

Mariusz FELCZAK¹, Marina MICHALAK², Bogusław WIĘCEK¹¹ INSTYTUT ELEKTRONIKI, POLITECHNIKA ŁÓDZKA, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź² KATEDRA MATERIAŁOZNAWSTWA, TOWAROZNAWSTWA I METROLOGII WŁÓKIENNICZEJ, POLITECHNIKA ŁÓDZKA, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź

Wyznaczanie przewodności cieplnej materiałów tekstylnych przy użyciu termowizji

Dr inż. Mariusz FELCZAK

W 2002 roku podjął pracę w Instytucie Elektroniki na stanowisku asystenta. W roku 2007 obronił pracę doktorską i rozpoczął pracę na stanowisku adiunkta. Obecnie jego prace związane są z wymianą ciepła układów elektronicznych. Zajmuje się również optymalizacją rozmieszczenia elementów elektronicznych na podłożu przy użyciu algorytmów genetycznych.



e-mail: felczak@p.lodz.pl

Dr inż. Marina MICHALAK

Ukończyła studia i doktorat obroniła na Uniwersytecie Wileńskim (Litwa) ze specjalności półprzewodników. Od 1983 r. pracuje na Politechnice Łódzkiej i specjalizuje się w badaniach elementów maszyn i procesów włókienniczych, metrologii włókienniczej, nowych materiałów i technologii włókienniczych oraz nad opracowaniem metod badań właściwości tekstyliów z wykorzystaniem termografii w podczerwieni. Jest autorem i współautorem ponad 100 publikacji i kilku patentów.



e-mail: marina.michalak@p.lodz.pl

Dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Specjalizuje się w termografii w podczerwieni i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Bogusław Więcek jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermometry oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczerwieni” – TTP.



e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl

1. Wprowadzenie

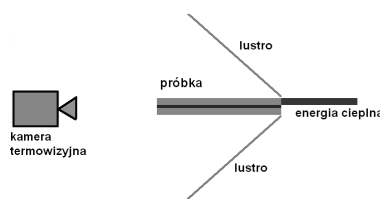
Próbki umieszczano w stanowisku pomiarowym w pozycji pionowej w przestrzeni pomiędzy lustrami. Ogrzewanie prowadzono w sposób elektryczny wykorzystując właściwości elektroprzewodzące włókniny spowodowane istnieniem w jej objętości włókien stalowych. Elektrody podłączone do źródła napięcia U umieszczono w płaszczyźnie pionowej na krawędziach ogrzewanej części próbki – rys. 1 i 2. Część ogrzewana znajdowała się w obszarze poza lustrami. Moc cieplna dostarczona do próbki była szacowana na podstawie wielkości napięcia i natężenia prądu przepływającego przez próbkę z uwzględnieniem strat spowodowanych konwekcją i radiacją.

Badano proces transportu energii cieplnej przez warstwowe struktury włókninowe. Z mieszanki włókien lnianych (40%), włókien stalowych (40%) oraz włókien poliestrowych o niskiej temperaturze mięknięcia (20%) wytwarzano runo metodą mechaniczną – zgrzeblarkową, które wstępnie przeigłowano. Następnie otrzymaną włókninę poddano obróbce termoplastycznej przy temperaturze 120°C. Włókna stalowe zastosowano w celu zwiększenia przewodności cieplnej włókniny. Z tak uzyskanej włókniny o wzdluznym ułożeniu włókien tworzono struktury warstwowe.

Metodami stosowanymi w badaniach materiałów włókienniczych wyznaczano parametry morfologiczne i fizyczne włókniny: masę powierzchniową, $m_p=186,7 \text{ g/m}^2$, gęstość pozorną $\rho=111,2 \text{ kg/m}^3$, przepuszczalność powietrza $P_p=166,4 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$. Z wytworzonej włókniny przygotowano próbki (rys. 2). Włókna są ułożone równolegle do dłuższego boku próbki.

W celu wyznaczenia parametrów termicznych badanych włóknin niezbędne było przeprowadzenie pomiarów termowizyjnych. Do tego celu jest wykorzystywane stanowisko pomiarowe z lustrami podczerwieni (rys. 1). Pozwala ono na rejestrację rozkładu temperatur na przeciwległych powierzchniach badanej próbki.

