

Waldemar ŚWIDERSKI¹, Paweł HŁOSTA¹, Marek SZUDROWICZ²

¹ WOJSKOWY INSTYTUT TECHNICZNY UZBROJENIA, ul. Prymasa Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka

² WOJSKOWY INSTYTUT TECHNIKI PANCERNEJ I SAMOCHODOWEJ, ul. Okuniewska 1, 05-070 Sulejówek

Badania nieniszczące wielowarstwowych kompozytów z włókna węglowego metodą termografii impulsowej w podczerwieni

Dr inż. Waldemar ŚWIDERSKI

Absolwent Wydziału Elektro-Mechanicznego Uzbrojenia Wojskowej Akademii Technicznej (1978). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2000 (budowa i eksploatacja maszyn). Od 1980 roku jest pracownikiem Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia. Zainteresowania naukowe to badania nieniszczące z zastosowaniem termografii w podczerwieni oraz zastosowania techniki podczerwieni w aplikacjach militarnych. Autor i współautor ponad 130 publikacji oraz 8 patentów.



e-mail: waldemar.swiderski@wp.pl

Mgr inż. Paweł HŁOSTA

Absolwent Wydziału Elektroniki, Wojskowej Akademii Technicznej (1999). Od 1999 jest pracownikiem Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia. Kierownik pracowni elektronicznej. Projektuje i programuje moduły układów elektronicznych systemów szkolno – treningowych. Zainteresowania naukowe to nieniszczące badania z wykorzystaniem kamer pracujących w podczerwieni.



e-mail: phpph@wp.pl

Dr inż. Marek SZUDROWICZ

Absolwent Wydziału Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej (1994). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2001. Od 1995 roku jest pracownikiem Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej. Zainteresowania naukowe to konstruowanie i badania lekkich panczerzy kompozytowych do ochrony załóg pojazdów wojskowych.



e-mail: mszudrow@witpis.eu

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę związaną z wykrywaniem bardzo cienkich defektów w postaci wtrąceń obcych materiałów, delaminacji i ubytków materiałowych w wielowarstwowych materiałach kompozytowych na bazie bardzo wytrzymałych włókien węglowych stosowanych w lekkich osłonach balistycznych. Zainteresowanie badaniami nieniszczącymi tego typu materiałów spowodowane jest powszechnym ich stosowaniem w aplikacjach militarnych chroniących załogi przed odłamkami oraz ostrzałem pociskami małokalibrowymi. Identyfikacja wielkości wewnętrznej strefy zniszczenia kompozytu wymaga zastosowania nieniszczących metod diagnostycznych. Biorąc pod uwagę, że lekkie osłony balistyczne mają najczęściej grubość od kilku do kilkunastu milimetrów oraz są wykonane z materiałów, których parametry termofizyczne różnią się zdecydowanie od parametrów, jakie mają potencjalne defekty, które mogą występować w tych materiałach, do wykrywania defektów zastosowano metodę termografii impulsowej w podczerwieni. W artykule przedstawiono zarówno wyniki modelowania wykrywania defektów jak i wyniki badań eksperymentalnych. Do przetwarzania sekwencji źródłowej w badaniach eksperymentalnych zastosowano kilka algorytmów stosowanych w impulsowych termograficznych badaniach nieniszczących takich jak: normalizacja, dopasowanie wielomianu, impulsowo fazowa termografia, analiza głównych składowych i analiza korelacji. Dokonano również oceny ich skuteczności.

Słowa kluczowe: termografia impulsowa w podczerwieni, materiały kompozytowe, włókno węglowe.

Nondestructive testing of multi-layer composites made of carbon fibre by pulsed IR thermography

Abstract

Presently a lot of designs of light armours are based mainly on the multi-layer composite materials. Thanks to these materials it was possible to achieve the highest levels of ballistic resistance of specific armour at limited weight. The weight (area density) and the efficacy have direct influence on the value of combat ability of equipment and soldiers [1].

