

## OKREŚLANIE CZASU TERMICZNEGO WYMUSZENIA SKOKOWEGO W CELU WYKRYCIA ZMIANY GRUBOŚCI PIERWSZEJ WARSTWY STRUKTURY DWUWARSTWOWEJ

Sławomir GRYŚ

Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa  
tel.: 34 325 0883 e-mail: gryś@el.pcz.czyst.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki analizy zmienności w czasie temperatury powierzchni materiału poddanego nagrzewaniu zewnętrznym źródłem promieniowania. Celem analizy odpowiedzi skokowej na termiczne wymuszenie jest wykrycie zmiany grubości materiału, traktowanej jako wada materiałowa. Wymagany czas analizy danych pomiarowych określono na podstawie właściwości wzoru na odpowiedź skokową na wymuszenie cieplne dla układu dwóch ciał o różnych właściwościach termicznych.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, pomiar grubości, model analityczny, termiczne wymuszenie skokowe.

### 1. WPROWADZENIE

#### 1.1. Aktywna termografia w defektoskopii

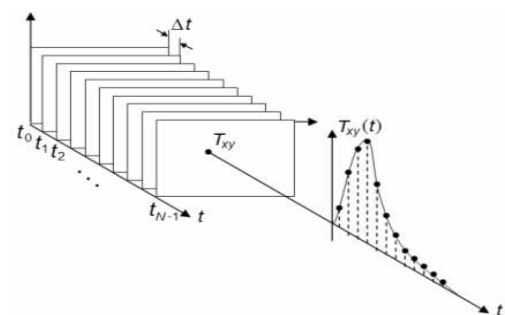
Aktywna termografia w podczerwieni należy do metod badań nieniszczących i jest szczególnie przydatna w wykrywaniu defektów zorientowanych równolegle do powierzchni materiału i leżących w warstwie podpowierzchniowej. Podstawowym ograniczeniem metody jest brak możliwości wykrycia wad o podobnych właściwościach cieplnych co materiał badany. W termografii aktywnej, powierzchnię próbki badanego materiału poddaje się wymuszeniu energetycznemu, a następnie rejestruje odpowiedź w postaci zmian pola temperatury jego powierzchni. Najczęściej stosuje się napromienienie obiektu, jego podgrzanie przez kontakt ze źródłem ciepła, nagrzewanie indukcyjne lub przemianę energetyczną energii mechanicznej drgań na energię wewnętrzną. Podstawy fizyczne termografii aktywnej zostały obszernie opisane, przykładowo w pracach [1-5].

#### 1.2. Analiza pojedynczego termogramu i sekwencji termogramów

Do rejestracji zmian pól temperatury stosuje się kamerę z detektorem pracującym w zakresie podczerwieni zapisującą dane bezpośrednio na nośniku lub opcjonalnie przesyłającą dane w czasie rzeczywistym do komputera. Analiza zarejestrowanych danych dostarcza informacji o obecności wady (defektu), jego kształcie, wymiarach geometrycznych, lokalizacji i charakterze cieplnym. Informacja ta jest przydatna, m.in., do poznania przyczyn wystąpienia defektów i szacowania czasu eksploatacji obiektów.

Do stwierdzenia obecności defektu pod powierzchnią badanego materiału metodą aktywnej termografii,

