

Sławomir GRYŚ, Waldemar MINKINAPOLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA,
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa**Kontrast filtrowany w charakteryzacji wad materiałowych metodą aktywnej termografii**

Dr inż. Sławomir GRYŚ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2003 r. Pracuje na stanowisku adiunkta w Instytucie Elektroniki i Systemów Sterowania Politechniki Częstochowskiej. Jest autorem podręcznika, współautorem patentu, monografii i kilkudziesięciu artykułów publikowanych w czasopiśmie krajowych, zagranicznych oraz materiałach konferencyjnych. Jego zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia metrologiczne, elektronikę i nauki informatyczne.

e-mail: grys@el.pcz.czest.pl



Prof. dr hab. inż. Waldemar MINKINA

Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1983 r., doktora habilitowanego w 1995 r., tytuł profesora nauk technicznych w 2006 r. Jest autorem i współautorem 6 monografii z metrologii w tym: Minkina W., Dudzik S.: „Infrared thermography – errors and uncertainties” John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2009 r., opublikowanej w prestiżowym wydawnictwie. Ponadto jest autorem lub współautorem 120 publikacji oraz 7 patentów. Specjalizuje się w problematyce termometrii, termografii komputerowej oraz komputerowych systemów pomiarowych.

e-mail: minkina@el.pcz.czest.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania „kontrastu filtrowanego” do wykrywania i charakteryzacji defektów w materiale metodą aktywnej termografii. Do wyznaczenia „kontrastu filtrowanego” nie jest wymagana znajomość obszaru referencyjnego bez defektu oraz jest mniej wrażliwy na niejednorodność napromienienia powierzchni materiału w porównaniu do klasycznych rodzajów kontrastów cieplnych. Eksperyment przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w kamerę ThermoCAM PM 595 oraz kartę rejestracji danych. Oszacowano wpływ parametrów cieplnych badanego materiału i defektu oraz parametru filtru wygładzającego, niezbędnego do implementacji idei kontrastu filtrowanego, na niepewność estymacji głębokości defektów. W analizie zastosowano zasadę propagacji rozkładów prawdopodobieństwa i symulację Monte Carlo.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, aktywna termografia, charakteryzacja defektów, propagacja rozkładów, symulacja Monte Carlo.

Filtered contrast in defect characterization using active infrared thermography**Abstract**

The paper presents the possibility of the use of new kind of thermal contrast in subsurface defects detection [1,3-6]. It allows detecting defects taking advantages [2,6] of an active thermography – Table 1. In opposition to known definitions of the thermal contrast [1], a defect-free area is no necessary and this contrast is less sensitive to nonuniformity of heat disposal to the material surface. The measurements were performed on a setup presented in Fig. 1 [7]. A special sample of Plexiglas was made with bottom-holes simulating defects – Figs 2 and 3. The material parameters - Table 2, were taken from [1]. The step heating was chosen as heat excitation. Exemplary, raw and processed thermograms for symmetrical and asymmetrical heat disposal are shown in Figs 4 and 5. The influence of the parameter B of the smoothing filter, thermal parameters of the tested material and defect on expanded uncertainty of determination of defect depth were analyzed. Due to significant complexity of the model the numerical method, i.e. Monte Carlo simulation was applied. According to this procedure [9,10] an expectation and 95% coverage intervals are presented in Tab 4 and 5. In the Table 6 there is fixed if the 95% coverage interval contains the true value of depth. For the inspected sample, $B=10$, and assumed accuracy of evaluation of diffusivity [8] of Plexiglas, the accuracy of the method does not exceed 20%. The optimal value of B corresponds to the diameter of defects. This aspect will be examined in further work.

Keywords: nondestructive testing, active thermography, defect detection and characterization, propagation of distributions, Monte Carlo simulation.

