



Charakteryzowanie defektów w kompozytach stosowanych w lekkich osłonach balistycznych metodami tomografii cieplnej

Waldemar ŚWIDERSKI^{1*}, Paweł HŁOSTA¹,
Marek SZUDROWICZ²

¹Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka

²Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej,
ul. Okuniewska 1, 05-070 Sulejówek

* autor korespondencyjny, e-mail: waldemar.swiderski@wp.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 06.06.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 12.05.2015

DOI 10.5604/20815891.1195199

Streszczenie. Zobrazowanie badanego materiału (obiektu) warstwa po warstwie nazywane jest tomografią. W artykule opisano dwie metody tomografii cieplnej stosowane w badaniach nieniszczących: Dynamiczną Tomografię Ciepłą (DTT – *Dynamic Thermal Tomography*) nazwaną w artykule „klasyczną” i tomografię cieplną „bezwzorcową”. Na przykładzie lokalizacji i charakteryzacji defektów w wielowarstwowych próbkach kompozytu węglowego (CFRP), poddanych wcześniej działaniu uderzeń mechanicznych o różnej energii, przedstawiono ich efektywność.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, termografia, tomografia cieplna, kompozyt



1. WSTĘP

Materiały inżynierskie są grupą materiałów technicznych, które nie występują w naturze. Powstają one w wyniku wykorzystania surowców dostępnych w naturze i przystosowania ich do potrzeb technicznych. Do grupy tych materiałów należą niemetalowe materiały kompozytowe [1]. Ze względu na ich wytrzymałość przy niskiej wadze w porównaniu z metalami są często stosowane do konstruowania lekkich osłon balistycznych. Materiały kompozytowe wzmocnione włóknem występujące w formie laminatu są podstawowymi materiałami w tych konstrukcjach. Stosowane są w celu zapewnienia zwiększonej wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej, którą uzyskuje się poprzez wprowadzenie do miękkiej, lecz ciągliwej osłony wytrzymałych, sztywnych, ale zwykle kruchych włókien. Materiały kompozytowe tej grupy mogą przy tym wykazywać wysokie właściwości wytrzymałościowe zarówno w temperaturze pokojowej, jak i podwyższonej. W aplikacjach militarnych do konstrukcji lekkich osłon balistycznych stosowane są laminaty wzmocnione włóknami aramidowymi, węglowymi i szklanymi. Pierwszym było włókno szklane wytwarzane w okresie II wojny światowej, a następnie w latach 50. ubiegłego wieku opracowano technologię włókien węglowych (niskomodulowych, a później wysokomodulowych). Włókna aramidowe zostały wynalezione w 1965 roku. Ale dopiero w ostatniej dekadzie nastąpiło duże nimi zainteresowanie do ich zastosowań militarnych (m.in. w lekkich osłonach balistycznych). W tabeli 1 przedstawiono wybrane właściwości fizyczne tych włókien.

Tabela 1. Właściwości fizyczne włókien stanowiących typowe wypełnienie w strukturach kompozytowych [1, 4]

Table 1. The physical properties of the fibres constituting the typical fill in composite structures

Właściwość	Rodzaj włókna		
	aramidowe	węglowe	szklane
Gęstość [g/cm^3]	1,39÷1,47	1,7÷2,18	2,15÷2,55
Moduł sprężystości wzdłużnej [GPa]	65÷179	170÷900	75÷91
Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]	2,8÷3,5	1,4÷7,1	3,1÷4,4
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	2,0÷4,4	1,0÷2,5	4,0÷5,7

Podane w tabeli 1 wartości są wartościami orientacyjnymi, ponieważ włókna mogą być wytwarzane z różnych materiałów oraz za pomocą różnych technologii i wówczas mają różne moduły sprężystości wzdłużnej i wytrzymałości na rozciąganie. Na przykład włókna węglowe mogą być wytwarzane z polimerów naturalnych i sztucznych, smoły, żywicy fenolowych i fenolowo-formaldehidowych [1].



