

## WYKRYWANIE BARDZO CIENKICH DEFECTÓW W KOMPOZYTACH WARSTWOWYCH Z WŁÓKNA WĘGLOWEGO METODAMI TERMOGRAFII W PODCZERWIENI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono problematykę związaną z wykrywaniem bardzo cienkich wad w wielowarstwowych materiałach kompozytowych na bazie włókien węglowych. Defekty, jakie mogą występować w tego typu wielowarstwowych materiałach kompozytowych to niedokładności w sklejeniu warstw kompozytu oraz rozwarstwienia i delaminacje. Termiczne badania nieniszczące (NDT) są uważane za skuteczną technikę do wykrywania wad w wielowarstwowych materiałach. W artykule przedstawiono również porównanie pobudzania cieplnego próbek kompozytowych warstwowych z włókna węglowego za pomocą impulsu optycznego i ultradźwiękowego w impulsowej metodzie termografii w podczerwieni. Do przetwarzania sekwencji źródłowej zastosowano kilku algorytmów stosowanych w impulsowych termograficznych badaniach nieniszczących takich jak: normalizacja, dopasowanie wielomianu, impulsowo fazowa termografia, analiza głównych składowych, analiza korelacji i dynamiczna cieplna tomografia. Dokonano również oceny ich skuteczności.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, termografia w podczerwieni, materiały kompozytowe

## DETECTION OF VERY THIN DEFECTS IN CFRP BY IR THERMOGRAPHY METHODS

**Abstract.** Some problems of detecting very thin defects in multi-layered composite materials created on the base of carbon are presented in the paper. Typical defects in multi-layered composite materials are inaccuracies in gluing composite layers up and stratifications or delaminations. Thermal nondestructive testing (NDT) is regarded as a relevant technique for detecting defects in composite materials. Comparison of optical and ultrasound thermal stimulation of CFRP samples in pulsed IR thermography methods to detect defects in this material is also presented in this paper. A source sequence has been processed by applying some algorithms known in pulsed thermal nondestructive testing namely: Normalization (N), Polynomial Fitting (PF), Pulse Phase Thermography (PPT), Principal Component Analysis (PCA), Correlation Analysis (CA) and Dynamic Thermal Tomography (DTT). The efficiency of data processing techniques is discussed.

Keywords: non-destructive testing, IR thermography, composite materials

### 1. Wprowadzenie

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 [2]. 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.

## 2. Metoda badań

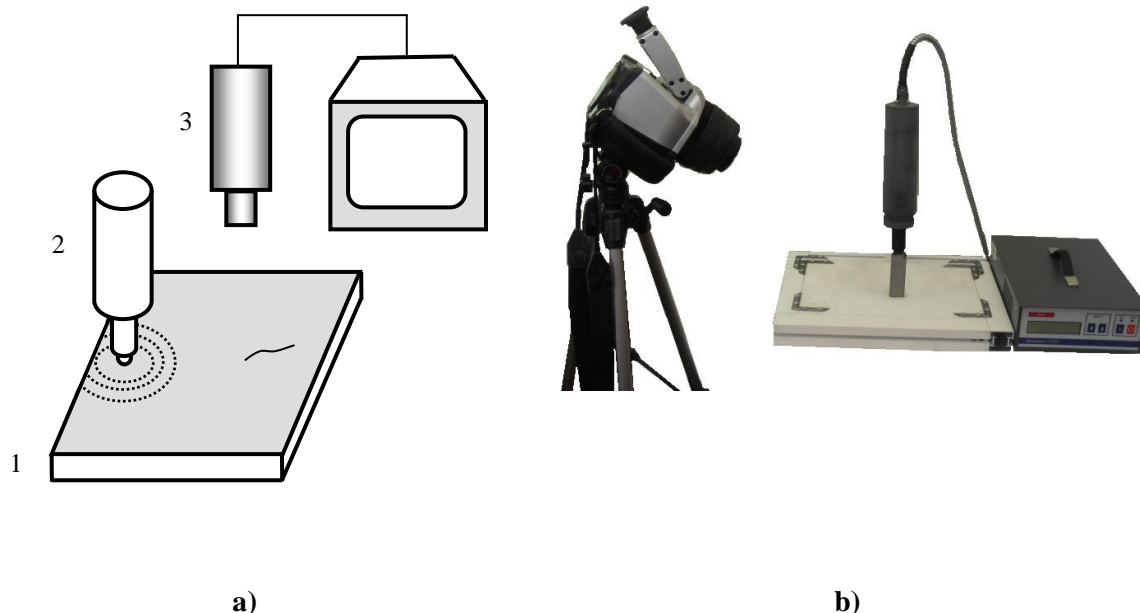
W celu sprawdzenia skuteczności wykrywania defektów w wielowarstwowych kompozytach węglowych zastosowano jedną z głównych metod aktywnych badań termograficznych termografię impulsową (Pulsed Thermography – PT) [3].