1. Wprowadzenie

Ciągle rosnące wymagania współczesnego rynku pociągają za sobą konieczność zapewnienia bardzo wysokiej niezawodności wytwarzanych dóbr konsumenckich. Bardzo rygorystyczne wymagania stawia się tym działaniom ludzkim, gdzie potencjalna

awaria niesie za sobą ryzyko ofiar w ludziach, zniszczenia infrastruktury lub zanieczyszczenia środowiska naturalnego, np. przemysł komunikacyjny, budownictwo wysokościowe, przemysł chemiczny, energetyka jądrowa. Zapewnieniu wysokiej jakości produktów i utrzymaniu ich funkcjonalności w długim okresie użytkowania z zachowaniem wymaganego poziomu bezpieczeństwa służą różne procedury inspekcyjne, gdzie najlepsze efekty przynosi łączenie wiedzy doświadczonego eksperta z możliwościami nowych technologii i metod diagnostycznych. Jeśli ocena stanu urządzenia, budowli czy instalacji musi odbyć się bezinwazyjnie lub bez zatrzymania procesu produkcyjnego, sięga się po metody badań nieniszczących (ang. nondestructive testing methods – NDT). Badania nieniszczące charakteryzują się użyciem nieinwazyjnych metod do określania jednorodności, integralności, stanu lub ilościowej oceny obiektu bez zmiany jego struktury i właściwości [1]. Jedną z nowszych metod diagnostycznych jest metoda termowizyjna (ang. thermographic nondestructive testing method – TNDT), która nie jest stosowana tak powszechnie (przynajmniej w Polsce) jak inne, klasyczne metody badań nieniszczących, takie jak: metoda radiologiczna, ultradźwiękowa, penetracyjna czy prądów wirowych. Metodę termograficzną można podzielić na pasywną i aktywną. W przeciwieństwie do termografii pasywnej, do realizacji termografii aktywnej jest wymagane dostarczenie energii do badanego obiektu i rejestracji odpowiedzi na tak powstałe wymuszenie cieplne.

2. Aktywna termografia w badaniach nieniszczących

W aktywnej termografii stosuje się napromienienie obiektu, a niekiedy jego podgrzanie lub przemianę energetyczną energii mechanicznej (drżania) na energię wewnętrzną. Zależnie od możliwości technicznych, grubości testowanego obiektu, „fale termiczne” są generowane i wykrywane po tej samej stronie obiektu, lub źródło wymuszenia i detektor w postaci kamery termowizyjnej znajdują się po przeciwnych stronach. Biorąc pod uwagę kształt wymuszenia rozróżnia się metodę impulsową, skokową lub lock-in [2-5]. Energię do badanego obiektu dostarcza się z lamp wyładowczych lub promienników ciepła. Aktywna termografia stwarza możliwości wizualizacji zmian w czasie pola temperatury powierzchni badanego obiektu, będącej odpowiedzią na wymuszenie energetyczne. Dzięki wykorzystaniu nowych materiałów do konstrukcji kamer termowizyjnych, rejestracji, technik przetwarzania obrazów, archiwizacji danych i wnioskowania otrzymuje się nowe, wydajne narzędzie diagnostyczne. Typowy obszar zastosowań to, m.in. [2, 6]:

- badanie stanu połączeń spawanych, zgrzewanych, lutowanych, nitowych, klejonych i śrubowych,
- inspekcja poszycia statków wodnych i powietrznych,
- inspekcja jakości rur z tworzyw sztucznych,

- charakteryzacja ilościowa podpowierzchniowych defektów, np. korozji metali, pęknięć, rozwarstwień, uszkodzeń kompozytów na skutek uderzenia mechanicznego,
 - inspekcja stanu rozwarstwienia malowideł ściennych.
- Metoda termograficzna posiada szereg zalet i ograniczeń, z których najbardziej istotne zostały przedstawione w tabeli 1.

