



Określanie parametrów termofizycznych polimetakrylanu metylu, polistyrenu oraz stali stopowej 1H18N9T metodą chwilowego źródła ciepła

JANUSZ ZMYWACZYK, PIOTR KONIORCZYK, JACEK GAJ*

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Lotniczej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2
*Departament Infrastruktury MON,
00-911 Warszawa, Al. Niepodległości 218

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę chwilowego źródła ciepła do jednoczesnego określania trzech parametrów termofizycznych: przewodności cieplnej k , dyfuzyjności cieplnej a oraz ciepła właściwego c_p w czasie jednego pomiaru. Metoda jest obecnie stosowana na świecie nie tylko dla materiałów termoizolacyjnych, ale również dla stopów metali. Cechuje ją krótki czas pomiaru. Szczególnie ważna jest metodologia badań. W ostatnich latach dokonał się w tym zakresie duży postęp. W pracy przedstawiono wyniki badań k , a i c_p dla polimetakrylanu metylu, tzw. pleksiglasu (PMMA), polistyrenu ekstrudowanego firmy BASF (XPS 3035 CS) oraz stali stopowej 1H18N9T. Badania k , a i c_p w funkcji grubości próbki h przeprowadzono w temperaturze pokojowej dla próbek w kształcie walca o średnicy 50 mm dla PMMA, 1H18N9T i 200 mm dla XPS. Grubości próbek zawierały się w granicach od 2 mm do 30 mm.

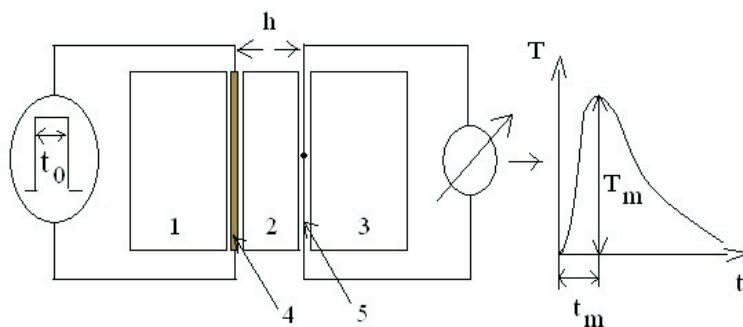
Słowa kluczowe: nieustalone przewodzenie ciepła, przewodność cieplna, dyfuzyjność cieplna, pojemność cieplna, materiały termoizolacyjne, kompleksowe badania właściwości termofizycznych, metoda chwilowego źródła ciepła

Symbole UKD: 536.252

1. Wprowadzenie

Standardową metodą badań przewodności cieplnej materiałów termoizolacyjnych jest metoda ochronnej płyty cieplnej, której procedura jest znormalizowana i opisana w normie PN-ISO 8302:1999. Jest to metoda powszechnie stosowana

przez akredytowane laboratoria badawcze w Polsce i za granicą. Uzyskiwane tą metodą wyniki badań należą do bardzo dokładnych, ale odbywa się to kosztem dość długiego czasu pomiaru ze względu na powolny proces dochodzenia układu do warunków ustalonej wymiany ciepła. Wady tej pozbawione są metody analizy stanów nieustalonych, a wśród nich metoda chwilowego źródła ciepła [1-4]. Schemat metody zilustrowano na rysunku 1. Przy pomocy termoelementu 5 bada się odpowiedź termiczną układu (w jego określonym punkcie przestrzennym w odległości h od źródła) na wymuszenie cieplne w postaci krótkotrwałego impulsu cieplnego wytworzonego na powierzchni czołowej badanej próbki 2 (rys. 1). Położenie maksimum nadwyżki temperatury na przeciwległej powierzchni badanej próbki pozwala na jednoczesne wyznaczenie (w trakcie jednego eksperymentu) dyfuzyjności cieplnej a oraz przewodności cieplnej k , a przy znajomości gęstości materiału próbki także jego ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu c_p . W metodzie chwilowego źródła ciepła grzejnik o skończonych wymiarach zastępowany jest powierzchniowym źródłem ciepła. Korzysta się z jednowymiarowego modelu wymiany ciepła w ośrodku półnieskończonym przy założeniu, że źródło ciepła w formie foliowego grzejnika elektrycznego jest scharakteryzowane powierzchnią gęstością strumienia ciepła. W rzeczywistym eksperymencie próbka ma skończone wymiary, a powierzchniowe źródło ciepła nie jest izotermiczne. W literaturze dostępne są rozwiązania analityczne dla takiego układu, tzn. dla przypadku jednowymiarowego nieustalonego przewodzenia ciepła, uwzględniające różne kształty impulsu wymuszającego, np. impuls prostokątny, impuls nieskończenie krótki modelowany funkcją Diraca czy impuls w kształcie krzywej Gaussa [6]. W naszym przypadku model zakłada wymuszenie cieplne w formie impulsu typu delta Diraca, chociaż w eksperymencie impuls cieplny jest generowany w czasie t_0 (rys. 1). Ponieważ strumień ciepła dyfunduje w głąb próbki na stosunkowo niewielką jej głębokość (w czasie t_0), istotne jest przyjęcie odpowiedniej grubości



