

*termografia, podczerwień,
defekty materiałowe,
analiza falkowa*

Leszek RÓŻAŃSKI¹
Krzysztof ZIOPAJA¹

WYKORZYSTANIE METOD AKTYWNEJ TERMOGRAFII W PODCZERWIENI DO WYKRYWANIA DEFECTÓW MATERIAŁOWYCH

W pracy poruszono zagadnienia dotyczące oceny możliwości wykorzystania metod aktywnej termografii w podczerwienu do wykrywania defektów materiałowych takich np. jak pęknięcia, rozwarstwienia, rysy. Posłużono się analizą falkową jako „narzędziem matematycznym” umożliwiającym generowanie obrazów parametrycznych odwzorowujących te defekty. Przeprowadzono badania symulacyjne i doświadczalne, które pokazały, że identyfikacja wad lub uszkodzeń materiału, przy wykorzystaniu dwuwymiarowej dyskretnej transformaty falkowej funkcji opisującej powierzchniowy rozkład temperatury, może być skutecznym narzędziem do ich wykrywania i identyfikacji. Stwierdzono, że istotny wpływ na skuteczność detekcji wad materiałowych może mieć poziom szumów generowanych w torze pomiarowym systemu termograficznego.

1. WPROWADZENIE

Rozwiązywanie problemów współczesnej nauki i techniki wiąże się z potrzebą ciągłego rozwijania i doskonalenia metod badawczych i aparatury związanej z techniką badań diagnostycznych oraz nieniszczących. Wdrażanie w przemyśle, na coraz szerszą skalę, systemów kontroli czynnej jako jednego z elementów polityki kompleksowego zarządzania jakością, skłania środowiska naukowców i inżynierów do poszukiwania coraz efektywniejszych metod badawczych. Jedno z ważniejszych miejsc wśród tych metod zajmuje termografia w podczerwienu. Ogólnie można stwierdzić, że technika termograficzna, obejmująca akwizycję, przetwarzanie, transmisję i wyświetlanie informacji o polach temperaturowych badanych obiektów znajduje szerokie zastosowanie w wielu dyscyplinach nauki i techniki współczesnego świata. Stosując techniki głównie cyfrowe, dziedzina ta wykorzystuje osiągnięcia sprzętowe w zakresie przetwarzania informacji przestrzennej oraz programowania dotyczące konstruowania algorytmów i procedur służących do analizy, przetwarzania, odtwarzania oraz rozpoznawania odwzorowań termalnych. Najczęściej stosowane są metody termografii pasywnej tzn. bez oddziaływania termalnego na badany obiekt. W ostatnich latach obserwuje się burzliwy rozwój aktywnej

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych,
E-mail: leszek.rozanski@put.poznan.pl

(dynamicznej) termografii w podczerwieni, polegającej na kontrolowanym oddziaływaniu termicznym na badany obiekt i analizie reakcji tego obiektu na zastosowane wymuszenie. W literaturze przedmiotu opisuje się trzy podstawowe metody badawcze termografii aktywnej: termografię impulsową (ang. *pulse thermography* – PT), termografię impulsowo-fazową (ang. *pulse phase thermography* – PPT) oraz termografię synchroniczną (ang. *lock-in thermography* lub *modulated thermography* – MT); istnieje kilka odmian termografii synchronicznej [1],[2],[3],[4]. Metody badawcze termografii aktywnej dają szerokie możliwości analizowania zaburzeń struktury materiałów i mogą być wykorzystywane m. in. do badania laminatów, włókien węglowych oraz materiałów kompozytowych. Możliwe jest efektywne wykrywanie podpowierzchniowych uszkodzeń od uderzeń, rozwarstwień i defektów technologicznych. Metody termografii dynamicznej pozwalają na generowanie obrazów parametrycznych, przy czym aparat matematyczny wykorzystywany do ich tworzenia obejmuje m. in. metody przekształceń Fouriera oraz metody przekształceń falkowych. Porównanie tych metod w odniesieniu do zagadnień związanych z detekcją defektów przedstawiono w pracy [5]. W obu przypadkach argumentem funkcji poddawanych przekształceniom jest czas. W pracy przeanalizowano możliwość badania zaburzeń struktury materiału w oparciu o dyskretną transformację falkową funkcji przestrzennej rejestrującej zaburzenie.