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. 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. Różnice w rozkładzie temperatury na badanej powierzchni powstają w wyniku zaburzeń przepływu ciepła przez strukturę materiału na skutek różnic w termofizycznych parametrach między materiałem kompozytu, a defektami. Często do wskazania obszarów z defektami trzeba zastosować specjalne techniki przetwarzania termogramów.

Zastosowanie najpopularniejszego impulsowego optycznego ogrzewania (np. lampa grzewcza) związane jest również z wadami tego typu ogrzewania do których należą: 1) nierównomierność nagrzewania; 2) niski kontrast temperatury spowodowany tym, że nagrzewane są strefy zarówno z uszkodzonym materiałem jak i również strefy materiału bez uszkodzeń; 3) trudności z wykrywaniem głębiej położonych defektów, które wymagają zastosowania większej energii cieplnej, ale może to spowodować nadmierne nagrzanie próbki i jej uszkodzenie.

W celu zmniejszenia wpływu ww. wad zaczęto stosować stymulację cieplną za pomocą ultradźwięków [4, 5]. Ultradźwięki powodują przede wszystkim wzrost temperatury w rejonie defektów co istotnie wpływa na wzrost wartości kontrastu temperatury. Przyczyną podwyższenia temperatury jest wewnętrzne tarcie ścianek defektów przy ich pobudzeniu

falami ultradźwiękowymi. Dla porównania możliwości zwiększenia prawdopodobieństwa wykrycia defektów w warstwowych kompozytach węglowych przeprowadzono badania z zastosowaniem termograficznej metody impulsowej ze stymulacją cieplną za pomocą lampy grzewczej jak i ultradźwięków. Na rys. 1 przedstawiono stanowisko użyte do badań termograficznych z ultradźwiękowym pobudzeniem cieplnym.



**Rys.1. Schemat stanowiska do badań termograficznych z ultradźwiękowym pobudzeniem cieplnym próbki (a) i stanowisko eksperymentalne (b)**  
1 – próbka, 2 – stymulator ultradźwiękowy, 3- kamera termowizyjna

### 3. Badania eksperymentalne

W badaniach eksperymentalnych przebadano dwie próbki kompozytu wielowarstwowego wykonanego z włókna węglowego. Do pierwszej próbki o grubości 1 mm, wykonanej z dwóch warstw tkaniny węglowej o splocie płóciennym połączonej żywicą epoksydową, wprowadzono między warstwy cztery krążki o różnej średnicy (1÷8 mm) wykonane z folii z tworzywa PTFE o grubości 0.1 mm, które symulowały defekty (D1÷D4) w postaci rozwarstwień. Tworzywo PTFE jest często stosowane w próbkach kompozytów wielowarstwowych do symulacji rozwarstwień ze względu na prostą technologię wykonania takich próbek oraz zachowanie założonych gabarytów defektu po wykonaniu próbki. Próbka ta została użyta w badaniach porównawczych stymulacji cieplnej próbki za pomocą impulsu optycznego i ultradźwiękowego. Jako źródło impulsu optycznego użyta została lampa błyskowa dająca impuls cieplny (impuls Diraca) o mocy 3 kW i czasie trwania 1 ms. Impuls ultradźwiękowy o częstotliwości 20 kHz i mocy 300 W generowany był przez stymulator ultradźwiękowy pokazany na rys.1. Do rejestracji zmian pola temperatury na powierzchni próbki zastosowano kamerę termowizyjną ThermaCAM P65 rejestrując sekwencje termogramów (400 obrazów w sekwencji) z częstotliwością 25 Hz.

