

Problematyka diagnozowania kompozytowych konstrukcji lotniczych

The issues connected with non destructive techniques for the aerospace composite structures inspection

Streszczenie

W artykule przedstawiony zostanie opis problematyki diagnozowania kompozytowych konstrukcji lotniczych. Kompozyty, charakteryzując się zdecydowanie większym stosunkiem masy/wytrzymałość, niż większość konstrukcji wykonywanych np. z stopów lekkich. Są one jednak wrażliwe na uszkodzenia od uderzeń mechanicznych i termicznych. Ponadto w trakcie wytwarzania powstają uszkodzenia wpływające na zmniejszenie ich wytrzymałości. W artykule przedstawiono podejście do diagnostyki takich struktur z wykorzystaniem metod badań nieniszczących takich jak: metoda ultradźwiękowa z wykorzystaniem *Phased Array*, oraz metoda spektroskopii terahertzowej. Omówiono i przedstawiono problemy diagnozowania konstrukcji kompozytowych, w tym konstrukcji FML (*Fibre Metal Laminates*). Dla każdej z tych metod badań nieniszczących przedstawiono ich zalety i ograniczenia związane z diagnostyką takich konstrukcji.

Abstract

This paper presents approach for NDT techniques for composite structural integrity assessment of the aerospace structures. In such structures besides of higher mass/durability ratio than e.g. aluminum alloys aerospace components there is higher vulnerability on the failure mode creation because of impact damage from mechanical and thermal shocks. Moreover during the manufacturing process different damages occur and affect material strength. For the purpose of damage detection different NDE (Non Destructive Evaluation) techniques will be presented such as: ultrasonic with the use of Phased Array and THz spectroscopy. The main problems of the composites structures NDE will be highlighted and presented including FML (*Fibre Metal Laminates*). All the advantages and limitations of the above described NDE methods will be delivered.

Wstęp

Właściwości materiałów kompozytowych spełniające wymogi filozofii systemu eksploatacji „tolerowanego uszkodzenia” (*Damage Tolerance*), oraz korzystny iloraz masy do wytrzymałości powodują, iż producenci statków powietrznych (SP) coraz częściej stosują materiały kompozytowe do produkcji elementów konstrukcyjnych SP [1]. Kolejnym czynnikiem powodującym zwiększone zastosowanie materiałów kompozytowych jest możliwość zmniejszenia kosztów związanych z zużyciem paliwa oraz innych kosztów eks-

ploatacji [2]. Stosowane dotychczas stopy aluminium są podatne na powstawanie uszkodzeń związanych nie tylko z oddziaływaniem atmosfery (zjawisko korozji), ale również z oddziaływaniem cyklicznych obciążeń zmęczeniowych (przykładem jest zjawisko pęknięcia zmęczeniowego pod wpływem korozji – *Stress Corrosion Cracking* – SCC) [3, 4]. Zastosowanie materiałów kompozytowych eliminuje problem związany z występowaniem efektów korozyjnych. Jednakże należy zdawać sobie sprawę z innych czynników wpływających na możliwość zmniejszenia wytrzymałości takich struktur spowodowanych [5]:

- brakiem powtarzalności przy wytwarzaniu elementów, w szczególności w tzw. „technikach na mokro”;
- brakiem jednoznacznie określonej granicy plastyczności materiału;
- anizotropią materiału i związanymi z tym różnymi rodzajami uszkodzeń;

- szczególną podatnością na uszkodzenia od obciążeń prostopadłych do płaszczyzny powierzchni elementu;
- niedostatkami kontroli jakości elementów opuszczających wytwórnię;
- wysoką podatnością na powstawanie uszkodzeń od uderzeń o niewielkich energiach;
- możliwością powstawania wad i uszkodzeń podczas wytwarzania elementów, m.in. takich jak: porowatość, odklejenia, wtrącenia ciał obcych, rozwarstwienia.