2. ANALIZA NUMERYCZNA

2.1. OPIS PROCESU NIEUSTALONEGO PRZEPIYWU CIEPŁA

Równania nieustalonego przepływu ciepła w przestrzeni Ω są określone przez prawo Fouriera i mają następującą postać (1):

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{div} \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) + f &= c(\mathbf{x})\dot{T}(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) &= -\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{x}) \cdot \nabla T(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \right\} \text{ w } \Omega \quad (1)$$

Symbole \mathbf{q} , f , $\boldsymbol{\lambda}$, T to odpowiednio strumień ciepła, ciepło generowane w jednostce objętości, macierz przewodności cieplnej i pole temperatury. Symbol \dot{T} oznacza pochodną temperatury po czasie, a c to ciepło właściwe. Współczynnik konwekcji h został określony przy założeniu braku transportu mas powietrza wokół przestrzeni Ω . Warunki wymiany ciepła na zewnętrznych powierzchniach Γ_T , Γ_q , Γ_h opisują odpowiednie warunki brzegowe: Dirichleta, Neumanna i Henkela (2).

$$\left\{ \begin{aligned} T(\mathbf{x}, t) &= T^0(\mathbf{x}, t) & \text{na } \Gamma_T \\ q_n(\mathbf{x}, t) &= q_n^0(\mathbf{x}, t) & \text{na } \Gamma_q \\ q_n(\mathbf{x}, t) &= h[T(\mathbf{x}, t) - T_\infty(\mathbf{x}, t)] & \text{na } \Gamma_h \end{aligned} \right. \quad (2)$$

W przypadku rozpatrywania problemu nieustalonego przepływu ciepła zdefiniowano warunek początkowy $T(\mathbf{x}, t=0) = T_0$ oraz przyjęto temperaturę otoczenia $T_\infty(\mathbf{x}, t) = 22^\circ\text{C}$.

2.2. TRANSFORMATA FALKOWA JAKO NARZĘDZIE ANALIZY SYGNAŁU

Równania nieustalonego przepływu ciepła w przestrzeni są określone przez znane prawo Fouriera. Podstawy teoretyczne praktycznych aplikacji analizy falkowej zostały opublikowane na początku lat dziewięćdziesiątych przez Daubechies, Chui i Newland. W roku 1989 Mallat [6] przedstawiła algorytm wielorozdzielczej dekompozycji dwuwymiarowego sygnału $F(x, y) \in L^2(R)$ w reprezentacji falkowej:

$$F(x, y) = S_J(x, y) + \sum_{j=1}^J D_j^V(x, y) + \sum_{j=1}^J D_j^H(x, y) + \sum_{j=1}^J D_j^D(x, y) \quad (3)$$

Funkcje w równaniu (1) S_J , D_j^V , D_j^H i D_j^D oznaczają odpowiednio wygładzoną część obrazu oraz pionowy, poziomy i diagonalny detal obrazu. Maksymalny poziom dyskretnej transformacji falkowej J zależy od liczby punktów N służących do aproksymacji funkcji $F(x, y)$; $N = 2^J$. Reprezentacja sygnału na poziomie rozdzielczości j jest sumą pionowego, poziomego i diagonalnego komponentu:

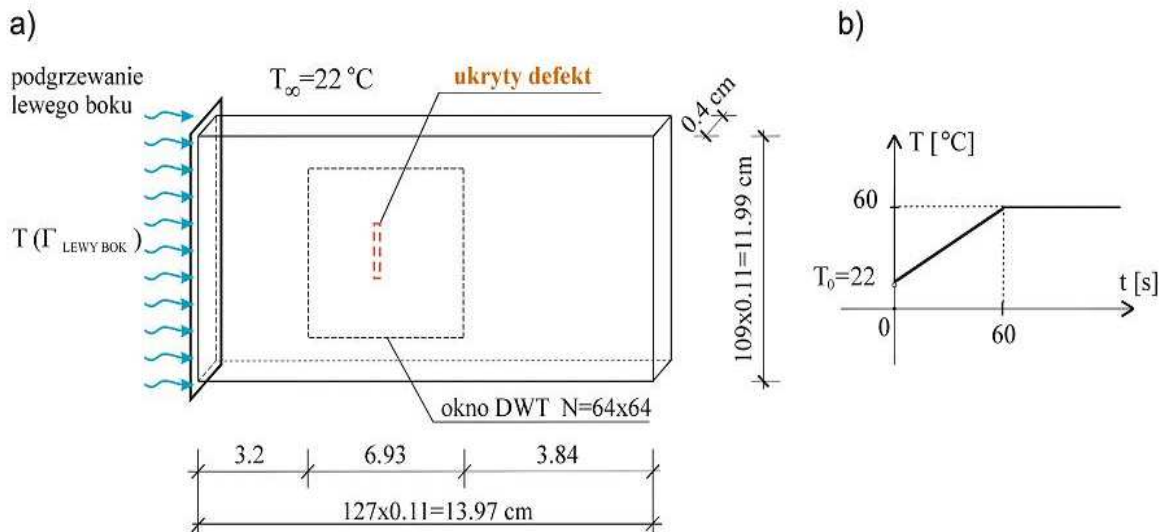
$$D_j(x, y) = D_j^V(x, y) + D_j^H(x, y) + D_j^D(x, y) \quad (4)$$

Detal $D_{j=1}(x, y)$ odpowiada najbardziej lokalnej reprezentacji funkcji $F(x, y)$.

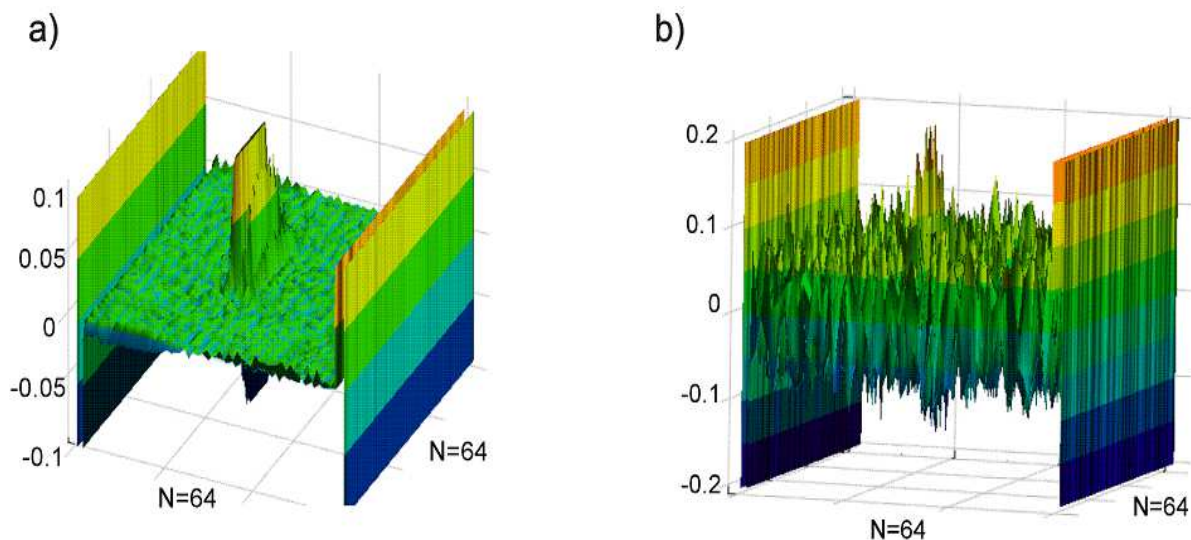
2.3. SYMULACJE NUMERYCZNE PROCESU DETEKcji USZKODZEŃ

