

Jerzy Nowacki*, Norbert Sieczkiewicz
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Postępy w ocenie NDT jakości kompozytów polimerowych w warunkach produkcyjnych

Advances in NDT assessment of the quality of polymer composites in production conditions

ABSTRACT

This article presents non-destructive polymer composite systems in terms of current solutions in the area of methodology and devices. A list of available standards for non-destructive polymer composites established by ASTM International, the International Organization for Standardization (ISO) and the SAE has been developed. In the experiment, Flir ONE cameras were tested in the NDT workshop for carbon-epoxy composites. The possibility of using the Flir One thermal imaging camera for basic control of polymer composites in small production facilities has been demonstrated.

Keywords: *thermography, thermographic camera, nondestructive testing of composites*

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono perspektywiczne systemy badań nieniszczących kompozytów polimerowych w aspekcie aktualnych rozwiązań w obszarze metodyki i urządzeń. Opracowano wykaz dostępnych norm dotyczących badań nieniszczących kompozytów polimerowych ustanowionych przez ASTM International, Międzynarodową Organizację Normalizacyjną ISO oraz SAE. W eksperymencie przeprowadzono próby możliwości zastosowania kamery Flir ONE w warunkach warsztatowych do badań NDT kompozytowych płyt węglowo-epoksydowych. Wykazano możliwość wykorzystywania kamery termowizyjnej Flir One do podstawowej kontroli kompozytów polimerowych w małych zakładach produkcyjnych.

Słowa kluczowe: *termografia, kamera termograficzna, badania nieniszczące materiałów kompozytowych*

1. Wstęp

Szerokie zastosowanie kompozytów polimerowych oraz wysokie wymagania dotyczące niezawodności i wymaganych współczynników bezpieczeństwa, osiągających wartość 1,5 według amerykańskich przepisów lotniczych organizacji Federal Aviation Administration (FAR § 25.303) [1] w lotnictwie i kosmonautyce zdecydowały o szczególnym znaczeniu badań nieniszczących w tych przemysłach.

Z analizy danych sprzedażowych firmy Toray - lidera w produkcji włókna węglowego [2], jednym z największych odbiorców produktów tej firmy jest przemysł lotniczy i kosmonautyczny [3]. Przykładem samolotów pasażerskich, w których zastosowano kompozyty na dużą skalę są konstrukcje samolotów Airbus A350 XWB oraz Boeing B787 Dreamliner, które wykonane są odpowiednio z 53% i 50% materiałów kompozytowych [4, 5].

W 2014 agencja rządu Stanów Zjednoczonych NASA stworzyła kompozytowy zbiornik na paliwo o średnicy 5,5 metra. Space Exploration Technologies Corporation (SpaceX). Obecnie pracuje nad projektem Interplanetary Transport System, którego celem będzie możliwość wysłania wyprawy złożonej z co najmniej 100 osób na Marsa [6]. Kluczowym aspektem realizacji tej wyprawy ma być opanowanie produkcji zbiornika na paliwo o średnicy 12 metrów wykonanego z kompozytu węglowego [7].

Z powodu dużego zapotrzebowania przemysłu lotniczego na materiały kompozytowe, to właśnie tam intensywnie rozwijane są technologie dotyczące materiałów kompozytowych, w tym także sektor badań nieniszczących. Dlatego też normy SAE i ASTM obejmują badania nieniszczące kompozytów

w zastosowaniach lotniczych i kosmonautycznych (Tab. 1).

2. Innowacyjne techniki badań nieniszczących

Do podstawowych metod badań nieniszczących kompozytów zalicza się techniki ultradźwiękowe, termowizyjne, radiologiczne, wizualne, penetracyjne, prądów wirowych, emisji akustycznej, drgań rezonansowych i optyczne [8]. W związku z dynamicznym wzrostem popytu na roboty w gospodarce światowej oraz polskiej, jak wynika z badań przeprowadzonych przez Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową [9, 10], można oczekiwać, że w najbliższej przyszłości coraz większe znaczenie będą zyskiwać zrobotyzowane badania NDT.

2.1 Techniki ultradźwiękowe

Firma TWI pracowała nad projektem IntACom, którego celem było zwiększenie wydajności badań nieniszczących [11, 12, 13]. Efektem projektu było stworzenie zrobotyzowanej celi inspekcyjnej składającej się z dwóch 6-osiowych robotów. Efektor robota wykorzystuje pojedynczy przetwornik ultradźwiękowy oraz metodę ultradźwiękową phased array (Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)), które zostały zamontowane w dyszy strumienia wody. Dysza, wykonana metodą druku 3D, zapewnia stałe sprzężenie akustyczne, kierując wiązkę fal na powierzchnię elementu. Aby ochronić głowice przed uszkodzeniami, zastosowano magnetyczny uchwyt wraz z mikrowyłacznikami, które w momencie kolizji i rozdzielania się uchwytu zatrzymują robota [14].