One of the basic types of reinforcement materials in composites are carbon fibres. They have many technical applications including light ballistic covers where they are most often used as multi-layer composite materials constituting a structure made of several interconnected layers or many layers of carbon fibres, or in combination with other materials. This work presents modern approach to detection of defects in composite structures of military applications. In these structures different failure modes can occur during the service life. Failure modes are connected with the cycling fatigue loads, impact damage and environmental conditions. Moreover, during the manufacturing process different defects occur, affecting the material strength. There are following typical failure modes and defects: delaminations, disbands, foreign object inclusions, porosity. To get information about the occurrence of discontinuity in objects (defects) without disarranging their macro and microstructure and causing changes of their functional properties, the nondestructive testing methods are used. IR thermography is one of many techniques used to "see the unseen" and IR thermography methods are positively verified for detecting these types of defects [2]. Recently these methods have benefited from the development of computer image processing and imager systems having higher temperature resolution, which makes these methods appear much more effective for non-destructive testing. The experimental results obtained at testing samples of composite material were processed by applying the algorithms of Normalization, Pulse Phase Thermography, Polynomial Fitting, Principal Component Analysis (PCA) and Correlation Analysis. In this paper both modelling (Figs. 1 and 2, Table 1) and experimental (Figs. 3-6) results illustrating advantages and limitations of IR thermography for inspecting composite materials are presented. It is shown in the paper that pulsed thermography is an interesting method for detection of destruction area in composite armours made of a multi-layer carbon-fibre laminate. In the case of the pulsed method it is necessary to use algorithm analysis of thermograms to detect defects. It allows precise analysis of the tested structure of composites, but is usually time-consuming.

Keywords: pulsed IR thermography, composite materials, carbon fibre.

1. Wstęp

Materiały kompozytowe są coraz częściej stosowane do konstruowania lekkich osłon balistycznych. Zainteresowanie lekkimi osłonami balistycznymi wynika z zagrożeń, na jakie narażone są oddziały wojskowe biorące udział w misjach stabilizacyjnych. Wyposażone są one z reguły w pojazdy samochodowe, które są narażone na ostrzał z broni małokalibrowej oraz eksplozję min. Niezbędne jest więc skuteczne zabezpieczenie tych pojazdów, które zapewni odpowiedni poziom bezpieczeństwa ich załóg [1]. Materiały kompozytowe mają doskonałe parametry mechaniczne i wytrzymałościowe przy małej gęstości. Z jednoczesnym występowaniem tych cech mamy do czynienia w zasadzie tylko w przypadku kompozytów, stąd gwałtownie rosnące w ostatnich latach ich stosowanie w konstrukcjach lekkich osłon balistycznych, dla których cechy te mają pierwszorzędne znaczenie.

Jedną z podstawowych grup materiałów zbrojących w materiałach kompozytowych stanowią włókna węglowe odkryte jeszcze w XIX wieku [3]. Mają one liczne zastosowania techniczne m.in. w lekkich osłonach balistycznych, w których najczęściej występują jako materiały kompozytowe warstwowe stanowiąc strukturę złożoną z połączonych ze sobą kilku lub wielu warstw włókien węglowych lub w połączeniu z innymi materiałami.

Biorąc pod uwagę, że lekkie osłony balistyczne mają najczęściej grubość od kilku do kilkunastu milimetrów oraz są wykonane z materiałów, których parametry termofizyczne różnią się zdecydowanie od parametrów, jakie mają potencjalne defekty, które mogą występować w tych materiałach, badania nieniszczące metodami termograficznymi mogą być skuteczne w wykrywaniu w nich defektów.

W celu sprawdzenia skuteczności wykrywania defektów w wielowarstwowych kompozytach węglowych zastosowano jedną z głównych metod aktywnych badań termograficznych - termografię impulsową (*Pulsed Thermography - PT*) [2].

Ogólnym kryterium porównania różnych procedur badań termograficznych jest stosunek sygnał/szum [1], który określa się jako

$$S = \frac{\bar{T}_d - \bar{T}_{nd}}{\sigma_{nd}} \quad (1)$$

gdzie: \bar{T}_d , \bar{T}_{nd} - odpowiednio średnie temperatury strefy z defektem i bez defektu, σ_{nd} - standardowe odchylenie temperatury w strefie bez defektu.

