

ZASTOSOWANIE METOD PROGOWANIA LOKALNEGO DO WYKRYWANIA DEFECTÓW Z UŻYCIEM TERMOGRAFII AKTYWNEJ

Sebastian DUDZIK¹, Olga SOCHACKA²

1. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych
tel.: 34 3250 225, e-mail: sebdud@el.pcz.czyst.pl
2. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych
tel.: 731 672 953, e-mail: o.sochacka@el.pcz.czyst.pl

Streszczenie: W pracy zaprezentowano zastosowanie metod progowania lokalnego do wykrywania defektów z użyciem termografii aktywnej. Przeprowadzono badania eksperymentalne polegające na rejestracji sekwencji termogramów powierzchni badanej próbki materiału dla dwóch wymuszeń cieplnych oraz dwóch faz procesu wymiany ciepła (faza nagrzewania i faza stygnięcia). Sekwencje termogramów uzyskane w badaniach eksperymentalnych zostały poddane binaryzacji z wykorzystaniem lokalnych metod progowania. Do oszacowania efektywności wykrywania defektów za pomocą zaproponowanych metod, zastosowano kryteria oparte na pojęciu błędu klasyfikacji w obszarze defektów i obszarze tła. Na podstawie badań stwierdzono, że największą dokładność uzyskuje się z stosując zmodyfikowaną metodę Bradleya.

Słowa kluczowe: termografia aktywna, badania nieniszczące, wykrywanie defektów, progowanie lokalne.

1. WPROWADZENIE

1.1. Termografia aktywna w podczerwieni

Termografia w podczerwieni pozwala na bezkontaktowy pomiar temperatury obiektu za pomocą promieniowania elektromagnetycznego. Technika ta umożliwia detekcję, zapis, transformowanie oraz wizualizację promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt. Wynikiem końcowym jest termogram, który odwzorowuje rozkład temperatury na powierzchni obiektu poddawanego analizie [1]. Badanie obiektu bez zmiany jego właściwości, zwane badaniem nieniszczącym, pozwala na kontrolę jakości wytwarzanego obiektu (elementu, urządzenia).

Główne metody badań termografii aktywnej to [2]: termografia impulsowa (ang. *Pulsed Thermography*), metoda długiego impulsu (ang. *Step Heating*) oraz termografia wibracyjna (ang. *Vibrothermography*).

Metody aktywnej termografii można klasyfikować na podstawie: rodzaju źródła impulsu cieplnego, wzajemnego położenia źródła ciepła i urządzenia rejestrującego temperaturę obiektu, a także kształtu i wymiarów strefy intensyfikacji ciepła oraz rejestracji temperatury. Termografia aktywna może być realizowana przy użyciu: a) metody refleksyjnej, która polega na ustawieniu źródła ciepła oraz urządzenia rejestrującego temperaturę po jednej stronie badanego obiektu [3],

b) metody transmisyjnej, która polega na ustawieniu źródła ciepła oraz urządzenia rejestrującego temperaturę po przeciwnych stronach badanego obiektu [3],

c) cieplnej stymulacji przy użyciu wewnętrznego źródła (przy pomocy np. prądów wirowych, ultradźwięków czy pobudzenia mechanicznego).

Termowizyjne badania nieniszczące są coraz częściej stosowane ze względu na możliwość wykrycia nieciągłości w sposób bezkontaktowy, w szczególności dla defektów podpowierzchniowych [4].