W celu porównania skuteczności wykrywania defektów z zastosowaniem różnego typu algorytmów przetwarzania obrazu stosowanych w badaniach termograficznych przeprowadzono badania drugiej próbki kompozytu o wymiarach 100x100 mm i grubości 5 mm wykonanego z 4 warstw tkaniny jednokierunkowej z włókna węglowego połączonych żywicą epoksydową. W sąsiadujących ze sobą warstwach ułożenie kierunku włókien było

takie, że przecinały się pod kątem prostym. Pomiędzy warstwami tkaniny umieszczonych zostało 6 defektów (D5÷D10), o wymiarach 5x5 mm, 10x10 mm i 10x20 mm, wykonanych z teflonu o grubości 0.1 mm, które symulowały rozwarstwienia kompozytu. Badania próbki wykonano metodą termografii impulsowej. Jako źródło ogrzewania użyta została lampa błyskowa dająca impuls cieplny (impuls Diraca) o mocy 3 kW i czasie trwania 2.7 ms. Do rejestracji zmian pola temperatury na powierzchni próbki zastosowano kamerę termowizyjną AGEMA 900 LW.

W trakcie badań wymiana ciepła między badaną próbką, a otoczeniem odbywała się na drodze swobodnej konwekcji. Monitorowana była za pomocą kamery termowizyjnej tylko badana powierzchnia próbki.

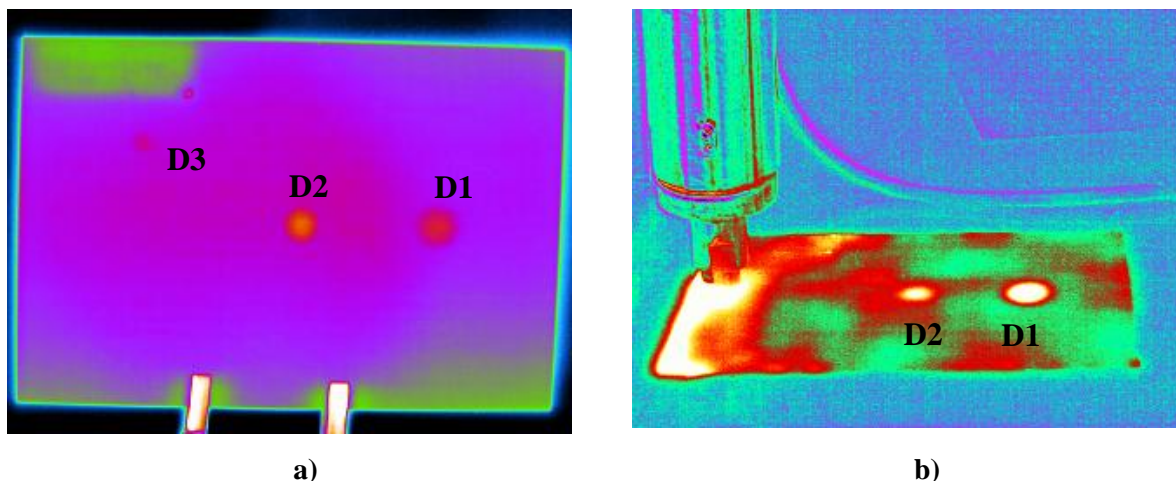
#### 4. Wyniki badań

Do analizy wyników zastosowano kilka algorytmów (takich jak: przekształcenie Fouriera, normalizacja, dopasowanie wielomianu, impulsowo fazowa termografia, analiza głównych składowych, analiza korelacji i dynamiczna cieplna tomografia) stosowanych w termograficznych badaniach nieniszczących, których użycie ma na celu wyodrębnienie w termogramie na tle zakłóceń obszarów zmian wartości sygnału [6]. Jako kryterium porównawcze w ocenie zastosowanych algorytmów przetwarzania obrazów zastosowano stosunek sygnał/szum (S) [1]. Na podstawie wartości stosunku sygnał/szum można ocenić, który algorytm jest bardziej skuteczny w wyodrębnianiu obszarów, w których znajdują się defekty [7, 8].