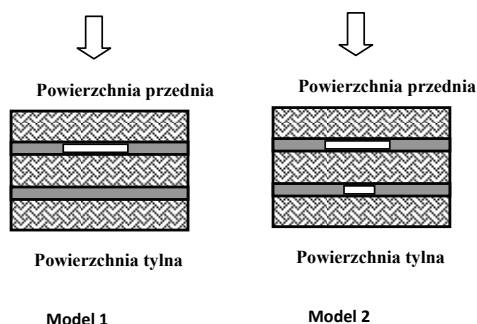
Rozkład szumu zmienia się w czasie, dlatego maksymalna wartość S może wystąpić w momencie w ogólnym przypadku nie pokrywającym się z maksimum $\Delta T(t)$ lub kontrastem $C = \Delta T(t)/T(t)$ [4]. $\Delta T(t)$ - jest różnicą między wartością maksymalną temperatury w strefie powierzchni próbki nad defektem, a wybranym miejscem w strefie bez defektu.

W artykule stosunek sygnał/szum został zastosowany do porównania różnych procedur zastosowanych do analizy termogramów źródłowych w analizie wyników badań eksperymentalnych.

2. Modelowanie wykrywania defektów

Wyniki obliczeń dla numerycznych modeli defektów identyfikowanych w nieniszczących badaniach termicznych są pomocne przy ustaleniu warunków badań rzeczywistych obiektów, wyboru najskuteczniejszej metody w termograficznych badaniach aktywnych, określeniu wstępnych parametrów źródła pobudzenia cieplnego oraz określeniu parametrów ukrytych defektów możliwych do wykrycia [5].

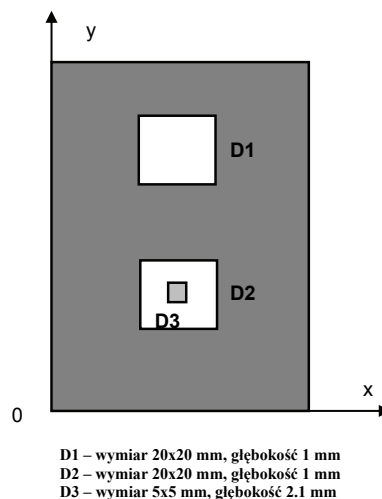
Do wyznaczenia rozkładów temperatury w wielowarstwowych próbkach kompozytów z włókna węglowego zastosowano oprogramowanie ThermoCalc-6LTM. Analizowane próbki kompozytu z defektami przedstawione są na rys. 1.



Rys. 1. Modele
Fig. 1. Thermal NDT models

W programie ThermoCalc-6LTM rozwiązywane są równania przewodnictwa ciepła przy zastosowaniu numerycznej metody elementów skończonych [6]. W ThermoCalc-6LTM zastosowano unikalny algorytm, dzięki któremu możliwe jest modelowanie bardzo cienkich defektów w grubych materiałach, bez utraty dokładności obliczeniowej. W programie zakłada się, że zarówno badana próbka jak i podpowierzchniowe defekty mają kształt równoległościaków. Ogrzewanie lub chłodzenie za pomocą zewnętrznego impulsu „ciepła” dokonywane jest po stronie powierzchni przedniej próbki. Zakłada się, że strumień ciepła po tej stronie jest jednorodny lub rozkład jego gęstości w przekrojach x i y opisuje funkcja Gaussa. W drugim przypadku punkt maksymalnej gęstości strumienia może być lokowany w dowolnym miejscu powierzchni nagrzewanej. Obok stymulowanego grzania lub chłodzenia, powierzchnia czółowa oraz tylna, zgodnie z prawem Newtona podlegają chłodzeniu (a w procesie uczestniczy także wymiana ciepła na drodze konwekcji oraz promieniowania). W tym celu wprowadzone są odpowiednie współczynniki przejmowania ciepła h . Parametry cieplne próbki i defektów mogą być określane niezależnie we wszystkich trzech płaszczyznach przestrzeni, dzięki czemu elementy te cechować może pełna anizotropowość. W modelu przyjęto, że boczne powierzchnie próbki są izolowane adiabatycznie. Natomiast ciągłość temperatury jest zachowana pomiędzy granicami warstw próbki oraz pomiędzy defektami i ich otoczeniem. W programie uwzględniono defekty pojemnościowe. Oznacza to, że inaczej niż w wielu innych modelach stosowanych w badaniach nieniszczących, w obliczeniach uwzględniane są zarówno dyfuzyjności jak i przewodnictwa cieplne defektów. Dzięki temu możliwy jest dokładniejszy opis zjawisk cieplnych związanych z defektem i jego otoczeniem.