Laminaty są kompozytami powstającymi z połączenia dwóch materiałów o różnych właściwościach mechanicznych, fizycznych i technologicznych, w których składnik wzmacniający jest układany w postaci warstw, między którymi znajduje się wypełnienie pełniące funkcję lepiszcza. Warstwy wzmocnienia mogą być w postaci włókien ciągłych ułożonych jednokierunkowo, tkanin lub mat z włókien ciętych. Najczęściej występującymi uszkodzeniami w laminatach wzmacnianych włóknami są: delaminacje, makropęknięcia, pęknięcia włókien, pęknięcia międzyfazowe, mikropęknięcia, porowatość, wtrącenia, uszkodzenia termiczne, zawilgocenia, wypukłości powierzchniowe i pofałdowania. Do najbardziej skutecznych metod badań nieniszczących wykrywających uszkodzenia w laminatach zalicza się interferometrię i termografię w podczerwieni [2]. W wyniku mechanicznego udaru zewnętrznego, w strukturach wielowarstwowych, jakimi są laminaty, powstaje uszkodzenie, którego wymiary powierzchniowe są różne w poszczególnych warstwach kompozytu. Związane jest to z absorbowaniem energii kinetycznej udaru przez poszczególne warstwy laminatu. Następuje niszczenie międzywarstwowe materiału na skutek pęknięcia i rozciągania włókien [3]. Zastosowanie tomografii cieplnej umożliwia ocenę obszaru zniszczenia w kilku (5÷6) różnych warstwach laminatu.

2. TOMOGRAFIA CIEPLNA

Zobrazowanie badanego materiału warstwa po warstwie nazywane jest tomografią, która jako metoda tomografii rentgenowskiej (tomografii komputerowej) jest stosowana w diagnostyce medycznej. Idea metody tomografii cieplnej (*thermal tomography*) i jej zastosowania w nieniszczących badaniach termograficznych powstała w latach 80. ubiegłego wieku [5].

Vavilov i Shiryaev w 1986 r. zaproponowali zastosowanie tzw. Dynamicznej Ciepłej Tomografii (DTT) [6]. Idea DTT jest taka, że na podstawie czasów optymalnej obserwacji, tj. czasów, dla których osiągnięta jest maksymalna różnica temperatury w obserwowanym punkcie, pola nad defektem w stosunku do pewnej temperatury odniesienia mogą być użyte do charakteryzowania tych defektów. Obraz głębszych defektów pojawia się na nagrzewanej powierzchni z opóźnieniem w czasie, dlatego obraz rozkładu opóźnień czasowych można przebudować w obraz rozkładu głębokości defektów. Zastosowany algorytm umożliwia „krojenie” próbek na cienkie warstwy ze znanymi współrzędnymi głębokości warstwy pod powierzchnią badanej próbki. Podstawowa idea polega na tym, że każdy punkt termogramu niesie unikatową informację zawartą w rejestrowanych zmianach temperatury. Zachowanie się w czasie sygnału przyrostu temperatury ΔT zdefiniowanego jako różnica temperatury między każdym punktem termogramu T i wybranym punktem odniesienia T_{nd} , który znajduje się w strefie bez defektów, umożliwia określenie położenia defektu pod powierzchnią badanej próbki.



Tomografia cieplna umożliwia:

- wykonanie warstwowej analizy obiektu kontroli;
- kompensację wpływu powierzchniowych szumów na jakość termogramu, poprzez wykorzystanie informacji z kolejnych rejestrowanych termogramów;
- polepszenie wykrywania ukrytych defektów;
- określenie głębokości położenia defektów z zadowalającą dokładnością.

W pracy [7] została zaproponowana tzw. adaptacyjna tomografia cieplna polegająca na podwarstwowym adaptacyjnym wykreślaniu zmian dyfuzyjności cieplnej próbki. Wykorzystano w niej algorytm, opracowany przy następujących założeniach:

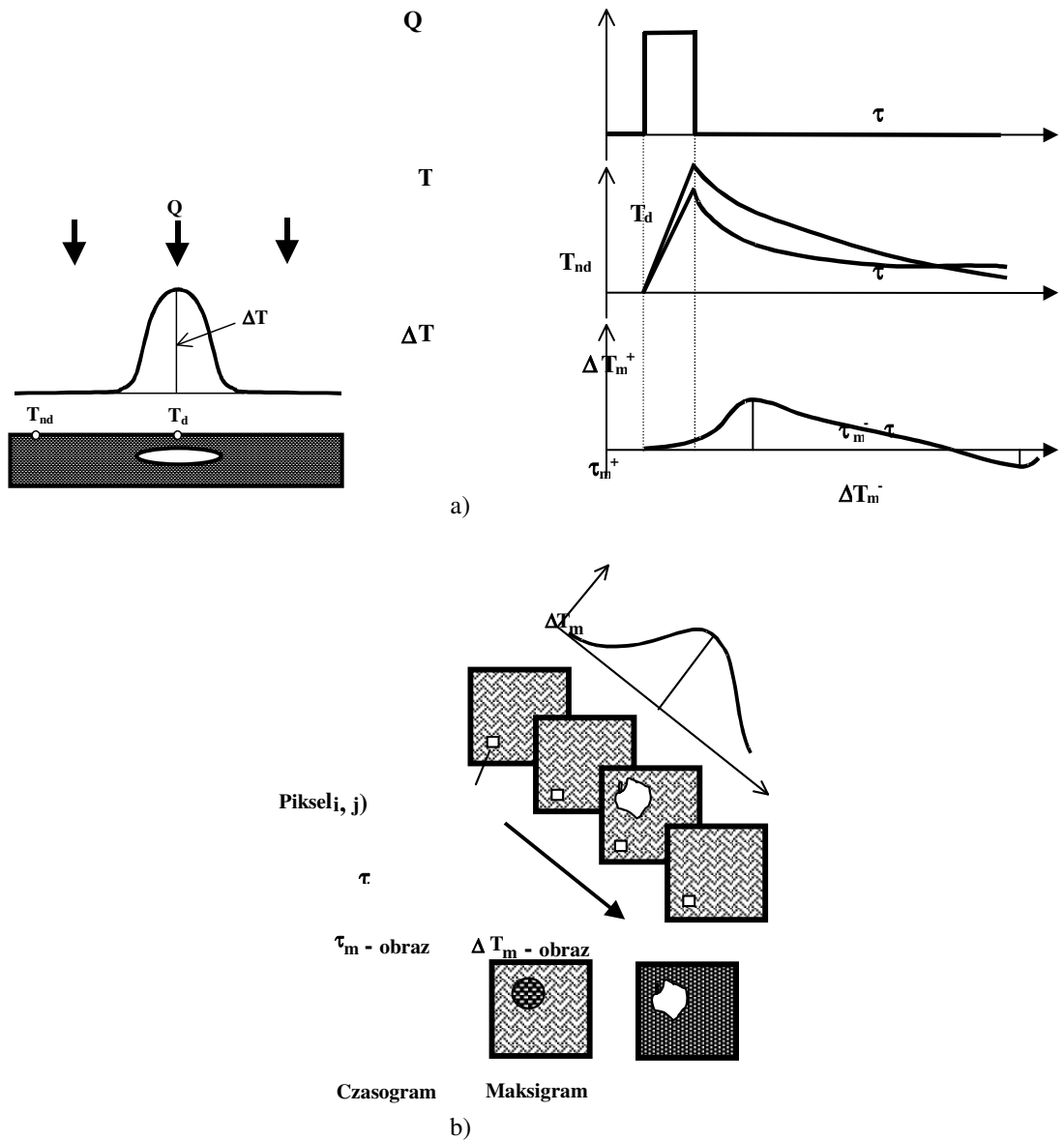
- zmiany pola (rozkładu) temperatury w czasie rejestruje się z małym interwałem $\Delta\tau$;
- termofizyczne charakterystyki zasadniczego materiału są wcześniej znane i są to właściwości efektywne;
- dla pierwszego kroku w czasie $\Delta\tau$ głębokość przenikania energii cieplnej jest mała i próbkę rozpatruje się w charakterze półnieskończonego ciała bez defektów;
- eksperymentalne wartości temperatury mierzy się krok po kroku z interwałem $\Delta\tau$, porównując z danymi obliczeniowymi i modyfikując je na każdym kroku i w każdym pikselu, zmieniając wartości przewodności cieplnej próbki zgodnie z wartością zmierzonej temperatury.