1.2. Metody progowania obrazów termowizyjnych

Progowanie obrazu polega na określeniu progów jasności dla obrazu, w wyniku czego powstaje obraz binarny (dwuwartościowy). Próg określa się globalnie dla całego obrazu lub lokalnie dla wskazanego okna. Efektem progowania jest przypisanie pikseli do zbioru obiektów lub zbioru tła. W niniejszej pracy zastosowano następujące metody progowania:

- modyfikację metody *Bradleya* dla termogramów, polegającą na wyznaczeniu lokalnej średniej temperatury w oknie (obszarze) sąsiedztwa [5]. Oknem sąsiedztwa określa się piksele znajdujące się w otoczeniu rozważanego piksela termogramu. Macierz wartości progów dla każdego piksela termogramu osiąga się używając następującego równania:

$$\mathbf{V}_{mean} = s \cdot [\mathbf{M}_{mean} * \mathbf{T}(\tau)], \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{V}_{mean} – macierz wartości progów dla każdego piksela termogramu; s – współczynnik czułości; \mathbf{M}_{mean} – jądro filtra uśredniającego o rozmiarze okna sąsiedztwa N , wyrażonego w pikselach; $\mathbf{T}(\tau)$ – termogram zarejestrowany w chwili τ względem początku czasu nagrzewania, (*) – operacja splotu dwuwymiarowego.

Współczynnik czułości s określa, które piksele mają zostać potraktowane jako piksele defektów. Przyjęcie dużej wartości współczynnika czułości stwarza ryzyko dołączenia pikseli należących do obszaru tła do obszaru defektów, powodując wzrost błędu klasyfikacji w obszarze tła. Rozmiar okna sąsiedztwa N wykorzystywany do obliczenia progów lokalnych dla każdego piksela określany jest jako rzeczywisty, numeryczny, skalarny lub dwuelementowy

wektor dodatnich liczb całkowitych i nieparzystych. Rozmiar okna sąsiedztwa definiowany jest wzorem:

$$N = 2 \cdot Ent \cdot \left(\frac{size\{T(\tau)\}}{16} \right) + 1, \quad (2)$$

gdzie: N – rozmiar okna sąsiedztwa; Ent – funkcja zaokrąglenia liczby w dół; $size\{T(\tau)\}$ – rozmiar termogramu zarejestrowanego w chwili τ względem początku czasu nagrzewania. Piksel przyporządkowywany jest do zbioru defektów, w przypadku gdy jego wartość przekracza wartość progu, natomiast jeżeli wartość piksela jest mniejsza niż wartość progu, piksel klasyfikowany jest jako tło (obszar bez defektu).

- metodę *Median* wykorzystującą filtr medianowy. Piksele o wartościach większych od mediany obliczonej w oknie sąsiedztwa są uznawane za należące do obszaru defektu, a piksele o wartościach mniejszej są przypisywane do obszaru tła.

$$V_{median}(i, j) = \forall i, j \in O(\text{Median}\{T(i, j)\}), \quad (3)$$

gdzie: $V_{median}(i, j)$ - wartość progu dla każdego piksela o współrzędnych (i, j) termogramu, wyrażona w Kelwinach; *Median* – mediana, O – okno sąsiedztwa wyrażone w pikselach; $T(i, j)$ – wartość temperatury dla piksela o współrzędnych (i, j) wyrażona w Kelwinach. Tak obliczona wartość jest następnie wykorzystywana jako próg dla operacji binaryzacji.

- metoda *Gaussian*, wykorzystująca filtr dolnoprzepustowy Gaussa:

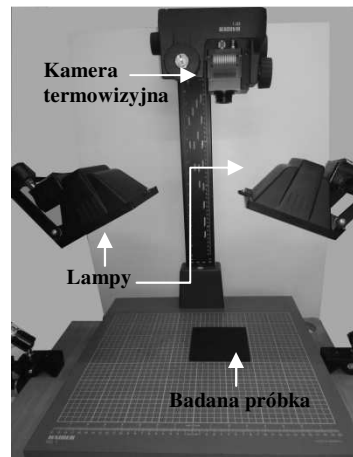
$$V_{gaussian} = s \cdot [M_{gaussian} * T(\tau)], \quad (4)$$

gdzie: $V_{gaussian}$ – macierz wartości progów dla każdego piksela termogramu, $M_{gaussian}$ – jądro filtra gaussowskiego o rozmiarze okna N ; s – współczynnik czułości; $T(\tau)$ – termogram zarejestrowany w chwili τ względem początku czasu nagrzewania.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