Rys. 1. Schemat metody chwilowego źródła ciepła: 1, 2, 3 — próbki; 4 — powierzchniowe źródło ciepła; 5 — termoelement; h — grubość próbki; t_0 — czas trwania impulsu; T_m — temp. maksymalna termoelementu

próbki h (rys. 1). W pracy przedstawiono metodologię badań parametrów termofizycznych materiałów tą metodą na przykładzie pomiarów dyfuzyjności cieplnej, przewodności cieplnej i ciepła właściwego dla polimetakrylanu metylu (PMMA) oraz polistyrenu ekstrudowanego firmy BASF (XPS 3035 CS).

2. Model analityczny

Zakłada się, że wskutek wystąpienia powierzchniowego źródła ciepła typu delta Diraca w izotropowym i jednorodnym ośrodku półnieskończonym zachodzi wymiana ciepła tylko na drodze przewodzenia ciepła [1-4]. Nieustalone pole temperatury jest wynikiem rozwiązywania jednowymiarowego równania przewodzenia ciepła [5, 7]

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

wraz z jednorodnym warunkiem początkowym:

$$T(x, t = 0) = T_0 \quad (2)$$

oraz warunkami brzegowymi:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} T(x, t) = T_0 \quad (3)$$

$$\left(-k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = q_0 \delta(t) \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (5)$$

gdzie: $\dot{q}_0 = q_0 \delta(t)$ jest gęstością strumienia ciepła, a $\delta(t)$ jest deltą Diraca.

Rozwiązanie problemu początkowo-brzegowego (1)-(5) otrzymujemy w postaci [1, 7]:

$$T(x, t) = T_0 + \frac{q_0}{k} \sqrt{\frac{a}{\pi t}} e^{-\frac{x^2}{4at}}. \quad (6)$$

Należy zwrócić uwagę na zmianę miana wielkości $\dot{q}_0 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$ na $q_0 \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right]$ w (4).

Podstawą metody eksperymentalnej jest rejestracja zmian temperatury $T(x, t)$ (6) pod wpływem cieplnego wymuszenia impulsowego wtwarzanego przez powierzchniowe źródło ciepła i obliczenie parametrów termofizycznych na podstawie cech charakterystycznych zmierzonej zależności (rys. 1). Ponieważ odpowiedź termiczna układu $T(x, t)$ postaci (6) na cieplne wymuszenie impulsowe (4) jest wyznaczana w odległości h od źródła ciepła, stąd mamy:

$$T(h, t) = T_0 + \frac{q_0}{k} \sqrt{\frac{a}{\pi t}} e^{-\frac{h^2}{4at}}. \quad (7)$$

Z warunku koniecznego istnienia ekstremum funkcji (w tym przypadku jest to maksimum zależności ($T_m = T(h, t_m) - T_0$)) (7):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{t=t_m} = 0 \Rightarrow \frac{1}{2k} - \frac{h^2}{4t_m a k} = 0, \quad (8)$$

wynika, że dyfuzyjność cieplna a dana jest wzorem:

$$a = \frac{h^2}{2t_m}. \quad (9)$$

Następnie po podstawieniu wzoru (9) do (7) przy uwzględnieniu warunków opisywanego eksperymentu, tzn. że ciepło rozchodzi się jednakowo w obie strony ośrodka $\dot{q}_0 \rightarrow \frac{\dot{q}_0}{2}$, uzyskuje się wyrażenia służące do wyznaczenia przewodności cieplnej:

$$k = \frac{q_0 h}{2t_m T_m \sqrt{2\pi \exp(1)}} \quad (10)$$

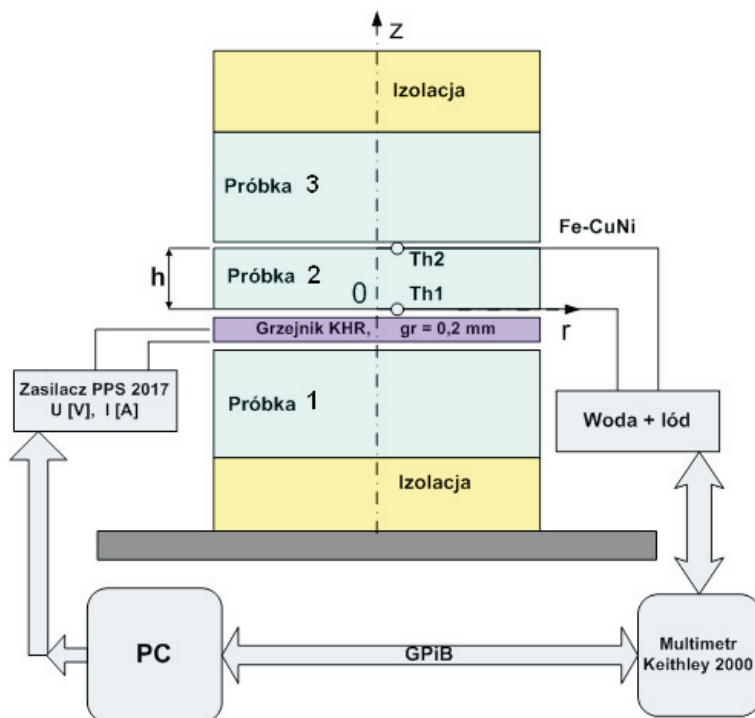
oraz ciepła właściwego:

$$c_p = \frac{q_0}{\rho h T_m \sqrt{2\pi \exp(1)}}, \quad (11)$$

gdzie ρ oznacza gęstość materiału próbki.

3. Opis układu pomiarowego

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. Stos pomiarowy składał się z próbki pomiarowej 2 (rys. 1 i 2) w kształcie walca o średnicy ϕ i grubości h otoczonej próbkami pomocniczymi nr 1 i 3 o tej samej dużej grubości znacznie większej od h (rys. 1 i 2), również w kształcie walca o średnicy ϕ (tab. 1). Do badań przeznaczono polimetakrylan metylu, tzw. pleksiglas (PMMA) o gęstości 1181 kg m^{-3} jako materiał referencyjny, polistyren ekstrudowany firmy BASF (XPS 3035 CS) o gęstości 33 kg m^{-3} oraz stal stopową 1H18N9T o gęstości 7902 kg m^{-3} . Dane dotyczące próbek pomiarowych zamieszczono w tabeli 1. Pomiędzy próbką 1 i 2 znajdował się grzejnik cienkowarstwowy KHR 2/10 firmy Omega (USA) o średnicy 50 mm, grubości $d = 0,2 \text{ mm}$ i rezystancji w temperaturze pokojowej $R = 22,4 \Omega$ (maksymalna temperatura pracy $+200^\circ\text{C}$) — dla próbek PMMA oraz 1H18N9T lub KHR 8/10 tej samej firmy o średnicy 200 mm, grubości $d = 0,2 \text{ mm}$ i rezystancji w temp. pokojowej $R = 459,3 \Omega$ (maksymalna temp. pracy $+200^\circ\text{C}$) — dla próbek XPS 3035 CS. W przypadku próbek PMMA oraz 1H18N9T zastosowano również pastę Dow Corning 340 (USA) w celu polepszenia kontaktu



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

TABELA 1

Dane dotyczące próbek pomiarowych

Materiał próbki	PMMA	XPS 3035 CS	1H18N9T
średnica próbki ϕ [mm]	50	200	50
grubość próbki nr 2 h [mm]	4, 6, 8, 10	10, 20, 30, 40	2,5, 5, 8, 10
grubość próbki nr 1 i nr 3 [mm]	12	50	10

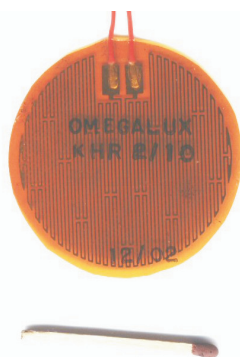
ciepłnego między poszczególnymi częściami próbki oraz między próbką a grzejnikiem. Dodatkowo stos był obłożony z góry i z dołu warstwą izolacji termicznej z pianki poliuretanowej pełniącej zarazem rolę docisku w celu zapewnienia lepszego kontaktu cieplnego pomiędzy powierzchnią próbki i grzejnika. Pomiar temperatury w punktach Th1 i Th2 (rys. 2) dokonywany był — w przypadku PMMA oraz XPS 3035 CS — za pomocą termoelementów typu J (Fe-CuNi) o średnicy $\phi_t = 0,10$ mm poprowadzonych w cienkich rowkach o szerokości i grubości 0,2 mm wzdłuż średnicy, przy czym ich gorące spoiny znajdowały się w osi symetrii próbki. W przypadku stali stopowej 1H18N9T pomiaru temperatury w punktach Th1 i Th2 (rys. 2) dokonywano przy pomocy termoelementów płaszczowych typu K (NiCr-Ni) firmy Heraeus o średnicy płaszcza 0,5 mm, poprowadzonych w rowkach o średnicy 0,55 mm wzdłuż średnicy, podobnie jak w przypadku PMMA oraz XPS. Grzejnik KHR zasilany był prądem stałym o zadanym napięciu U i czasie trwania t_0 ze sterowanego za pomocą komputera PC zasilacza PPS 2017 firmy Meeter International Corp. (USA). Napięcia termoelektryczne termoelementów, których zimne końce znajdowały się w wodzie z lodem, były mierzone automatycznie multimetrem Keithley 2000 sterowanym z komputera poprzez kartę GPIB. Wyniki pomiaru zapisywano na dysku komputera w zbiorze o zadanej przez użytkownika nazwie. Całością układu pomiarowego sterował własny program obsługi stanowiska pomiarowego. W celu uzyskania danych dotyczących jednorodności pola temperatury grzejników KHR 2/10 oraz KHR 8/10 wykonano pomiary termowizyjne, które pozwoliły zobrazować rozkłady temperatury na powierzchniach obu grzejników. Z przedstawionych wyników wyciągnięto wnioski, że efektywne pole powierzchni grzejnej grzejnika o średnicy $\phi = 50$ mm to koło o średnicy 45 mm, natomiast w przypadku grzejnika o średnicy $\phi = 200$ mm — koło o średnicy $\phi = 195$ mm [8].