Na rys. 2 przedstawione jest rozmieszczenie defektów w analizowanej za pomocą oprogramowania ThermoCalc-6LTM próbce kompozytu. Celem przeprowadzonej symulacji jest określenie wstępnych parametrów źródła pobudzenia cieplnego przy których jest możliwe wykrycie przewidywanych defektów w badanym materiale kompozytowym.



Rys. 2. Rozmieszczenie defektów w ThermoCalc-6L
Fig. 2. Location of defects in ThermoCalc-6L

Analizowana była próbka kompozytu węglowego składająca się z trzech warstw tkaniny z włókien węglowych (o grubości 1 mm) połączonych warstwami żywicy epoksydowej (o grubości 0,1 mm - rys. 1). Dwa rodzaje defektów były symulowane: rozwarstwienie wypełnione powietrzem i wtrącenie obcego materiału do kompozytu w postaci folii aluminiowej. Defekty były umieszczone w warstwie żywicy łączącej warstwy tkaniny z włókien węglowych. Grubość defektów nie przekraczała 0,1 mm. Kompozyt był ogrzewany z jednej strony impulsem cieplnym, a zmiany pola temperatury były monitorowane zarówno na ogrzewanej jak i przeciwnej powierzchni.

Do analizy przyjęto następujące parametry cieplne materiałów:

tkanina z włókna węglowego

- przewodność cieplna prostopadle do włókien

$$\lambda_{\perp} = 0,64 W / (m \cdot K)$$

- przewodność cieplna równoległe do włókien

$$\lambda_{\parallel} = 1,28 W / (m \cdot K)$$

- gęstość

$$\rho = 1500 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- pojemność cieplna

$$c = 846 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

- współczynnik dyfuzyjności prostopadle do włókien

$$\alpha_{\perp} = 0,418 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

- współczynnik dyfuzyjności równoległe do włókien

$$\alpha_{\parallel} = 1,84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}^2$$

żywica epoksydowa

- przewodność cieplna

$$\lambda = 0,21 W / (m \cdot K)$$

- gęstość

$$\rho = 1166 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- pojemność cieplna

$$c = 1190 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

- współczynnik dyfuzyjności

$$\alpha = 0,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

powietrze

- przewodność cieplna (dla powietrza w cienkich warstwach [7])

$$\lambda = 0,07 W / (m \cdot K)$$

- gęstość

$$\rho = 1,2 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- pojemność cieplna

$$C = 1005 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

- współczynnik dyfuzyjności

$$\alpha = 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

folia aluminiowa

- przewodność cieplna

$$\lambda = 177 W / (m \cdot K)$$

- gęstość

$$\rho = 2770 \text{ kg} / \text{m}^3$$

- pojemność cieplna

$$c = 875 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

- współczynnik dyfuzyjności

$$\alpha = 73 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$$

W Modelu 1 defekt (wypełniony powietrzem lub z folii aluminiowej) umieszczony był na głębokości 1 mm pod nagrzewaną powierzchnią próbki. Wymiary defektu - powierzchnia 20x20 mm, a grubość 0,1 mm. Dwa defekty (wypełniony powietrzem lub z folii aluminiowej) w Modelu 2 umieszczone były jeden pod drugim i znajdowały się na głębokości 1 mm oraz 2,1 mm. Wymiary defektów - powierzchnia większego 20x20mm, a mniejszego 5x5mm. Oba defekty miały grubość 0,1 mm. Obliczone optymalne parametry wykrycia tych defektów podane są w tabelicy 1.