wystarczająca jest analiza pojedynczego termogramu bez konieczności jego dalszego przetwarzania. Wystąpienie znacznej różnicy temperatury względem tła wskazuje na niejednorodność materiału, klasyfikowaną jako wada materiałowa. Nie jest tu istotna informacja o wartości temperatury piksela, lecz jej relacja do wartości pikseli sąsiadujących. Określenie głębokości na jakiej znajduje się defekt pociąga za sobą konieczność użycia modelu odwrotnego zjawisk cieplnych zachodzących w strukturze, w którym temperatura powierzchni jest jedną z wielkości i zmienia się w czasie. Termogram jest tu traktowany, jako dwuwymiarowy zbiór wartości temperatury powierzchni zaobserwowany w pewnej chwili czasowej. Analiza zmian wartości pojedynczego piksela w horyzoncie czasowym pozwala na określenie zmienności w czasie temperatury punktu badanej powierzchni w wymiarze odpowiadającym polu widzenia pojedynczego piksela. Dla wymuszenia skokowego daje to możliwość obserwacji jednej z faz, tj. nagrzewania lub stygnięcia, lub obu - tzw. „termografia długiego impulsu”. Przykładową sekwencję termogramów (obrazów termicznych) i zmienność w czasie temperatury  $T_{x,y}$  wybranego piksela przedstawia rysunek 1. Widoczne są obie fazy, tj. nagrzewania i stygnięcia.



Rys. 1. Sekwencja termogramów w czasie [2]

## 2. OKREŚLANIE CZASU ANALIZY SEKWENCJI TERMOGRAMÓW

### 2.1. Odpowiedź na cieplne wymuszenie skokowe

Jednym z parametrów charakteryzujących procedurę pomiarową jest jej czas trwania. W przypadku termicznego wymuszenia skokowego maksymalny czas rejestrowania danych jest ograniczony dopuszczalną temperaturą obiektu, taką która nie niszczy materiału ani nie zmienia jego

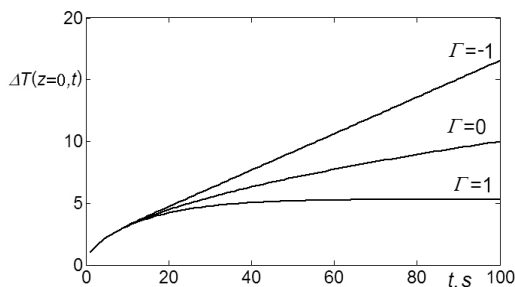
właściwości. W przeciwnym razie nie można by uznać badania za nieniszczące. Niekiedy, czas nagrzewania jest limitowany technologicznie, szczególnie w warunkach pomiaru *in situ*, gdy badanie diagnostyczne nie może powodować postojów na linii produkcyjnej.

W wyniku licznych badań symulacyjnych oraz doświadczalnych zauważono, że dla wymuszenia skokowego w początkowym okresie przyrost temperatury nie zależy od obecności defektu a więc i jego parametrów, a przebieg krzywej jest głównie funkcją czasu, dostarczonej energii i efuzyjności cieplnej materiału [6,7]. Efuzyjność grupuje klasyczne parametry wg zależności:

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K),  
 $\rho$  – gęstość (kg/m<sup>3</sup>),  $c_p$  – ciepło właściwe, J/(kg·K).

Obecność defektu w strukturze materiału objawia się jako różnica temperatur powierzchni nad defektem i obszarem referencyjnym. Poszukiwany czas, po którym krzywa przyrostu temperatury obszaru nad defektem, leżącego na pewnej głębokości  $L_{def}$ , zaczyna odbiegać od krzywej referencyjnej dla materiału o grubości  $L$  można wyznaczyć graficznie (rys. 2) dla danych eksperymentalnych lub symulacyjnych. Określenie związku pomiędzy chwilą, kiedy to następuje a innymi wielkościami opisującymi zjawisko wymaga analizy zależności analitycznej na termiczną odpowiedź skokową dla dwuwarstwowego układu ciał. Pierwszą warstwę stanowi badany materiał o grubości  $L$ , a jej zmniejszenie do wartości  $L_{def}$  jest interpretowane jako wada (ubytek materiału). Dla materiału jednorodnego, tj. bez defektu, zachodzi więc warunek  $L_{def}=L$  w całym przekroju.



