

## NIESTACJONARNY POMIAR TERMOWIZYJNY ABSORPCJI WIĄZKI LASEROWEJ PRZEZ POROWATE MATERIAŁY BUDOWLANE

Andrzej MARYNOWICZ

*Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa, Katedra Fizyki Materiałów  
ul. Katowicka 48, 45-061 Opole, e-mail: a.marynowicz@po.opole.pl*

**Streszczenie:** W pracy zaproponowano sposób pomiaru absorpcji promieniowania lasera czerwonego przez dwa różne porowate materiały budowlane. Do niestacjonarnego pomiaru temperatury na powierzchni próbki ogrzewanej promieniem lasera wykorzystano kamerę termowizyjną. Zaproponowane podejście, oparte na zastosowaniu prostego aparatu optymalizacyjnego, pozwala wyznaczyć poszukiwane parametry z dobrą dokładnością.

**Słowa kluczowe:** Pomiar termowizyjny, ogrzewanie laserowe, absorpcja energii, promień efektywny wiązki, materiały porowate.

### 1. WSTĘP

Technika termowizyjna jest narzędziem stosowanym coraz częściej w badaniach właściwości fizycznych materiałów. Najliczniejszą grupą badanych materiałów są te o budowie jednorodnej, o małej zmienności przestrzennej cech materiałowych, jak np. metale, czysta ceramika, tworzywa sztuczne [3, 8, 11]. Osobną grupę stanowią budowlane materiały porowate, mające najczęściej budowę niejednorodną, takie jak cegły ceramiczne, gazobetony, zaprawy czy betony [1, 2, 5, 7]. Ze względu na skomplikowaną strukturę wewnętrzną, materiały budowlane stwarzają dodatkowe utrudnienia w czasie pomiaru termowizyjnego. Należą do nich trudne do identyfikacji niejednorodności (np. w ceglach zwykłych) i wtrącenia różnego pochodzenia, np. kruszywa (zaprawy, cegły klinkierowe).

Pomimo tego, rozwijane są obecnie intensywnie badania termowizyjne struktury porowatych materiałów i elementów budowlanych. Kamera termowizyjna jest narzędziem badawczym o unikalnych cechach. Pozwala na przeprowadzenie w pełni bezkontaktowego, wielopunktowego pomiaru temperatury na całej powierzchni próbki, w bardzo krótkim czasie, z pominięciem zjawisk

związanych z bezwładnością cieplną czujnika temperatury [np. 5, 10]. Ze względu na specyfikę narzędzia pomiarowego, jakim jest kamera termowizyjna, niezbędnym jest wywołanie określonego pola temperatury w badanej próbce, celem przeprowadzenia analizy Zachowania materiału w procesie stacjonarnym (pojedynczy obraz) bądź niestacjonarnym (sekwencja obrazów) [6, 13]. Intensywny rozwój technologii laserów półprzewodnikowych oraz jej łatwa dostępność umożliwiają zastosowanie miniaturzonych modułów laserowych do wytworzenia powierzchniowego źródła ciepła, co zostało wykorzystane w przedstawionych niżej badaniach.

W niniejszej pracy zaproponowano sposób pomiaru absorpcyjności promieniowania laserowego, generującego na powierzchni porowatego materiału budowlanego zmienne w czasie pole temperatury. W pierwszej kolejności przyjęto model przepływu ciepła przez analizowany ośrodek, z warunkami brzegowymi drugiego rodzaju. Następnie, korzystając z metody przeszukiwania dziedzin, wyznaczono wartości poszukiwanych parametrów zadania. W badaniach wykorzystano relatywnie prosty zestaw pomiarowy, zaś właściwości cieplne badanego materiału ceramicznego określono za pomocą aparatury pomiarowej o wysokiej dokładności.