Powierzchnia jednej połowy próbki jest ogrzewana źródłem ciepła jak rys. 1. Strumień ciepły przechodzi wzdluz powierzchni w obszar nieogrzewany i dalej przechodzi w stronę powierzchni przeciwległej. Na granicy pomiędzy ogrzaną i nieogrzewaną częścią próbki umieszczono dwa lustra ułożone względem siebie pod kątem 90° z badaną próbką jak na rys. 1.



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego, widok z góry
Fig. 1. Top view of the measurement setup

Streszczenie

W pracy przedstawiono nową metodę wyznaczania parametrów termicznych materiałów włókienniczych, w tym także anizotropowych. Do próbek włókienniczych dostarczana jest energia cieplna i mierzona jest wartość temperatury po obu stronach materiału. Praca jest kontynuacją badań właściwości cieplnoizolacyjnych materiałów włókienniczych w dynamicznych warunkach za pomocą metody termograficznej w wykorzystaniem luster [1-6]. W stanowisku pomiarowym, którego schemat przedstawiono w cytowanych pracach zostało zastosowane źródło energii cieplnej umożliwiające szybkie nagrzewanie badanej próbki. Wykonano pomiary termowizyjne rozkładu temperatury i na podstawie uzyskanych wyników oraz modelowania termicznego wyznaczono przewodność cieplną badanych włóknin.

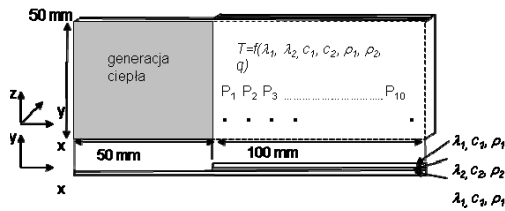
Słowa kluczowe: przewodzenie ciepła, odwrotne zagadnienia termiczne, termowizja.

Thermal conductivity evaluation of textile materials using infrared measurements

Abstract

A new method for evaluation of homogenous anisotropic textiles thermal parameters is presented in this paper. The research is a continuation of investigating the thermal properties of textile materials [1-6]. The thermal energy was supplied to textile materials and the temperature distribution on both surfaces of the textile was recorded using an infrared camera. The setup enabled fast textile heating. A thermal energy impulse was supplied to nonwovens. Using the obtained results and the finite element model of heat conduction, the thermal conductivity of a textile is evaluated. In order to obtain the thermal conductivity, it is necessary to solve an inverted heat conduction problem. The parameterized direct heat conduction model is used to calculate it. The research included both isotropic and anisotropic textile materials. The work was performed as a part of the Research Project 3 T08E 050 28 financed by KBN, entitled “3688/B/T02/2009/36 „The elaboration of the method of evaluation of temperature dependent thermal parameters of smart textile materials”.

Keywords: heat transfer, inverse heat conduction problem, thermovision.



Rys. 2. Geometria próbki wraz ze źródłem ciepła oraz przekrój próbki użyty do stworzenia modelu numerycznego 2D w oprogramowaniu Ansys®
Fig. 2. Structure and dimensions of the textile sample, heat source and probe cross-section used for 2D thermal model created in Ansys®

Kamera termowizyjna znajduje się na linii stanowiącej przedłużenie podłużnej osi próbki. Obraz zarejestrowany przez kamerę przekazywany jest do komputera do dalszej obróbki. W ten sposób możliwa jest jednoczesna rejestracja rozkładu temperatur na przeciwnych powierzchniach.

Opracowano procedurę eksperymentu do wyznaczania wartości parametrów termicznych badanej próbki, która wykorzystuje rozwiązanie termicznego zagadnienia odwrotnego. Dla niektórych materiałów parametry cieplne (przewodność, ciepło właściwe i gęstość) mogą być zależne od wartości temperatury, a sam materiał może dodatkowo być anizotropowy.