Rys. 2. Przyrost temperatury powierzchni materiału jednorodnego ( $\Gamma=0$ ) i materiału z defektem  $\Gamma \neq 0$  na wymuszenie skokowe

Mimo znacznego uproszczenia opisu zjawiska w porównaniu z pełnym modelem trójwymiarowym, model jednowymiarowy posiada zaletę, którą jest krótszy czas obliczeń oraz mniejsza złożoność obliczeń. Może to mieć znaczenie w badaniach *on-line* jakości produktów i procesów na liniach produkcyjnych [8]. W pracy [6] przyrost temperatury na powierzchni ( $z=0$ ) układu dwóch ciał o różnych właściwościach cieplnych powyżej temperatury początkowej  $T_0$  dla wymuszenia skokowego jest określony zależnością:

$$\Delta T(z=0,t) = C\sqrt{t} \cdot \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-\Gamma)^n \left[ \exp\left(-\frac{n^2 \cdot L_{def}^2}{a_{mat} \cdot t}\right) - \frac{n \cdot L_{def} \sqrt{\pi}}{\sqrt{a_{mat}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{n \cdot L_{def}}{\sqrt{a_{mat} \sqrt{t}}}\right) \right] \right\} = C\sqrt{t} [1 + f_{SH}(L_{def}, \Gamma, t, a_{mat})] \quad (2)$$

gdzie:  $a_{mat}$  – dyfuzyjność cieplna, m<sup>2</sup>/s jest liczona ze wzoru:

$$a_{mat} = \frac{\lambda_{mat}}{\rho_{mat} \cdot c_{p_{mat}}} \quad (3)$$

Parametr  $C$  grupuje wpływ wielu czynników. Jest funkcją zarówno właściwości badanej powierzchni (emisyjność, współczynnik refleksji) jak i właściwości materiału (efuzyjność cieplna) oraz źródła wymuszenia (intensywność napromienienia) [1,6]. Współczynnik niedopasowania termicznego  $\Gamma$  określany zależnością:

$$\Gamma = \frac{e_{def} - e_{mat}}{e_{def} + e_{mat}} \quad (4)$$

jest ilościową, względną miarą zróżnicowania właściwości cieplnych dwóch materiałów. Przykładowo, jeśli  $\Gamma > 0$  oznacza to, że materiał defektu jest przewodnikiem cieplnym w porównaniu do materiału badanego.

Analizując wpływ składnika  $f_{SH}$  (suma) we wzorze (2) na wartość  $\Delta T$  można określić czas, po którym zaznacza się oczekiwana różnica temperatur nad defektem i obszarem bez defektu. Ten czas można uznać za minimalny czas detekcji. W tabelicy 1 przedstawiono najmniejsze wartości czasu unormowanego wg relacji  $t_{norm} = t \cdot a_{mat} / L_{def}^2$ , dla którego udział czynnika związanego z występowaniem defektów na głębokości  $L_{def}$  przekracza 1 % wartości sygnału w stosunku do przypadku ciała półnieskończonego. Wyznacza się go jako wartość graniczną:

$$t_{norm0,01} = \max(t \cdot a_{mat} / L_{def}^2) \quad (5)$$

dla której tzw. „temperatura unormowana”:

$$|f_{SH}(L_{def}, \Gamma, t, a_{mat})| < 0,01 \quad (6)$$

Ustalając arbitralnie inne procentowe wartości progu - prawa strona we wzorze (6) - otrzymuje się czasy im odpowiadające. Czasy unormowane zamieszczono w tabelicy 1 dla przykładowych wartości progu w funkcji  $\Gamma$ . Zauważalna jest zależność czasów od znaku  $\Gamma$ , tzn. otrzymuje się inne wartości dla  $\Gamma$  dodatniego i ujemnego. Ponadto, im większe zróżnicowanie cieplne, tym krótsze czasy  $t_{norm}$ , czyli zmiana grubości ujawnia się wcześniej.