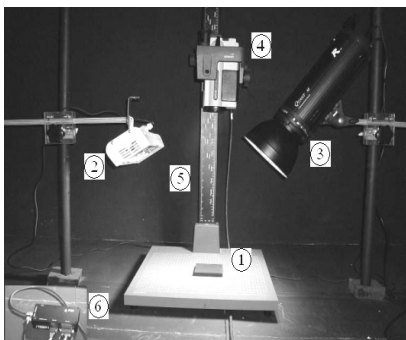
Tab. 1. Zalety i wady metody termowizyjnej
Tab. 1. Advantages and disadvantages of the TNDT

Zalety	Wady
krótki czas badania	znaczny koszt aparatury
bezpieczeństwo personelu i aparatury	konieczność wytworzenia jednorodnego i wysoko-energetycznego pobudzenia cieplnego obiektu
brak kontaktu z obiektem	straty ciepła (konwekcja, radiacja) wpływają na wynik oceny ilościowej
relatywnie prosta ocena wyników badania	wykrywalność defektów uzależniona od stopnia zróżnicowania właściwości termicznych materiałów
późniejsza analiza wyników badania	zdolność do wykrywania wad maleje wraz z głębokością, na jakiej znajduje się defekt
komputerowa archiwizacja wyników badania	wpływ wielu czynników, głównie emisyjności, na błąd pomiaru temperatury

W niniejszym artykule podjęto tematykę wykrywania defektów znajdujących się wewnątrz jednorodnej struktury obiektu oraz wyznaczania głębokości, na której się znajdują. Jest to kontynuacja badań przedstawionych w pracy [7]. Wykrycie na termogramach niejednorodności rozkładu temperatury, niemających uzasadnienia w strukturze i konstrukcji obiektu, jest przesłanką do zakwalifikowania obiektu jako wadliwego, natomiast wiedza o ich rozmiarach, w tym głębokości, ułatwia poszukiwania przyczyn obecności wad materiałowych.

3. Stanowisko badawcze

W niniejszym rozdziale opisano podstawowe cechy stanowiska badawczego do badania właściwości metrologicznych aktywnej termografii w podczerwieni jako metody badań nieniszczących. Widoczne na rys. 1 elementy stanowiska umieszczone są w zamkniętej komorze badawczej, której wewnętrzne ściany pomalowano czarną matową farbą eliminując promieniowanie odbite.

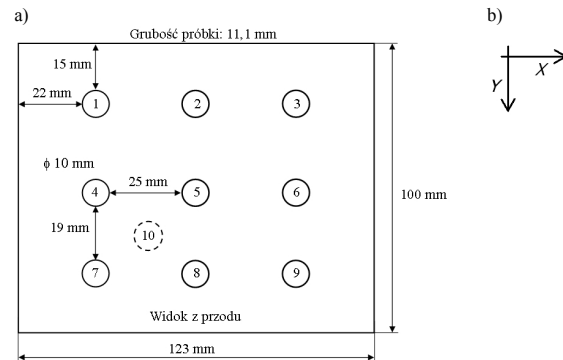


Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1- próbka badanego materiału, 2 – promiennik podczerwieni, 3 – lampa wyladowcza ze zintegrowaną lampą żarową, 4 – kamera termowizyjna ThermoCAM PM595, 5 – statyw, 6 – interfejs szeregowy połączony z kartą rejestracji danych
Fig. 1. Experimental setup: 1 – sample of tested material, 2 – infrared radiator, 3 – flash lamp with integrated incandescent lamp, 4 – infrared ThermoCAM PM595 camera, 5 – camera holder, 6 – serial interface connected to the frame-grabber

Stanowią one źródło wymuszenia cieplnego oraz termowizyjny system do rejestracji pól temperatury. Dane z kamery, za pośrednictwem zewnętrznego modułu interfejsu szeregowego oraz karty do rejestracji termogramów (tzw. frame-grabbera), są wizualizowane w czasie rzeczywistym na komputerze PC. Do rejestracji danych i ich przetwarzania (np. zmiana skali temperatury, wybór palety barw, profil w czasie, eksport do formatu *.mat programu Matlab, i. in.) zastosowano firmowe oprogramowanie ThermoCAM

Researcher Professional 2.9, dla środowiska MS Windows XP. Więcej szczegółów podano w pracy [7].