2.1. Opis stanowiska laboratoryjnego

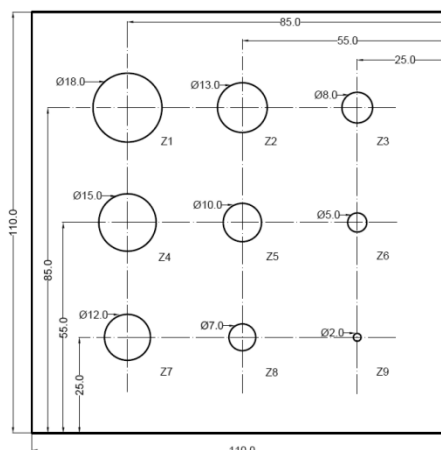
Badania zostały przeprowadzone na stanowisku do badań nieniszczących z użyciem aktywnej termografii. Stanowisko znajduje się w Zakładzie Automatyki i Robotyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej. Stanowisko składa się z kamery IRS336-NDT firmy Automation Technology, dwóch lamp halogenowych o mocy nominalnej 500 W każda, komputera stacjonarnego z oprogramowaniem do termowizyjnych badań nieniszczących IRNDT. Do stanowiska podłączona jest również karta pomiarowa (DAQ) NI USB-6251 oraz moduł AT IRXBOX odpowiedzialny za sprzętowe wyzwalanie rejestracji termogramów i aktywizację źródła wymuszenia cieplnego. Stanowisko laboratoryjne znajduje się w pomieszczeniu, które zostało całkowicie zaciemnione, aby zminimalizować wpływ promieniowania otoczenia. Fotografie stanowiska pokazano na rysunku 1.



Fot. 1. Fotografia stanowiska do badań nieniszczących

Kamera termowizyjna połączona jest z modulem sprzętowym oraz kartą akwizycji danych za pomocą protokołu *GigeVision 2.0*. Protokół ten pozwala na przechwytywanie obrazu z kamery w czasie rzeczywistym.

Do badań mających na celu wykrywanie defektów za pomocą lokalnych metod progowania użyto próbki wykonanej z poliwęglanu o wymiarach 110 x 110 mm. Na spodniej części próbki wywiercono dziewięć nieprzelotowych otworów. Defekty zlokalizowano na głębokościach: $z_1 = 3,56$ mm, $z_2 = 2,97$ mm, $z_3 = 2,10$ mm, $z_4 = 3,18$ mm, $z_5 = 2,35$ mm, $z_6 = 1,48$ mm, $z_7 = 2,66$ mm, $z_8 = 1,85$ mm, $z_9 = 0,83$ mm względem wierzchołka górnej strony próbki. Pomiary głębokości wykonano za pomocą głębokościomierza mikrometrycznego Mitutoyo Digimatic Depth No.329-250-10 o rozdzielczości 0,001 mm i dokładności $\pm 0,004$ mm. Wartość pasmowego współczynnika emisyjności lakieru pokrywającego próbkę testową oszacowano na $\varepsilon \approx 0,98$. Na rysunku 1 przedstawiono wymiary próbki oraz rozkład defektów utworzonych w próbce.



Rys. 1. Wymiary i rozkład defektów utworzonych w próbce

2.2. Metodyka badań eksperymentalnych

Celem badań przedstawionych w artykule było przetestowanie metod progowania lokalnego stosowanych w wykrywaniu defektów przy użyciu termografii aktywnej dla różnych faz procesu wymiany ciepła. Zarejestrowano fazy nagrzewania oraz stygnięcia badanej próbki. W badaniach zastosowano metodę długiego impulsu cieplnego [6]. Eksperymenty podzielono na dwa etapy.