Tabelica 1. Czas unormowany  $t_{norm} = t \cdot a_{mat} / L_{def}^2$  w funkcji  $\Gamma$

	współczynnik niedopasowania termicznego $\Gamma$							
	-1	-0,98	-0,5	-0,1	0,1	0,47	0,75	1
$t_{norm0,01}$	0,32	0,32	0,39	0,72	0,72	0,40	0,34	0,32
$t_{norm0,02}$	0,39	0,39	0,49	1,08	1,08	0,50	0,42	0,39
$t_{norm0,05}$	0,53	0,54	0,72	2,41	2,49	0,75	0,60	0,53
$t_{norm0,10}$	0,72	0,73	1,07	7,38	9,22	1,14	0,84	0,72
$t_{norm0,15}$	0,89	0,90	1,43	27,9	76,0	1,59	1,09	0,91
$t_{norm0,20}$	1,06	1,08	1,83	360	-	2,17	1,37	1,10
$t_{norm0,30}$	1,41	1,43	2,77	-	-	4,10	2,09	1,55
$t_{norm0,40}$	1,77	1,80	3,97	-	-	8,97	3,25	2,17
$t_{norm0,50}$	2,15	2,20	5,50	-	-	28,3	5,49	3,14

Na podstawie danych z ww. tabelicy można określić wymagany czas rejestracji danych  $t_{pom}$  w celu wykrycia i charakteryzacji zmiany grubości materiału. Jeśli brak

przesłanek co do znaku i wartości  $\Gamma$  (co zazwyczaj zachodzi w praktyce) zaleca się przyjąć największą wartość  $t_{norm0,01}(\Gamma)$  z tablicy 1, czyli 0,72 lub dla uproszczenia 1. W praktyce, współczynnik niedopasowania cieplnego  $\Gamma$  może przybierać dowolną wartość z przedziału  $\langle -1; 1 \rangle$ , stąd ww. tablica ma ograniczone zastosowanie, jedynie do wartości  $\Gamma$  w niej przedstawionych. Dla wartości pośrednich  $\Gamma$  można zastosować przybliżenie do najbliższej wartości z tablicy lub interpolację.

W tablicy 1 wyróżniono czasy dla  $\Gamma = -0,98$  i  $\Gamma = 0,47$ , odpowiadające dwóm układom ciał: pleksiglas-powietrze, pleksiglas-żelazo [9,10]. Jeśli powietrze otacza badany materiał, wypełnia ubytek w materiale. Jest też typowym defektem występującym w formie bąbla lub rozwarstwienia struktury wielowarstwowej. Żelazo modeluje wtrącenie metaliczne jako skutek zanieczyszczenia procesu produkcyjnego. Oba materiały defektu różnią się silnie właściwościami cieplnymi względem siebie i jednocześnie względem pleksiglasu - materiału badanego, czego efektem jest znaczna różnica temperatury nad defektem i jednorodnym tłem. Zależnie od znaku  $\Gamma$  krzywa przyrostów temperatury nad defektem przebiega nad lub pod krzywą dla materiału jednorodnego [7]. Jest to widoczne na rysunku 1 obrazującym zagadnienie dla skrajnych wartości  $\Gamma$ .

Defekt może występować na dowolnej głębokości, w skrajnym przypadku zbliżonej do grubości  $L$  próbki badanego materiału, czyli  $L_{def} \approx L$ . Zakładając tak niekorzystny przypadek, minimalny czas obserwacji zmian pola temperatury, po którym defekt powinien być już widoczny można oszacować następująco ( $t_{norm0,01} = 1$ ):

$$t_{norm0,01}(\Gamma) \cdot L_{def}^2 / a_{mat} < t_{pom} < L^2 / a_{mat} \quad (7)$$

Powyższa zależność ma potencjalnie duże znaczenie praktyczne. Jeśli do tego czasu defekty nie ujawniły się, to prawdopodobnie nie występują one w strukturze materiału lub nie jest możliwe ich wykrycie metodą aktywnej termografii, ze względu na ich mały rozmiar (niewielki stosunek wymiaru poprzecznego do głębokości) lub niekorzystną orientację – ułożone są prostopadłe do obserwowanej powierzchni [1]. Graniczną wartość czasu pomiaru  $t_{pom}$  określa relacja kwadratu grubości materiału badanego (wcześniejszy pomiar, specyfikacja techniczna) do dyfuzyjności cieplnej materiału badanego (pomiar, tablice fizyczne).