Czynniki takie prowadzą do powstania wad w kompozytach i takich jak [6]:

- niewłaściwie wygrzana termicznie osnowa;
- nieprawidłowy udział objętościowy włókien zbrojenia – spowodowany nadmiarem lub brakiem osnowy. Lokalne nieprawidłowości zdarzają się podczas produkcji, jednakże duże odchyłki (tzn. większe obszary) występują wskutek nieprawidłowego przebiegu procesu wytwarzania;
- pory – wskutek parowania osnowy lub powietrza w trakcie nieprawidłowego przeprowadzenia procesu wygrzewania;
- brak równoległości w ułożeniu włókien zbrojenia – powoduje lokalne zmiany w objętościowym udziale włókien zbrojenia w materiale;
- brak równoległości w ułożeniu warstw. Powstaje w trakcie układania warstw. Może powodować zmianę sztywności materiału oraz odkształcenie w trakcie procesu wygrzewania;
- pękanie poszczególnych warstw – spowodowane oddziaływaniem poszczególnych warstw podczas wytwarzania;
- rozwarstwienia – rzadko spotykane podczas wytwarzania, jednakże mogą powstać wskutek zanieczyszczenia przy wytwarzaniu lub obróbce mechanicznej, polegają na niedoklejeniu poszczególnych warstw materiału kompozytowego;
- uszkodzenia włókien zbrojenia;
- odklejenia – w trakcie procesu wytwarzane komponenty mogą być klejone. Wskutek zanieczyszczenia lub braku kleju, elementy te mogą nie dolegać do siebie, co poważnie wpływa na zmniejszenie wytrzymałości badanego elementu;
- wtrącenia ciał obcych – polegające na pozostawieniu w trakcie wytwarzania, zanieczyszczeń, pozostałości z procesu wytwarzania.

W ostatnich latach prowadzono wiele badań, mających na celu zmniejszenie ilości wad powstających w materiałach kompozytowych. Rozwinięte zostały takie metody wytwarzania jak: RTM (*Resin Transfer Moulding*), RFI (*Resin Film Infusion*) [7]. Metody te jednakże mogą powodować powstawanie innych wad, co wymusza konieczność stosowania badań nieniszczących w ocenie materiałów kompozytowych.

Innymi przyczynami powstawania uszkodzeń w strukturach kompozytowych są czynniki wpływające na trwałość tych materiałów w trakcie eksploatacji. Takimi czynnikami powodującymi powstawanie

uszkodzeń w materiałach kompozytowych są [8]: obciążenia statyczne; uderzenia; procesy zmęczeniowe; efekty atmosferyczne (zmiany temperatury i wilgotności); przegrzania.

Wystąpienie uszkodzeń powoduje obniżenie właściwości wytrzymałościowych konstrukcji.

Kompozyty stosowane w konstrukcjach lotniczych

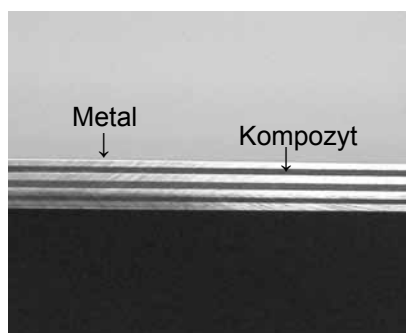
Kompozyty stosowane w lotnictwie w większości: CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Plastic*) – kompozyt polimerowy o zbrojeniu węglowym i GFRP (*Glass Fibre Reinforced Plastic*) – kompozyt polimerowy o zbrojeniu szklanym;

- zbudowane są z włókien węglowych/szklanych zespolonych za pomocą utwardzonej żywicy.

W zależności od właściwości włókien i żywicy, kompozyt uzyskuje różne właściwości mechaniczne i termodynamiczne. Właściwości kompozytu nie są średnią arytmetyczną ani sumą właściwości jego składników [7, 8].

