla gazów ($Pr < 1$)

$$L \geq 26,67 (Pe_{\min})^{-0,08}, \quad (1)$$

— dla cieczy ($Pr > 1$)

$$L \geq 50,1 (Pe_{\min})^{-0,154}, \quad (2)$$

gdzie:

$L = \frac{l}{r_w}$ — względna długość grzejnika,

Pr — liczba Prandtla,

$Pe_{\min} = Re_{\min} Pr$,

Re_{\min} — liczba Reynolda określająca minimalny przepływ.

Ogólne równania przewodnictwa cieplnego dla rury i płynu wraz z odpowiednimi warunkami brzegowymi zostały przedstawione i rozwiązane w literaturze [1, 2].

Funkcja rozkładu temperatury wzdłuż osi x , dla $x \geq l$, ma postać

$$\theta = A e^{-Bx} \quad (3)$$

gdzie:

$$\theta = \theta(x) - \theta_k, \quad (4)$$

$$B = \sqrt{k Nu}, \quad (5)$$

$$A = \frac{P}{\pi r_w \lambda_p} \frac{1}{4 L Nu} \left(e^{\sqrt{k Nu} L} - e^{-\sqrt{k Nu} L} \right), \quad (6)$$

$$k = \frac{\lambda_p}{\lambda} \frac{r_w^2}{r_i^2 - r_w^2} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{2 \alpha r_w}{\lambda_p} \quad (8)$$

gdzie:

- $\vartheta(x)$ — temperatura rury,
- ϑ_k — temperatura końcowa rury i płynu,
- λ, λ_p — konduktywności cieplne rury i płynu,
- r_i, r_w — promienie zewnętrzny i wewnętrzny rury,
- $X = \frac{x}{r_w}$ — względna odległość,
- $L = \frac{l}{r_w}$ — względna długość grzejnika,
- α — przejmowalność energii cieplnej.

Z zależności (3)...(8) otrzymuje się wzór określający konduktywność cieplną rury

$$\lambda = \frac{P}{4 \pi r_w L} \frac{r_w^2}{r_i^2 - r_w^2} \frac{e^{BL} - e^{-BL}}{AB^2} \quad (9)$$

Z zależności (9) wynika, że konduktywność cieplna λ zależy od mocy P grzejnika, wymiarów geometrycznych (r_w, r_i, L) oraz od wartości współczynników A i B , które wyznacza się z funkcji rozkładu temperatury (3). W tym celu wystarczy zmierzyć różnicę temperatur Θ w co najmniej dwóch punktach X_1, X_2 i rozwiązać układ równań [4]

$$\begin{cases} \Theta_1(X_1) = \vartheta_1(X_1) - \vartheta_k = A e^{-BX_1} \\ \Theta_2(X_2) = \vartheta_2(X_2) - \vartheta_k = A e^{-BX_2} \end{cases} \quad (10)$$

Dla $X_2 = 2 X_1$ rozwiązanie układu równań (10) jest proste, a wartości współczynników A i B wynoszą

$$A = \frac{\Theta_1^2}{\Theta_2}; \quad B = \frac{1}{X_1} \ln \frac{\Theta_1}{\Theta_2} \quad (11)$$

Dla kilku punktów pomiarowych temperatury rury wartości A i B wyznacza się logarytmując stronami zależność (3). Wówczas otrzymuje się zależność liniową

$$\ln \Theta_n = \ln A - B X_n, \quad (12)$$

gdzie: $n = 1, 2, 3 \dots$ — kolejne punkty pomiaru temperatury.

Wartości współczynników A i B wyznacza się aproksymując otrzymaną doświadczalnie charakterystykę $\Theta_n = f(X_n)$ zależnością liniową.

4. POMIARY I WNIOSKI

Przeprowadzono pomiary konduktywności cieplnej λ rury aluminiowej o średnicach $r_w = 3,5$ mm, $r_z = 4,0$ mm. Na rurze nawinięto grzejnik z drutu manganinowego o długości $2l = 140$ mm i rezystancji $R_G = 40 \Omega$. Maksymalna moc grzejnika, wynikająca z dopuszczalnej temperatury pracy ($\theta_{\text{dop}} \leq 80^\circ\text{C}$), wynosi $P_{\text{max}} = 140$ W. Do pomiaru różnicy temperatur zastosowano termoelementy Cu - Konst. umieszczone w trzech punktach (1, 2, 3) za grzejnikiem.

Pomiary wykonano dla kilku wartości przepływu objętości mocy grzejnika. Obliczone wartości konduktywności cieplnej zawarte były w granicach od 205,2 W/mK do 208,5 W/mK, a błąd metody oceniono na kilka %. Otrzymane wartości są zbliżone do wartości podawanych w tablicach fizycznych.

Przedstawiona metoda umożliwia pomiary konduktywności cieplnej rur cienkościennych stosowanych do budowy przepływomierzy cieplnych bezkontaktowych.

LITERATURA

1. Hering M.: Termokinetyka dla elektryków. WNT, Warszawa 1980.
2. Pasecka O.: Analiza przepływomierzy cieplnych bezkontaktowych z uwzględnieniem wpływu temperatury przepływającego płynu. Praca doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1979.
3. Praca zbiorowa: Pomiary cieplne. WNT, Warszawa 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Jaskulski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 1996 r.

Abstract

The general principle of thermal conductivity measurement has been presented in the paper. Conditions of heat exchange for the considered physical model consisting of a thin-walled pipe and a heater have been determined. It has been assumed that a fluid with constant physical properties and constant volume flow flows through the pipe. An electric heater of appropriate length is wound around the pipe.

Relations determining the function of temperature distribution outside the pipe behind the heater have been given. Thermal conductivity of the pipe depends on heater power, dimensions of the pipe and the heater and temperature distribution behind the heater. Relations enabling to calculate the pipe thermal conductivity have been given as well.

CONSTRUCTION OF A PIPE WITH HEATER IN DETERMINING THE MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY

Summary: Conditions of a thin-walled pipe heated electrically by a heater of a certain length in determining heat transfer of the proposed device has been presented in the paper. It has been determined the function of temperature distribution outside the pipe behind the heater and relations enabling to calculate the pipe thermal conductivity have been given as well.

1. WSTĘP

W pracy przedstawiono ogólny sposób pomiaru przewodności cieplnej cienkościennej rury z grzałką. Określono warunki wymiany ciepła dla rozważanego modelu fizycznego, który składa się z rury i grzałki. Zakładano, że przez rurę płynie ciecz o stałych właściwościach fizycznych i stałym przepływie objętościowym.

Podano zależności określające funkcję rozkładu temperatury wewnątrz rury za grzałką. Przewodność cieplna rury zależy od mocy grzałki, wymiarów rury i grzałki oraz rozkładu temperatury wewnątrz rury za grzałką. Podano zależności umożliwiające wyznaczenie przewodności cieplnej rury. Wykazało się, że przewodność cieplna rury zależy od mocy grzałki, wymiarów rury i grzałki oraz rozkładu temperatury wewnątrz rury za grzałką.