2. Model termiczny

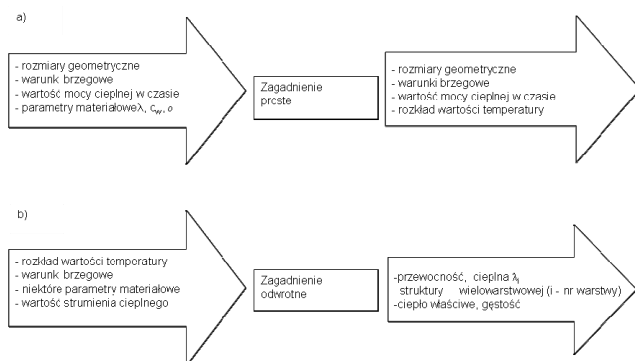
Rozwiązano zagadnienie termiczne proste (*ang. forward problem*) przepływu ciepła dla struktury z rys. 2 [7, 8, 9], dla którego danymi wejściowymi są:

- rozmiary geometryczne,
- warunki brzegowe,
- wartość strumienia cieplnego lub gęstości mocy,
- parametry materiałowe:
 λ_1, λ_2 – współczynnik przewodzenia ciepła,
 ρ_1, ρ_2 – gęstość,
 c_1, c_2 – ciepło właściwe.

W celu wyznaczenia wartości parametrów termicznych struktury należy rozwiązać zagadnienie odwrotne (*ang. inverse problem*) przepływu ciepła (rys. 3b), dla którego danymi wejściowymi są [9, 10]:

- rozmiary geometryczne,
- warunki brzegowe,
- wartość strumienia cieplnego lub gęstości mocy,
- rozkład wartości temperatury na powierzchni próbki.

W zagadnieniu prostym jako wynik otrzymujemy rozkład wartości temperatury w próbce, a w modelu odwrotnym możemy wyznaczyć parametry materiałowe takie jak np. przewodność cieplna.



Rys. 3. Zagadnienie proste (a) oraz odwrotne (b) przewodzenia ciepła w próbce
Fig. 3. Forward (a) and inverted (b) model of heat conduction in the textile

W prowadzonych badaniach, rozkład wartości temperatury jest znany, ponieważ może on być wyznaczony na podstawie pomiarów termowizyjnych. Nie są znane natomiast, niektóre wartości parametrów materiałowych, takie jak przewodność cieplna. Do ich

wyznaczenia można użyć modelu termicznego badanej próbki rozwiązując zagadnienie odwrotne przepływu ciepła (rys. 3b). W zależności od potrzeb wartością wyjściową może być gęstość materiału, dostarczona moc cieplna lub inne właściwości materiałowe.

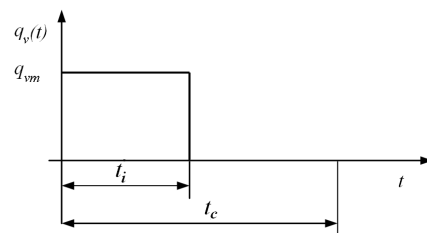
Obliczenia zagadnień odwrotnych są trudne do przeprowadzenia oraz często niestabilne numerycznie. Zastosowano oryginalne podejście prowadzące do wyznaczania wartości przewodności cieplnej materiałów jednorodnych i anizotropowych.

Opracowano model prosty przewodzenia ciepła dla badanej próbki. Użyto oprogramowania ANSYS®, które wykorzystuje metodę elementów skończonych. Model uwzględnia zjawisko przewodzenia ciepła w materiale stałym (równanie Kirchhoffa-Fouriera [7, 8]). Geometria modelu jest zgodna z wymiarami na rys. 2.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{xi} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{yi} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{zi} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = c_i \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie: T – temperatura, t – czas, x, y, z – współrzędne, $\lambda_{xi}, \lambda_{yi}, \lambda_{zi}$ – współczynniki przewodzenia ciepła i -tego materiału, q_v – gęstość objętościowa mocy źródła ciepła, c_i – ciepło właściwe i -tego materiału, ρ_i – gęstość i -tego materiału.

Model uwzględnia konwekcyjną i radiacyjną wymianę ciepła między próbką a otoczeniem i umożliwia uzyskanie rozkładu temperatury na powierzchni próbki przy założeniu pobudzenia zmiennego w czasie. Typowy sygnał gęstości mocy, jaki stosowano w badaniach, przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Impuls wymuszenia termicznego w postaci impulsu gęstości mocy q_v
Fig. 4. Thermal impulse of power density q_v

Czas trwania impulsu mocy wynosił $t_i = 600$ s, natomiast całkowity czas pomiaru i rejestracji obrazów termowizyjnych $t_c = 1200$ s. Przyjęto, że wartości parametrów termicznych struktury próbek są zależne od temperatury. Ciepło doprowadzone do części próbki przepływa do tych jej fragmentów, które „widzi” kamera termowizyjna (rys. 1 i 2). Pomiar temperatury przy użyciu lusterek umożliwia wyznaczenie różnicy temperatury zarówno w kierunku wzdłużnym jak i poprzecznym materiału tekstylnego, co jest niezbędne do badań struktur anizotropowych.