### 2. MODEL OBLICZENIOWY I TECHNIKA EKSPERYMENTALNA

#### 2.1. Opis zagadnienia

Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto klasyczny model bezźródłowego przewodzenia ciepła przez materiał, dla zadania dwuwymiarowego we współrzędnych cylindrycznych (rys. 1a), w postaci równania

$$\frac{\rho c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Warunek początkowy  $T = T_0$  w całej objętości ciała (dla  $t = 0$ ), zaś warunki brzegowe (rys. 1b) mają postać

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q_{las}(r) - h_z(T - T_e) \quad \text{dla } z = 0, \quad (2a)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=N} = h_r(T - T_e) \quad \text{dla } r = N, \quad (2b)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=M} = h_z(T - T_e) \quad \text{dla } z = M, \quad (2c)$$

w których  $q_{las}(r)$  jest strumieniem zaabsorbowanej energii wiązki laserowej, wyrażonym zależnością w postaci

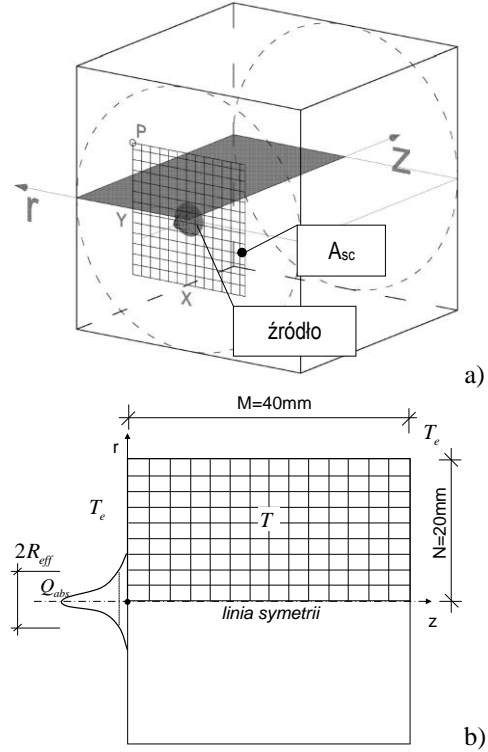
$$q_{las}(r) = \frac{2Q_{abs}}{\pi R_{eff}^2} e^{-\frac{2r^2}{R_{eff}^2}}. \quad (3)$$

Zależność (3) jest szeroko stosowana w opisie procesów technologicznych związanych z laserową obróbką materiałów [3, 8, 11]. W niniejszej pracy założono, że  $Q_{abs}$  [W] oznacza moc zaabsorbowanej części wiązki laserowej, zaś  $R_{eff}$  [m] jest efektywnym promieniem gaussowskim (odpowiadającym intensywności promieniowania  $I = I_0 e^{-2}$  [11]).

Przyjęcie warunku brzegowego (2) podyktowane jest faktem bardzo małej grubości warstwy przejściowej przemiany energii promieniowania laserowego w energię cieplną, osiągającej wartość rzędu kilkudziesięciu mikrometrów [15]. Można dzięki temu podejściu zrezygnować z modelowania złożonego zjawiska absorpcji promieniowania przez ośrodek porowaty, co wyraźnie uprości dalszą analizę. Wartości współczynników konwekcyjnej wymiany ciepła, tzn.  $h_r$  oraz  $h_z$ , przyjęto jak dla ścianki pionowej przy konwekcji swobodnej, czyli  $h_r = h_z = 7.7 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ . Jak wykazały wyniki obliczeń pomocniczych, wpływ strumienia konwekcyjnego na wynik jest pomijalnie mały ( $h_{r,z}(T - T_e) \ll q_{las}$ ).

Wybór współrzędnych cylindrycznych uzasadniony jest geometrią próbki i relatywnie małym zakresem oddziaływania padającej wiązki laserowej względem wymiarów powierzchni próbki. Odrębne obliczenia, przeprowadzone dla w pełni trójwymiarowego modelu, z wykorzystaniem metody różnic skończonych wykazały, że uproszczenie zadania do dwuwymiarowego osiowoosymetrycznego nie wprowadza istotnego błędu. Pozwala natomiast wyraźnie zredukować czas obliczeń, co

ma kluczowe znaczenie przy rozwiązywaniu zadań optymalizacyjnych.