Stosunek sygnału do szumu jest określany zależnością:

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

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

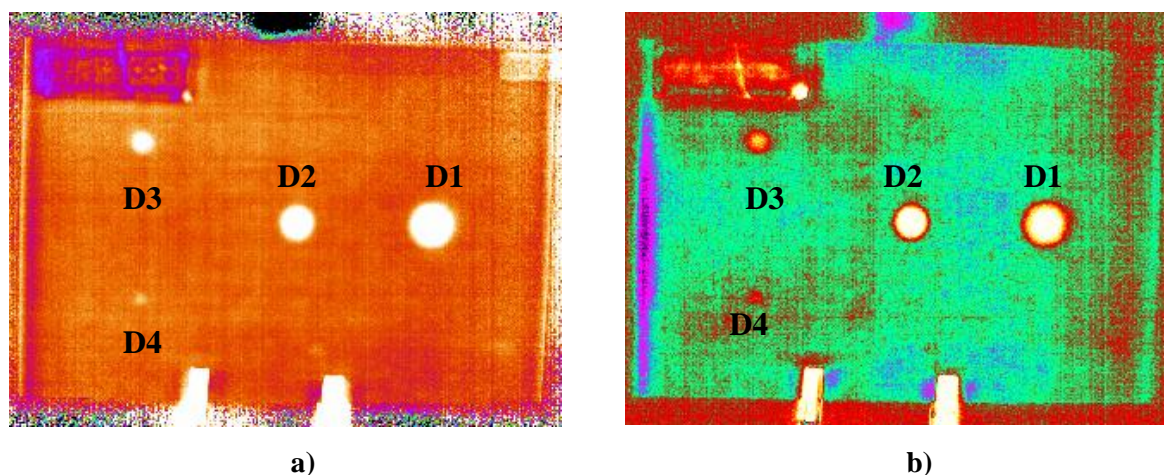


**Rys. 2. Porównanie stymulacji optycznej i ultradźwiękowej próbki warstwowego kompozytu węglowego o grubości 1 mm (defekty imitują 4 teflonowe wstawki między warstwami kompozytu)**

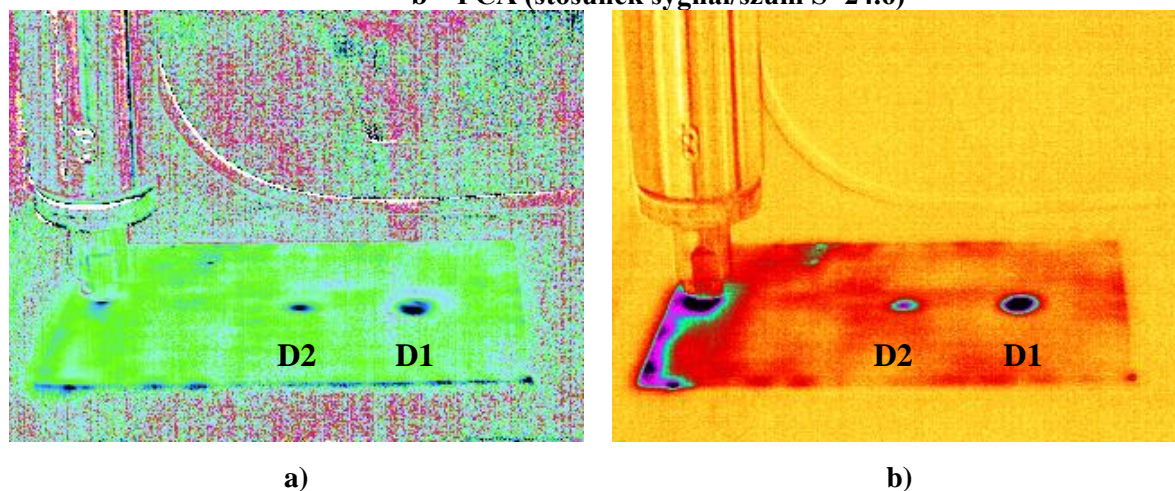
- a – optyczna stymulacja (maksymalny sygnał nad defektem D1 = 1.16°C, średnia nadwyżka temperatury próbki 2.2°C, stosunek sygnał/szum 18.6, kontrast temperatury 53%);
- b – stymulacja ultradźwiękowa (maksymalny sygnał na defektem D1 = 2.1°C, średnia nadwyżka temperatury próbki 0.6°C, stosunek sygnał/szum 32.0, kontrast temperatury 580%)

Na rys.2 przedstawiona wyniki uzyskane z porównania stymulacji impulsem optycznym i ultradźwiękowym próbki pierwszej. Na termogramie wykonanym z użyciem impulsu optycznego widoczne są „ślady” ciepłne trzech defektów, a na termogramie przy użyciu impulsu ultradźwiękowego można wykryć dwa największe defekty.