Ostatnio coraz częściej w konstrukcjach lotniczych stosowane są również kompozyty FML (*Fibre Metal Laminates*) [9]. Przykładem takich konstrukcji są laminaty typu GLARE (*GLass ALuminium REinforced*). Są to laminaty składające się z warstw cienkiej blachy metalowej i kompozytu polimer-włókno ceramiczne lub polimerowego. Laminaty takie charakteryzują się doskonałymi właściwościami łącząc równocześnie właściwości metalu i włóknistego kompozytu polimerowego. Taka kombinacja daje w rezultacie nową generację materiałów hybrydowych o właściwościach pozwalających na hamowanie i blokowanie rozwoju pęknięć przy cyklicznym obciążeniu, bardzo dobrej charakterystyce wytrzymałości na obciążenia i udarność oraz niskiej gęstości co wpływa na zmniejszenie masy konstrukcji statków powietrznych.

Na rysunku 1 przedstawiono przykład laminatu FML wytworzonego jako próbkę odniesienia do badań nieniszczących. W laminacie wykonano uszkodzenia o charakterze wtrąceń ciał obcych za pomocą wkładek teflonowych o grubości 125 µm. Próbkę została wykonana przez Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Lubelskiej [10].



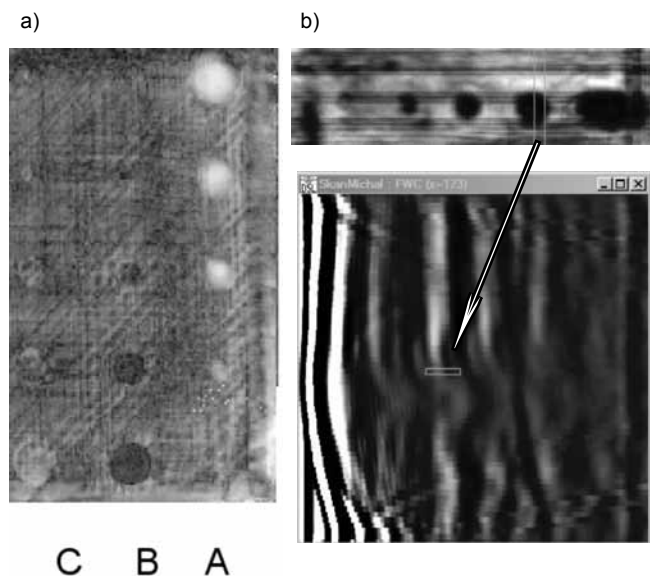
Rys. 1. Przykład laminatu FML
Fig. 1. FML laminate example

Metody badań i diagnostyki kompozytów

W chwili obecnej do badań materiałów kompozytowych stosuje się metody: wizualną, ultradźwiękową, rezonansowe, optyczną (D-Sight), shearography, termografię, radiografię, prądów wirowych oraz szereg metod hybrydowych. Każda z metod charakteryzuje się pewnymi ograniczeniami jak również możliwościami diagnozowania struktur określonych typów. W artykule przedstawione zostanie podejście do diagnostyki metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem techniki *Phased Array* oraz spektroskopii terahertzowej.

Metoda ultradźwiękowa (Phased Array)

Metoda ultradźwiękowa jest metodą pozwalającą na uzyskania najbardziej szczegółowych informacji o badanej strukturze. Wykorzystanie głowic wieloprzetwornikowych oraz funkcji modułów elektronicznych pozwala na zwiększenie możliwości diagnostycznych w szczególności w diagnostyce elementów wielowarstwowych. Poniżej przedstawiono wynik badania elementu (próbki odniesienia) wykonanej z laminatu FML z uszkodzeniami w postaci wtrąceń ciał obcych umieszczonych na różnej głębokości i posiadających różny rozmiar.