3. Wyniki badań

Opracowany model jest dwuwymiarowy. Pominięto przepływ ciepła w kierunku „z” (rys. 2), co nie wpływa na dokładność obliczeń, natomiast zapewnia skrócenie czasu uzyskania wyników obliczeń. Trzeci wymiar „z” został przyjęty jako jednostkowy. Dostarczona do próbki gęstość objętościowa mocy (rys. 4) wynosiła $q_v = 627000$ W/m³, co oznacza, że całkowita moc wydzielana w źródle ciepła była na poziomie $P = 2,35$ W i odpowiadała warunkom eksperymentu. Jako warunek brzegowy założono, że chłodzenie odbywa się drogą konwekcji naturalnej ze współczynnikiem $\alpha = 8$ W/m²·K oraz radiacji przy założeniu emisyjności równej 0,95.

Badania prowadzono dla struktur modelowych i rzeczywistych próbek tekstylnych. Aby wyznaczyć wartości parametrów termicznych takich jak przewodność cieplna λ , opracowano oprogramowanie w pakiecie Matlab®. Używa ono wyniki z modelu prostego, w którym przewodność cieplna jest parametrem. Pozostałe parametry muszą być znane. Przyjęto typowe wartości para-

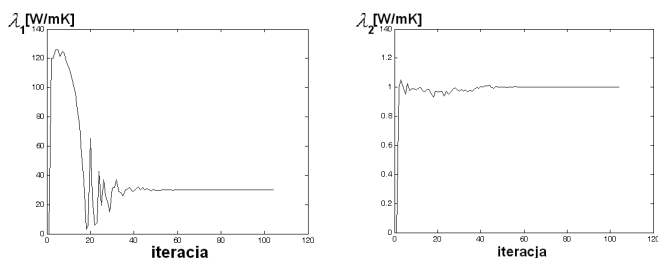
metrów materiałowych włókniny - gęstość $\rho = 111,2 \text{ kg/m}^3$ oraz ciepło właściwe $c = 1,360 \text{ kJ/kgK}$. Wykorzystanie algorytmu optymalizacyjnego złotego podziału (ang. Golden Section Search) pozwoliło wyznaczyć wartość przewodności cieplnej poszczególnych warstw struktury. W danych początkowych niezbędne było podanie zakresu, w którym nieznaną przewodność cieplną jest poszukiwana. Zbieżność algorytmu była weryfikowana na podstawie porównania rozkładów temperatury w czasie uzyskanych z pomiaru oraz symulacji.

Dla zadanych przez algorytm wartości λ_1 oraz λ_2 wielowarstwowej struktury z rys. 2, dokonywana jest ocena czy wartości przewodności cieplnej są właściwe. Wybranych zostało 10 punktów (P1-10) leżących na linii oraz 12 chwil czasowych (co 100 s). Dla każdej chwili czasowej wyznaczany jest błąd średniokwadratowy pomiędzy wartościami temperatury dla każdego punktu dla zadanych przez algorytm wartości przewodności λ_1 oraz λ_2 oraz dla wartości uzyskanych z pomiaru.

3.1. Badania wielowarstwowej struktury testowej

W celu oceny działania algorytmu wyznaczono numerycznie rozkłady temperatury dla struktury z rys. 2. Przyjęto wartości $\lambda_1 = 30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ oraz $\lambda_2 = 1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Wyniki symulacji zostały użyte w algorytmie optymalizacyjnym zamiast wartości uzyskanych z pomiaru.

Algorytm optymalizacyjny poszukiwał maksymalnej wartości błędu średniokwadratowego temperatury dla wszystkich punktów P1-10. Zminimalizowanie tej wartości pozwoliło wyznaczyć przewodności cieplne badanego materiału. Zbieżności procesu obliczeniowego była zadawalająca. Po około 50 iteracjach wartości przewodności cieplnej $\lambda_1 = 30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ oraz $\lambda_2 = 1 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ oszacowano z błędem względnym $\Delta\lambda/\lambda$ jest na poziomie 10^{-6} (rys. 5).