Zastosowanie do przetwarzania termogramu zarówno przekształcenia Fouriera jak i analizy głównych składowych pozwala na lokalizację czwartego defektu (D4) przy optycznej stymulacji próbki (rys. 3). Przetwarzanie termogramów otrzymanych przy stymulacji ultradźwiękowej za pomocą tych algorytmów nie umożliwia wykrycia defektów D3 i D4 (rys. 4).



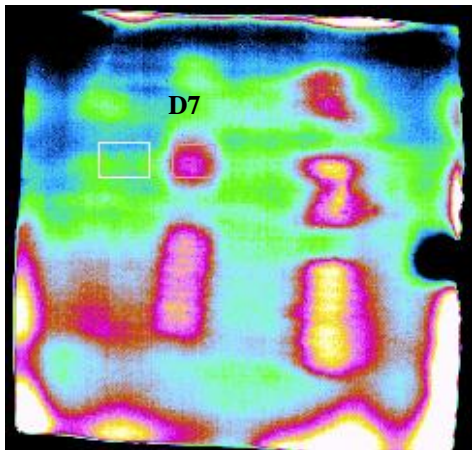
**Rys. 3. Efektywność przetwarzania termogramu przy optycznej stymulacji próbki:**  
**a - obraz fazy przekształcenia Fouriera (stosunek sygnał/szum  $S=33$ )**  
**b – PCA (stosunek sygnał/szum  $S=24.6$ )**



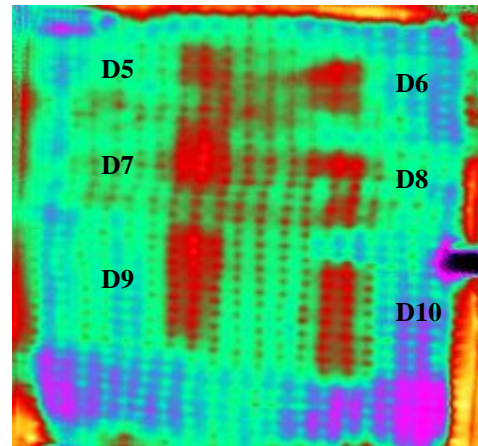
**Rys.4. Efektywność przetwarzania termogramów przy ultradźwiękowej stymulacji próbki:**  
**a - obraz fazy przekształcenia Fouriera (stosunek sygnał/szum  $S=11.8$ )**  
**b – PCA (stosunek sygnał/szum  $S=31.7$ )**

W trakcie badania drugiej próbki rejestrowano sekwencję 400 termogramów z częstotliwością 25 Hz. Przeprowadzono badania metodą impulsową jednostronną (kamera i źródło stymulacji ciepłnej znajdują się po tej samej stronie badanej próbki) i metodą dwustronną (kamera i źródło znajdują się po przeciwnych stronach próbki). Na rys. 5 przedstawiono wybrane wyniki uzyskane dla metody jednostronnej, która okazała się bardziej skuteczna w wykrywaniu defektów w tej próbce. Widać wyraźnie, że zastosowana procedura

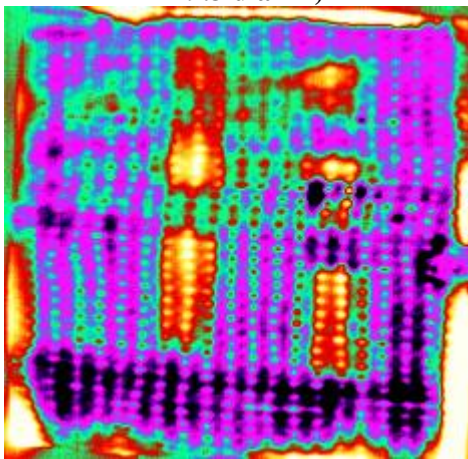
termografii impulsowo-fazowej (fazogram rys.5 b) oraz analiza głównych składowych (rys. 5 c) umożliwiając wykrycie wszystkich defektów.