Rys. 2. Wyniki badań ultradźwiękowych laminatu FML: a) zobrazenie typu C dla pojedynczego przetwornika, b) zobrazenie typu C (u góry) i typu B za pomocą systemu *Phased Array* (strzałka wskazuje na lokalizację uszkodzenia przy dolnej krawędzi laminatu)

Fig. 2. FML laminate ultrasonic test results: a) C type view for single transducer, b) C type view (up) and B-scan made with the use of *Phased Array* system (arrow shows the place of damage – near to bottom edge)

Dla potrzeb wyznaczenia rozmiaru uszkodzenia wykorzystano następującą zależność opisującą iloraz sygnał/szum:

$$SNR [dB] = 10 \log_{10} \frac{f(x,y)_S}{f(x,y)_B}$$

gdzie: $f(x,y)_S$ – średnia wartość sygnału (amplitudy) w obszarze uszkodzenia; $f(x,y)_B$ – średnia wartość sygnału (amplitudy) w wokół obszaru uszkodzenia.

Diagnostyka FML z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej (w tym głowic wieloprzetwornikowych – *Phased Array*) jest jedną z najbardziej efektywnych metod. Wykorzystanie funkcji tzw. przetwarzania *post-processing* umożliwia charakteryzowanie poszczególnych warstw oraz zmianę warunków brzegowych pomiaru.

Rysunek 2 przedstawia wyniki badań ultradźwiękowych laminatu FML z wykorzystaniem pojedynczego czujnika oraz systemu *Phased Array*. Wykorzystanie pojedynczego czujnika nie pozwoliło wykryć wszystkich uszkodzeń. Przyczyną była szerokopasmowa odpowiedź od poszczególnych warstw, a w szczególności echa od dna (mała wartość SNR) badanego elementu.

Wykorzystanie *Phased Array* oraz metod przetwarzania sygnałów *post-processing* w tym ogniskowania wiązki, pozwoliło wykryć wszystkie uszkodzenia [12, 13]. Co więcej technika *Phased Array* umożliwia dynamiczne zobrazowanie struktury z wykorzystaniem zobrazowania typu B-scan, co umożliwia tzw. szybki podgląd struktury.

Na rysunku 2 (dla głowic wieloprzetwornikowych) przedstawiono uszkodzenia zlokalizowane przy dolnej krawędzi płytki. Wykorzystanie tzw. aktywnej bramki umożliwia wizualizację uszkodzeń położonych na różnych głębokościach.

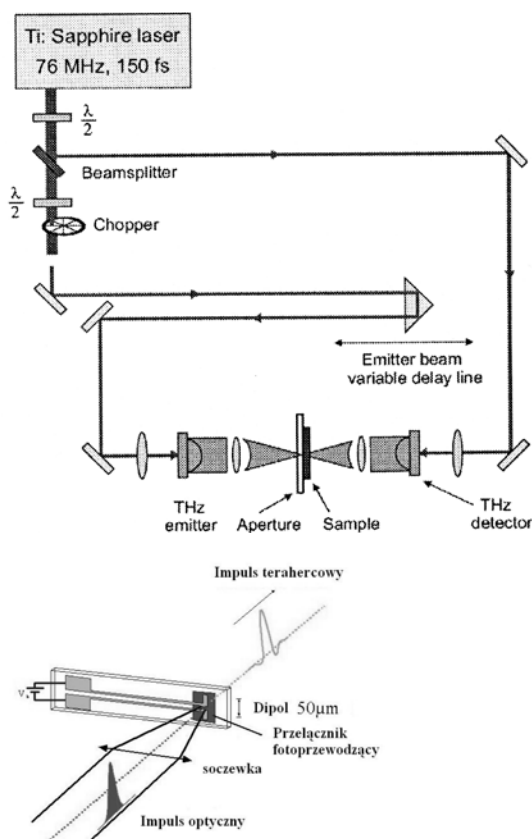
Najważniejsze informacje wynikające z badania przygotowanej próbki są następujące:

- badanie elementów o grubości 0,5 mm powoduje szereg odbić sygnałowych wpływających na utrudnioną detekcję uszkodzeń w szczególności tych położonych głębiej.
- istotnym czynnikiem wpływającym na wykrywalność jest odpowiedni dobór parametrów badania np.: częstotliwość powtórzeń, (uniknięcie efektów rezonansowych, odpowiednia rozdzielczość czasowa, efekty nieliniowe, likwidacja efektów dyfrakcyjnych);
- wykorzystanie funkcji składania danych (*Data Compounding*) i analiz *post processing* pozwala na określenie i wykrycie wszystkich uszkodzeń zaimplementowanych w badanej próbce – jednakże wymaga to wykorzystania odpowiednio przygotowanej jednostki pomiarowej;
- oszacowana wartość błędu wyznaczenia pola powierzchni uszkodzenia wynosi ok. 1%.

Metoda spektroskopii Terahertzowej (THz) – TDS

Fale terahercowe (THz) to ostatni niezagospodarowany dotąd przez człowieka zakres promieniowania elektromagnetycznego. Pasma terahercowe obejmuje fale w przedziale $0,3 \div 10$ THz ($300 \div 10\,000$ GHz) i odpowiada długościom fal od 1 mm do 30 μm . Urządzenia wykorzystujące technikę terahercową mają (i mogą mieć) bardzo szerokie zastosowania w różnych obszarach życia. Ze względu na niejonizacyjny charakter tego promieniowania, a co za tym idzie, brak szkodliwości jego oddziaływania na organizmy żywe może ono wyprzeć urządzenia rentgenowskie z wielu zastosowań.

Jednym z wielu zastosowań terahercowego zakresu promieniowania są nieniszczące badania materiałów (odzież, skóra, tworzywa sztuczne), struktur oraz organizmów żywych, które zawierają niezbyt duże ilości wody i nie są metalami. Jego mniejsza przenikliwość pozwala badać materiały o mniejszej gęstości, z czym nie radziły sobie promienie X. W wyniku prześwietlenia próbki otrzymywany jest obraz, który ukazuje ukryte dla zwykłej optyki defekty struktury. Pozwala wykryć miejsca uszkodzeń różnych elementów np. w strukturach kompozytowych czy w urządzeniach półprzewodnikowych, a także wady lub choroby



Rys. 3. Schemat systemu dla spektroskopii TDS (u góry) oraz generacja impulsu terahercowego z wykorzystaniem anteny fotoprzewodzącej (na dole)

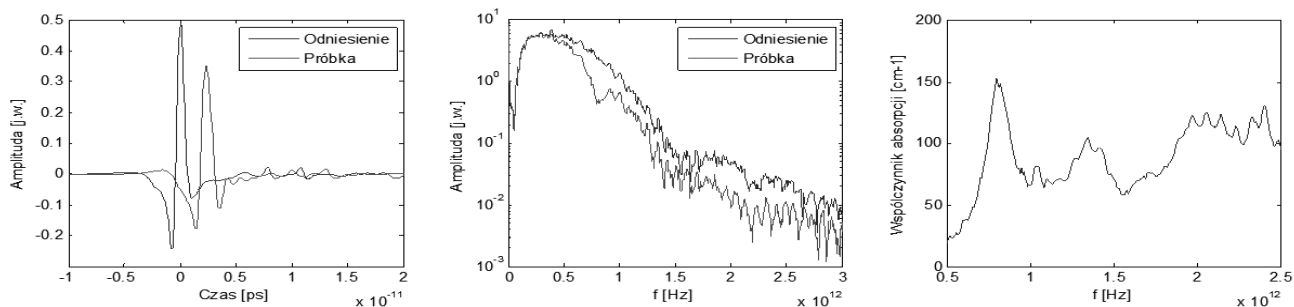
Fig. 3. The scheme of system for TDS spectroscopy (top) and the terahertz impulse generation with the use of photoconduction aerial (down)

organizmów żywych. W odniesieniu do laminatów, promieniowanie THz łatwo przenika poprzez większość materiałów polimerowych, także kolorowych i nieprzenikalnych dla zakresu widzialnego i podczerwieni [11]. Jednakże wzmocnienia w postaci włókien szklanych, węglowych czy magnezium hydroxide wykazują większą absorpcję. Ponadto włókna, których średnice są porównywalne z długościami fali THz (rzędu ułamków mm) ze względu na rozpraszanie posiadają większy kontrast w porównaniu do promieniowania podczerwonego, widzialnego i rentgenowskiego.