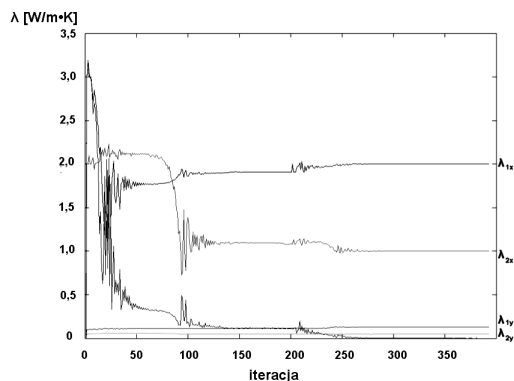
Rys. 5. Wartości $\lambda_{1,2}$ w kolejnych iteracjach dla struktury testowej
Fig. 5. Values of $\lambda_{1,2}$ in successive iterations

3.2. Badania anizotropowej struktury testowej

Algorytm został również przetestowany dla przypadku, kiedy materiały 1 i 2 z rys. 2 są anizotropowe, tzn. każdy z materiałów posiada inną przewodność w różnych kierunkach: λ_1 oraz λ_2 . Wykonano symulację rozkładu temperatury dla materiału o arbitralnie przyjętych wartościach przewodności cieplnej $\lambda_{1x}=2,0$, $\lambda_{1y}=0,3$, $\lambda_{2x}=1,0$, $\lambda_{2y}=0,05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Na rys. 6 przedstawiono wartości przewodności cieplnych w kolejnych iteracjach. Po ok. 350 iteracjach uzyskano wartości przewodności cieplnej $\lambda_{1x}=1,97$, $\lambda_{1y}=0,18$, $\lambda_{2x}=1,03$, $\lambda_{2y}=0,052 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Błąd względny wynosił odpowiednio 1,5%, 40%, 1,5%, 4%.

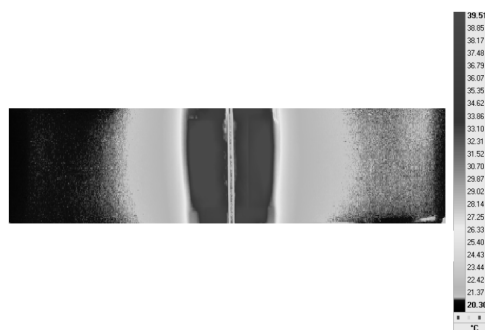
Wartość błędnej dla λ_{1y} była znacznie wyższa niż dla pozostałych przewodności cieplnych. Wynika to z faktu, iż zmiana wartości λ_{1y} w dość dużym przedziale $0,1 \div 0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ po podstawieniu do modelu prostego nie powoduje istotnej zmiany rozkładu temperatury.



Rys. 6. Wartości λ w kolejnych iteracjach anizotropowej wielowarstwowej struktury testowej
Fig. 6. Values of λ in successive iterations for a multilayer anisotropic test structure

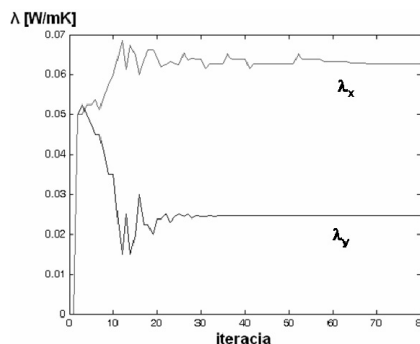
3.3. Badania rzeczywistej anizotropowej struktury tekstylnej

Przeprowadzono pomiary termograficzne przy użyciu stanowiska pomiarowego z rys. 1. W czasie nagrzewania próbki prowadzono pomiar odbitego w lustrach promieniowania podczerwonego za pomocą kamery termowizyjnej, co umożliwiło wyznaczenie rozkładu temperatur na przeciwległych powierzchniach struktury. Przykładowy termogram przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Wybrany obraz termowizyjny ogrzanej włókniny w stanie ustalonym
Fig. 7. Chosen infrared image of the investigated textile in steady state

Przy użyciu opracowanego w ramach tej pracy oprogramowania, zawierającego model prosty z przewodnością cieplną jako parametrem oraz procedury optymalizacyjne, wyznaczono przewodność cieplną badanej próbki. Uzyskano wartość przewodności cieplnej o wartości $\lambda_y = 0,0268 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ oraz $\lambda_x = 0,0628 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (rys. 8).