Takie też powierzchnie uwzględniano do obliczania $q_0 \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right]$ w (7).

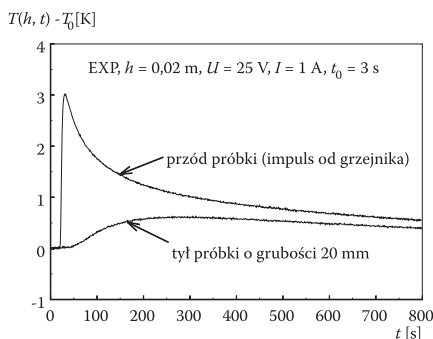
4. Metodyka badań

Metodę chwilowego źródła ciepła zbadano pod kątem wpływu zaburzenia jednorodności temperatury w próbce dla czasu $t = 0$ s, tzn. temp. termostatowa-

nia próbki na wynik pomiarów. Na rysunku 4 pokazano nadwyżkę temperatury $T(h, t) - T_0$, stanowiącą różnicę pomiędzy odpowiedzią termiczną układu w punkcie Th1 (rys. 2) i z tyłu próbki, tzn. w punkcie Th2 ($h = 20$ mm). Choć do obliczeń k , a i c wystarczy znać nadwyżkę temperatury $T(h, t) - T_0$ tylko w punkcie Th2, tzn. dla $h = 20$ mm, warto umocować termoelementy po obu stronach powierzchni czołowych próbki, tzn. również w punkcie Th1. Obydwa sygnały powinny startować z tej samej temperatury T_0 , czyli dla $T(h, t) - T_0 = 0$. Jeżeli tak nie jest, to przyczyną może być brak równowagi termicznej w układzie próbki przy rozpoczęciu pomiaru lub w niewłaściwym przewodzeniu każdego z przewodów termoelementu do woltomierza. Obydwa przewody termoelektryczne, tzn. Fe oraz CuNi powinny być na drodze od próbki do woltomierza prowadzone obok siebie. W przeciwnym wypadku pojawia się niezrównoważenie torów kanałów pomiarowych. Nadwyżka temperatury $T(h, t) - T_0$, tzw. odpowiedź termiczna układu w punkcie Th2 próbki (rys. 2), nie powinna — według danych literaturowych przekraczać 1 K, a właściwie powinna być zawarta pomiędzy około 0,4 a 0,8 K [1, 2]. Krótki czas pomiaru



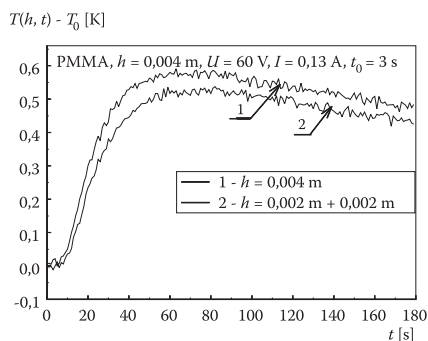
Rys. 3. Grzejnik KHR 2/10 o średnicy 50 mm firmy OMEGA



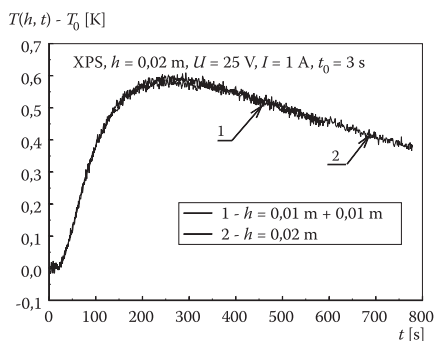
Rys. 4. Odpowiedź termiczna układu $T(h, t) - T_0$ z przodu, tzn. w punkcie Th1 i z tyłu próbki, tzn. w punkcie Th2 (rys. 2); temp. początk. $T_0 = 17,6^\circ\text{C}$ (290,8 K)

oraz mała nadwyżka temperatury $T(h, t) - T_0$ predystynują tę metodę do określania przewodności cieplnej materiałów wilgotnych.