Tab. 1. Zakładane parametry wykrycia defektów na przedniej powierzchni ($t_R=0,01$ s; $Q=3 \cdot 10^5$ W/m²)

Tab. 1. Expected detection parameters of defects in the front-surface ($t_R=0,01$ s; $Q=3 \cdot 10^5$ W/m²)

Defekt	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	τ_m, s	C, %
D1 – wypełniony powietrzem	0,29	3,45	9
D2+D3 – wypełnione powietrzem	0,34	3,53	8
D1 – folia aluminiowa	-0,51	1,67	-11
D2+D3 – folia aluminiowa	-0,58	1,78	-15

Ujemne wartości ΔT dla defektów z folii aluminiowej świadczą o tym, że mamy do czynienia w tym przypadku z tzw. defektami pojemnościowymi o lepszych parametrach cieplnych w porównaniu z zasadniczym materiałem próbki i wystąpił chwilowy spadek sygnału temperatury na powierzchni próbki nad defektem.

Przedstawione w tabelicy 1 parametry wykrycia defektów (impuls cieplny o gęstości energii $Q=3 \cdot 10^5$ W/m² i czasie trwania $t_R=0,01$ s) spełniają przyjęte założenia, że:

- sygnał temperatury nad defektami musi przewyższać rozdzielczość temperaturową użytej kamery termowizyjnej

$$\Delta T > 0,02^\circ\text{C};$$

- bieżący kontrast temperatury musi przewyższać poziom szumów

$$|C| > 2\%.$$

3. Badania eksperymentalne

W badaniach eksperymentalnych zastosowano metodę termografii impulsowej. Termografia impulsowa jest jedną z najpopularniejszych obecnie metod stosowanych w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych. Badania tego rodzaju polegają na zastosowaniu lampy, lasera itp. do generowania impulsu (lub serii impulsów) wymuszenia cieplnego, który trwa od kilku milisekund dla materiałów o dużej przewodności cieplnej (np. metale) do kilku sekund w przypadku materiałów o małej przewodności. Można również użyć impulsu schładzającego powierzchnię badanego obiektu (np. strumień zimnego powietrza, ciekłego azotu itp.). Termografia impulsowa może być realizowana zarówno metodą odbiciową jak i transmisyjną. Metoda odbiciowa, nazywana również jednostronną, polega na tym, że źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdują się po tej samej stronie badanego obiektu. Metoda transmisyjna, nazywana również dwustronną, polega na tym, że źródło stymulacji cieplnej i urządzenie do rejestracji temperatury znajdują się po przeciwnych stronach badanego obiektu. Zarówno w jednej jak i drugiej metodzie rejestrowana jest sekwencja obrazów (termogramów) z jednakowym odstępem czasu między obrazami. Po wyłączeniu źródła promieniowania obiekt schładza się do temperatury otoczenia. W fazie stygnięcia wyznaczany jest rozkład temperatury na powierzchni badanego obiektu, który poddawany jest analizie. W zależności od parametrów cieplnych badanego materiału oraz występujących w nim ukrytych pod powierzchnią defektów, strefy o wyższej lub niższej temperaturze na powierzchni będą wskazywały obszary, w których mogą występować defekty materiału. Często do wskazania obszarów z defektami trzeba zastosować specjalne techniki przetwarzania termogramów.

Przebadano cztery próbki wielowarstwowego kompozytu wykonanego z połączonych żywicą epoksydową warstw tkaniny z włókna węglowego. Próbki o wymiarach 100x100 mm miały różną grubość. W pierwszej próbce o grubości 3,2 mm składającej się z 3 warstw tkaniny i dwóch warstw żywicy w środkowej warstwie tkaniny wprowadzono defekt (D4) w postaci przecięcia i usunięcia kilku włókien węglowych.

W pozostałych próbkach jako defekty zastosowano wtrącone ciała wykonane z materiałów które występują jako materiały konstrukcyjne amunicji: aluminium i mosiądz. W próbce drugiej o grubości 4,2 mm umieszczono dwa defekty (D5 i D6) wykonane z folii aluminiowej o grubości 0,1 mm i różnych wymiarach 5x5 mm i 20x20 mm. Symulowały one położenie jednego defektu nad drugim (D5 na głębokości 1 mm, a D6 na głębokości 3,1 mm).