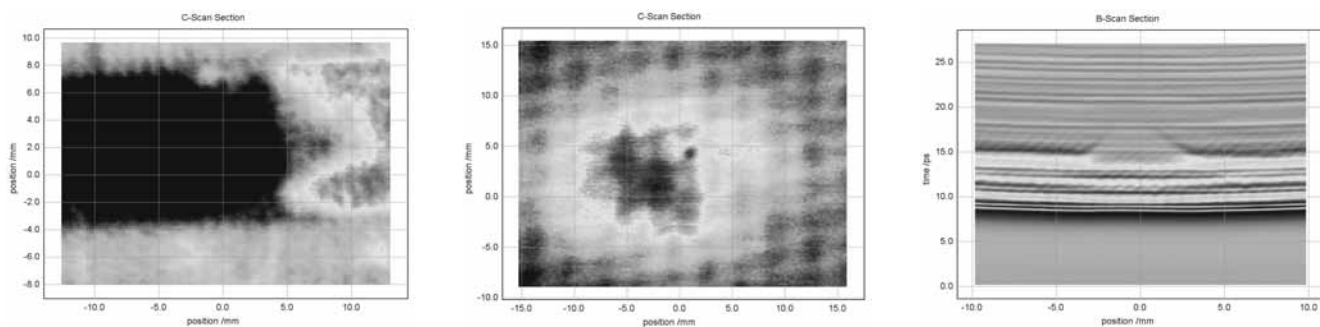
W przedstawionej metodzie pomiarowej wykorzystywane będą propagujące się impulsy promieniowania THz (podobnie jak w metodzie ultradźwiękowej), zarówno w trybie transmisyjnym jak i odbiciowym. Ich czasowe opóźnienia i echa dostarczają informacji nie tylko o grubości próbki i jej strukturze wewnętrznej ale także o jej warstwach, niejednorodnościach, rozwarstwieniach czy porach powietrznych [12].

Opis techniki TDS i jej możliwości zostanie przedstawiony na przykładzie spektrometru firmy Ekspla (rys. 3). Generującym i zarazem detekującym elementem systemu jest antena dipolowa konstruowana na absorbującym promieniowanie laserowe bliskiej podczerwieni (ok. 800 nm) warstwie półprzewodzącej (GaAs) osadzonej na podłożu dielektrycznym.

Warstwa półprzewodnika zostaje spolaryzowana napięciem ok. 50V przyłożonym do elektrod naniesionych na powierzchni półprzewodnika. Pomiędzy poszczególnymi elektrodami istnieje kilkumikronowa przerwa. Duża oporność półprzewodnika powoduje, że upływ prądu jest pomijalnie mały. Laserowy, silny impuls femtosekundowy zogniskowany na wyróżnionej przerwie między elektrodami powoduje generację elektronów i dziur w obszarze półprzewodnika. Polaryzacja umożliwia zaś przepływ ładunków – elektronów i dziur do odpowiednich elektrod. Parametry materiałowe półprzewodnika są tak dobrane, że femtosekundowy impuls laserowy (czas trwania impulsu < 150 fs) generuje impuls elektryczny terahercowej częstotliwości składowych widma impulsu. Promieniowanie zebrane i ukierunkowane przez hemisferyczną soczewkę tworzy użyteczny strumień THz. Wyżej opisany układ generuje ciąg impulsów terahercowych, których cykl odpowiada cyklowi padających na antenę impulsów z lasera (ok. 80 MHz). Zakres częstotliwości wynosi $0,1 \div 3$ THz, a moc ok. $10 \mu\text{W}$. Jako detektor promieniowania terahercowego stosuje się identyczną antenę dipolową z czułym amperomierzem. Podobnie jak w generatorze femtosekundowy impuls laserowy generuje obszar ładunków między elektrodami. W czasie bardzo krótkiego życia tych ładunków na detektor pada „wolny” impuls terahercowy, który powoduje przepływ prądu w antenie o kształcie i natężeniu proporcjonalnym do chwilowej wartości natężenia impulsu terahercowego, co jest mierzone czułym amperomierzem. Skanując położenie linii opóźniającej istnieje możliwość odtworzenia na detektorze całego impulsu terahercowego.