Do celów badawczych wykonano próbkę testową z pleksiglasu o wymiarach przedstawionych na rys. 2. Aby zwiększyć emisyjność powierzchni próbki została ona pomalowana czarną matową farbą. Od spodniej strony próbki nawiercono otwory o średnicy $\phi 10$ mm imitujące występowanie defektów na różnej głębokości – rys. 2 i tab. 2.



Rys. 2. Geometria badanej próbki materiału, gdzie a) 1-9 – defekty, 10 – obszar referencyjny, b) układ współrzędnych XY

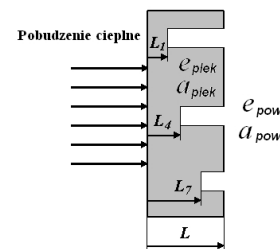
Fig. 2. a) Geometry of tested sample, where: 1-9 – defects, 10 – sound area, b) XY coordinates

Część czołową otworów wyrównano frezem, dzięki czemu defekty mają kształt walca. Wszystkie defekty spełniają warunek wykrycia metodą aktywnej termografii, tj. promień defektu/głębokość defektu ≥ 2 . Przedstawione w tabeli 2 wartości głębokości defektów L_i przyjęto za wartości rzeczywiste (prawdziwe) w analizie ilościowej, przeprowadzonej w dalszej części artykułu.

Tab. 2. Charakterystyka defektów
Tab. 2. Defect characterization

Nr defektu	Głębokość defektu L_i , mm	Promień defektu /głębokość defektu
1	0,8	6,2
2	1,0	5,0
3	1,1	4,5
4	1,3	3,8
5	1,7	2,9
6	2,0	2,5
9	2,1	2,4
7	2,3	2,2
8	2,5	2,0

Widok z boku na przekrój próbki przedstawiono na rys. 3 uwiaczniając przykładowe defekty L_1 , L_4 i L_7 , gdzie e – efuzyjność, $W \cdot s^{1/2} / (m^2 \cdot K)$ oraz a – dyfuzyjność cieplna, m^2/s . Pleksiglas stanowi pierwszą, a powietrze warstwę drugą.



Rys. 3. Dwuwarstwowy model przewodzenia ciepła w próbce, gdzie: L – grubość pierwszej warstwy dla obszarów bez defektu,

Fig. 3. Two-layer model of heat diffusion in a specimen, where: L – thickness of first layer for defect-free sub areas, L_i – thickness of first layer for defect area No. i

4. Wyniki eksperymentu

W eksperymencie zastosowano lampy żarowe, zintegrowane z lampami wyładowczymi, każda o mocy elektrycznej 250 W, będące źródłem wymuszenia skokowego. Umieszczono je po obu stronach próbki wzdłuż osi X, zapewniając symetrię (załączone obie lampy) lub asymetrię (tylko lampa prawa) napromienienia w temperaturze pokojowej, tj. sprzed załączenia lamp, a następnie termogramy w odstępach 2 sekundowych do 120 sekundy od momentu załączenia lamp.

Podstawowym warunkiem wykrywalności wad metodą aktywnej termografii jest konieczność znacznego zróżnicowania właściwości termicznych materiału próbki i defektu. Stosowaną miarą takiego zróżnicowania jest tzw. współczynnik niedopasowania termicznego (ang. thermal mismatch factor), nazywany niekiedy współczynnikiem odbicia ciepłego [6], tu:

$$\Gamma_{plek, pow} = \frac{e_{pow} - e_{plek}}{e_{pow} + e_{plek}} = -0,977 \approx -1 \quad (1)$$

w którym efuzyjność wyznaczana jest wg zależności:

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (2)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m²·K), ρ – gęstość, kg/m³, c_p – ciepło właściwe, J/(kg·K). Wartość Γ jest bliska wartości granicznej -1 , co wskazuje na prawie idealne zróżnicowanie ciepłe. Parametry pleksiglasu i powietrza zaczerpnięto z książki [2]. Rzeczywiste wartości tych parametrów mogą odbiegać od danych katalogowych. Istnieje wówczas możliwość dokonania pomiaru wielkości występujących we wzorze (2), stosując aparat płytowy. W przypadku miękkich materiałów można wykorzystać koncepcję „gorącej sondy” i sztucznych sieci neuronowych, opisaną przykładowo w pracy [8]. Odczytanie przybliżonych wartości parametrów z tablic jest zazwyczaj wystarczające, gdyż wprowadzanie do wzoru (1) wartości efuzyjności pleksiglasu i powietrza ze znacznym błędem δe_{plek} i δe_{pow} wpływa w niewielkim stopniu na wartość współczynnika niedopasowania Γ . Przykładowo, jeśli błędy są na poziomie $\delta e_{plek} = \pm 50\%$ i $\delta e_{pow} = \pm 50\%$, a efuzyjność $e_{plek} = 0,04$ J/(cm²·K·s^{-1/2}) i $e_{pow} = 0,00041$ J/(cm²·K·s^{-1/2}) przyjęte na podstawie [7], to $\delta \Gamma$ wyniesie:

Tab. 3. Błąd względny oszacowania współczynnika Γ
Tab. 3. Relative error of mismatch factor Γ

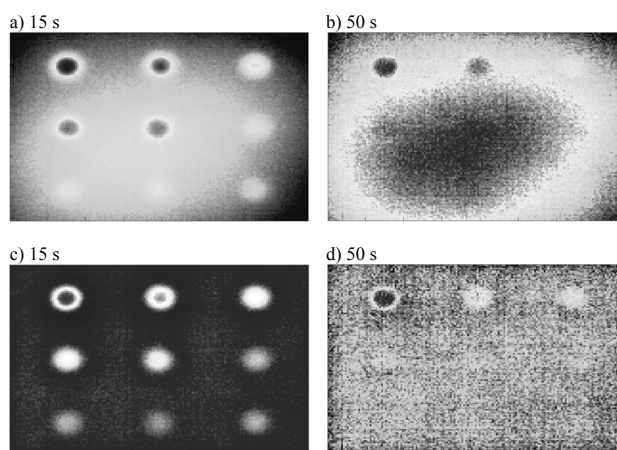
	$\delta e_{pow} = 50\%$ $\delta e_{plek} = 50\%$	$\delta e_{pow} = -50\%$ $\delta e_{plek} = 50\%$	$\delta e_{pow} = 50\%$ $\delta e_{plek} = -50\%$	$\delta e_{pow} = -50\%$ $\delta e_{plek} = -50\%$
$\delta \Gamma, \%$	0	-1,36	+4,19	0

dla wartości granicznych błędów efuzyjności pleksiglasu i powietrza, i w najgorszym przypadku nie przekracza 5%.

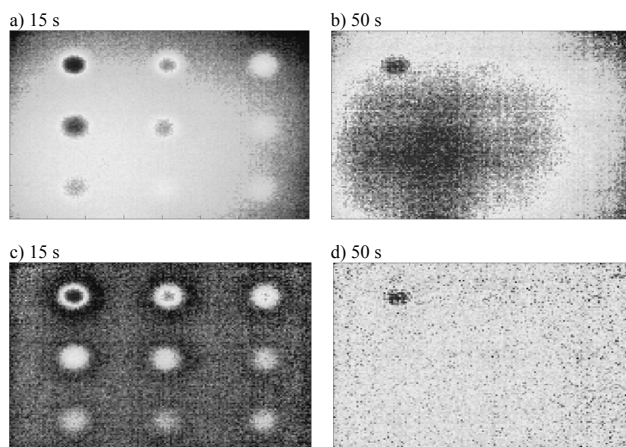
Dzięki dużemu zróżnicowaniu termicznemu, otrzymuje się jednoznaczne rozróżnienie obszarów nad defektami na tle pozostałego obszaru bez defektów jedynie na podstawie informacji zawartych w bieżącym termogramie. Widoczna na rys. 4a,b i 5a,b duża niejednorodność tła, około 10 K, jest spowodowana niejednorodnym napromienieniem powierzchni próbki. Częściową kompensację tego czynnika uzyskuje się stosując technikę kontrastu. W pracy [7] zaproponowano nowy sposób jego wyznaczania, tzw. kontrast filtrowany, którego idea polega na odjęciu termogramu wygładzonego, np. za pomocą 2-D filtru Gaussa, od termogramu oryginalnego (nieprzetworzonego). Filtrację Gaussa przeprowadza się wzdłuż kolumn i wierszy termogramu za pomocą funkcji wagowej:

$$f(i) = \exp \left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{i - i_{max}}{B} \right)^2 \right) \quad (3)$$

dla pikseli przykładowej kolumny lub wiersza o indeksach $i = [1; i_{max}]$, gdzie $i_{max} = 7 \cdot B + 1$, a B jest arbitralnie przyjmowanym parametrem filtru [2]. W wyniku filtracji i odejmowania, widoczne jest na rys. 4c,d i 5c,d wyrównanie temperatury tła, w porównaniu do oryginalnych termogramów z rys. 4a,b i 5a,b, co ułatwia automatyczną segmentację termogramu, na klasy: „defekt”, „brak defektu”.



Rys. 4. Termogramy dla symetrycznego wymuszenia: a, b) nieprzetworzony, c, d) kontrast filtrowany
Fig. 4. Thermograms for symmetric excitation: a, b) raw thermogram, c, d) filtered contrast



Rys. 5. Termogramy dla asymetrycznego wymuszenia (tylko prawa lampa): a-b) nieprzetworzony, c-d) kontrast filtrowany
Fig. 5. Thermograms for asymmetric excitation (only right lamp): a, b) raw thermogram, c, d) filtered contrast

Im dłuższy czas rejestracji, tym defekty są lepiej widoczne, szczególnie na wyrównanym tle temperaturowym. W praktyce, czas rejestracji jest ograniczony dopuszczalną temperaturą, niepowodującą zmiany właściwości badanego materiału lub limitem czasu na przeprowadzenie badania. Do charakteryzacji ilościowej defektów jest wystarczające osiągnięcie przyrostu temperatury rzędu kilkunastu (kilkudziesięciu) stopni. W eksperymencie, maksymalny przyrost temperatury względem temperatury początkowej wystąpił dla symetrycznego wymuszenia, w 120 sekundzie, dla defektu nr 1 i wyniósł 72 K.

5. Niepewność estymacji głębokości defektu

W pracy [7] opisano zastosowanie jednowymiarowego modelu dyfuzji ciepła oraz kontrastu filtrowanego do estymacji głębokości defektów. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu, ww. modelu nie przedstawiono w niniejszym artykule. Podjęto jednak dalsze badania, tzn. próbę oszacowania wpływu wybranych czynników na niepewność tej estymacji. Do analizy zastosowano zasadę propagacji rozkładów prawdopodobieństwa wielkości wejściowych przez model zjawiska. Do otrzymania numerycznej aproksymacji dystrybuanty wielkości wyjściowej i niepewności jej estymacji, użyto symulacji Monte Carlo, jako techniki zalecanej przez [9,10] dla przypadków o dużej złożoności modelu i metody estymacji. Analizę niepewności przeprowadzono dla parametru filtru z zakresu $B=[6;16]$. Przyjęto prostokątny rozkład prawdopodobieństwa wielkości wejściowych. Losowano próbki z przedziału $\Gamma=[-1;-0,9]$, co obejmuje zakres zmienności Γ dla układu pleksiglas-powietrze (tabela 3) i $a_{plek}=[0,225;0,275]\cdot 10^{-6}$ m²/s, co odpowiada $\pm 10\%$ zmienności a_{plek} przyjętej na podstawie [2]. Wyniki dla przypadku asymetrycznego pobudzenia cieplnego przedstawiono w tabelach 4-6, dodatkowo wyróżniając wartości estymaty głębokości najbliższe wartości prawdziwej.