Jeżeli znany jest związek przesunięcia fazy z głębokością położenia i grubością defektu, wówczas można zastosować tzw. fazową tomografię zaproponowaną w pracy [8]. Teoretyczne krzywe przesunięcia fazowego w stosunku do głębokości położenia defektów zostały użyte do syntezy tomogramów. Ideę dynamicznej tomografii cieplnej przedstawiono na rysunku 1.

Efektywność „klasycznej” tomografii cieplnej (DTT) istotnie zależy od stopnia jednorodności nagrzewania lub jakości normalizacji danych wejściowych, ponieważ jest konieczne wybieranie wzorcowej wartości sygnału temperaturowego. Normalizację danych wejściowych realizuje się poprzez prostą arytmetyczną operację odejmowania termogramów. Odejmuje się termogram zarejestrowany bezpośrednio przed zadaniem impulsu cieplnego, kolejno od pozostałych zarejestrowanych termogramów. Niekiedy korzystniejsza jest normalizacja względem pierwszego termogramu otrzymanego bezpośrednio po włączeniu impulsu cieplnego.

Ilościowa ocena jest oczywiście niemożliwa bez wzorca, niemniej jednak można wprowadzić do rozpatrzenia model cieplny rozkładu temperatury w strefach bez defektów, który będzie jednakowy dla wszystkich pikseli termogramu.





Rys. 1. Idea dynamicznej tomografii cieplnej [10]:
 a) zmiany w czasie temperatury powierzchni i sygnału ΔT ,
 b) powstanie czasogramu i maksigramu

Fig. 1. Idea of dynamic thermal tomography:
 a) change of surface temperature and signal ΔT in time,
 b) producing timegram and maxigram



Analizowane są tylko odchylenia eksperymentalnych wartości temperatury od wartości przypisanych modelowi. Takie podejście nazywane jest „bezwzorcową” tomografią cieplną opisaną w pracy [9].

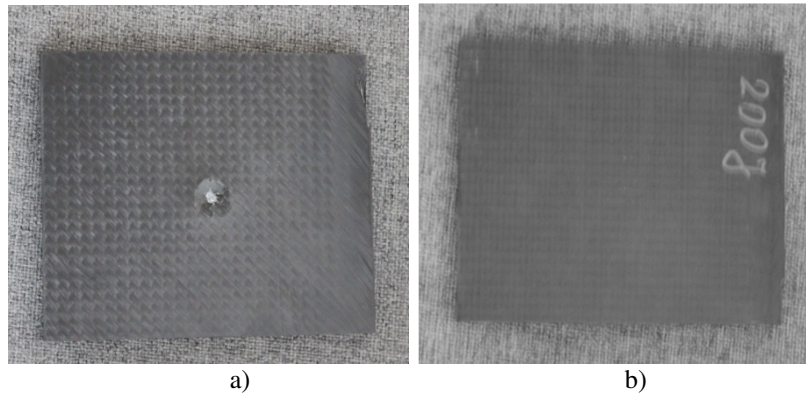
W tej metodzie aproksymuje się zmiany w czasie sygnałów temperaturowych w punktach, w pobliżu których nie występują defekty i w ich obecności za pomocą dwóch wielomianów: II i VI stopnia w każdym punkcie określa się sygnał różnicowy jako $\Delta T_{ijf} = T_{ijf}^{(6)} - T_{ijf}^{(2)}$, gdzie górny indeks oznacza stopień wielomianu. Aproksymacji poddany jest cały zapis. Wielomian II stopnia niesie informację referencyjną, a ewentualne defekty wpływają przede wszystkim na zmiany wartości funkcji aproksymacyjnej wielomianu VI stopnia. Taka analiza nie wymaga wyboru wzorcowego punktu. Analizie poddana jest cała sekwencja zarejestrowanych termogramów obejmująca zarówno czas nagrzewania, jak i stygnięcia badanej próbki. Podczas zmian różnicowego sygnału w czasie powstają miejscowe ekstrema, spowodowane istnieniem ukrytych defektów, zatem podejście to może być stosowane do realizacji „bezwzorcowej” tomografii.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Badania eksperymentalne przeprowadzone były na 15-warstwowych próbkach kompozytu z tworzywa wzmocnionego włóknem węglowym (CFRP – *carbon-fiber-reinforced plastic*) o grubości 11,6 mm wykonanego w Wojskowym Instytucie Techniki Pancernej i Samochodowej (WITPiS) jako lekka osłona balistyczna z przeznaczeniem do osłony balistycznej pojazdów wojskowych. Przebadano trzy próbki po badaniach niszczących, które poddano działaniu uderzeń mechanicznych, każdą o różnej energii 100 J, 200 J i 300 J. Na rysunku 2 przedstawiona została próbka po mechanicznym uderzeniu z energią 200 J.

