

Zofia KOLEK, Ewa MARCINKOWSKA

KATEDRA METROLOGII I ANALIZY INSTRUMENTALNEJ AKADEMII EKONOMICZNEJ W KRAKOWIE
KATEDRA TOWAROZNAWSTWA PRZEMYSŁOWEGO AKADEMII EKONOMICZNEJ W KRAKOWIE

Dynamiczna metoda pomiaru parametrów cieplnych materiałów

dr hab. inż. Zofia KOLEK

Jest absolwentką Wydziału Elektrotechniki AGH, posiada absolutorium z fizyki. Stopień naukowy doktora habilitowanego nauk ekonomicznych uzyskała na Wydziale Towaroznawstwa AE w Poznaniu. Zainteresowania zawodowe: wykorzystanie fizycznych i fizyko-chemicznych metod badań, zagadnienia metrologiczne w systemach jakości: wiarygodność pomiarów, przyczyny i skutki błędów i niepewności wyników pomiarów



e-mail: zofia.kolek@ae.krakow.pl

dr hab. Ewa MARCINKOWSKA

Kierownik Katedry Towaroznawstwa Przemysłowego AE w Krakowie. Doktor habilitowany nauk ekonomicznych w zakresie towaroznawstwa, 1994 r.; Członek Sekcji Towaroznawczej – Nauk o Jakości PAN. Autor i współautor ponad stu trzydziestu prac naukowych oraz 10 patentów. Zajmuje się pomiarami wielkości określających transport wilgoci i ciepła w materiałach stosowanych w odzieży i obuwiu



e-mail: etmarcin@cyf-kr.edu.pl

Streszczenie

Przedstawiono układ do pomiaru współczynnika przenikania ciepła materiałów o różnych właściwościach cieplnych. Metoda pomiarowa jest oparta na zjawisku wymiany ciepła w stanie nieustalonym uporządkowanym. Do analizy wyników wykorzystano model matematyczny, który przedstawia eksponencjalną zależność gradientu temperatury na grubości próbki od czasu. Przeprowadzona analiza błędów i niepewności miała na celu ustalenie możliwości zwiększenia dokładności pomiarów w konkretnych warunkach badań.

Słowa kluczowe: przenikanie ciepła, stan uporządkowany, opór cieplny

A dynamic method for measuring thermal parameters of materials

Abstract

A heat transmission coefficient measuring system for materials of various heat-insulating properties is presented. The measuring method is based on the steady ordered state. A mathematical model presenting an exponential relationship between the temperature gradient through the specimen thickness and time was used. An analysis of errors and uncertainties were aimed at possibility to improve measuring accuracy under specified test conditions.

Keywords: heat conduction, ordered state, thermal resistance

1. Wstęp

Współczynnik przewodzenia ciepła można wyznaczyć w oparciu o teorię wymiany ciepła w stanie nieustalonym uporządkowanym [1,4]. W przypadku płytki o grubości znacznie mniejszej od pozostałych wymiarów, ogrzewanej (chłodzonej) równomiernie temperatura T zmienia się tylko w kierunku osi x prostopadłej do powierzchni płytki. Jednowymiarowe równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

gdzie:

- c – ciepło właściwe,
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła,
- ρ – gęstość.

W stanie uporządkowanym zależność zmian różnicy ϑ temperatur ciała i otoczenia od czasu ma charakter eksponencjalny [4,5]:

$$\vartheta = BU \exp(-At)$$

gdzie:

- A – stała zależna od właściwości termofizycznych materiału i rozmiarów ciała,
- B – stała zależna od warunków początkowych wymiany ciepła,
- U – funkcja zależna od właściwości materiału, kształtu ciała oraz jego rozmiarów.

2. Metoda pomiaru oporu cieplnego materiałów izolujących ciepłnie

Próbka, w postaci cienkiej płytki, posiadająca jednakową temperaturę początkową w całej objętości, jest równomiernie ogrzewana od strony górnej powierzchni przez grzejnik o stałej temperaturze. Do przeciwległej powierzchni próbki przylega odbiornik o dużej pojemności cieplnej wykonany z miedzi. Wnikanie ciepła następuje przez powierzchnie grzejnik/próbka, następnie ciepło jest przewodzone przez próbkę i przyjmowane przez odbiornik.