Rys. 1. Geometria próbki, a), oraz jej model obliczeniowy, b).  
Fig. 1. Sample geometry, a), and it's computational model, b).

Parametry występujące w równaniu (3), tzn.  $R_{eff}$  i  $Q_{abs}$ , są niezbędne do prawidłowego sformułowania zadania początkowo-brzegowego opisanego równaniami (1) i (2). Ze względu na przyjęte wyżej uproszczenie zaproponowano, by drugim krokiem w proponowanej metodzie było określenie parametrów warunku brzegowego,  $\mathbf{u} = [Q_{abs}, R_{eff}]$ , za pomocą, często stosowanej w odwrotnych zagadnieniach cieplnych [12], techniki minimalizacji funkcji celu,  $F(\mathbf{u})$ , w postaci

$$\mathbf{u} = \arg \min_{\mathbf{u}} F(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n [Y_i(r_i, t)|_{z=0} - T_i(\mathbf{u}, r_i, t)|_{z=0}]^2, \quad (4)$$

w której  $Y_i(r_i, t)$  oznaczono wektor temperatur zmierzonych na powierzchni ( $z=0$ ) w  $i$ -tym punkcie w chwili czasowej  $t$ , zaś  $T_i(\mathbf{u}, r_i, t)$  jest wektorem temperatur obliczonych w tych samych punktach, dla określonego zestawu parametrów  $\mathbf{u}$ . Wartości  $T_i$  obliczono z równania (1), przy warunkach brzegowych (2), za pomocą metody różnic skończonych, z wykorzystaniem schematu niejawnego o zmiennych kierunkach (ADI) Peacemana-Rachforda [8, 14]. Analizie poddano obszar oznaczony na rysunku 1 jako  $A_{sc}$ .

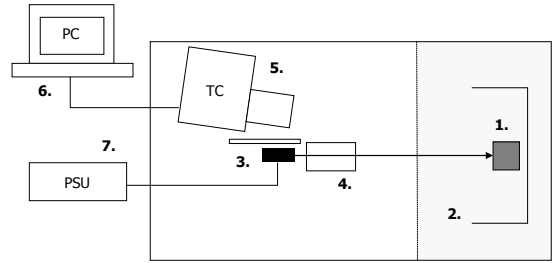
## 2.2. Materiały i stanowisko pomiarowe

Pomiar temperatury na powierzchni próbek w pierwszym etapie wykonano dla dwóch różnych materiałów: cegły klinkierowej z domieszką piasku (CK) oraz zaprawy cementowej (ZC), wykonanej wg EN 196-1, na bazie wody, cementu CEM I 32.5 oraz piasku  $0 \div 2mm$ , w proporcjach wagowych 0.5:1:3. W tabeli 1 zestawiono średnie parametry fizyczne badanych próbek, zmierzone w temperaturze  $25^{\circ}C$ . Pomiary właściwości cieplnych  $a[m^2 s^{-1}]$ ,  $\rho_{app}[kg \cdot m^{-3}]$ ,  $c_p[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ ,  $\lambda[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  wykonano za pomocą urządzenia Netzsch LFA427, zaś porowatość  $\phi$  zmierzono porozymetrem rtęciowym.

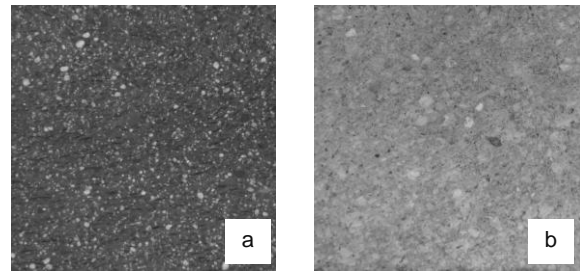
Tabela 1. Cechy fizyczne badanych materiałów.  
Table 1. Physical properties of tested materials.