Tab. 4. Estymata głębokości defektu w funkcji parametru B
Tab. 4. Estimate of the defect depth as a function of parameter B

B	Estymata głębokości defektu, mm									
	Defekt nr									
	1	2	3	4	5	6	9	7	8	
6	1,11	1,32	1,55	1,74	2,19	2,57	2,87	2,58	3,00	
7	0,99	1,19	1,39	1,58	1,98	2,34	2,57	2,36	2,73	
8	0,88	1,09	1,28	1,44	1,85	2,20	2,42	2,19	2,59	
9	0,83	1,02	1,20	1,36	1,74	2,07	2,25	2,07	2,43	
10	0,77	0,97	1,14	1,29	1,66	2,00	2,19	1,98	2,36	
11	0,74	0,94	1,10	1,24	1,60	1,92	2,08	1,90	2,25	
12	0,71	0,91	1,06	1,19	1,56	1,89	2,06	1,85	2,23	
13	0,59	0,79	0,93	1,05	1,40	1,70	1,84	1,66	2,01	
14	0,66	0,87	1,01	1,13	1,48	1,80	1,97	1,75	2,14	
15	0,65	0,86	1,00	1,11	1,46	1,77	1,91	1,72	2,09	
16	0,64	0,85	0,98	1,08	1,44	1,76	1,92	1,68	2,08	

Tab. 5. Przedział dla 95% poziomu ufności w funkcji parametru B
Tab. 5. 95% coverage interval as a function of parameter B

B	Przedział dla 95% poziomu ufności, mm									
	Defekt nr									
	1	2	3	4	5	6	9	7	8	
6	[1,00; 1,23]	[1,19; 1,44]	[1,42; 1,68]	[1,61; 1,88]	[2,04; 2,34]	[2,41; 2,74]	[2,70; 3,06]	[2,41; 2,75]	[2,82; 3,20]	
7	[0,88; 1,10]	[1,07; 1,31]	[1,27; 1,52]	[1,45; 1,71]	[1,84; 2,12]	[2,18; 2,49]	[2,40; 2,73]	[2,20; 2,51]	[2,55; 2,89]	
8	[0,78; 0,99]	[0,97; 1,19]	[1,16; 1,40]	[1,32; 1,57]	[1,71; 1,98]	[2,05; 2,34]	[2,26; 2,58]	[2,04; 2,34]	[2,42; 2,75]	
9	[0,72; 0,93]	[0,92; 1,14]	[1,09; 1,32]	[1,25; 1,48]	[1,61; 1,87]	[1,93; 2,21]	[2,11; 2,40]	[1,93; 2,22]	[2,27; 2,59]	
10	[0,66; 0,88]	[0,86; 1,08]	[1,03; 1,26]	[1,17; 1,41]	[1,53; 1,80]	[1,86; 2,14]	[2,04; 2,34]	[1,84; 2,13]	[2,21; 2,52]	
11	[0,63; 0,84]	[0,83; 1,05]	[0,98; 1,21]	[1,12; 1,36]	[1,47; 1,73]	[1,78; 2,05]	[1,93; 2,21]	[1,76; 2,04]	[2,10; 2,40]	
12	[0,60; 0,81]	[0,80; 1,02]	[0,95; 1,18]	[1,08; 1,31]	[1,43; 1,69]	[1,75; 2,02]	[1,91; 2,20]	[1,71; 1,99]	[2,08; 2,39]	
13	[0,59; 0,80]	[0,79; 1,00]	[0,93; 1,15]	[1,05; 1,28]	[1,40; 1,65]	[1,70; 1,97]	[1,84; 2,12]	[1,66; 1,94]	[2,01; 2,31]	
14	[0,56; 0,77]	[0,76; 0,98]	[0,90; 1,12]	[1,01; 1,24]	[1,36; 1,61]	[1,67; 1,94]	[1,83; 2,11]	[1,62; 1,89]	[1,99; 2,29]	
15	[0,56; 0,76]	[0,76; 0,97]	[0,89; 1,11]	[1,00; 1,23]	[1,34; 1,59]	[1,64; 1,90]	[1,78; 2,05]	[1,58; 1,85]	[1,94; 2,23]	
16	[0,54; 0,74]	[0,74; 0,95]	[0,88; 1,09]	[0,97; 1,19]	[1,32; 1,56]	[1,63; 1,89]	[1,78; 2,05]	[1,56; 1,81]	[1,94; 2,22]	