Pomiary wykonano dla próbek trzech materiałów o różnych właściwościach termofizycznych. Były to płytki:

- z poliuretanu o grubości od 3,80 mm do 11,25 mm i gęstości 0,027 g/cm³,
- z korka o grubości od 2,36 mm do 9,86 mm i gęstości 0,215 g/cm³,
- z gumy twardej o grubości od 2,25 mm do 12,12 mm i gęstości 1,232 g/cm³,

Wybór materiału doświadczalnego wynikał z przeznaczenia przyrządu do oceny właściwości cieplnych skór, tworzyw skóropodobnych i materiałów tekstylnych. Zastosowane próbki reprezentują zarówno materiały „ciepłe” (duży opór cieplny) jak i „zimne” (mały opór cieplny). Pomiary przeprowadzono kilkakrotnie dla każdej próbki.

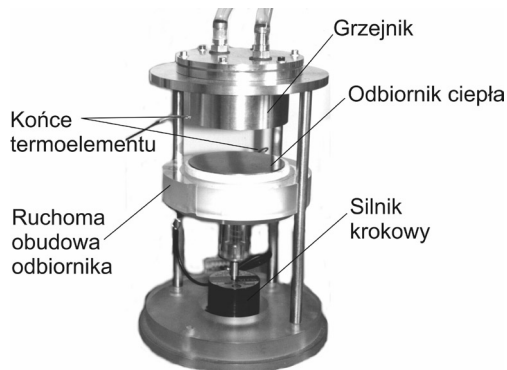
2.1. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy składa się z następujących elementów: urządzenia podstawowego, sterownika położenia, termostatu, termoelementu, cyfrowego miernika napięcia i komputera.

Podstawowymi częściami urządzenia podstawowego jest grzejnik i odbiornik ciepła, między którymi umieszcza się próbkę

badanego materiału. W odbiorniku i w dolnej części grzejnika umieszczone są końce termoelementu różnicowego, który podłączony jest do miernika cyfrowego o dużym oporze wejściowym. Mierzone napięcie (siła termoelektromotoryczna) jest proporcjonalne do różnicy temperatury grzejnika i odbiornika ciepła: $U = 0,4\Delta T$. Dane z miernika są przekazywane przez złącze szeregowo do komputera i rejestrowane [1].

Właściwe ustawienie grzejnika względem odbiornika uzyskano dzięki mikroprocesorowemu sterownikowi położenia. Mechaniczna część tego systemu składa się ze stelaża, na którym – w górnej jego części – umieszczono grzejnik, natomiast w dolnej – silnik krokowy (rys.1). Silnik ten za pomocą śruby i tulei pociągowej zmienia położenie odbiornika względem grzejnika. Zastosowanie nacisku powierzchniowego (1,8 kPa) zmniejsza opór kontaktowy związany z nierównościami powierzchni [1].

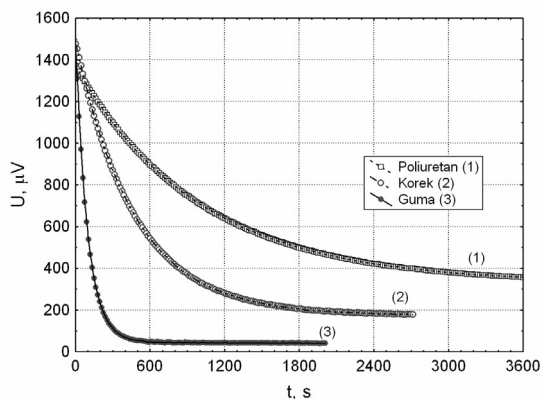


Rys. 1. Urządzenie podstawowe
Fig.1. Basic equipment

Oprogramowanie systemu pomiarowego służy do rejestracji i archiwizacji danych pomiarowych oraz prowadzenia obliczeń. Wyniki pomiarów są przedstawiane liczbowo oraz w postaci wykresów.

2.2. Zmiana temperatury w czasie

Po umieszczeniu próbki badanego materiału między grzejnikiem a odbiornikiem następuje wzrost temperatury odbiornika i zmniejszanie różnicy temperatur między grzejnikiem a odbiornikiem w czasie tym szybsze, im jest mniejszy opór cieplny badanego materiału (rys.2).



Rys.2. Napięcie rejestrowane w czasie pomiaru
Fig.2. Voltage recorded during measurements