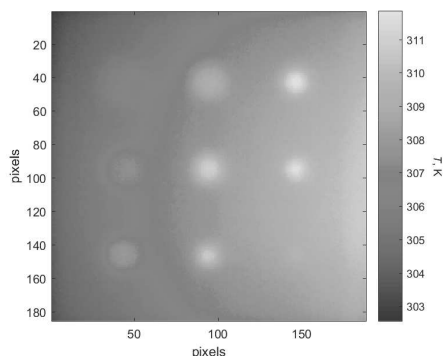
Pierwszy etap dotyczył nagrzewania próbki za pomocą jednej lampy. Podczas drugiego etapu próbkę nagrzewano dwoma lampami. W trakcie eksperymentu powierzchnię próbki nagrzewano impulsem cieplnym o mocy 250 W. Czas trwania impulsu wynosił 30 s. Do nagrzewania użyto lampy o mocy 250 W. Podczas trwania fazy nagrzewania oraz przez 30 s fazy stygnięcia zarejestrowano sekwencje termogramów powierzchni próbki. Częstotliwość próbkowania ustalono na 3 Hz.

Podobnie przeprowadzono drugą część badań. Powierzchnię próbki nagrzewano impulsem cieplnym o mocy 500 W dla takich samych parametrów rejestracji, jak w przypadku etapu pierwszego.

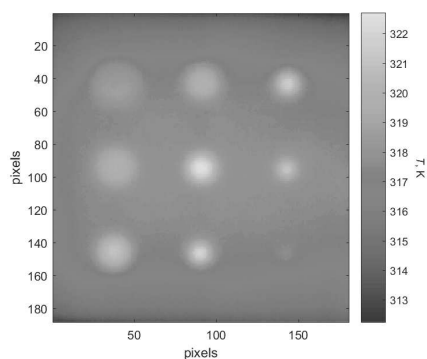
Parametry rejestracji sekwencji termogramów oraz źródła wymuszenia cieplnego dobrano w sposób eksperymentalny metodą prób i błędów, biorąc pod uwagę właściwości cieplne (dyfuzyjność cieplną) badanego materiału. W dalszych badaniach przeprowadzono analizę uzyskanych sekwencji, dobierając parametry metod progowania zarejestrowanych termogramów.

2.3. Wyniki badań eksperymentalnych

Na rysunkach 2, 3 zaprezentowano termogramy powierzchni próbki nagrzewanej za pomocą jednej lampy oraz dwóch lamp. Termogramy zarejestrowano w końcowej fazie stygnięcia $\tau = 58$ s.



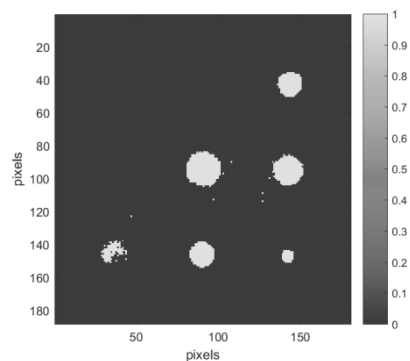
Rys. 2. Termogram powierzchni ($\tau = 58$ s, jedna lampa)



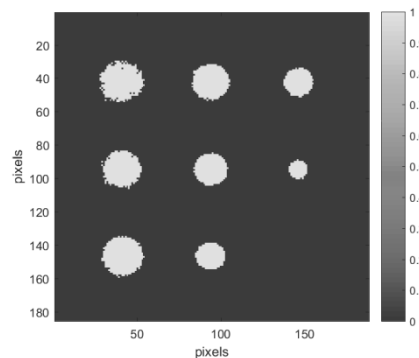
Rys. 3. Termogram powierzchni ($\tau = 58$ s, dwie lampy)

2.4. Wyniki przetwarzania sekwencji termogramów

Poniżej przedstawiono wyniki przetwarzania sekwencji termogramów zarejestrowanych w badaniach eksperymentalnych z zastosowaniem metod progowania lokalnego. Na rysunku 4 zaprezentowano wynik binaryzacji termogramu zarejestrowanego dla $\tau = 28$ s, natomiast na rysunku 5 przedstawiono wynik binaryzacji termogramu zarejestrowanego dla $\tau = 58$ s.