Firma GE oferuje produkt, służący do zrobotyzowanej inspekcji kompozytów, pod nazwą Hydrastar. Występuje on w dwóch konfiguracjach robotów – pojedynczej i podwójnej. System pomiarowy umieszczony na końcu ramienia

*Autor korespondencyjny. E-mail: jerzy.nowacki@zut.edu.pl

robota może wykorzystywać technologię phased array lub konwencjonalną Through Transmission Ultrasonic (TTU). Za pomocą odpowiednich głowic w jednym przejściu można kontrolować promienie zewnętrzne i wewnętrzne, teowniki lub przyspieszyć procedurę badań za pomocą głowicy cechującej się 15 milimetrowym obszarem skanowania. Oferowana jest również głowica wykorzystująca technikę Pulse Echo o szerokości skanowania 38mm [15].

Tab. 1. Wykaz norm dotyczących badań nieniszczących kompozytów

Tab. 1. List of standards for non-destructive testing of composites

Numer normy	Tytuł normy
Metoda emisji akustycznej	
ASTM E1495/ E1495M-12	Standard Guide for Acousto-Ultrasonic Assessment of Composites, Laminates, and Bonded Joints
ASTM E2191/ E2191M-16	Standard Practice for Examination of Gas-Filled Filament-Wound Composite Pressure Vessels Using Acoustic Emission
ASTM E2661/ E2661M-15	Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Plate-like and Flat Panel Composite Structures Used in Aerospace Applications
PN-EN 15857:2010	Badania nieniszczące - Emisja akustyczna - Badanie polimerów wzmocnionych włóknem - Określona metodologia i ogólne kryteria oceny
Metoda radiologiczna	
ASTM E2662-15	Standard Practice for Radiographic Examination of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications
Metoda ultradźwiękowa	
ASTM E2580-12	Standard Practice for Ultrasonic Testing of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications
Szerografia	
ASTM E2581-14	Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites and Sandwich Core Materials in Aerospace Applications
Metoda termograficzna	
ASTM E2582-07	Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications
Personel badań nieniszczących	
PN-EN 4179:2017	Lotnictwo i kosmonautyka -- Kwalifikacja i zatwierdzanie personelu badań nieniszczących
Normy ogólnego przeznaczenia	
ASTM E2533-16a	Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications
ASTM E2981-15	Standard Guide for Nondestructive Testing of the Composite Overwraps in Filament Wound Pressure Vessels Used in Aerospace Applications
SAE ARP5606A	Composite Honeycomb NDI Reference Standards
SAE ARP5605A	Solid Composite Laminate NDI Reference Standards

Stosowanie wody jako cieczy sprzęgającej wymaga zastosowania pomp (możliwy hałas), kontroli stanu instalacji, filtrów oraz dbania o jakość wody [16]. Aby uniknąć tych niedogodności, należałoby rozważyć zastosowanie w przyszłych projektach Laser Ultrasonics (LUS). Metoda ta wykorzystuje termosprężyste właściwości materiałów kompozytowych. Materiał absorbuje światło laserowe, które następnie przetwarzane jest na ciepło. Nagrzany obszar rozszerza się, wywołując naprężenia normalne i styczne, a więc niejako falę naprężeń. Cechą kompozytów o osnowie organicznej jest to, że fala ta zawsze rozchodzi się prostopadle do powierzchni. Dzięki temu brak jest szczególnych wymagań, co do ustawienia elementów badanych, gdyż wiązka lasera może padać pod różnymi kątami. Układ detekcji wykorzystuje interferometr Fabry'ego-Perota i laser pulsacyjny. Rozwiązanie takie oferuje firma PAR Systems pod nazwą handlową LaserUT® [17, 18].

DolphiCam 2D Ultrasonic Array Camera jest urządzeniem służącym do ultradźwiękowych badań kompozytów, które można podłączyć do tabletu lub komputera poprzez interfejs USB. Pozwala ono na pracę na sucho na błyszczących powierzchniach, ciecz sprzęgająca może być wymagana na chropowatych powierzchniach. Za jego pomocą możliwe jest tworzenie obrazów typu A, B, C-scan. Na rynku dostępne są dwa modele, jeden o oznaczeniu CF08, który pozwala na badanie kompozytów CFRP o grubości do 8 mm, oraz drugi o oznaczeniu CF16, za pomocą którego można analizować materiały do grubości 16mm. Kamera jest wykorzystywana podczas badań nieniszczących zbiornika paliwa wykonanego z kompozytu węglowego, wykorzystywanego w samolocie Boeing 787 Dreamliner [19, 20].

2.2 Techniki emisji akustycznej

WichiTech RD3 oraz Mitsui Woodpecker są urządzeniami służącymi do badań kompozytów metodą akustyczną, eliminującymi błąd ludzki, który może wystąpić przy klasycznym opukiwaniu młotkiem np. w pomieszczeniach o dużym natężeniu hałasu. Najnowszy model tego urządzenia firmy Mitsui, WP-632AM, wyposażony jest w ekran LCD, który wyświetla wartości zmierzone i rzeczywiste celem szybkiego porównania przez operatora, pozwala również na dostęp do historii pomiarów. Urządzenie można wyposażyć w opcjonalny ploter XY, który umożliwia stworzenie kolorowej mapy składającej się z kafelków (punktów pomiarowych) w różnych odcieniach. Zapewnia to szybkie określenie ilości defektów oraz ukazuje przybliżoną wielkość i lokalizację wady w czasie rzeczywistym [21, 22, 23, 24].