Obserwowana zależność napięcia U od czasu t w warunkach uporządkowanej wymiany ciepła, to jest poza początkowym przebiegiem, ma charakter wykładniczy. W oparciu o różniczkowy bilans cieplny, uwzględniający wymianę ciepła przez przenikanie między próbką a grzejnikiem i odbiornikiem

oraz przez przewodzenie w samej próbce, a także mając na uwadze straty ciepłne, otrzymano następującą zależność [1]:

$$U = \frac{\alpha S_L}{\alpha S_L + \frac{S}{R_S}} U_o + \frac{S}{R_S \left(\alpha S_L + \frac{S}{R_S} \right)} U_o \exp \left(- \frac{\alpha S_L + \frac{S}{R_S}}{mc} t \right) \quad (2)$$

czyli:

$$U = U_o (C + B \exp(-A t))$$

gdzie:

$$A = \frac{\alpha S_L + \frac{S}{R_S}}{mc}, \quad \frac{1}{s}$$

$$B = \frac{S}{R_S \left(\alpha S_L + \frac{S}{R_S} \right)}$$

$$C = \frac{\alpha S_L}{\alpha S_L + \frac{S}{R_S}}$$

U – napięcie w chwili t , μV

U_o – napięcie w chwili $t=0$, μV

S – powierzchnia wymiany ciepła, m^2

$S_L = \frac{1}{4} \pi \varphi^2$ – powierzchnia utraty ciepła przez odbiornik, m^2

φ – średnica odbiornika ciepła, m

α – sumaryczny współczynnik wnikania ciepła do otoczenia, $W/(m^2 K)$

m – masa odbiornika ciepła, kg

c – ciepło właściwe odbiornika, $J/(kg K)$

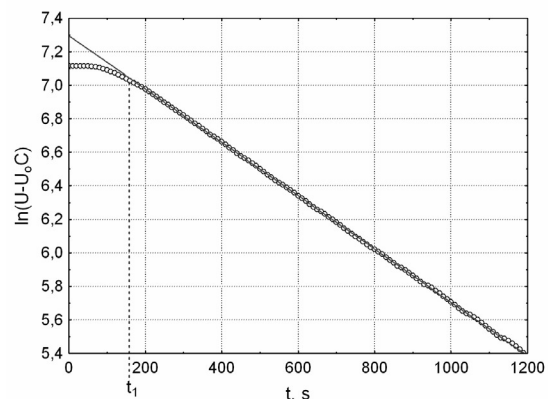
R_S – całkowity opór cieplny próbki, $m^2 K/W$

t – czas, s .

Iloczyn $U_o C$ jest równy napięciu elektrycznemu odpowiadającemu różnicy temperatur grzejnika i odbiornika po osiągnięciu stanu ustalonego, przy uwzględnieniu utraty ciepła przez odbiornik.

2.3. Ustalenie czasu trwania stanu nieuporządkowanego

W początkowym okresie wymiany ciepła, w stanie nieuporządkowanym, rozkład oraz szybkość zmian temperatury w materiale zależą od warunków początkowych. Rys.3 przedstawia przykładowo początkowe wartości rejestrowanego napięcia, w przypadku gumy. Po czasie $t > t_1$ następują uporządkowane warunki wymiany ciepła.



Rys.3. Zależność rejestrowanego napięcia od czasu pomiaru w stanie nieuporządkowanym ($t < t_1$)

Fig.3. Voltage vs. time measured at an unordered state ($t < t_1$)

Obliczenie parametrów równania (2) wymaga ustalenia czasu osiągnięcia stanu uporządkowanego. W tym celu została opracowana specjalna procedura postępowania [2], która sprowadza się do:

- numerycznego różniczkowania zarejestrowanych danych,
- określenia chwili osiągnięcia minimum funkcji aproksymującej przebieg pochodnej napięcia U po czasie t ,
- odrzucenia wszystkich punktów od początku rejestracji do czasu osiągnięcia minimum przez tę pochodną.

2.4. Obliczenia oporu cieplnego

Dane, po odrzuceniu punktów od początku rejestracji do czasu osiągnięcia stanu uporządkowanego służą do obliczania oporu cieplnego R_s . Dokonuje tego oprogramowanie systemu pomiarowego, poprzez estymację parametrów A , B i C równania (2), a następnie obliczenie oporu cieplnego R_s wg wzoru:

$$R_s = \frac{\pi\varphi^2 \left(1 + \frac{C}{B}\right)}{4cmA} \quad (3)$$

Niepewność $u(R_s)$ oporu, obliczono jako niepewność wielkości złożonej. Udział w niepewności złożonej poszczególnych wielkości występujących we wzorze (3) był tego samego rzędu.

Wyznaczone wartości oporu cieplnego R , były zawarte w przedziale $[9,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}, 376,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}]$. Niepewność względna $\frac{u(R)}{R}$ określenia oporu cieplnego nie przekracza 0,5% i nie zależy od wartości oporu, co oznacza stałą dokładność wyników pomiarów w podanym zakresie.