W trakcie badań eksperymentalnych powierzchnie próbek były nagrzewane od strony uderzenia impulsem cieplnym prostokątnym o mocy 6 kJ i czasie trwania 10 ms generowanym przez lampę błyskową. Zmiany pola temperatury, na nagrzewanej powierzchni próbek, były rejestrowane kamerą FLIR SC 7600 w sekwencjach składających się z 1200 obrazów o rozdzielczości 512×640 pikseli, zapisanych z częstotliwością 25 Hz. Do przetwarzania termogramów zastosowano oprogramowanie ThermoLab, opracowane na potrzeby badań nieniszczących prowadzonych w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia (WITU) przez prof. V. Vaviłova z Politechniki w Tomsku (Rosja). Oprogramowanie to umożliwia analizę termogramów, wykorzystując algorytmy tomografii cieplnej „klasycznej” i „bezwzorcowej”.

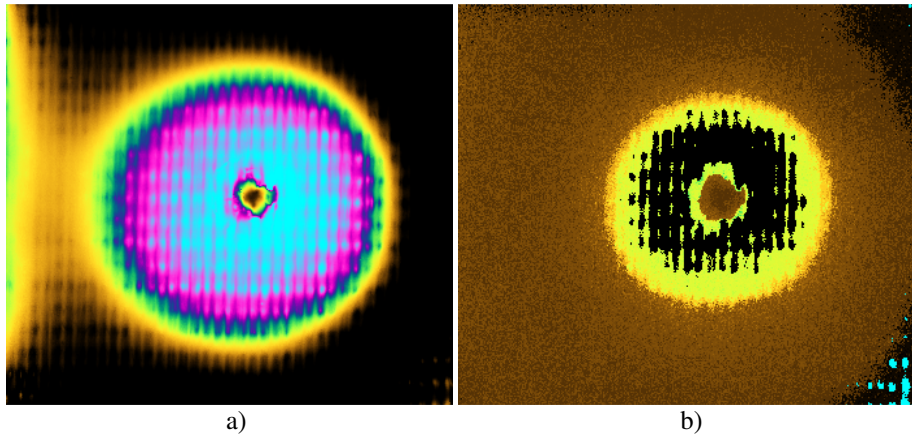




Rys. 2. Próbkę kompozytu z tworzywa wzmocnionego włóknem węglowym po mechanicznym udarze z energią 200 J:
a) od strony uderzenia, b) od strony przeciwległej

Fig. 2. The sample of CFRP after mechanical impact force of 200 J:
a) impact side, b) rear side