2.3 Techniki termograficzne

Wykonywanie pomiarów termograficznych metodą impulsową może być używane do wykrywania rozwarstwień w materiałach kompozytowych. Firma Flir opisała na swojej stronie internetowej wykorzystanie kamery FLIR SC7000 do kontroli kompozytowych ram rowerowych [25].

Mając na uwadze fakt, iż termografia staje się coraz bardziej dostępna, jak na przykład sensor FLIR Lepton®, który został zastosowany w smartfonie CAT S60 [26], czy też obecne na rynku akcesoria do telefonów z systemem iOS

i Android, takie jak Flir ONE, Seek Thermal CompactPRO oraz I3 Systems Inc. Thermal Expert, jest to bardzo obiecujący kierunek rozwoju badań nieniszczących kompozytów w małych warsztatach.

Rozwiązaniem, które zostało opracowane w szczególności na potrzeby badań materiałów kompozytowych jest produkt C-CheckIR opracowany przez firmę Automation Technology GmbH. C-CheckIR wykorzystuje technikę aktywnej termografii. Rozwiązanie to pozwala na przeanalizowanie obszaru o wymiarach 0,5 x 0,4 m, z możliwością zawężania oraz rozszerzania granic badanego rejonu. Czas pomiaru przeciętnie wynosi mniej niż 15 sekund, nie jest wymagane przygotowywanie powierzchni przed badaniem. System C-CheckIR umożliwia badanie elementów na bieżąco oraz może zostać zrobotyzowany. Produkt jest także dostępny jako urządzenie, które może służyć do badań w lotnictwie zgodnie z procedurą Airbus NTM 55-40-50 [27].

Thermal Wave Imaging (TWI) również oferuje produkty wykorzystujące termografię do badań nieniszczących materiałów kompozytowych. W ofercie posiadają systemy dla przemysłu i laboratoriów, urządzenia zrobotyzowane oraz przenośny system VoyagerIR [28].

2.4 Techniki shearografii laserowej

Szerografię oferuje firma Dantec Dynamics np. jako przenośne systemy FlawExplorer, składające się układu pomiarowego i terminalu PC. System wyposażony jest w 4 lub 8 diod laserowych, pozwalając na badanie pola o powierzchni od 100 x 100 mm do 2 x 2 m na jedno zdjęcie. System może zostać łatwo zautomatyzowany w połączeniu z robotem w celu wykonywania zrobotyzowanych badań NDT.

Drugim systemem oferowanym przez firmę Dantec Dynamics jest produkt o nazwie Q810. Jest to system wyposażony w głowicę próżniową, pracujący niezależnie od warunków otoczenia, pozwalający na przebadanie pola o powierzchni 300 mm x 200 mm co 10 sekund. Zarówno optyka, jak i dioda lasera są hermetycznie chronione przed pyłem i zanieczyszczeniami. Samodopasowująca się uszczelka pozwala na badanie powierzchni o skomplikowanych kształtach. Oprogramowanie dołączone do urządzenia ma możliwość automatycznego wykrywania wad, eliminując błąd ludzki [29 - 31].

3. Próby termograficznych badań delaminacji kompozytu węglowo-epoksydowego

3.1 Cel badań

W kompozytach jedną z wad, która występuje stosunkowo często i może doprowadzić do zniszczenia elementu, jest delaminacja. Rozwarstwienie wiąże się z utratą sztywności i wytrzymałości, co jest niewskazane, gdy trzeba zapewnić wymaganą niezawodność i bezpieczeństwo konstrukcji. W przypadku kompozytów „sandwich” z przekładkami w postaci plastra miodu, wykorzystywanych w przemyśle lotniczym, problemem jest wilgoć, która przez mikropęknięcia na powierzchni nośnych warstw kompozytowych może przedostać się do wnętrza komórek rdzenia. Woda może również dostać się do kompozytu przez miejsca elementów złącznych. Samolot na wysokości przelotowej narażony jest

na działanie wysokich, ujemnych temperatur, co w przypadku zawilgoconej przekładki może spowodować zwiększenie objętości zamarzającej wody i w konsekwencji uszkodzeń struktury, a nawet zerwania części poszycia [32]. W związku z tym istnieje potrzeba sprawdzenia możliwości wykorzystania kamery termograficznej kompatybilnej ze smartfonem do szybkich inspekcji struktur kompozytowych.

3.2 Materiał i metoda badań

Próby termograficznych badań delaminacji kompozytu węglowo-epoksydowego przeprowadzono z użyciem kamery termowizyjnej i akcesorium Flir One do telefonu z systemem iOS (Rys. 1, 2).



Rys. 1. Kamera termowizyjna Flir One podłączona do tabletu iPad mini. Dzięki symetryczności złącza Lighting, kamerę można zamontować w jednym z dwóch kierunków – w stronę operatora lub przeciwnie do niego.

Fig. 1. Flir One thermal camera connected to the iPad mini. With the symmetry of the Lighting connector, the camera can be mounted in one of two directions - in the direction of the operator or vice versa.