Metoda chwilowego źródła ciepła pozwala badać wpływ termicznego oporu kontaktowego na wyniki pomiarów k , a i c . Na rysunkach 5 i 6 porównano odpowiedzi termiczne układu $T(h, t) - T_0$ dla próbki jednolitej oraz złożonej z dwóch próbek w taki sposób, by łączna grubość obu próbek odpowiadała grubości próbki jednolitej. W przypadku PMMA sygnały $T(h, t) - T_0$ dla próbki jednolitej oraz złożonej z dwóch próbek różnią się zasadniczo. W przypadku XPS różnice są niezauważalne. Oznacza to, że termiczny opór kontaktowy powierzchni XPS, czyli materiału którego przewodność cieplna jest o rząd wielkości mniejsza, niż PMMA jest bardzo mały. Dodatkowe pomiary, jakie wykonali autorzy pokazują, że podział próbki jednolitej XPS na trzy lub więcej próbek w taki sposób, by łączna grubość trzech lub więcej próbek odpowiadała grubości próbki jednolitej, również skutkuje



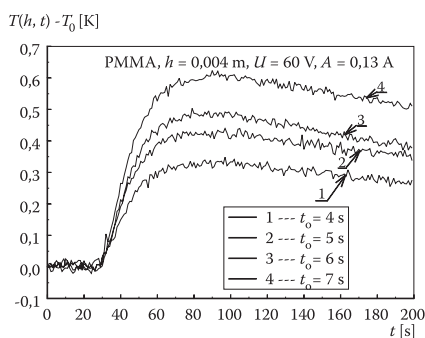
Rys. 5. Wpływ oporu kontaktowego na odpowiedź termiczną układu $T(h, t) - T_0$ w punkcie Th2 (rys. 2) dla próbek z PMMA o grubości $h = 4$ mm: 1 — próbka jednolita, 2 — próbka złożona z dwóch próbek o łącznej grubości 4 mm; temp. początek. $T_0 = 17,3^\circ\text{C}$ ($290,5$ K)



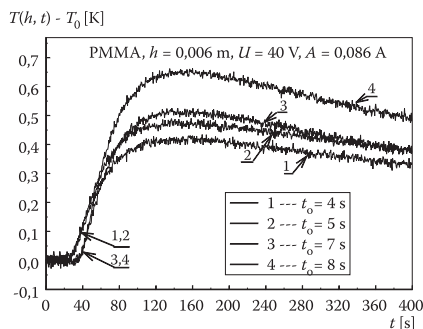
Rys. 6. Wpływ oporu kontaktowego na odpowiedź termiczną układu $T(h, t) - T_0$ w punkcie Th2 (rys. 2) dla próbek z XPS o grubości $h = 20$ mm: 1 — próbka złożona z dwóch próbek (czas pomiaru $t = 600$ s), 2 — próbka jednolita (czas pomiaru $t = 800$ s); temp. początek. $T_0 = 17,7^\circ\text{C}$ ($290,9$ K)

powstaniem różnic pomiędzy sygnałami $T(h, t) - T_0$ dla próbki jednolitej oraz złożonej z kilku próbek. Są to jednak różnice zdecydowanie mniejsze, niż dla PMMA.

Metodę chwilowego źródła ciepła zbadano również pod kątem wpływu czasu próbkowania na wynik pomiarów. Autorzy testowali metodę na przykładzie PMMA. Uzyskane odpowiedzi termiczne układu $T(h, t) - T_0$ dla dwóch różnych czasów próbkowania sygnału z termoelementu (1 s oraz 0,5 s) oraz dla różnych czasów trwania impulsu cieplnego t_0 pokazano na rysunkach 7 i 8. Czas próbkowania 1 s jest wystarczający do dokładnego obliczenia k , a i c_p PMMA. Oznacza to, że jest również wystarczający dla XPS, dla którego odpowiedź termiczna układu $T(h, t) - T_0$ w przedziale czasu od 0 s do t_m jest trzykrotnie dłuższa w stosunku do PMMA (rys. 1). Obowiązuje w tej metodzie generalna zasada: im większa przewodność cieplna materiału, tym krótszy czas t_m , tzn. czas osiągnięcia temp. T_m (rys. 1). Metoda zdaje również egzamin w przypadku metali lub stopów metali o małej przewodności cieplnej k . Na rysunku 13 autorzy zaprezentowali wyniki pomiarów k , a i c_p dla stali stopowej 1H18N9T. W dalszej perspektywie autorzy zamierzają wykorzystać proce-



Rys. 7. Odpowiedzi termiczne układu $T(h, t) - T_0$ dla próbek z PMMA o grubości $h = 4$ mm (czas próbkowania 1 s) dla różnych czasów trwania impulsu cieplnego t_0 ; temp. początk. $T_0 = 17,3^\circ\text{C}$ (290,5 K)