Automatyczne wykrycie defektu dla 1 % progu detekcji jest utrudnione ze względu na szereg czynników:

- przebieg krzywej  $\Delta T$  zależy od lokalnej wartości  $C_{x,y}$ ,
- wymagana jest krzywa referencyjna dla obszaru bez defektu,
- obecność szumów pomiarowych.

Usunięcie powyższych niedogodności jest możliwe dzięki zastosowaniu formuły *KFWP* [11-13].

## 2.2. Zastosowanie kontrastu filtrowanego *KFWP*

Gdyby przyjąć następującą formułę matematyczną:

$$\frac{C\sqrt{t}[1 + f_{SH}(L_{def}, \Gamma, t, a_{mat})] - C\sqrt{t}[1 + f_{SH}(L, \Gamma, t, a_{mat})]}{C\sqrt{t}[1 + f_{SH}(L, \Gamma, t, a_{mat})]} = \quad (8)$$

$$= \frac{f_{SH}(L_{def}, \Gamma, t, a_{mat}) - f_{SH}(L, \Gamma, t, a_{mat})}{1 + f_{SH}(L, \Gamma, t, a_{mat})}$$

to po prawej stronie powyższego wyrażenia współczynnik  $C$  już nie występuje – eliminacja czynnika a). Dla materiału

jednorodnego, tj. bez defektu, można przyjąć  $L_{def} = L$  i wyrażenie (8) jest równe zero. Osiąga się w ten sposób stały, zerowy poziom referencyjny dla obszarów jednorodnych, na którego tle ujawniają się potencjalne defekty o wartościach niezerowych. Podobne działanie wykazuje kontrast filtrowany względny przyrostowy *KFWP* zastosowany względem krzywych przyrostów temperatury. Jeśli przywołać definicję *KFWP* w postaci [11-13]:

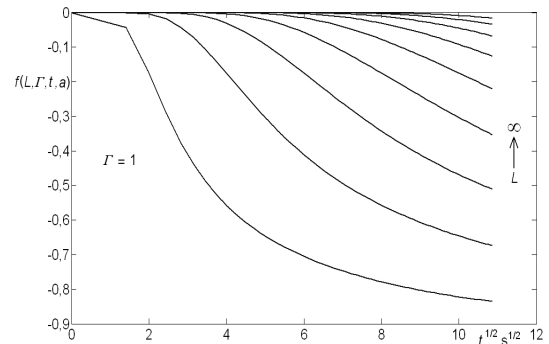
$$KFWP = \frac{T - filter(T)}{filter(T) - T_{ref}} = \frac{T - T_{ref} - filter(T) + T_{ref}}{filter(T) - T_{ref}} = \quad (9)$$

$$= \frac{\Delta T - [filter(T) - T_{ref}]}{filter(T) - T_{ref}}$$

i w miejsce  $\Delta T$  wstawić wzór na odpowiedź skokową oraz za  $T_{ref}$  przyjąć temperaturę sprzed rozpoczęcia nagrzewania materiału, to wzory (8) i (9) przedstawiają to samo działanie. Dodatkowym warunkiem, który musi być spełniony jest idealne maskowanie defektu tak, aby było uprawnione przyjęcie  $L_{def} = L$  dla obszaru nad defektem po filtracji. Osiąga się to dzięki efektowi wygładzania pola temperaturowego, realizowanego przez filtrację dolnoprzepustową na termogramie za pomocą operacji  $filter(T)$ . Jeśli grubość badanego materiału (również grubość pierwszej warstwy w układzie dwuwarstwowym) jest wystarczająco duża to funkcja  $f_{SH}$  dąży do zera:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} f_{SH}(L, \Gamma, t, a_{mat}) = 0 \quad (10)$$

Potwierdzają to obserwacje z rys. 3, przedstawiającego rodzinę krzywych przyrostów funkcji  $f_{SH}$ .