Materiał	$a$	$\rho_{app}$	$c_p$	$\lambda$	$\phi$
CK	$0.71 \cdot 10^{-6}$	2175	790	1.220	0.12
ZC	$1.13 \cdot 10^{-6}$	1943	945	2.075	0.16

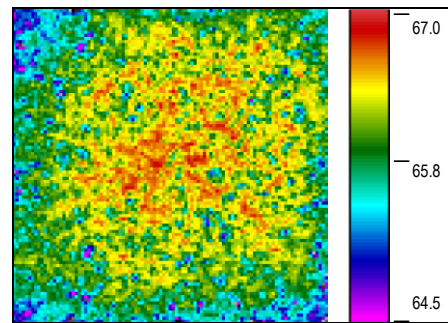
W celu wykonania pomiarów temperatury w procesie nagrzewania wiązką laserową zbudowano stanowisko pomiarowe pokazane na rysunku 2. Na drewnianej podstawie umieszczono próbkę 1, wraz z osłoną 2 pokrytą grafitem, w celu zminimalizowania efektów odbicia wiązki od próbki. Źródło ciepła stanowi diodowy laser półprzewodnikowy małej mocy 3 (Mitsubishi ML101J27, 660nm, max. 150mW CW) wraz z układem korekcji wiązki 4 (para pryzmatów anamorficznych, Thorlabs). Do rejestracji temperatury wykorzystano kamerę termowizyjną 5 typu VigoCAM v50 (VIGO System), o czułości NETD=0.08K i zakresie spektralnym  $8 \div 14\mu m$ . Kamerę cechuje duża stabilność odczytu temperatury w czasie wymaganym do przeprowadzenia pomiaru, rzędu 30s. Stanowisko pomiarowe uzupełniają stabilny zasilacz lasera 7 oraz komputer 6 do ciągłej rejestracji odczytów z kamery. Głównym czynnikiem zakłócającym pomiar temperatury materiałów niejednorodnych kamerą termowizyjną, oprócz szumów i dryftu matrycy mikrobolometrycznej kamery [10], są różne emisyjności poszczególnych, przypadkowo rozmieszczonych fragmentów badanego obszaru. Na rysunkach 3a i 3b pokazana jest struktura powierzchni badanych materiałów, na której można zaobserwować liczne niejednorodności, widoczne wyraźnie również w podczerwieni, co pokazano na rysunkach 4a i 4b dla tych samych materiałów. Obrazy te uzyskano w wyniku obserwacji swobodnego studzenia próbek sześciennych.



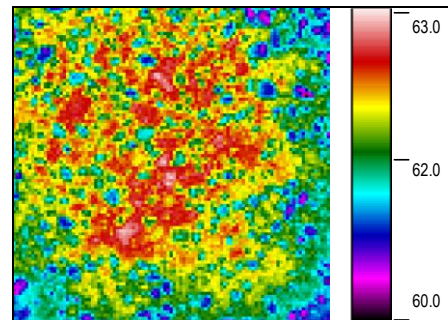
Rys.2. Budowa stanowiska pomiarowego: 1- próbka na podstawie, 2- osłona, 3- moduł laserowy, 4- pryzmaty korekcyjne, 5- kamera termowizyjna, 6- komputer, 7- zasilacz regulowany.  
Fig. 2. Test assembly scheme: 1- sample on a stand, 2- shield, 3- laser module, 4- correction prisms, 5- infrared camera, 6- PC computer, 7- power supply unit.



Rys.3. Obrazy powierzchni badanych materiałów – zakres widzialny: a) - CK, b) - ZC.  
Fig.3. Surface images of analysed samples – visible region: a) - CK, b) - ZC.



Rys.4. Obraz termowizyjny temperatury ( $^{\circ}C$ ) powierzchni próbki CK  
Fig.4. Infrared images of surface temperature ( $^{\circ}C$ ) of the CK sample.