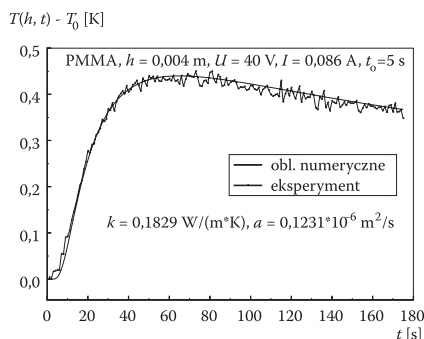


Rys. 8. Odpowiedzi termiczne układu $T(h, t) - T_0$ dla próbek z PMMA o grubości $h = 6$ mm (czas próbkowania 0,5 s) dla różnych czasów trwania impulsu cieplnego t_0 ; temp. początk. $T_0 = 21,3^\circ\text{C}$ (294,5 K)

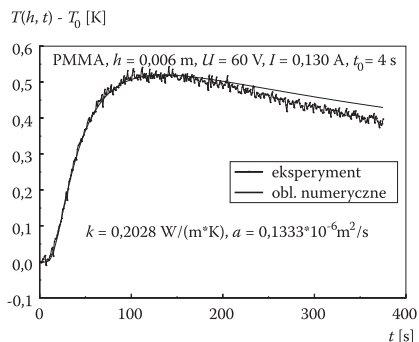
durę regularyzacji do wygładzania danych pomiarowych $T(h, t) - T_0$. Z tego punktu widzenia im krótszy czas próbkowania, tym większa ilość informacji i w efekcie lepiej uwarunkowany jest wynik obliczeń. Analiza wpływu czasu trwania impulsu cieplnego to na wyniki pomiarów k , a i c_p wymaga jeszcze dodatkowych badań. Oczywiście jest, że im dłuższy czas t_0 , tym warunki eksperymentu bardziej odbiegają od przyjętego modelu matematycznego, tzn. nagrzewania próbki „impulsem Diraca”. Wykonane przez autorów próby w tym zakresie pokazują, że wyniki pomiarów k , a i c_p dla PMMA i XPS są poprawne nawet dla $t_0 = 10$ s.

Na zakończenie rozważań związanych z metodyką badań wykonano modelowanie numeryczne wymiany ciepła problemu (1)-(5) w środowisku MATLAB. Wyznaczano numerycznie zależność $T(h, t)$, a następnie nakładano ją na taką samą zależność uzyskaną z eksperymentu. Dokładne rozwiązanie numeryczne problemu (1)-(5), tzn. zależność $T(h, t)$ porównywano z taką samą zależnością, ale uzyskaną z eksperymentu. Dane do obliczeń problemu (1)-(5), tzn. wartości parametrów termofizycznych k , a i c_p wyznaczano metodą chwilowego źródła ciepła z tych eksperymentalnych zależności $T(h, t)$, na które później nakładano rozwiązanie numeryczne. Porównanie obu zależności pozwalało ocenić, w jakim stopniu uzyskana z eksperymentu zależność $T(h, t)$, która służy do obliczenia parametrów termofizycznych k , a i c_p w metodzie chwilowego źródła ciepła, odpowiada dokładnemu rozwiązaniu jednowymiarowemu problemu (1)-(5). Do badań wybrano próbki z PMMA o grubości $h = 4$ mm oraz $h = 6$ mm.

Wyniki obliczeń numerycznych odpowiedzi termicznych układu $T(h, t) - T_0$ porównano z wynikami eksperymentu i zilustrowano na rysunkach 9 i 10. Wyniki potwierdzają poprawność wyznaczenia na drodze eksperymentalnej wartości k , a i c_p metodą chwilowego źródła ciepła. Zależności $T(h, t) - T_0$ obliczone numerycznie oraz zmierzone praktycznie się pokrywają. Otrzymano w ten sposób instrument badawczy, który pozwala weryfikować wyniki eksperymentu. Na obecnym etapie trudno jeszcze ocenić jego pełną przydatność.



Rys. 9. Porównanie odpowiedzi termicznych układu $T(h, t) - T_0$ dla próbek z PMMA o grubości $h = 4$ mm uzyskanych z pomiarów oraz obliczonych numerycznie; temp. początk. $T_0 = 21,3^\circ\text{C}$ (294,5 K)