Rys. 3. Zależność przebiegu funkcji  $f_{SH}$  od grubości warstwy  $L$

Przy założeniu (10) prawa strona równania (8) upraszcza się do postaci:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{f_{SH}(L_{def}, \Gamma, t, a_{mat}) - f_{SH}(L, \Gamma, t, a_{mat})}{1 + f_{SH}(L, \Gamma, t, a_{mat})} = \quad (11)$$

$$= f_{SH}(L_{def}, \Gamma, t, a_{mat})$$

Tak więc, dla  $L \rightarrow \infty$  kontrast filtrowany  $KFWP(t)$  jest oszacowaniem funkcji  $f_{SH}(t)$ , interpretowanej jako temperatura unormowana z zarejestrowanych krzywych pomiarowych  $\Delta T(t)$ . Jego wartość jest niezależna od grubości materiału, współczynnika  $C$  i może służyć do wyznaczania czasów, dla których jest osiągany zadany próg procentowy, bez konieczności odnoszenia się do krzywej referencyjnej dla materiału jednorodnego – eliminacja czynnika b). Przyjęcie wyższego niż 1% progu detekcji zmniejsza wrażliwość metody detekcji na szum – eliminacja czynnika c) - jednak kosztem wydłużenia czasu detekcji.

Ostatecznie, grubość (jej ubytek) pierwszej warstwy materiału można oszacować ze wzoru:

$$L_{def} = \sqrt{a_{mat} \cdot \frac{t_{próg\%}}{t_{norm}(\Gamma)}} \quad (12)$$

dla znanych (szacowanych) wartości  $\Gamma$  i  $a_{mat}$ , czasu  $t_{próg\%}$  osiągnięcia przez krzywą *KFWP* zadanego procentowego proggu temperatury unormowanej  $\geq 1\%$  i współczynnika  $t_{norm}$  odczytanego z tablicy 1. Błąd określenia  $t_{norm}$  będzie skutkować błędem pomiaru grubości  $L_{def}$ . Zaleca się więc wyznaczenie  $t_{norm}$  przez rozwiązanie równania modelującego temperaturę unormowaną  $f_{SH}$ , dla założonej wartości  $\Gamma$  i procentowego proggu detekcji oraz arbitralnie przyjętego stosunku  $L^2/a_{mat}$ . Prostota metody jest jej zaletą, ale i wadą. Korzystanie z pojedynczej próbki danych - punkt na krzywej pomiarowej *KFWP*, pociąga za sobą potencjalną wrażliwość na szumy i właściwy dobór parametrów filtracji, niezbędnej do otrzymania krzywej *KFWP*. Dokładniejsze oszacowanie  $L_{def}$  uzyskuje się przez dopasowanie fragmentu, np. od  $t_{próg1\%}$  do  $t_{próg20\%}$ , krzywej zmian w czasie *KFWP* wyznaczonej z danych eksperymentalnych do krzywej z modelu (8). Niedogodnością takiego rozwiązania jest konieczność wprowadzenia do algorytmu grubości badanego materiału  $L$ . Jeśli materiał (w sensie zachodzących w nim zjawisk cieplnych) jest wystarczająco gruby, wówczas zamiast wzoru (8) można zastosować przybliżenie (11), w którym parametr  $L$  nie występuje. Otwartą kwestią pozostaje pytanie, kiedy stosowanie takiego uproszczenia jest uprawomocnione? Znalezienie odpowiedzi na to i inne pytania wyznacza kierunki dalszych badań.

### 3. WNIOSKI KOŃCOWE

Analiza jednowymiarowego wzoru na odpowiedź skokową pozwoliła na oszacowanie minimalnego czasu trwania pobudzenia cieplnego w celu wykrycia wady materiałowej, rozumianej jako lokalne zmniejszenie grubości warstwy badanego materiału. Metoda jednopunktowa, bazująca na wzorze (12) została zaimplementowana w autorskim oprogramowaniu „IR Defect Detector” [14]. Wyniki eksperymentu dla próbki pleksiglasu z wydrążonymi otworami były dyskutowane, m.in., w wyżej cytowanych publikacjach [11-13].