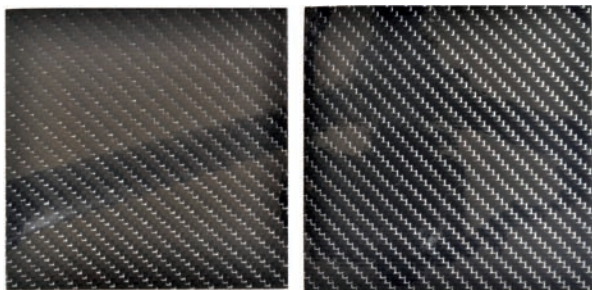
Firma Flir opracowała technologię MSX, która łączy obraz termiczny z konturami obrazu widzialnego, dzięki czemu obraz cechuje się większą szczegółowością. Rozdzielczość sensora wynosi 160 x 120 px, a czułość termiczna - 100 mK. Kamera posiada dwa obiektywy, więc przy bliskich odległościach od przedmiotu badanego może być widoczny problem

paralaksy. Niedogodnością, przy niewielkiej wielkości zasymulowanych wad, jest zwiększenie szczegółowości obrazu poprzez wprowadzenie konturów obrazu widzialnego, co może przeszkodzić w prawidłowej ocenie próbek.



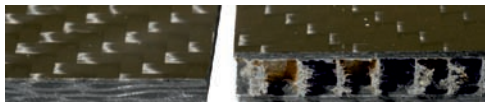
Rys. 2. Akcesorium Flir One do telefonu z systemem iOS (złącze Lighting)

Fig. 2. Flir One accessory for iOS phone (Lighting connector)



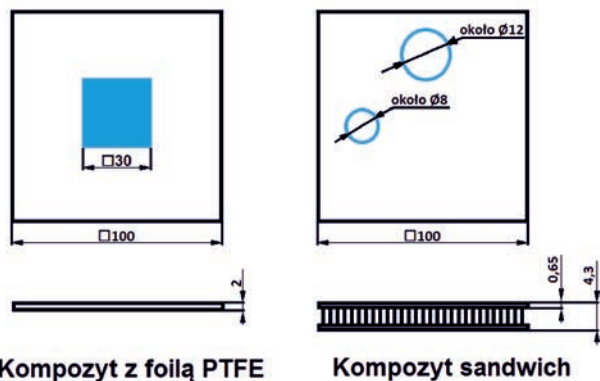
Rys. 3. Próbkę kompozytową z folią PTFE (lewa) oraz sandwich (prawa)

Fig. 3. Composite sample with PTFE foil (left) and sandwich (right)



Rys. 4. Fragment przekroju próbki kompozytowej z folią PTFE (lewa) oraz sandwich (prawa)

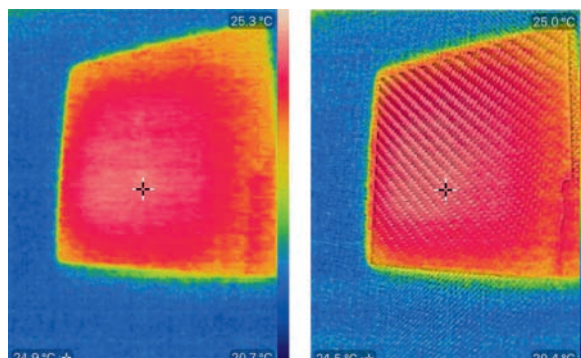
Fig. 4. Fragment of cross section of composite sample with PTFE film (left) and sandwich (right)



Rys. 5. Lokalizacja i wymiary zasymulowanych wad
Fig. 5. Location and dimensions of simulated defects

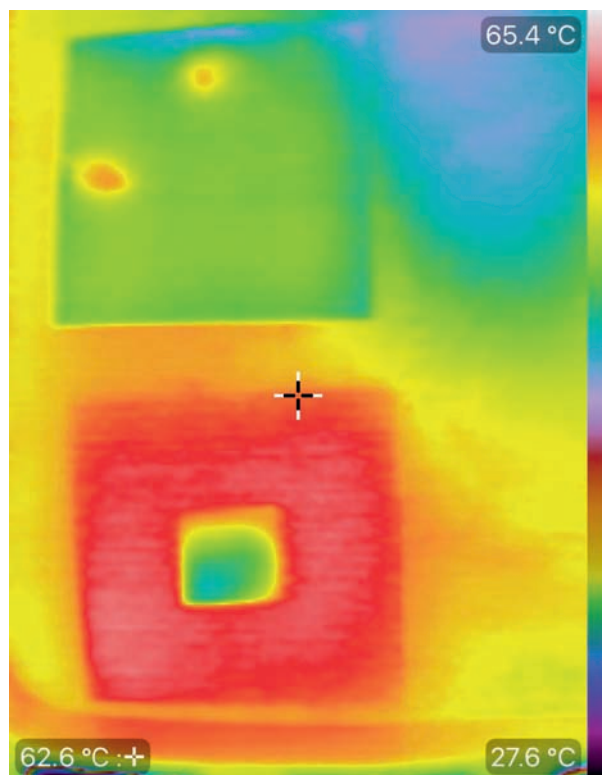
W związku z tym, jako oprogramowanie użyte do zapisania zdjęć termograficznych wybrano Thermal Camera+

For Flir ONE autorstwa Georga Friedricha. Aplikacja ta pozwala na wyłączenie funkcji MSX. Wodę wewnątrz komórki rdzenia wprowadzono strzykawką lekarską, wbijając igłę w wybranych miejscach próbki.