Rys. 8. Wartość $\lambda_{x,y}$ w kolejnych iteracjach anizotropowej struktury tekstylnej
Fig. 8. Values of $\lambda_{x,y}$ in successive iterations of anisotropic textile structure

4. Wnioski

Badania prowadzone w ramach tej pracy potwierdziły, że możliwe jest wyznaczanie parametrów termicznych materiałów włókienniczych przy użyciu pomiarów termowizyjnych oraz modelowania zjawisk odwrotnych przewodzenia ciepła. Użycie modelu prostego przepływu ciepła oraz metod optymalizacyjnych pozwala na wyznaczenie przewodności cieplnej włókien. Wyznaczone wartości przewodności cieplnej w kierunku O_x są wyższe od wartości w kierunku prostopadłym - O_y . Związane jest to z anizotropową strukturą wytworzonej włókniny o wzdłużnym ułożeniu włókien i geometrią próbki. Włókna są ułożone wzdłuż próbki, tzn. w kierunku O_x , a ze względu na obecność pomiędzy włóknami powietrza ciepło wzdłuż włókien (w kierunku O_x) przewodzone jest lepiej, niż w kierunku poprzecznym O_y .

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN 3688/B/T02/2009/36 „Opracowanie metody wyznaczania zależnych od temperatury parametrów termicznych włókienniczych materiałów inteligentnych”.

The work was done as a part of Research Project 3 T08E 050 28 financed by KBN, entitled “3688/B/T02/2009/36 „The elaboration of the method of evaluation of temperature dependent thermal parameters of smart textile materials”.

5. Literatura

- [1] Michalak M., Więcek B., Krucińska I., Lis M.: Thermal Barrier Properties of Nonwovens Multilayer Structures Investigated by Infrared Thermography. VIIth Quantitative Infrared Thermography – QIRT 2004, Bruksela, Belgia, 5-8 lipca, 2004.
- [2] Michalak M., Więcek B., Krucińska I., Felczak M.: The Thermal Wave Method for Investigations of Textile Properties. VI-th Quantitative InfraRed Thermography 6 – QIRT’2006.
- [3] Michalak M., Więcek B.: Nowa bezkontaktowa metoda do badania mechanizmów transportu ciepła. *Fibres&Textiles In Eastern Europe*, vol.x, Nr, 2008.
- [4] Michalak M., Felczak M., Więcek B.: A new method of evaluation of thermal parameters for textile materials QIRT-2008, Kraków, 2-4 lipca, 2008.
- [5] Michalak M., Felczak M., Więcek B.: Thermal parameters of materials evaluated using new thermography method. VIII Międzynarodowe sympozjum EL-TEX 2008, Łódź, listopad 2008 oraz *Fibres&Textiles in Eastern Europe*.
- [6] Michalak M., Felczak M., Więcek B.: Evaluation of the Thermal Parameters of Textile Materials using the Thermographic Method. *Fibres&Textiles in Eastern Europe*, vol.17, No. 3 (74), 2009, pp. 84-89.
- [7] Staniszewski B.: Wymiana ciepła, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
- [8] Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [9] Ch. H. Huang, W.L. Chang: An Inverse Problem in Estimating the Volumetric Heat Generation for a Three-Dimensional Encapsulated Chip, *Journal of Electronic Packaging* Copyright © 2010 by ASME MARCH 2010, Vol. 132 / 011004-1.
- [10] Monde M., Arima H., Liu W., Mitutake Y., Hammad J. A.: An analytical solution for two-dimensional inverse heat conduction problems using Laplace transform”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 2135–2148.

otrzymano / received: 06.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE



energoelektronika.pl

ZAPRASZAMY

**na IX edycję SZKOLENIA dla
SŁUŻB UTRZYMANIA RUCHU**

LUBLIN 30 listopada 2011

**ZDOBĄDŹ CENNA
WIEDZĘ I KONTAKTY !!!**

Więcej informacji na temat szkolenia znajdziesz na stronie
www.seminarium.energoelektronika.pl



Partnerzy



Jeżeli jesteś zainteresowany zaprezentowaniem produktu lub nowego rozwiązania napisz do nas na **marketing@energoelektronika.pl**