Prześlędzono efektywność wykrywania uszkodzeń na przykładzie aluminiowej płytki ogrzewanej od strony lewego brzegu (rysunek 1a). W ten sposób symulowano proces termiczny o charakterze nieustalonym, w którym transport ciepła odbywał się wzdłuż dłuższego boku płytki. Wymuszenie termiczne jest określone przez warunek Dirichleta, a jego model pokazano na rysunek 1b. Symulacje numeryczne nieustalonego przepływu ciepła z uwzględnieniem konwekcji naturalnej $h=6,25 W/(m^2 \cdot K)$, przeprowadzono przy użyciu programu Abaqus Standard. Do dyskretyzacji płytki użyto przestrzennych, 8-węzłowych liniowych elementów skończonych DC3D8, rozmieszczonych równomiernie w pięciu warstwach. Przyjęto następujące parametry materiału: przewodność cieplną $\lambda=250 W/(m \cdot K)$, ciepło właściwe $c=90 J/(kg \cdot K)$ oraz ciężar objętościowy $\gamma=2700 kg/m^3$. Defekt modelowano jako nacięcie o szerokości 0,2 i długości 2cm, o zmiennej głębokości $g = (0,08, 0,16, 0,24, 0,32 cm)$. Modelowano rozkład temperatury na powierzchni znajdującej się po przeciwnej stronie płaszczyzny z defektem. Wartości pola temperatury rejestrowane w oknie pomiarowym obejmującym 64x64 węzły zostały poddane dyskretnej transformacji falkowej. Dokonane symulacje numeryczne pozwoliły sformułować kilka interesujących wniosków. Okazało się, że charakter wymuszenia i procesu cieplnego powoduje, że możliwość lokalizacji defektu poprawia się wraz z wydłużaniem czasu

rejestracji pola temperatury ($t=60s$). Przy głębokościach nacięcia $g=0,08$ i $0,16cm$, detekcja jest prawie niemożliwa. Na brzegach transformaty powstają silne zaburzenia (rysunek 2a), związane zarówno ze skończonymi rozmiarami analizowanego pola temperatury, jak i z „wewnętrznym” i procedurami transformacji falkowej. Ważnym aspektem rozpatrywanego przykładu jest fakt, że możliwa jest detekcja uszkodzenia także w obecności szumów, z którymi zawsze ma się do czynienia w warunkach realnych pomiarów.



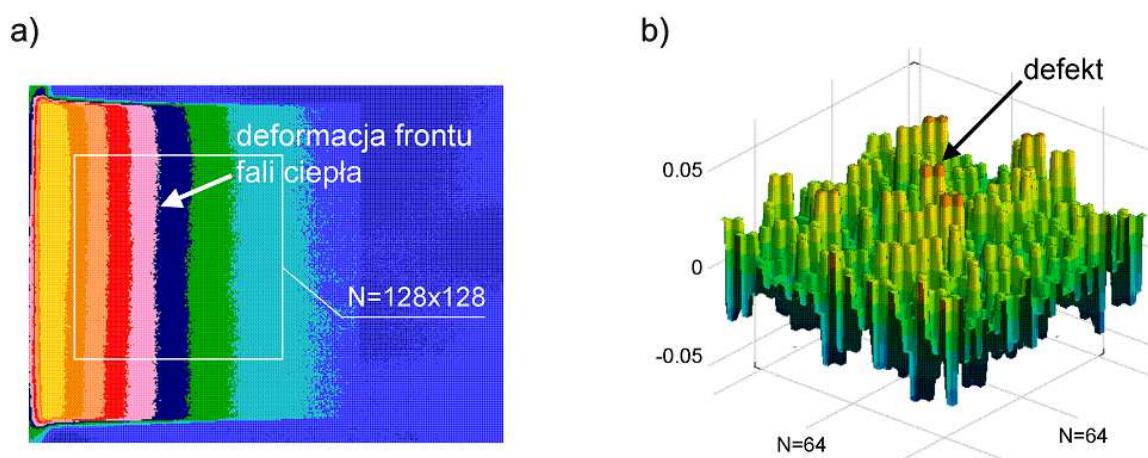
Rys. 1. Płytkę aluminiową podgrzewana od strony lewej krawędzi; a) model układu; b) model wymuszenia termicznego
Fig. 1. Aluminum plate heated from the left edge; a) layout model; b) thermal stimulation model