Rys. 6. Porównanie obrazu termicznego (lewy) z obrazem termicznym połączonym z konturami obrazu widzialnego (prawy). Wzrost szczegółowości widać szczególnie na powierzchni próbki, na której widoczny jest splot tkaniny węglowej.

Fig. 6. Comparison of thermal image (left) with thermal image combined with visual contours (right). The increase in detail is particularly visible on the surface of the sample, where the weave of carbon fabric is visible



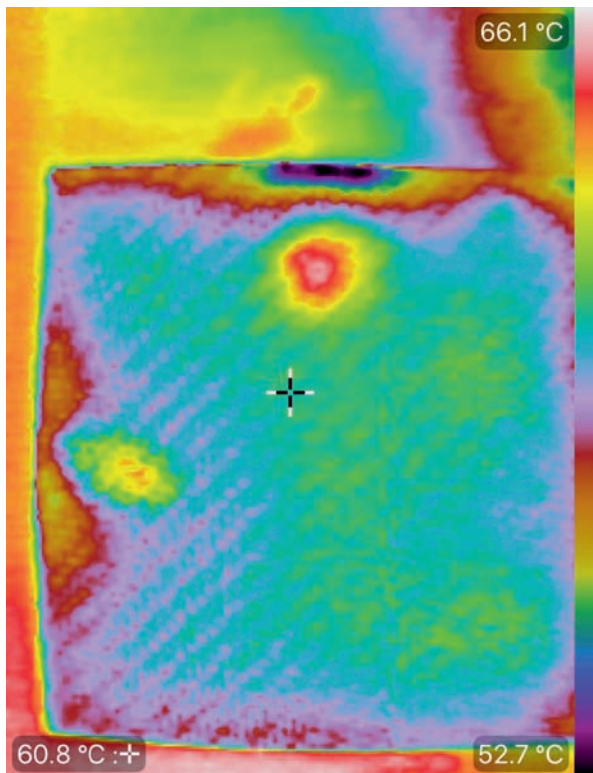
Rys. 7. Wady widoczne w próbkach. Próbkę z folią PTFE wykazuje w obszarze defektów niższą temperaturę, gdyż kamera znajdowała się po przeciwnej stronie źródła ciepła. W przypadku próbki sandwich została ona obrócona tak, aby nagrzana strona próbki skierowana była w stronę kamery, stąd wada widoczna jest jako obszar o wyższej temperaturze.

Fig. 7. Disadvantages visible in samples. The PTFE foil shows a lower temperature in the defect area as the camera is on the opposite side of the heat source. In the case of a sandwich sample, it is rotated so that the heated side of the sample faces the camera, so the defect is seen as a higher temperature area.

Próbki zostały położone na stole grzewczym i ogrzane do temperatury około 90°C. Następnie próbki przełożono na blachę rozgrzaną do temperatury około 50°C. Próbkę sandwich podczas przekładania obrócono o 180° tak, aby strona nagrzana była w kierunku kamery termowizyjnej.

Badania przeprowadzono na próbkach kompozytowych węglowo-epoksydowych o wymiarach 100 x 100 mm (Rys. 3, 4). W celu zasymulowania rozwarstwienia w próbce wykonanej metodą RTM wprowadzono fragment folii wykonanej z PTFE, o wymiarach 30 x 30 mm, pomiędzy środkowymi warstwami zbrojenia (Rys. 5). Grubość próbki z delaminacją wynosiła 2 mm. W przypadku próbki przekładkowej grubość nośnych warstw kompozytowych wynosi 1,3 mm. Grubość przekładki ulowej to 3 mm, zaś całkowita grubość próbki to 4,3 mm.

W wyniku badań zarejestrowano obrazy termiczne i obrazy termiczne połączone z konturami obrazu widzialnego próbek z zasymulowanymi wadami (Rys. 6 - 8).

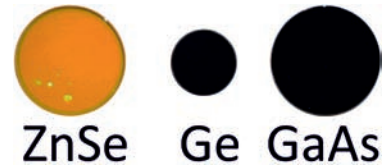


Rys. 8. Wady widoczne na próbce sandwich, na brzegach próbki obecne są miejsca, przez które wprowadzano ciecz za pomocą strzykawki

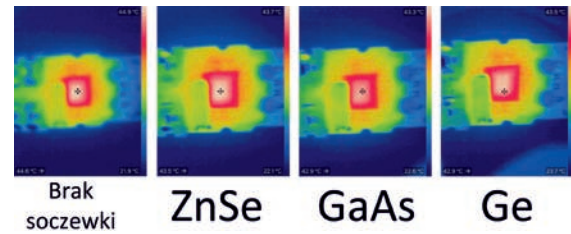
Fig. 8. Defects visible on the sandwich sample, on the edges of the sample, are the places through which the liquid was introduced by means of a syringe

3.3 Jakość obrazu

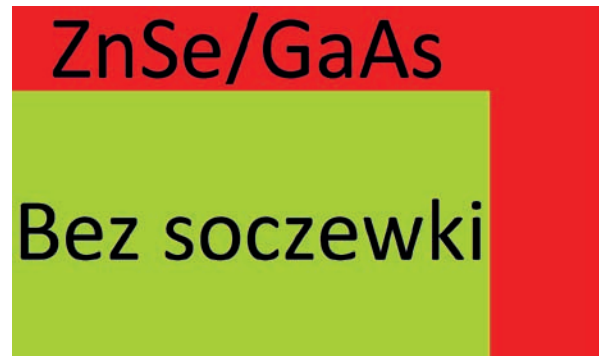
Problemem podczas badania małych elementów lub z bliskich odległości może być brak ostrości obrazu termowizyjnego. W celu jego poprawy można zastosować optykę wykonaną z np. arsenku galu GaAs, selenku cynku ZnSe lub germanu Ge (Rys. 9). Wadą ZnSe jest jego skłonność do zarysowań. Soczewki wykonane ZnSe oraz GaAs użyte do badań mają 20 mm średnicy oraz ogniskową 64,5 mm. Soczewka z Ge ma średnicę 12 mm oraz ogniskową 50,8 mm.