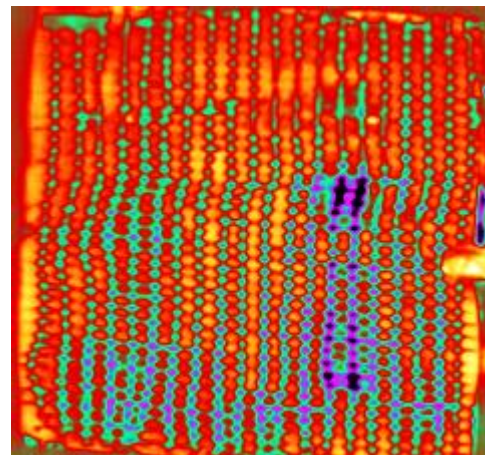
a) Optymalny obraz nr 83 z sekwencji (S = 9.3 dla D7)



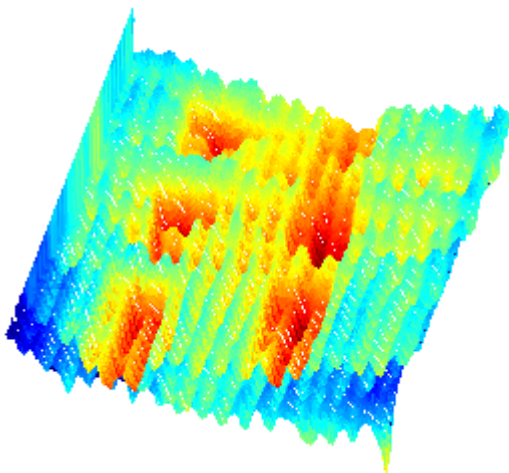
b) Fazogram (PPT) S = 7.1



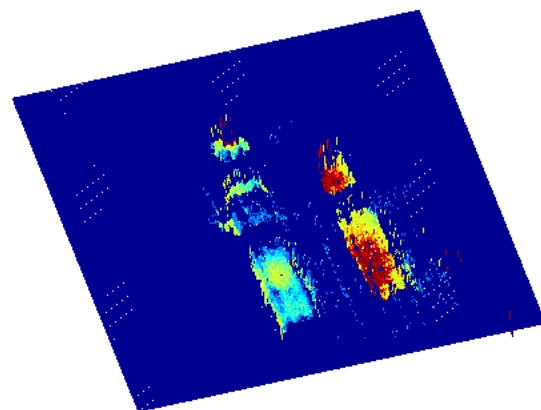
c) PCA składowa nr 3, S=8.1



d) PCA składowa nr 4, S=1.2



e) 3D fazogram b) (S = 7.1)



f) 3D tomogram – warstwa 0.9÷1.1 mm (S = 8.7)

Rys.5. Wyniki badania próbki kompozytu z włókna węglowego wykonane metodą termografii impulsowej (metoda jednostronna)

## 5. Wnioski

1) Porównanie stymulacji cieplnej pierwszej próbki metodą optyczną i ultradźwiękową wykazało, że:

- w przypadku wykrytych defektów wartość stosunku sygnał/szum jest wyższa przy stymulacji ultradźwiękowej;
- wartość temperatury powierzchni próbki w obszarach bez defektów jest znacznie niższa przy stymulacji ultradźwiękowej;
- przy stymulacji ultradźwiękowej nie wykryto defektów o małej powierzchni, przyczyną może być niewłaściwy wybór częstotliwości ultradźwięków zastosowanych do stymulacji (metoda ta nie jest jeszcze dostatecznie przebadana);
- prawdopodobnie lepsze wyniki za pomocą stymulacji ultradźwiękowej będą przy badaniu pęknięć materiału prostopadłych do jego powierzchni;
- obecnie w wykrywaniu rozwarstwień bardziej skuteczna jest stymulacja optyczna.

2) Przeprowadzone badania obu próbek wykazały, że istnieją obecnie techniczne możliwości wykrywania za pomocą metod termografii w podczerwieni bardzo cienkich defektów w warstwach podpowierzchniowych kompozytów wielowarstwowych na bazie włókien węglowych.

3) Ze względu na różnice parametrów cieplnych warstwy tkaniny węglowej wynikające z różnych procesów technologicznych wykonania włókien węglowych przez producentów, ilość warstw tkaniny w kompozycie oraz minimalne wymiary geometryczne defektu, przy których jest możliwa jego identyfikacja mogą być określone tylko dla jednego badanego rodzaju kompozytu. Jak wykazano na podstawie badań eksperymentalnych w pracy [9] zawartość % włókien w wielowarstwowym kompozycie węglowo-epoksydowym ma istotny wpływ na dyfuzyjność cieplną kompozytu.