Rys. 2. Transformaty falkowe pola temperatury ($T_{64 \times 64}$), Detal D_1 , Daubechies 4, $t=60s$
a) głębokość nacięcia $g=0,32cm$ b) głębokość $g=0,32cm$, biały szum $\pm 0,1^\circ C$
Fig. 2. Wavelet transform of the temperature field ($T_{64 \times 64}$), Detail D_1 , Daubechies 4, $t=60s$
a) depth of cut $g=0,32cm$ b) depth of cut $g=0,32cm$, white noise $\pm 0,1^\circ C$

3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Badaniu poddano płytkę aluminiową o wymiarach $140 \times 120 \times 4 \text{ mm}$. Przebieg procesu cieplnego miał podobny charakter do opisanego w przykładzie numerycznym. Pole temperatury rejestrowano długofalową kamerą termograficzną FLIR SC2000 o rozdzielczości termicznej (w sensie NETD) wynoszącej $0,1^\circ\text{C}$ przy temperaturze 30°C . Na rysunku 3a przedstawiono termogram obrazujący deformację fali ciepła spowodowaną defektem (nacięcie o wym. $2 \times 0,2$ i głębokości $0,25 \text{ cm}$) w strukturze badanego obiektu. Z uwagi na zaszumienie sygnału bezpośrednia interpretacja transformaty (rysunek 3b) pola temperatury nie pozwala jednoznacznie określić położenia uszkodzenia.



Rys. 3 Wyniki eksperymentu; a) termogram dla $t=47 \text{ s}$; b) transformata pola temperatury
 Fig. 3. The result of the experiment; a) thermogram for $t=47 \text{ s}$; b) transform of the temperature field

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazały, że identyfikacja uszkodzeń przy wykorzystaniu dwuwymiarowej dyskretnej transformacji falkowej funkcji opisującej rozkład temperatury może być skutecznym narzędziem badań nieniszczących. Duży poziom szumów w stosunku do zaburzenia generowanego przez defekt ogranicza zdolność wykrycia tego defektu. Skuteczność metody może być lepsza, jeśli zastosuje się system termograficzny o korzystniejszej rozdzielczości termicznej lub gdy zastosuje się procedurę powtarzania rejestracji zaburzeń w połączeniu z uśrednianiem zarejestrowanych termogramów.

LITERATURA

- [1] BREITENSTEIN O., WARTA W., LANGENKAMP M., 2010, *Lock-in thermography – Basics and applications to functional diagnostics of electronic components*, Springer.
- [2] WU D., BUSSE G., 1998, *Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials*, *Revue Generale de Thermique*, 37/8, 693-703.

- [3] SHEPARD S., 2001, *Advances in pulsed thermography*, Proc. SPIE, Thermosense-XXIII, 4360, 331-337.
- [4] MALDAGUE X. P., GALMICHE F., ZIADI A. , 2002, *Advances in Pulse-phase Thermography*, Infrared Physics & Technology, 43, 175-181.
- [5] OLBRYCHT R. W., WIĘCEK B., GRALEWICZ T., SWIĄTCZAK T., OWCZAREK G., 2007, *Comparison of Fourier and wavelet analyses for defect detection in lock-in and pulse phase thermography*, QIRT Journal, 4/2, 219-232.
- [6] MALLAT S., 1989, *A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11/ 7, 674-693.

THE USE OF METHODS OF ACTIVE INFRARED THERMOGRAPHY TO DETECT DEFECTS IN MATERIALS

The possibility of detection the hidden defects or damage applying the methods of dynamic infrared thermography and the 2D discrete wavelet transform of data measured in thermal processes has been described. Besides of theoretical information about application of these transforms results of MES digital simulations as well as qualitative experimental has been presents.