Rys. 9. Soczewki użyte w badaniu
Fig. 9. Lenses used in the study



Rys. 10. Karta dźwiękowa USB. Widoczne powiększenie obrazu oraz zwiększenie jego jakości po zastosowaniu każdej z soczewek.
Fig. 10. USB sound card. The picture shows magnification of the object and increase in its quality after using different types of lenses.



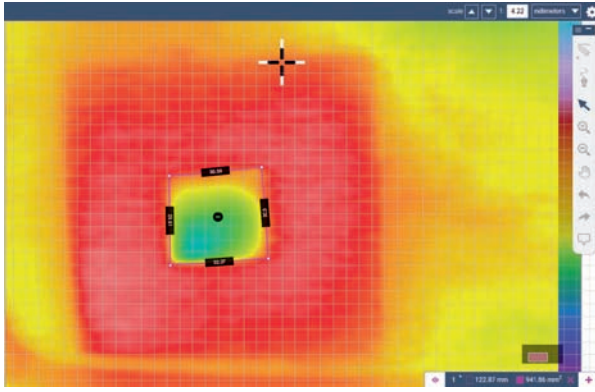
Rys. 11. Porównanie wielkości powiększenia obiektu z wykorzystaniem soczewki GaAs/ ZnSe z wielkością obrazu zarejestrowanego bez soczewki

Fig. 11. Comparison of GaAs / ZnSe object magnification with image size recorded without lens

Telefon wraz z kamerą termowizyjną zamontowano na statywie. Odległość kamery od przedmiotu badanego, czyli karty dźwiękowej USB, była stała. Kolejno przykładano soczewki do obiektywu kamery Flir One i zapisywano zdjęcia. Zastosowanie soczewek GaAs, ZnSe i Ge spowodowało widoczne powiększenie obrazu oraz jego szczegółowości (Rys. 10, 11).

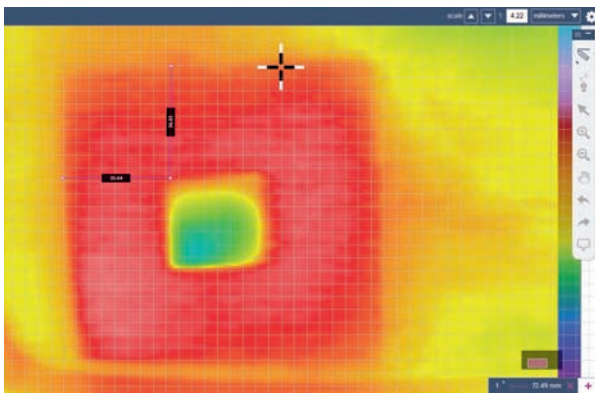
3.4 Wymiary i umiejscowienie wad

W celu opisanie rozmiaru oraz lokalizacji wad wykorzystano oprogramowanie Area Calculator - SketchAndCalc firmy Icalc, Inc. Program oferowany jest w postaci aplikacji internetowej oraz aplikacji mobilnej. Zaletą drugiego rozwiązania jest możliwość edycji termogramu na tym samym urządzeniu, którym wykonano zapis zdjęcia z kamery Flir ONE. Program ten pozwala na wprowadzenie wartości referencyjnej długości z uprzednio wykonanego zdjęcia. W przypadku znanych wymiarów próbki, tj. 100 x 100 mm jako wartość referencyjną przyjęto jedną z krawędzi próbki. Następnie za pomocą rysika oznaczano na ekranie kontury wad. Program automatycznie generował, na podstawie



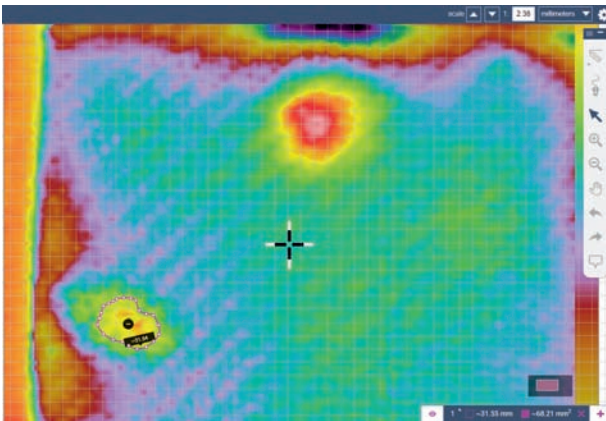
Rys. 12. Określenie wielkości zasymulowanej wady w postaci folii PTFE