Głębokość defektu nie jest jedynym jego parametrem, który można wyznaczyć analizując przyrosty temperatury. Przykładowo, wpływ czasu obserwacji odpowiedzi skokowej na dokładność wyznaczania szerokości defektu został poddany dyskusji w pracy [15]. Analizie poddano dane wygenerowane z modelu numerycznego 3D struktury dwuwarstwowej.

## DETERMINATION OF RESPONSE TIME OF MATERIAL SURFACE FOR STEP HEATING

The paper deals with chosen aspects of method of processing measuring data for detecting and characterizing local change in thickness of the material, treated as material flaw. The measuring data are obtained by means of active infrared thermography. Characterization relies on the analysis of a single thermogram to examine neighboring pixels and of a sequence of thermograms to trace the variability of a single pixel in time. It allows nonuniformity detecting and determining the change in material thickness. Data processing relies on relative incremental filtered contrast RIFC merged with classical 1D theoretical model of temperature rising of surface of the two-layered material externally excited. Considerations are limited to the case of step heating only. Data from the cooling phase are not considered. General conclusions are as follows: It is possible to find defect depth by matching RIFC curve in time to the curve taken from the one-dimensional analytical model for assumed or estimated values of material depth and thermal properties of tested material and assumed defect properties.

**Keywords:** NDT, determination of material thickness, analytical model, step heating.

## 4. BIBLIOGRAFIA

1. Maldague X.: Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York 2001.
2. Minkina W. (red.) Wybrane problemy współczesnej termografii i termometrii w podczerwieni, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011.
3. Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania, Wyd. PAK, Warszawa 2011.
4. Bagavathiappan S., i in.: Infrared Thermography for Condition Monitoring – A Review, Infrared Physics & Technology, No. 60 2013, s. 35-55.
5. Suszyński Z., Arsoba R., Napieralski A., Tylman W.: Infrared Detection of Delaminations Using Induction Heating, IEEE Trans. on Components and Packing Technologies, Vol. 2, No. 1 2004, s. 112-115.
6. Osiander R., Maclachlan Spicer J.: Time-resolved Infrared Radiometry with Step Heating. A review, Revue Générale de Thermique, No. 37 (8) 1998, s. 680-692.
7. Gryś S.: Analysis of Temperature-rise of the Material Surface over Hidden Defect Thermally Stimulated in Active Thermography, Electrical Review, No. 51 (9a) 2012, s. 235-239.
8. Kosikowski M., Suszyński Z.: Optimization of Recording of Thermal-Wave Images in BDM Method.
9. Holman J.: Heat Transfer. 10<sup>th</sup> edition McGraw-Hill, Blacklick, USA, 2009.
10. CRC Handbook of Chemistry and Physics, Edition No. 83<sup>th</sup>. CRC Press, Boca Raton, USA 2003.
11. Gryś S., Minkina W.: Filtered Thermal Contrast – Error Analysis, Proc. of the 10<sup>th</sup> International Conference on Quantitative Infrared Thermography QIRT'2010, 27-30 July 2010, Quebec, Canada, s. 495-502.
12. Gryś S.: Filtered Thermal Contrast Based Technique for Testing of Material by Infrared Thermography, Opto-Electronics Review, No. 19 (2) 2011, s. 234-241.
13. Gryś S.: New Thermal Contrast Definition for Defect Characterisation by Active Thermography, Measurement No. 45 2012, s. 1885-1892.
14. Gryś S. Minkina W.: IR Defect Detector - New Possibility in Thermographic NDT, Proc. of IX International Conference Methods and Instruments of Physical Quantities Measurement - Temperature'2012, 25-28 September 2012, Lviv, Ukraine, s. 139-141.
15. Gryś S., Vokorokos L., Borowik L.: Size Determination of Subsurface Defect by Active Thermography – Simulation Research, Infrared Physics & Technology, No. 62 2014, s. 147-153.