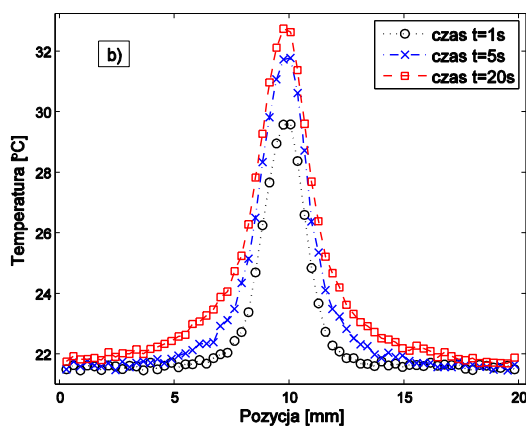
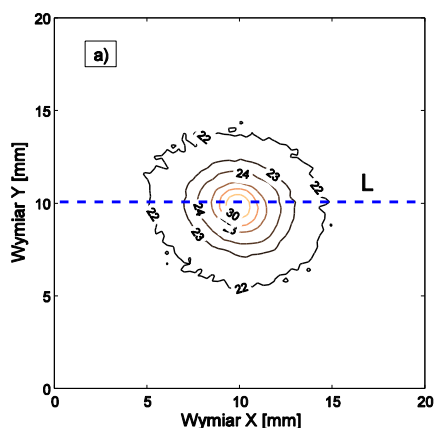


Rys.5. Obraz termowizyjny temperatury ( $^{\circ}C$ ) powierzchni próbki ZC.  
Fig.5. Infrared images of surface temperature ( $^{\circ}C$ ) of the ZC sample.

### 3. POMIARY WŁAŚCIWOŚCI ABSORPCYJNYCH

#### 3.1. Przygotowanie danych pomiarowych

Proces nagrzewania próbek CK i ZC trwał ok. 30s, przy czym, ze względu na szybkie ustabilizowanie się temperatury w centrum wiązki laserowej, analizie poddano pierwsze 20s procesu nagrzewania. W obydwu przypadkach zarejestrowano sekwencję klatek o częstotliwości 10 obrazów/sekundę. Mając tak uzyskane rozkłady temperatury wybrano do dalszych obliczeń chwile czasowe od 1-20s, z krokiem 1s. Jako miarodajne do dalszych obliczeń wzięto temperatury odczytane z linii bliskiej środka termogramów (oznaczenie L na rysunku 6a), odpowiednio dla cegły klinkierowej i zaprawy cementowej.



Rys. 6. Temperatura na powierzchni  $A_{sc}$  próbki CK po 5 s nagrzewania (a) oraz na linii L w wybranych chwilach czasowych (b).

Fig. 6. Temperature isolines at the surface  $A_{sc}$  of CK sample after 5 s of heating up (a) and temperature at line L in selected time of process (b).

Chcąc zminimalizować wpływ szumu pomiarowego i niejednorodności materiałowych na wynik minimalizacji funkcjonu (4), zaproponowano wygładzenie danych pomiarowych za pomocą globalnej funkcji aproksymującej typu pseudo-voigt, w postaci

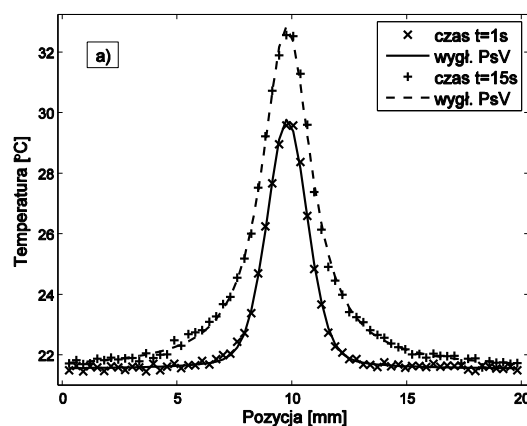
$$f(\mathbf{v}, r) = y_0 + A \cdot \left[ \mu \frac{2w}{4\pi(r-r_c)^2 + w^2} + (1-\mu) \frac{\sqrt{4\ln 2}}{w\sqrt{\pi}} e^{-\frac{4\ln 2}{w^2}(r-r_c)^2} \right], \quad (5)$$