Fig. 12. Determination of the size of the simulated defect in the form of PTFE foil



Rys. 13. Określenie lokalizacji wady w postaci folii PTFE

Fig. 13. Determination of defect location in the form of PTFE foil

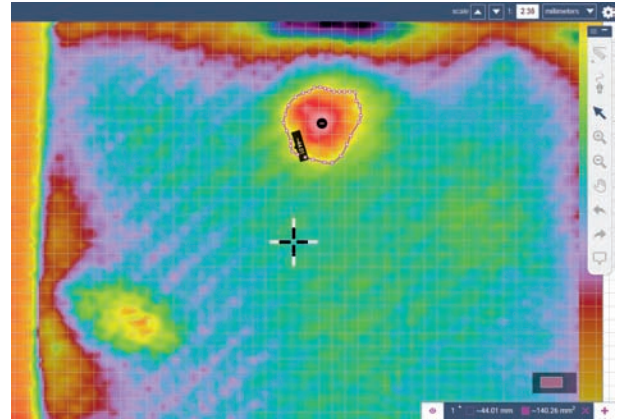


Rys. 14. Określenie wielkości jednej z dwóch wad w próbce sandwich

Fig. 14. Determination the size of one of the two defects in the sandwich sample

wprowadzonych punktów, obwód oraz pole powierzchni oznaczonych obszarów.

Fragment folii PTFE miał wymiary 30x30mm i uzyskane wyniki były bardzo zbliżone do tej wartości. Również spróbowano określić lokalizację wady, a dokładniej narożnika folii PTFE (Rys. 12 - 15). W przypadku próbki sandwich określono jedynie wielkości wad.



Rys. 15. Określenie wielkości drugiej wady w próbce sandwich

Fig. 15. Determination the size of the second defect in the sandwich sample

4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych testów wykazano przydatność kamery termowizyjnej Flir One w warsztatowych badaniach delaminacji kompozytów epoksydowo – węglowych.

Opracowanie technik termograficznych badań delaminacji kompozytów polimerowych z użyciem kamery termowizyjnej i akcesorium Flir One do telefonu z systemem iOS otwiera możliwość prowadzenia podstawowej inspekcji materiałów kompozytowych w małych zakładach produkcyjnych, a nawet ze względu na prostotę - również przez hobbystów.

Istnieje potrzeba przeprowadzenia dalszych badań w celu określenia możliwości wykrywania innych wad np. porów, jak również określenia wielkości wad możliwych do wykrycia analizowaną metodą.

W celu poprawy jakości obrazowania małych elementów za pomocą mobilnej kamery Flir One można zastosować tanie i łatwo dostępne soczewki do laserów.

Przyszłością badań materiałów kompozytowych jest możliwość ich automatyzacji lub robotyzacji, co umożliwi wykluczenie ewentualnego błędu człowieka podczas pomiarów oraz przyspieszy proces badania NDT, co ma znaczenie szczególnie podczas produkcji seryjnej.

5. Literatura/References

- [1] F. Shanley, "Historical Note on the 1.5 Factor of Safety for Aircraft Structures", Journal of the Aerospace Sciences, vol. 29, no. 2, pp. 243-244, 1962.
- [2] Carbon fiber market share by company", rmi.org, 2011. [Online]. Available: http://www.rmi.org/RFGGraph-Carbon_fiber_market_share_by_company. [Accessed: 06- Mar- 2017].
- [3] "TORAY", Toray.com. [Online]. Available: http://www.toray.com/ir/individual/ind_012.html. [Accessed: 23- May- 2017].
- [4] B. Lu, "The Boeing 787 Dreamliner: Designing an Aircraft for the Future", Journal of Young Investigators, 2010.
- [5] K. Campbell, "Airbus to start manufacturing parts for new A350 XWB in late '09", Engineering News, 2009. [Online]. Available: <http://www.engineeringnews.co.za/article/airbus-to-start-manufacturing-parts-for-new-a350-xwb-in-late-09-2009-05-11>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [6] M. Wall, "SpaceX's Elon Musk Unveils Interplanetary Spaceship to Colonize Mars", Space.com, 2016. [Online]. Available: <https://www.space.com/34210-elon-musk-unveils-spacex-mars-colony-ship.html>. [Accessed: 12- Mar- 2018].