4) Biorąc pod uwagę, że w warunkach rzeczywistych badań termograficznych może występować szum na poziomie  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  [10], generowany przez stan powierzchni badanej próbki (nierówności, różnice w emisyjności, promieniowanie odbite od innych źródeł) oraz nierównomierne nagrzewanie próbki przy optycznej stymulacji to w większym stopniu wpływ na wynik (wykrywanie defektów na większej głębokości pod powierzchnią kompozytu oraz o mniejszych wymiarach geometrycznych) będzie miał wybór termograficznej metody badań, źródła stymulacji cieplnej oraz metody obróbki obrazu, które mogą zmniejszyć wpływ szumów, niż rozdzielczość temperaturowa zastosowanej kamery termowizyjnej.

5) Zmiany temperatury na powierzchni kompozytu nad defektem mogą być stosunkowo małe, wymaga to zastosowania zaawansowanych technik przetwarzania danych takich jak termografia impulsowo-fazowa (PPT), analiza składowych głównych (PCA) i tomografia cieplna.

6) Warstwy włókien węglowych w kompozycie węglowo-epoksydowym mogą być w postaci tkaniny jednokierunkowej jak i tkaniny o splocie płóciennym, mogą również występować w różnej konfiguracji w poszczególnych warstwach dlatego też trudno jest jednoznacznie określić pod jaką ilością warstw tkaniny można wykrywać defekty metodami termograficznymi.

7) Stymulacja kompozytu impulsem ultradźwiękowym jest metodą perspektywiczną ale wymagającą zarówno poprawy parametrów stymulatora ultradźwięków (zwiększenie mocy, zakres częstotliwości) jak również przeprowadzenia szeregu prac eksperymentalnych umożliwiających jej dokładniejsze poznanie.

8) Wykrywanie defektów w postaci pęknięć materiału usytuowanych prostopadle do powierzchni kompozytu przedstawionymi w artykule metodami jest planowane jako dalszy etap ich analizy porównawczej.

Autor dziękuje prof. V. Vavilov (Tomsk Polytechnic University - Rosja) za pomoc umożliwiającą przeprowadzenia badania ze stymulacją ultradźwiękową, którego wybrane wyniki przedstawione są w tej pracy.

## Literatura

- [1] Świdorski W., Metody termograficzne w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych, Monografia, WITU, Zielonka 2010
- [2] Dobrzański L. A., Nietalowe materiały inżynierskie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008
- [3] Maldague X. P. V., Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, John Wiley&Sons, Inc. New York, p. 78, 2001
- [4] Вавилов В.П., Инфракрасная термография и неразрушающий контроль.-М.: «Спектр», Moskwa, str. 544, 2009
- [5] Favro L. D., Han X., Ouyang Z. et al., IR imaging of cracks excited by an ultrasonic pulse, Proc. SPIE "Thermosense-XXII", Vol. 4020, pp. 182-185, 2000
- [6] Świdorski W., Vavilov V., Przetwarzanie termogramów w badaniach nieniszczących metodami termografii w podczerwieni, PTU Nr 3, str.57÷81, 2009
- [7] Świdorski W., Bin Umar M. Z., Ahmad I., Vavilov V., Developing methodology of pulsed thermal NDT of composites: Step-by-step analysis of reference samples, The e-Journal&Database of Nondestructive Testing, pp. 1-13, May 2008 Issue
- [8] Świdorski W., Możliwości wykrywania metodami termografii w podczerwieni bardzo cienkich wad w materiałach kompozytowych stosowanych w lekkich osłonach balistycznych, Inżynieria Materiałowa, nr 1 (173), str. 62-66, 2010
- [9] Wróbel G., Rdzawski Z., Muzia G., Pawlak S., Wpływ zawartości włókien na dyfuzyjność cieplną warstwowych kompozytów węglowo-epoksydowych, Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne 2010, Monografia pod redakcją G. Wróbla, str. 442-452, Gliwice 2010
- [10] Świdorski W., Vavilov V., Statystyczna ocena danych w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych metodami termografii w podczerwieni PTU, Zeszyt 112. Nr 4, str. 59-73, 2009