Tab. 6. Walidacja metody wyznaczania głębokości defektu
Tab. 6. Validation of the method of defect depth determination

B	Rzeczywista głębokość defektu zawiera się w wyznaczonym przedziale ufności (T/N)?									
	Defekt nr									
	1	2	3	4	5	6	9	7	8	
6	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
7	N	N	N	N	N	N	N	T	N	
8	T	T	N	N	N	N	N	T	T	
9	T	T	T	T	T	T	N	N	T	
10	T	T	T	T	T	T	T	N	T	
11	T	T	T	T	T	T	T	N	N	
12	T	T	T	T	N	T	T	N	N	
13	N	T	T	N	N	N	T	N	N	
14	N	N	T	N	N	N	T	N	N	
15	N	N	T	N	N	N	N	N	N	
16	N	N	N	N	N	N	N	N	N	

6. Wnioski

Zadowolające wyniki walidacji metody estymacji głębokości defektu, dla przypadku niesymetrycznego pobudzenia cieplnego, osiągnięto dla $B=[9;12]$. Metodę uznano za efektywną, jeśli dla większości defektów wartość rzeczywista głębokości defektu zawierała się w wyznaczonym przedziale ufności – tabela 6. Najwięcej, tj. 8 z 9, defektów zostało prawidłowo scharakteryzowanych dla $B=10$. Wówczas niedokładność estymacji głębokości defektów, liczona na podstawie ww. przedziału ufności, odniesionego do wartości rzeczywistej, nie przekroczyła 20%. Metoda estymacji głębokości defektów wymagała podania wartości parametru B , którego optymalna wartość jest zależna od wymiarów defektu (tu średnicy) i wpływa na dokładność tej estymacji. Ten aspekt będzie przedmiotem dalszych badań.

7. Literatura

- [1] Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa 2001.
- [2] Maldague X.: Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley&Sons Inc., New York 2001.
- [3] Benitez H., Ibarra-Castanedo C., et.al.: Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography. Infrared Physics & Technology, 51 (2008), 160-167.
- [4] Badghaish A., Fleming D.: Non-destructive inspection of composites using step heating thermography. Journal of Composite Materials, 42 (2008), 1337-1357.
- [5] Gralewicz G., Owczarek G., Więcek B.: Investigations of single and multilayer structures using lock-In thermography - possible applications, JOSE Int. Journal of Occupat. Safety & Ergonomics, 11 (2005), no. 2, 211-215.
- [6] Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [7] Gryś S., Minkina W., Chudzik S.: Detekcja wad powierzchniowych na podstawie analizy serii termogramów. Mat. XVII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica Górka, 20-23 września 2009, 27-35.
- [8] Chudzik S., Gryś S., Minkina W.: The application of the artificial neural network and hot probe method in thermal parameters determination of heat insulation materials. Part 1 – thermal model consideration and Part 2 – application of the neural network. Proc. of IEEE ICIT'2009, Melbourne.
- [9] Minkina W., Dudzik S.: Infrared thermography – errors and uncertainties. John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2009.
- [10] Fotowicz P.: Wyrażanie niepewności pomiaru w świetle najnowszych propozycji międzynarodowego biura miar. Mat. IV Konferencja Podstawowe Problemy Metrologii, Ustroń, 8-11 maja 2005, 37-44.