3. Wyniki pomiarów oporu cieplnego i ich analiza

Obliczona według wzoru (3) wartość R_s jest sumą oporów przenikania ciepła przez powierzchnie styku oraz oporu przewodzenia ciepła przez badany materiał. Ponadto istnieją opory kontaktowe, związane z niemożnością zapewnienia idealnego styku na całej powierzchni grzejnik/próbka i próbka/odbiornik oraz występują straty ciepła przez powierzchnie boczne próbek. Te składowe powodują, że zależność odwrotności wyznaczonego oporu cieplnego R_s od odwrotności grubości l płytek, przedstawiona na rys.4, jest opisana równaniem:

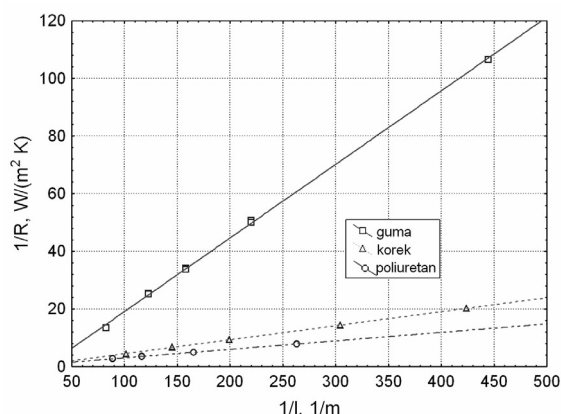
$$\frac{1}{R_s} = a + b \frac{1}{l} \quad (4)$$

z współczynnikami a i b zależnymi od zastosowanego układu pomiarowego.

Otrzymane wyniki obliczeń współczynników a i b oraz współczynnika korelacji r zestawiono w Tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki obliczeń parametrów prostej $1/R=f(l)$
Tab. 1. Results of straight line $1/R=f(l)$ parameters calculations

materiał	a	$\sigma(a)$	b	$\sigma(b)$	r
	$\frac{W}{m^2K}$		$\frac{W}{mK}$		
poliuretan	0,12	0,05	0,0295	0,0003	0,9994
korek	-0,35	0,08	0,0486	0,0003	0,9998
guma	-6,38	0,53	0,2553	0,0024	0,9997



Rys.4. Zależność odwrotności oporu cieplnego $1/R_s$ od odwrotności grubości $1/l$ badanych próbek

Fig.4. Relationship between the inverse of thermal resistance $1/R_s$ and the inverse of thickness $1/l$ for specimens under investigation

Wyznaczenie wartości oporu cieplnego R badanej próbki i przewodności cieplnej λ materiału wymaga oszacowania i uwzględnienia odpowiednich poprawek. Są one tym bardziej istotne im jest mniejszy opór cieplny materiału [3]. W przypadku oceny właściwości cieplochronnych materiałów o małej przewodności cieplnej wystarczająco otrzymane bezpośrednio wyniki – potwierdza to zgodność otrzymanych wartości współczynnika kierunkowego b z wartością literaturową współczynnika przewodności cieplnej korka [5], a także – w przypadku poliuretanu – zgodność, w granicach niepewności, obliczonej wartości b i wartości współczynnika λ otrzymaną inną metodą [3].

4. Podsumowanie

Przedstawiony system pomiarowy ma zastosowanie w ocenie właściwości cieplochronnych skór, tworzyw skóropodobnych i materiałów tekstylnych, których współczynnik przewodzenia ciepła jest rzędu 0,1 W/(m·K). Metoda pomiarowa jest oparta na zjawisku wymiany ciepła w stanie nieustalonym uporządkowanym. System pomiarowy umożliwia automatyzację i obiektywizację procesu pomiarowego oraz rejestrowanie i archiwizację dużej liczby danych. Bardzo dobre dopasowanie krzywych teoretycznych do punktów doświadczalnych świadczy o dużej dokładności metody pomiarowej. Warunkiem otrzymania poprawnych wartości współczynnika λ przewodności cieplnej jest jednak uwzględnienie doświadczalnie wyznaczonych poprawek aparaturowych; w tym przypadku niepewność względna wyniku pomiaru jest nie większa niż 2%.

5. Literatura

- [1] Marcinkowska E.: Estimation of the Thermal Conductivity of Leather. The Journal of the American Leather Chemists Association 99(6), 2004, 240-248.
- [2] Marcinkowska E.: An Estimation of Parameters for a Model Describing Heat Transfer on a Footwear Material Tester. Proceed 14th IGWT Symposium Focusing New Century: Commodity-Trade-Environmen, Beijing, China, 25th-29th August, 2004, 13-17.
- [3] Marcinkowska E., Kolek Z., Żuk W.: Metoda pomiaru i sposób obliczenia oporu cieplnego. Badania statutowe, 2007, w opracowaniu.
- [4] Minkina W., Chudzik S.: Pomiary parametrów cieplnych materiałów termoizolacyjnych – przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2004.
- [5] Staniszewski B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN Warszawa 1980.