Rys. 4. Wynik binaryzacji termogramu ($\tau = 28$ s, metoda *Median*, $s = 0,5$, $N = (131 \times 131)$ pikseli, dwie lampy)



Rys. 5. Wynik binaryzacji termogramu ($\tau = 58$ s, metoda *Gaussian*, $s = 0,43$, $N = (31 \times 31)$ pikseli, jedna lampa)

Dla celów przetwarzania sekwencji termogramów określono mapę defektów odniesienia obejmującą rzeczywiste defekty. Mapa pozwoliła na klasyfikację błędów fałszywie pozytywnego w obrębie tła oraz fałszywie negatywnego w obrębie defektu. Względny błąd klasyfikacji w obszarze defektów określono następującym wzorem:

$$e_d = \frac{l_d}{N_d} \cdot 100\%, \quad (5)$$

gdzie: l_d – liczba niepoprawnie sklasyfikowanych pikseli w obszarze defektów; N_d – całkowita liczba pikseli w obszarze defektów. Względny błąd klasyfikacji w obszarze tła określono jako:

$$e_s = \frac{l_s}{N_s} \cdot 100\%, \quad (6)$$

gdzie: l_s – liczba niepoprawnie sklasyfikowanych pikseli w obszarze tła; N_s – całkowita liczba pikseli w obszarze tła.

3. WNIOSKI

Przedstawione wyniki przetwarzania sekwencji termogramów stanowią podstawę analizy efektywności wykrywania defektów z zastosowaniem termografii aktywnej i lokalnych metod progowania. Na podstawie badań eksperymentalnych z użyciem jednej lampy sformułowano następujące wnioski:

- Zmodyfikowana metoda *Bradley'a* wymaga dużych okien sąsiedztwa (101 x 101) pikseli co wpływa na wydłużenie czasu działania metody. W fazie stygnięcia uzyskano błąd

klasyfikacji w obszarze tła na poziomie 3,1 % a w obszarze defektu 36 %;

- W metodzie *Median* zaobserwowano konieczność korzystania z dużych okien sąsiedztwa. Przy małych oknach sąsiedztwa (31 x 31) pikseli metoda wykrywała defekty jedynie w niespełna 10 %. Zwiększenie okna sąsiedztwa do (71 x 71) pikseli spowodowało pojawienie się dokładniejszych wyników. Błąd klasyfikacji w obszarze tła w fazie nagrzewania wyniósł 7,8 %, jednak wciąż występowały błędy w obszarze defektów równe 90 %. W fazie stygnięcia błędy wynosiły 14 % w obszarze defektów oraz 1,2 % dla obszaru tła.

- Metoda *Gaussian* umożliwia szybkie obliczenia dzięki małemu oknu sąsiedztwa. Przy zastosowaniu tej metody zaobserwowano stosunkowo małe błędy klasyfikacji. W fazie nagrzewania zmierzono błędy klasyfikacji w obszarze defektu na poziomie 23 %, a w obszarze tła 2,0 %. W fazie stygnięcia błąd klasyfikacji w obszarze defektu wynosił 7,2 %, a w obszarze tła zaledwie 0,61 %. Dodatkowo zauważono, że wraz ze wzrostem czułości pomiarów wzrasta błąd klasyfikacji.