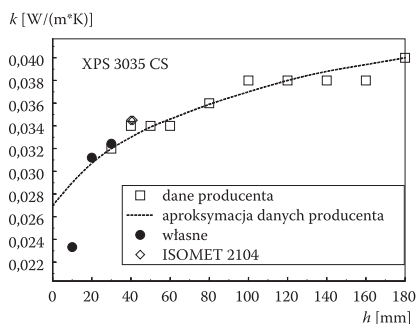
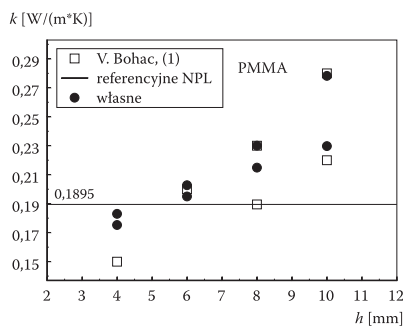
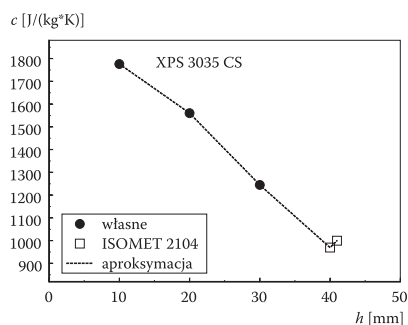
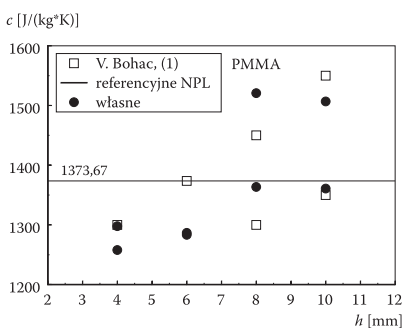
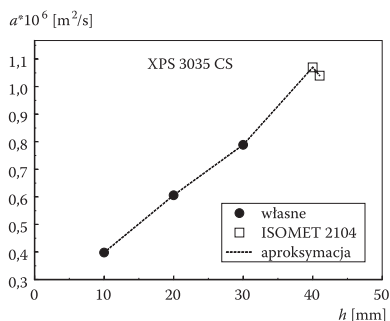
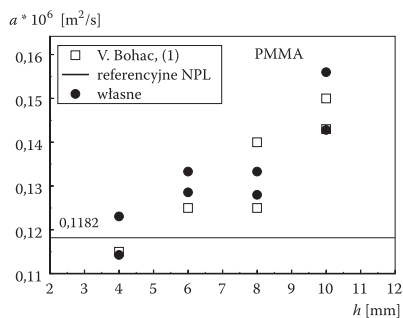
Rys. 10. Porównanie odpowiedzi termicznych układu $T(h, t) - T_0$ dla próbek z PMMA o grubości $h = 6$ mm uzyskanych z pomiarów oraz obliczonych numerycznie; temp. początk. $T_0 = 20,3^\circ\text{C}$ ($293,5$ K)

5. Wyniki badań i podsumowanie

Zmierzone parametry termofizyczne k , a i c_p dla PMMA i XPS pokazano na rysunkach 11 i 12. W zakresie grubości $h = 4, 6, 8$ i 10 mm uzyskano bardzo dobrą zgodność pomiarów k , a i c_p dla PMMA z danymi zaprezentowanymi przez twórców tej metody, tzn. V. Boháča oraz L. Kubičára [1]. Wyniki badań $k(h)$ dla $h = 20$ oraz 30 mm, dla polistyrenu ekstrudowanego XPS pokazane na rysunku 12, również lokują się wokół wartości zamieszczonych przez producenta w materiałach reklamowych [11].

Należy podkreślić zalety metody chwilowego źródła ciepła do jednoczesnego określania k , a i c_p materiałów izolacyjnych, tzn. krótki czas pomiaru i prosty układ pomiarowy. Szczególnie w przypadku materiałów wilgotnych krótki czas pomiaru oraz niewielki przyrost temperatury uniemożliwiają migrację wilgoci w stronę zimnej powierzchni próbki, jak ma to miejsce w metodzie ochronnej płyty cieplej. Również ze względu na stosunkowo małe wymiary próbek, ich termostatowanie w wyższych temperaturach nie wydaje się trudne. Nawet temperatury wysokie, tzn. powyżej 200°C są w zasięgu tej metody. Obecnie są już produkowane cienko-warstwowe grzejniki ceramiczne, które wytrzymują temp. do 600°C .

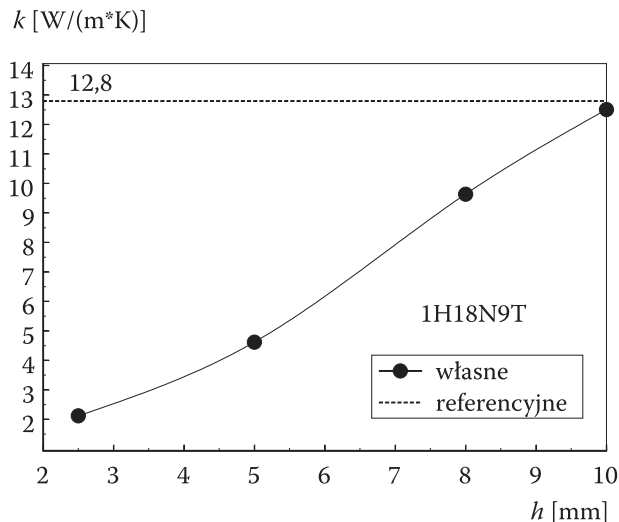
Na rysunku 13 pokazano uzyskaną z pomiarów przewodność cieplną w funkcji grubości próbki $k(h)$ stali stopowej 1H18N9T. Dopiero dla grubości próbki $h = 10$ mm wartości k zbliżają się do wartości referencyjnej [10]. Wartości dyfuzyjności cieplnej a oraz ciepła właściwego c_p , otrzymane z pomiarów, znacznie przekraczają wartości rekomendowane, tzn. $a = 3,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ oraz $c_p = 471 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [10] i nie zostały pokazane. I tak uzyskane przez autorów wartości liczbowe a oraz c_p dla grubości $h = 2,5$ oraz 5 mm leżą poniżej wartości referencyjnych, natomiast dla $h = 8$ mm są większe o około 30%, a dla $h = 10$ mm o około 50% od wartości referencyjnych. Na obecnym etapie badania stali stopowej 1H18N9T należy trak-