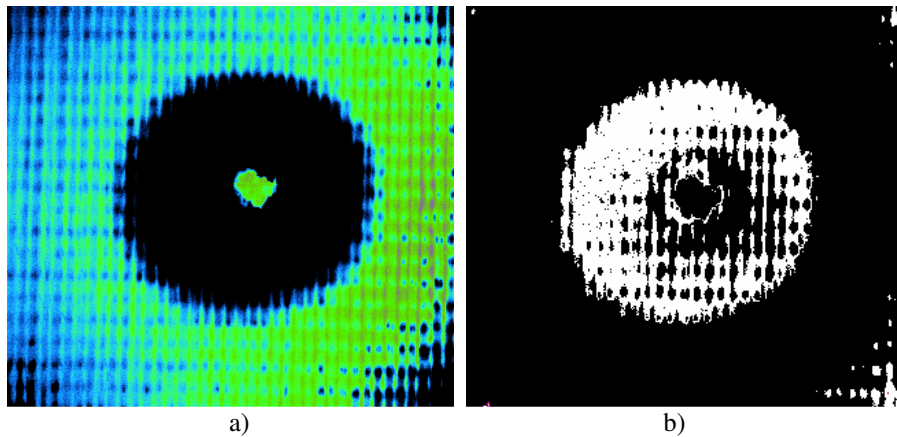
Na rysunkach 3 i 6 przedstawiono czasogramy i maksigramy otrzymane metodą klasycznej tomografii, w której wymagany jest wybór punktu odniesienia (referencyjnego) w miejscu na powierzchni próbki, w którym pod powierzchnią nie ma defektów. Maksigram jest „sztucznym” zobrazowaniem powstałym z sekwencji zarejestrowanych termogramów. Pokazuje on strukturalne niejednorodności badanego obiektu w stosunku do wybranego wzorca (wybrany piksel o współrzędnych i_{ref} , j_{ref} z obszaru powierzchni poza strefą defektów) i jest ich najlepszym ujawnieniem oraz charakteryzuje się maksymalnym stosunkiem sygnał/szum. Czasogram odzwierciedla rozkład charakterystycznych czasów wymiany ciepła w obiekcie w stosunku do wzorca. Rzeczywiście, każdy piksel czasogramu zawiera numer kolejnego zobrazowania, któremu odpowiada maksymalna wartość ΔT . W porównaniu z odpowiednim maksigramem, czasogram charakteryzuje się bardziej stromym frontem przestrzennego rozkładu sygnału $\tau_m(i, j)$ i dlatego lepiej odzwierciedla rzeczywiste wymiary defektów. Ważną cechą czasogramu jest prawie „płaski” przebieg sygnału $\tau_m(i, j)$ w środkowej części defektu i obecność charakterystycznych większych wartości czasów na krańcach defektów, co prowadzi do pojawienia się artefaktów (fałszywych defektów). Czasogramy są wynikiem nieliniowego przetwarzania wyjściowych temperaturowych informacji i w przypadku nieprawidłowego wyboru punktu wzorcowego, czasogram może nie odzwierciedlać obecności wewnętrznych defektów.



Rys. 3. „Klasyczna” tomografia cieplna próbki po mechanicznym udarze z energią 300 J: a) maksigram, b) czasogram

Fig. 3. „Classical” thermal tomography of the sample after mechanical impact force of 300 J: a) maxigram, b) timegram

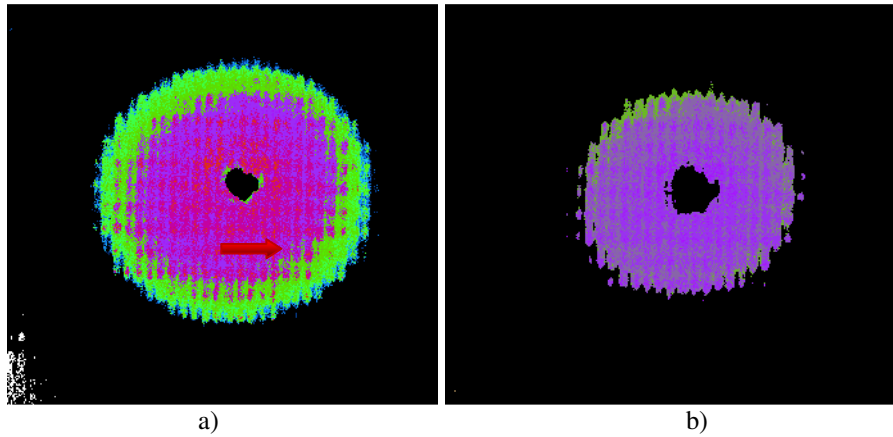
Na rysunkach 4, 5 i 7 przedstawiono wybrane wyniki z tomogramami opracowanymi dla poszczególnych warstw z występującymi w nich defektami. Porównano wyniki uzyskane metodą tomografii cieplnej „klasycznej” i „bezwzorcowej”.