W trzeciej próbce o grubości 2,1 mm wykonanej z dwóch warstw tkaniny węglowej połączonych żywicą epoksydową umieszczono w warstwie żywicy defekt (D7) o wymiarach 20x20 mm i grubości 0,1 mm wykonany z folii teflonowej symulujący rozwarstwienie kompozytu.

W czwartej próbce o grubości 4,5 mm na głębokości 2 mm umieszczono defekt (D8) w postaci płytki wykonanej z mosiądzu o wymiarach 20x20mm i grubości 0,1 mm.

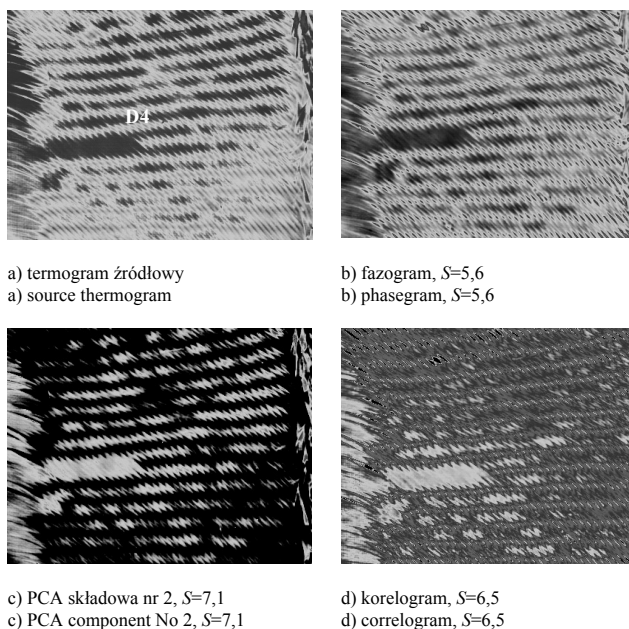
Próbki przebadano stosując metodę termografii impulsowej zarówno stosując procedurę odbiciową jak i transmisyjną. Jako źródło ciepła użyto lampy błyskowej, która generowała impuls cieplny o gęstości energii padającej na próbkę $Q = 3 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ i czasie trwania $t_f = 0,01 \text{ s}$. Do rejestracji zmian pola temperatury na powierzchni próbek użyto kamery termowizyjnej SC 7600 (rozdzielczość obrazu 640x521 pikseli, NETD < 20 mK) rejestrując sekwencję 1000 termogramów z częstotliwością 100 Hz.

Do przetwarzania sekwencji źródłowych termogramów w celu wydobycia informacji o podpowierzchniowych defektach zastosowano różne typy analizy takie jak: normalizacja, dopasowanie wielomianu, impulsowo fazowa termografia, analiza głównych składowych i analiza korelacji.

W badaniach termograficznych termin „normalizacja” oznacza działanie matematyczne dzielenia termogramów w celu stłumienia

efektu nierównomiernego nagrzewania. Polega na dzieleniu wszystkich termogramów z sekwencji przez wybrane zobrazowanie, które nazywa się „normalizującym”. W celu tłumienia szumu wysokoczęstotliwościowego stosowana jest aproksymacja zmiany temperatury w czasie np. wielomianowa. W termografii impulsowo-fazowej zarejestrowana w trakcie pomiarów sekwencja termogramów jest poddana obróbce z użyciem przekształcenia Fouriera. Do analizy zastosowano również metody statystyczne analizę głównych składowych (PCA) i analizę korelacji. W analizie głównych składowych wykorzystuje się metodę dekompozycji do wydobycia przestrzennej i czasowej informacji z macierzy danych termograficznych. Trójwymiarową macierz (sekwencję zarejestrowanych termogramów) przekształca się w dwuwymiarową, w której wartości czasu rozmieszczone są w kolumnach, a przestrzenne dane w wierszach. Następnie dwuwymiarową macierz poddaje się dekompozycji i wynikowa macierz może być znów przedstawiona w postaci sekwencji zobrazowań. Analiza korelacji jest metodą statystyczną pozwalającą badać związek między dwoma zbiorami zmiennych, w przypadku termografii czasu i temperatury. W analizie termogramów przedstawiono również zobrazowanie w postaci maksigramu. Maksigram jest „sztucznym” zobrazowaniem powstałym z rozkładu maksymalnych wartości temperatury z sekwencji zarejestrowanych termogramów, który pokazuje strukturalne niejednorodności obiektu w stosunku do wybranego wzorca.