będącej uproszczoną wersją splotu funkcji Gaussa i Lorentza [9]. Poszukiwanymi parametrami funkcji  $f(\mathbf{v}, r)$ ,  $\mathbf{v} = [y_0, A, w, r_c, \mu]$ , są odpowiednio przesunięcie względem osi x (offset), amplituda, szerokość połowkowa (FWHM), położenie maksimum rozkładu oraz udział składowej Lorentza. Parametry te obliczono z wykorzystaniem metody simpleksów Neldera-Meada (procedura 'fminsearch' pakietu MATLAB).

Zamieniając wektor temperatur zmierzonych  $Y_i(r_i, t)$  wektorem temperatur określonych funkcją (5), funkcjonal  $F(\mathbf{u})$  będzie miał finalnie postać

$$F(\mathbf{u}) = \sum_{i=1}^n \left[ f_i(\mathbf{v}, r_i, t) \Big|_{z=0} - T_i(\mathbf{u}, r, t) \Big|_{z=0} \right]^2. \quad (6)$$

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe wyniki dopasowania funkcji wygładzającej (5) do wyników pomiarów dla chwil czasowych  $t = 1s$  i  $t = 15s$ , dla próbki CK.



Rys. 7. Wyniki dopasowania funkcji pseudo-voigt (PsV) do pomiarów temperatury dla próbki CK

Fig. 7. Results of pseudo-voigt function fitting (PsV) for CK sample temperature measurements

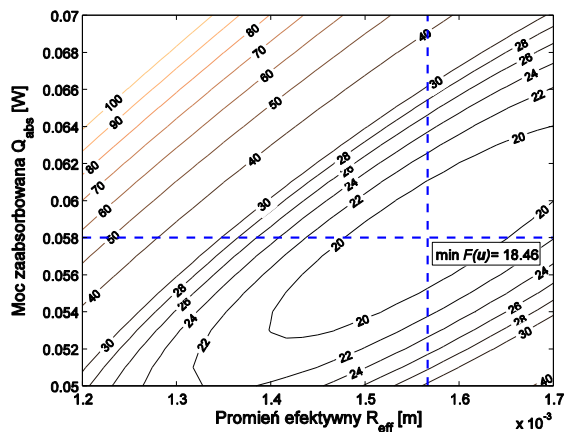
### 3.2. Wyniki obliczeń

Minimalizację funkcjonu (6), dla każdej z 20-u klatek, wykonano z wykorzystaniem metody przeszukiwania dziedziny parametrów  $\mathbf{u}$ . Przyjęto wartości graniczne dla promienia efektywnego  $R_{eff} = \{1.2 \cdot 10^{-3} \div 1.7 \cdot 10^{-3}\} [m]$  oraz dla mocy źródła  $Q_{abs} = \{50 \cdot 10^{-3} \div 70 \cdot 10^{-3}\} [W]$ , z podziałem odpowiednio na 30 i 20 kroków. Na rysunku 8 pokazano wykres konturowy wartości  $F(\mathbf{u})$  (czas  $t = 5 s$ ) dla cegły klinkierowej (CK), z zaznaczonym minimum oraz odpowiadającym mu wartościom  $R_{eff}$  i  $Q_{abs}$ . Na rysunkach 9 i 10 pokazane są wyniki obliczeń  $Q_{abs}$  i  $R_{eff}$  we wszystkich analizowanych chwilach czasowych. Średnie wartości poszukiwanych parametrów dla obydwu materiałów zestawiono w tabeli 2. Wyniki otrzymane dla obydwu materiałów różnią się między sobą o ok. 10 % w przypadku  $\bar{Q}_{abs}$  i jedynie 3 % w przypadku  $\bar{R}_{eff}$ .