- [7] D. Mosher, "Elon Musk is about to test the 'trickiest' part of his Mars spaceship — a giant, potentially explosive black orb", *Business Insider*, 2016. [Online]. Available: <http://www.businessinsider.com/spacex-carbon-fiber-fuel-tank-ocean-ship-test-2016-10?IR=T>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [8] S. Ochelski, *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004.
- [9] K. Łapiński, "Wpływ robotyzacji na konkurencyjność polskich przedsiębiorstw", *Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową*, 2016. [Online]. Available: http://ahk.pl/fileadmin/ahk_polen/DEinternational/Automatik2016/Krzysztof_Lapinski_INBnGR.pdf. [Accessed: 12- Mar- 2017].
- [10] K. Łapiński, M. Peterlik and B. Wyżnikiewicz, "Wpływ robotyzacji na konkurencyjność polskich przedsiębiorstw (II edycja raportu)", *Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową*, 2015. [Online]. Available: http://www.ibngr.pl/content/download/2067/19573/file/Roboty_2015.pdf. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [11] B. Fitzsimons, "Web Exclusives : Aerospace Testing International", *Aerospacetestinginternational.com*. [Online]. Available: <http://www.aerospacetestinginternational.com/articles.php?ArticleID=1185>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [12] "Robotic automated NDT inspection boost for the aerospace industry", *Twi-global.com*, 2014. [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/news-events/news/2014-09-robotic-automated-ndt-inspection-boost-for-the-aerospace-industry>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [13] I. Cooper, I. Nicholson, D. Yan, B. Wright, D. Liaptsis and C. MINEO, "DEVELOPMENT OF A FAST INSPECTION SYSTEM FOR COMPLEX COMPOSITE STRUCTURE - THE INTACOM PROJECT", *Ndt.net*, 2013. [Online]. Available: http://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/45_Cooper.pdf. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [14] B. Wright, I. Cooper, P. Nicholson, C. Mineo and S. Pierce, "PAUT Inspection of Complex Shaped Composite Materials through 6 DOFs Robotic Manipulators", *Twi-global.com*, 2014. [Online]. Available: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/paut-inspection-of-complex-shaped-composite-materials-through-6-dofs-robotic-manipulators>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [15] "Hydrastar Robotic Ultrasonic Solutions for Composites Inspection", *Gemeasurement.com*, 2015. [Online]. Available: https://www.gemeasurement.com/sites/gemc.dev/files/geit-60026_hydrastar_en_0.pdf. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [16] J. Szelążek, "Tworzywa sztuczne jako ośrodki sprzęgające w ultradźwiękowych badaniach materiałów", *Tworzywa sztuczne i chemia*, vol. 52, no. 2, pp. 21-24, 2010.
- [17] "LaserUT™", *Par.com*, 2013. [Online]. Available: <http://www.par.com/files/9913/6640/3159/WhatisLaserUT.pdf>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [18] O. Pétilion, J. Dupuis, D. David, H. Voillaume and H. Trétout, "Laser Ultrasonics : A Non Contacting NDT System", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, pp. 1189-1195, 1995.
- [19] "DolphiCam 2D Ultrasonic Array Camera - JR Technology - Composite test and repair specialists and production engineers", *Jrtech.co.uk*, 2015. [Online]. Available: <http://www.jrtech.co.uk/products/ndt-and-inspection/141-dolphicam-2d-ultrasonic-array-camera>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [20] "Dolphicam", *Avionteq.com*, 2014. [Online]. Available: <http://www.avionteq.com/Document/Dolphicam.pdf>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [21] "Woodpecker WP-632 Handpiece - JR Technology - Composite test and repair specialists and production engineers", *Jrtech.co.uk*. [Online]. Available: <http://www.jrtech.co.uk/products/ndt-and-inspection/99-woodpecker-wp-632-handpiece>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [22] "Woodpecker WP-632AM with Optional XY Plotter - JR Technology - Composite test and repair specialists and production engineers", *Jrtech.co.uk*. [Online]. Available: <http://www.jrtech.co.uk/en/ndt-and-inspection/115-launch-of-new-woodpecker-wp-632am>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [23] "Woodpecker", *Wp632.cadex.co.jp*. [Online]. Available: <http://wp632.cadex.co.jp/products/woodpecker.htm>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [24] "Diagnose Equipment Issues Fast With the RD3 Hammer at WichiTech - Composite Repair Systems, Smallest & Most Powerful Hot Bonder: Baltimore, MD", *Composite Repair Systems, Smallest & Most Powerful Hot Bonder: Baltimore, MD*, 2012. [Online]. Available: <http://www.wichitech.com/blog/index.php/diagnose-equipment-issues-fast-with-the-rd3-hammer-at-wichitech/>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [25] "FLIR thermal imaging cameras help detect material failures in bikes", *Flirmedia.com*. [Online]. Available: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820254/T820254_EN.pdf. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [26] "Cat® Rugged Phones | Cat phones", *Catphones En Gb*. [Online]. Available: <http://www.catphones.com/en-gb/features/integrated-thermal-imaging>. [Accessed: 09- Mar- 2017].
- [27] "Automation Technology Vision Sensors and Systems", *Automationtechnology.de*. [Online]. Available: http://www.automationtechnology.de/cms/wp-content/uploads/2016/05/c-checkir-sensor_web-.pdf. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [28] "Thermal Wave Imaging, Inc.", *Thermalwave.com*. [Online]. Available: <http://www.thermalwave.com/1/376/index.asp>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [29] "Shearography - Non Destructive Testing (NDT) Measurement Systems", *Dantecdynamics.com*. [Online]. Available: <https://www.dantecdynamics.com/shearography-non-destructive-testing>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [30] <https://www.prager-elektronik.at/>. [Online]. Available: http://www.prager-elektronik.at/datenblaetter/schwingung/PI-Q-810_09_01.pdf. [Accessed: 10- Mar- 2017].
- [31] "New FlawExplorer inspection system for NDT & Quality Control applications", *Dantecdynamics.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.dantecdynamics.com/news/new-ndt-system-inspect-areas-up-to-2-m2>. [Accessed: 12- Mar- 2018].
- [32] D. Thompson and D. Chimenti, *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*. New York: Plenum Press, 1996.