Rys. 4. Tomogramy cieplne próbki po mechanicznym udarze z energią 300 J: a) tomografia cieplna „klasyczna” (warstwa 0,39-0,46 mm), b) tomografia cieplna „bezwzorcowa”(warstwa 0,35-0,41 mm)

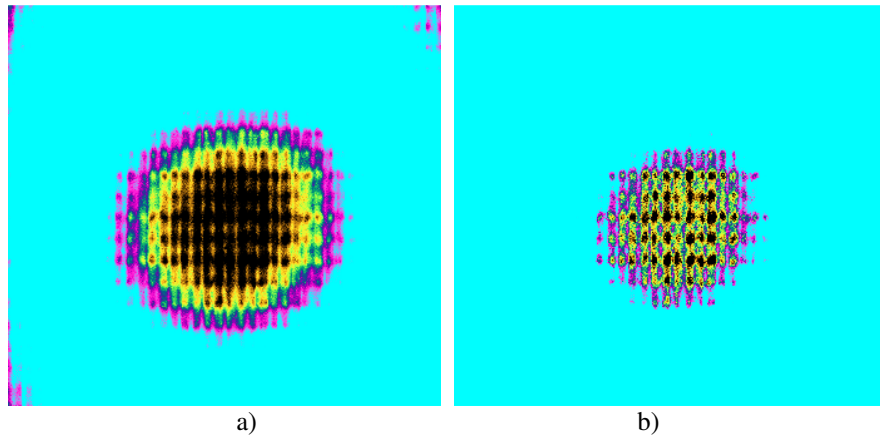
Fig. 4. Thermal tomograms of the sample after mechanical impact force of 300 J: a) „classical” thermal tomography (layer 0.39-0.46 mm), b) „no-reference” thermal tomography (layer 0.35-0.41 mm)





Rys. 5. Tomogramy cieplne próbki po mechanicznym udarze z energią 300 J:
a) tomografia cieplna „klasyczna” (warstwa 3,47-3,57 mm), b) tomografia cieplna „bezwzorcowa” (warstwa 3,51-3,58 mm)

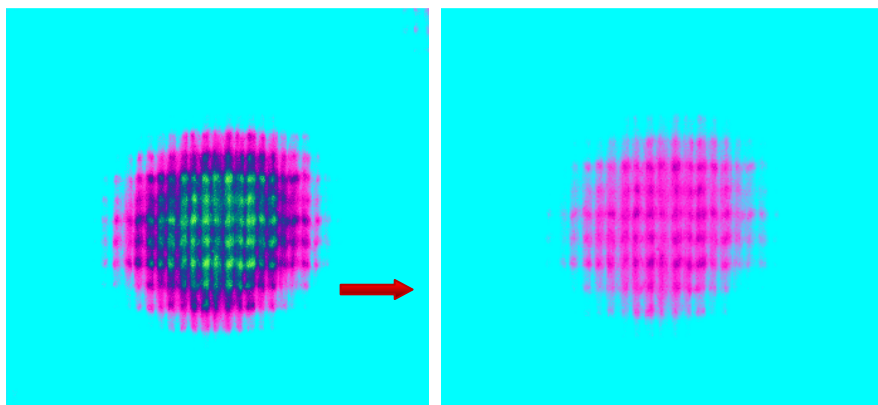
Fig. 5. Thermal tomograms of the sample after mechanical impact force of 300 J:
a) „classical” thermal tomography (layer 3.47-3.57 mm), b) „no-reference” thermal tomography (layer 3.51-3.58 mm)



Rys. 6. Klasyczna tomografia cieplna próbki po mechanicznym udarze z energią 200 J:
a) maksigram, b) czasogram

Fig. 6. „Classical” thermal tomography of the sample after mechanical impact force of 200 J: a) maxigram, b) timegram





Rys. 7. Tomogramy cieplne próbki po mechanicznym udarze z energią 200 J:
 a) tomografia cieplna „klasyczna” (warstwa 3,74-3,85 mm), b) tomografia cieplna
 „bezwzorcowa” (warstwa 3,72-3,83 mm)

Fig. 7. Thermal tomograms of the sample after mechanical impact force of 200 J:
 a) „classical” thermal tomography (layer 3.74-3.85 mm), b) „no-reference” thermal
 tomography (layer 3.72-3.83 mm)

Porównując rysunki 5a) i b) oraz 7a) i b), można zauważyć, że na rysunkach 5b) i 7b) w przedstawionych warstwach kompozytu nie występują fałszywe „defekty” w postaci artefaktów, jak ma to miejsce w „klasycznej” tomografii cieplnej. Artefakty zaznaczone są czerwonymi strzałkami, na rysunku 5a) pierścień w kolorze zielonym wokół defektu w kolorze fioletowym, na rysunku 7a) obszar w kolorach żółtym i niebieskim znajdujący się na defekcie w kolorze różowym.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonych badań eksperymentalnych można stwierdzić, że:

- tak jak przedstawiono we wstępie artykułu, uszkodzeniu w wyniku udaru mechanicznego ulegają kolejne warstwy laminatu, dlatego rozpatrywane w artykule zagadnienie analizy uszkodzeń w wybranej warstwie struktury kompozytu sprowadza się do problemu trudnego do interpretacji w diagnostyce technicznej wykrywania defektu znajdującego się pod defektem,
- za pomocą tomografii cieplnej można określić strefy zniszczenia materiału na różnych głębokościach pod powierzchnią badanych próbek kompozytów wielowarstwowych wzmacnianych włóknem,
- w wielu przypadkach zastosowanie tomografii cieplnej „bezwzorcowej” daje bardziej jednoznaczne wyniki niż zastosowanie metody „klasycznej”, nie jest to jednak regułą,



- wyniki uzyskane metodą tomografii „klasycznej” i „bezwzorcowej” są jakościowo zgodne.

Ograniczeniem stosowanych metod jest wykrywanie defektów znajdujących się nie głębiej niż 7 mm pod powierzchnią kompozytu z tworzywa wzmocnionego włóknem węglowym. Przyczyną ograniczenia jest efektywna głębokość wnikania impulsu cieplnego w głąb próbki, ze względu na to ograniczenie materiał ten (jeżeli istnieje taka możliwość) może być badany obustronnie.

LITERATURA

- [1] Dobrzański Leszek A. 2008. *Niemetalowe materiały inżynierskie*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [2] Cole Wendy F., M.S. Forte, Rikard B. Heslehurst. 2001. *Maintainability Issues in ASM Handbook, vol. 21 – Composites*. Ohio, USA: ASM International.
- [3] Niezgoda Tadeusz, Krzysztof Kosiuczenko, Wiesław Barnat, Robert Panowicz. 2011. „Symulacja numeryczna przebijania odłamkiem osłony balistycznej wykonanej z kompozytu”. *Modelowanie inżynierskie* 42 : 295-302.
- [4] Jones Thomas S., E.A. Lindgren, C.G. Perganits. 1995. „Infrared inspection of advanced Army composites”. *Proc. of SPIE – Thermosense XVII* : 214-218.
- [5] Rosencwaig Allan, Allen Gersho. 1982. *Thermal-Wave Imaging*, Science vol. 218, Washington, D.C.: American Association for the Advancement of Science.
- [6] Maldague Xavier P.V. 2001. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, New York: John Wiley & Sons.
- [7] Vavilov Vladimir, Xavier Maldague. Bernard Dufort, Alexander Ivanov. 1993. „Adaptive thermal tomography algorithm”. *Proc. of SPIE – Thermosense XV* : 166-173.
- [8] Vavilov Vladimir P., Sergio Marinetti. 1999. „Pulsed phase thermography and Fourier analysis thermal tomography” (in Russian), *Defectoscopyia 2* : 58-72.
- [9] Świdorski Waldemar. 2009. „The characterization of defects in multi-layered composite materials by thermal tomography methods”. *Acta Physica Polonica A*, 115 (4) : 800-804.
- [10] Świdorski Waldemar. 2010. *Metody termograficzne w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych do zastosowań specjalnych*, monografia habilitacyjna. Wydawnictwo WITU Zielonka.



Application of Thermal Tomography Methods for Characterization of Defects in Composite Materials Used for Light Ballistic Armours

Waldemar ŚWIDERSKI, Paweł HŁOSTA,
Marek SZUDROWICZ

Abstract. Imaging the tested material (object) in layer by layer mode is called tomography. This paper describes two methods of thermal tomography used in non-destructive testing: Dynamic Thermal Tomography (DTT), in the paper called „classical”, and „no reference” thermal tomography. These methods used for location and characterization of defects in the multilayer samples of carbon composite (CFRP) subjected to mechanical impacts of different energy, have shown their effectiveness.

Keywords: non-destructive testing, thermography, thermal tomography, composite material