Na podstawie wyników badań dla eksperymentu z zastosowaniem dwóch lamp sformułowano następujące wnioski:

- Metoda *Median* jest metodą najwolniejszą z powodu wykorzystania dużych okien sąsiedztwa oraz charakteryzuje się większymi błędami klasyfikacji. Błędy klasyfikacji na poziomie 12 % w obrębie tła oraz 0,0 % w obrębie defektu dla próbki w fazie stygnięcia o czułości $s = 0,55$ oraz oknie sąsiedztwa $N = (91 \times 91)$ pikseli. Wyniki z próbki poddanej nagrzewaniu przedstawiają się następująco: błąd klasyfikacji w obszarze defektu wynosi 67 % a błąd w obszarze tła 6,0 %.

- Metoda *Gaussian* gwarantuje małe błędy klasyfikacji przy mniejszych oknach sąsiedztwa. Błąd klasyfikacji w obszarze tła wynosi 4,7 % w fazie stygnięcia oraz 53 % w fazie nagrzewania.

- Najmniejsze błędy klasyfikacji zaobserwowano przy zastosowaniu metody *Bradley'a* (błąd w obszarze tła na poziomie 0,49 % w fazie stygnięcia, a w obszarze defektu 5,6 %). W fazie nagrzewania próbki błąd klasyfikacji

w obszarze defektu wynosi 65 %, a w obszarze tła 5,8 %. Metoda ta jest jednak wolniejsza od metody *Gaussian* ze względu na większe okna sąsiedztwa.

Reasumując, najlepsze wyniki osiągnięto używając w badaniach eksperymentalnych dwóch jednakowych lamp. Spowodowało to znaczne zmniejszenie niejednorodności nagrzania w fazie stygnięcia. Analizując wyniki badań metodę *Gaussian* uznano jako metodę najszybszą. Natomiast modyfikacja metody *Bradley'a* okazała się najdokładniejsza w zastosowaniu do wykrywania defektów.

W proponowanej metodycy badań metody wykrywania defektów zostały przetestowane w trybie off-line. W dalszych badaniach planuje się zastosowanie opisywanych metod do wykrywania defektów w czasie rzeczywistym (on-line). Dzięki temu możliwa będzie bieżąca ocena efektywności wykrywania defektu z jednoczesną możliwością modyfikacji parametrów akwizycji i sterowania źródłami wymuszeń cieplnych.

4. BIBLIOGRAFIA

1. Pomiary termowizyjne w praktyce, praca zbiorowa pod red. H. Madury, wyd. PAK, Warszawa, 2004.
2. Maldague X. P.: Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, John Wiley&Sons, Inc., New York, 2001.
3. Świdzki W., Szabra D., Wójcik J.: Nondestructive evaluation of aircraft components by thermography using different heat sources, QIRT, 2002, pp.79-83.
4. Dudzik S.: Application of the naive Bayes classifier to defect characterization using active thermography, Journal of Nondestructive Evaluation, (31) 4, 2012, pp. 383-392.
5. Bradley D., Roth G.: Adaptive Thresholding using the Integral Image, Journal of Graphics Tools. (12) 2, 2007, pp. 13-21.
6. Dudzik S.: Wyznaczanie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej i sztucznych sieci neuronowych, wyd. Politechnika Częstochowska, 2013, s.60-62.

APPLICATION OF LOCAL THRESHOLDING ALGORITHMS FOR DEFECT DETECTION USING ACTIVE THERMOGRAPHY

The paper presents the application of local thresholding methods for defect detection using active thermography. Experimental studies were performed involving the recording of the sequence of thermograms of the surface of the tested material sample. Experiments were conducted for two different thermal excitations and two phases of the heat transfer process (i.e. heating phase and cooling phase). The thermograms from sequences obtained in experimental studies were then binarized using local thresholding methods. Three following methods were employed: modified Bradley method, median method and Gaussian weighted mean method. To assess the accuracy of defect detection using the proposed algorithms, the criteria based on the concept of classification error in the defected and non-defected areas were applied. In this work it was found that the most accurate method is the modified Bradley method.

Keywords: active thermography, non-destructive testing, defect detection, local thresholding.