Na rys. 3 przedstawiono wybrane wyniki wykrycia defektu D4 w próbce pierwszej metodą odbiciową. Na załączonych termogramach wyraźnie widać, że defekt został wykryty.

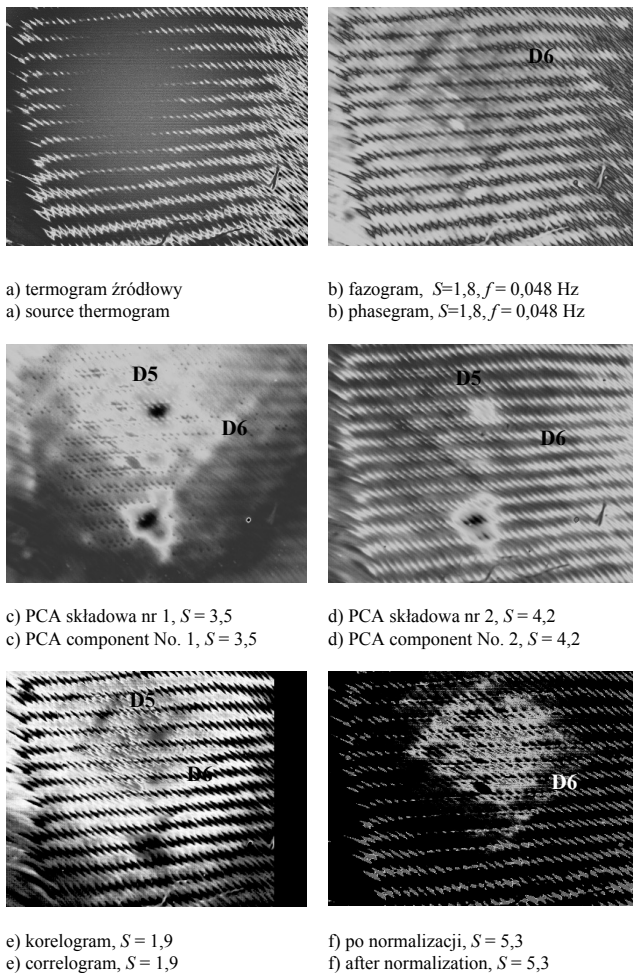


Rys. 3. Wyniki badań próbki pierwszej – metoda odbiciowa
Fig. 3. Results of first sample tests – reflection mode

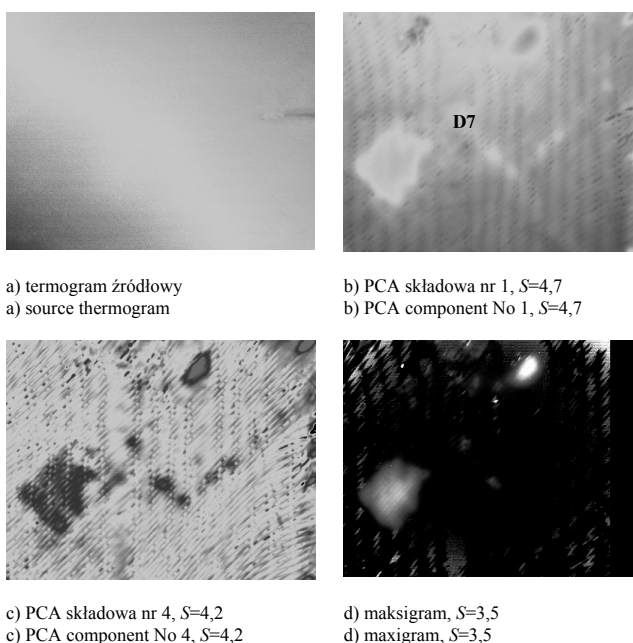
Rys. 4 przedstawia wyniki wykrycia dwóch defektów (D5 i D6) w drugiej próbce. Wyraźnie widać na rys. 4c), 4d) i 4e), że oba defekty są możliwe do wykrycia przez zastosowanie algorytmów do analizy termogramów takich jak analiza głównych składowych i korelogram.