Rys. 11. Parametry termofizyczne a , c i k dla PMMA w funkcji grubości próbki h — badania własne, dane referencyjne NPL [8]; temp. początek. $T_0 = 20,0^\circ\text{C}$ (293,2 K)

Rys. 12. Parametry termofizyczne a , c i k dla EXP 3035 CS w funkcji grubości próbki h — badania własne, dana uzyskana z pomiaru k przyrządem ISOMET 2104 (sonda powierzchniowa) oraz dane producenta; temp. początek. $T_0 = 20,0^\circ\text{C}$ (293,2 K)

tować jako wstępne. W przyszłości zostaną wykonane badania k , a i c_p tej stali dla większych grubości próbek oraz zastosowane tylko w tym przypadku termoelementy płaszczowe zostaną zastąpione termoelementami z pojedynczych drutów, jak w przypadku PMMA, czy XPS.



Rys. 13. Wyniki badań przewodności cieplnej k stali stopowej 1H18N9T; temperatura początkowa $T_0 = 20,0^\circ\text{C}$ (293,2 K); dane referencyjne [9]

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego N513 006 31/0615.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.04.2007 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2007 r.

LITERATURA

- [1] V. BOHÁČ, E. KUBIČÁR, V. VRETENÁR, *Methodology of the testing of model for contact pulse transient method and influence of the disturbance effects on evaluating thermophysical parameters of the PMMA*, Measurement Science Review, vol. 5, Section 3, 2005.
- [2] E. KUBIČÁR, V. BOHÁČ, *A stepwise method for measuring thermophysical parameters of materials*, Measuring Science Technology, 11, 2000.
- [3] P. KONIORCZYK, J. ZMYWACZYK, J. GAJ, *Określanie parametrów termofizycznych materiałów izolacyjnych metodą cieplnego wymuszenia impulsowego*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, 12, 2006.
- [4] E. KUBIČÁR, V. BOHÁČ, V. VRETENÁR, *Contact constriction and free surface effects in pulse transient method*, THERMOPHYSICS 2001 (Proceedings), Constantine the Philosopher University in Nitra, Slovak Physical Society.
- [5] S. J. GDULA (red.), *Przewodzenie ciepła*, PWN, Warszawa, 1984.
- [6] R. SMUSZ, M. WĘGLARSKI, J. WILK, *Odpowiedź temperaturowa układu grubowarstwowego na wymuszenie impulsowe*, XII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Kraków, 2004.
- [7] J. TALER, P. DUDA, *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*, WNT, Warszawa, 2003.

- [8] J. ZMYWACZYK, *Estymacja parametrów termofizycznych ciał stałych z wykorzystaniem wybranych metod optymalizacji*, monografia WAT, Warszawa, 2006.
- [9] D. SALMON, *Thermophysical Properties Section at the National Physical Laboratory*, personal communication (Teddington, UK.NPL).
- [10] J. CORSAN, N. BUDD, W. HEMMINGER, *High Temp. — High Press*, 23, 1991, 119-128.
- [11] BASF: *Technical data Styrodur C*.

J. ZMYWACZYK, P. KONIORCZYK, J. GAJ

Identification of thermophysical parameters of plexiglass (PMMA), extruded polystyrene (XPS) and alloy steel 1H18N9T by using a heat pulse method

Abstract. A heat pulse method is presented for simultaneous determination of three thermophysical parameters, i.e., the thermal conductivity k , the thermal diffusivity a , and the specific heat c_p . All of the thermophysical parameters were determined during a single measurement for a given sample thickness. The method is now commonly used not only for heat-insulating materials but also for metal alloys as well. As advantages of the method one can include its wide application possibilities and a short time of measurement duration. The methodology is of vital importance. The paper presents the measurement results of k , a , and c_p for plexiglass (PMMA), extruded polystyrene (XPS), and alloy steel 1H18N9T.

Keywords: heat transfer, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity, thermal insulations, heat pulse method

Universal Decimal Classification: 536.252