Tabela 2. Wyniki obliczeń  $\bar{Q}_{abs}$  i  $\bar{R}_{eff}$ .

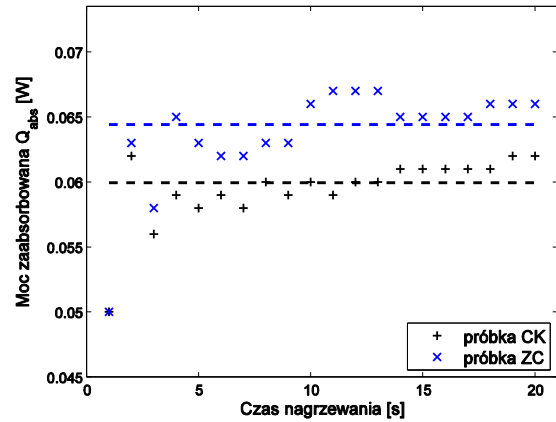
Table 2. Results of  $\bar{Q}_{abs}$  and  $\bar{R}_{eff}$  calculations.

Materiał	$T_e = T_0 [^{\circ}C]$	$\bar{Q}_{abs} [mW]$	$\bar{R}_{eff} [mm]$
CK	21,7	60,0	1,6
ZC	21,9	64,5	1,5



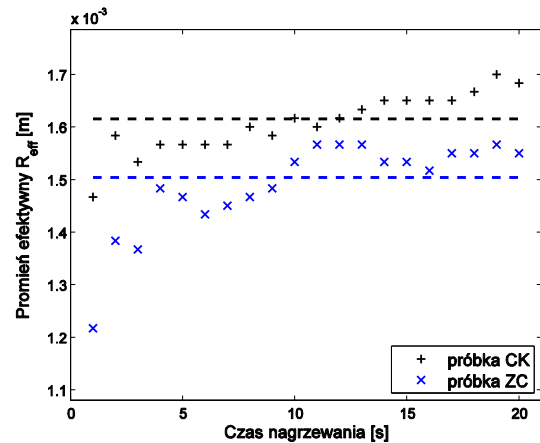
Rys. 8. Funkcjonal błędu  $F(\mathbf{u})$  dla  $t=5 s$  – próbka CK

Fig. 8. Error function plot of  $F(\mathbf{u})$  for  $t=5 s$  – CK sample



Rys. 9. Oszacowanie mocy zaabsorbowanej  $Q_{abs}$ .

Fig. 9. Estimation of the absorbed power  $Q_{abs}$ .



Rys. 10. Oszacowanie promieni efektywnych  $R_{eff}$ .

Fig. 10. Estimation of the effective radii  $R_{eff}$ .

## 4. WNIOSKI

Przedstawiona w pracy metodologia pomiaru daje możliwość przeprowadzenia relatywnie nieskomplikowanego eksperymentalnie i efektywnego czasowo badania właściwości absorpcyjnych porowatych materiałów budowlanych, z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. W pierwszym etapie opracowanego podejścia wybrano klasyczny model matematyczny opisu przepływu ciepła w analizowanym obszarze. Z kolei w drugim kroku zastosowano prostą metodę optymalizacyjną do oszacowania kluczowych parametrów brzegowych rozpatrywanego zagadnienia cieplnego, będących jednocześnie poszukiwanymi wielkościami, opisującymi absorpcyjność wiązki laserowej na powierzchni materiału porowatego.