Jak pokazano na rys. 5 wszystkie użyte metody analizy termogramów umożliwiają wykrycie defektu D7.

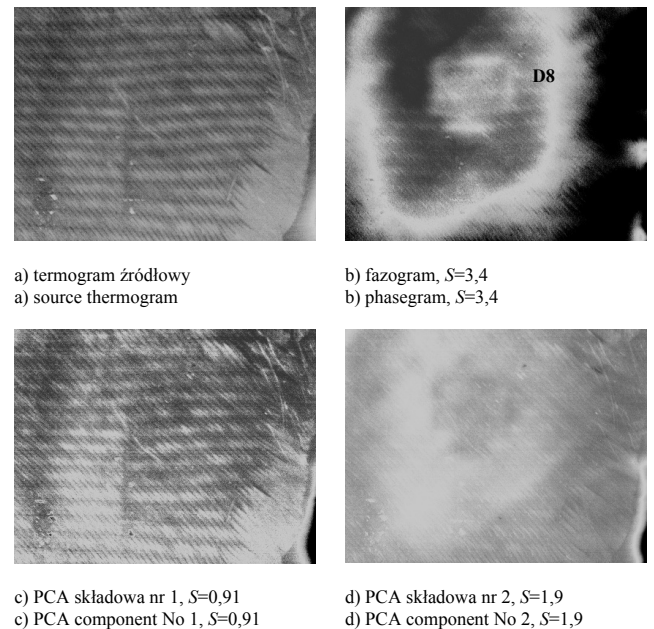
Wyniki z badania próbki czwartej pokazane na rys. 6 wskazują, że najbardziej efektywne metody analizy do wykrycia defektu D8 to analiza fazy rys. 4b i druga składowa analizy głównych składowych rys. 4d).



Rys. 4. Wyniki badania kompozytu z włókna węglowego metodą termografii impulsowej (jeden defekt pod drugim) – metoda odbiciowa
Fig. 4. Results of carbon-fibre composite test for the pulsed thermography method (one defect under second defect) – reflection mode



Rys. 5. Wyniki badania próbki trzeciej – metoda odbiciowa
Fig. 5. Results of third sample tests – reflection mode



Rys. 6. Wyniki badania czwartej próbki – metoda transmisyjna
Fig. 6. Results of fourth sample tests – transmission mode

4. Wnioski

- 1) Rozbieżności, które występują między wynikami otrzymanymi z symulacji komputerowej a wynikami eksperymentalnymi, mogą być na skutek nierównomiernego nagrzewania badanej powierzchni próbek oraz różnic między parametrami cieplnymi materiałów, które do modelowania zostały przyjęte na podstawie danych literaturowych, a rzeczywistymi występującymi w badanych próbkach.
- 2) Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że są obecnie techniczne możliwości wykrywania bardzo cienkich defektów w kompozytach z włókna węglowego za pomocą metody termografii impulsowej w podczerwieni.
- 3) Wykrycie obu defektów znajdujących się jeden pod drugim udało się jedynie w przypadku kiedy mniejszy defekt znajdował się nad większym.

5. Literatura

- [1] Świdzki W.: Metody termograficzne w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych. Monografia, WITU, Zielonka 2010.
- [2] Maldague X. P. V.: Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. John Wiley&Sons, Inc. New York, 2001.
- [3] Dobrzański L. A.: Nietalowe materiały inżynierskie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
- [4] Świdzki W., Vavilov V.: Charakterystyka nieciągłości materiałowych w materiałach kompozytowych w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni. PTU, Zielonka, 2010.
- [5] Świdzki W., Chachurski R.: Analiza porównawcza wybranych metod numerycznego modelowania zagadnień nieniszczących badań termicznych materiałów kompozytowych. Biuletyn WAT, Vol. LVIII, Nr 4, 2009.
- [6] User's Manual "ThermoCalc™-6L", Innovation Inc., 2005.
- [7] Vavilov V.: Infra-red non-destructive testing of bonded structures: aspects of theory and practice. Br J NDT (Jul) 1980, pp. 175-183.