Na podstawie otrzymanych wyników możliwe było sformułowanie kilku zasadniczych wniosków, a mianowicie:

- Proponowana metoda pozwala na oszacowanie współczynnika absorpcji promieniowania laserowego materiałów porowatych.
- Może być ona wykorzystana, po kalibracji w zależności od rodzaju materiału, również do wyznaczania właściwości cieplnych materiałów (zależnie od przyjętego modelu przepływu ciepła).
- W pracach poświęconych laserowej obróbce materiałów (głównie metali) promień adsorbowanej wiązki gaussowskiej przyjmowany jest jako stały. W modelu zaproponowanym w pracy parametr ten wyznaczono indywidualnie dla danej klasy materiału porowatego, jednak otrzymany rezultat pozwala przyjąć stałą wartość tego parametru.
- Zaproponowana metoda umożliwia przeprowadzenie pomiaru nieinwazyjnego, bezpośrednio na badanym obiekcie budowlanym.

#### TRANSIENT INFRARED MEASUREMENT OF LASER ABSORPTION PROPERTIES OF POROUS MATERIALS

**Summary:** The method of the red laser beam absorption description by selected porous building materials was proposed. The transient temperature measurements were performed with the use of infrared camera equipment during laser induced heating-up of the samples surface. The proposed approach utilizes simple optimization technique and gives possibility for a good estimation of the investigated parameters.

#### Literatura

- [1] Barreira E., de Freitas V.P.: *Evaluation of building materials using infrared thermography*. Construction and Building Materials 21 (2007) 218-224
- [2] Bison P., Bortolin A., Cadelano G., Ferrarini G., Grinzato E.: *Comparison of some thermographic techniques applied to thermal properties characterization of porous materials*. 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography QIRT 2012, Naples, Italy
- [3] Bison P.; Cernuschi, F., Grinzato, E., Marinetti, S., Robba, D.: *Ageing evaluation of thermal barrier coatings by thermal diffusivity*. Infrared Physics and Technology 49 (2007) 286-291
- [4] Cerdeira, F., Vázquez, M.E., Collazo, J., Granada, E.: *Applicability of infrared thermography to the study of the*

*behaviour of stone panels as building envelopes*. Energy & Buildings 43 (2011) 1845-1851

- [5] Furmański P., Wiśniewski T.S.: *Determination of Moisture Content in a Porous Building Material Using Infra-red Based Method*. ISESCO Journal of Science and Technology, 5 (2009) 71-75
- [6] Gayo E., de Frutos J., Palomo A., Massa S.: *A mathematical model simulating the evaporation processes in building materials: Experimental checking through infrared thermography*. Building and Environment 31 (1996) 469-475
- [7] Gayo-Moncó E., de Frutos J.: *Hydric processes associated with saline solutions, studied by means of selective infrared thermography*. Cement and Concrete Research 28 (1998) 1165-1177
- [8] Ivanović I. B., Sedmak A. S., Miloš M. V., Živković A. B., Lazić M. M.: *Numerical study of transient three-dimensional heat conduction problem with a moving heat source*, Thermal Science 15 (2011) 257-266
- [9] Jansson P. (ed.): *Deconvolution: with applications in spectroscopy*, Academic Press, Orlando, 1984
- [10] Minkina W., Dudzik S.: *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. Wiley, 2009
- [11] Modest M.: *Three-dimensional, transient model for laser machining of ablating/decomposing materials*. International Journal of Heat and Mass Transfer 39 (1996) 221-234
- [12] Ozisik M.N., Orlande H.R.B.: *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*. Taylor and Francis, New York 2000
- [13] Perkowski Z.: *A thermal diffusivity determination method using thermography: Theoretical background and verification*. International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011) 2126-2135
- [14] Wang T.-Y., Chen C C.-P.: *Thermal-ADI - A Linear-Time Chip-Level Dynamic Thermal-Simulation Algorithm Based on Alternating-Direction-Implicit (ADI) Method*. IEEE Transactions 11(2003) 691-700
- [15] Wojtatowicz T. (red.): *Badania przemian fazowych zachodzących w warstwie wierzchniej ciała porowatego za pomocą promieniowania laserowego*. Politechnika Łódzka, Łódź 2000