Rys. 4. Przebiegi czasowe impulsów THz, ich transformaty Fouriera (FFT) oraz widmo transmisyjne próbki heksogenu. [IOE WAT pomiary własne]
Fig. 4. The THz impulse time course, Fourier transform (FFT) and transmission spectrum of the hexogen sample [IOE WAT own measurements]



Rys. 5. Wyniki z badania metodą spektroskopii THz
Fig. 5. Results of THz spectroscopy test

W związku z tym systemy generacji i detekcji pracują w jednym, zsynchronizowanym w czasie układzie optycznym (rys. 3). Widmo transmisyjne materiału badanego jest ilorazem dwóch widm – próbki badanej i bez próbki (odniesienie). Na rysunku 4 pokazano przebiegi czasowe odebranych impulsów terahercowych, ich charakterystyki widmowe po transformacji Fouriera oraz widmo transmisyjne dla próbki heksogenu. Ze względu na duże tłumienie par wody, pomiary metodą TDS wykonuje się najczęściej w komorze z przedmuchem suchym powietrzem lub azotem. Opisywana metoda TDS, ze względu na swoje właściwości, może być adoptowana do obrazowania struktury materiałów kompozytowych. W przypadku dużych próbek (rzędu kilku cm), próbka jest umieszczana w uchwycie sterowanym silnikami krokowymi. Interesujący skan całej próbki jest uzyskiwany metodą rastrową punkt po punkcie a wyspecjalizowane oprogramowanie tworzy

obraz całej próbki (analogiczne do systemów skanujących np. metodą ultradźwiękową).

Możliwe jest także poruszanie głowicą nadawczo-odbiorczą w przypadku pomiaru dużych powierzchni. Każdy piksel obrazu reprezentuje jedną wartość uzyskaną z analizy impulsu terahercowego – może to być np. moc transmitowana w całym impulsie lub w pewnym jego przedziale, wartość szczytowa impulsu czy też opóźnienie impulsu względem impulsu odniesienia [12]. Tak więc z jednego procesu skanowania można uzyskać wiele dopełniających się obrazów terahercowych. Poniżej przedstawiono wyniki badań metodą spektroskopii THz laminatów wykonanych z GFRP.

Wyniki przedstawione na rysunku 5 obejmują uszkodzenia o charakterze odklejeń i rozwarstwień. Materiał przygotowany do badań to próbki wykonane z włókien szklanych i przedstawiające poszycie statków powietrznych.

Podsumowanie

Przedstawiono wybrane i rozwijane obecnie metody diagnostyki konstrukcji kompozytowych. Każda z stosowanych metod diagnostyki nieniszczącej ma swoje ograniczenia jak i możliwości zależne od badanego materiału jak i kształtu, grubości połączeń. W przypadku metody ultradźwiękowej olbrzymie możliwości w diagnostyce kompozytów zostały rozwinięte dzięki możliwościom przetwarzania sygnałów w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz

przetwarzaniu obrazów. Obecnie rozwijane są metody analizy poszczególnych warstw w strukturze kompozytowej, tzw. „ply stacking sequence”. Metody te pozwalają na ocenę uszkodzeń znajdujących się w poszczególnych warstwach kompozytu.

Jednym z alternatywnych i nowych podejść jest wykorzystanie spektroskopii THz. Jednakże metoda ta nadal w większości przypadków dotyczących konstrukcji lotniczych pozwala na badania jedynie laboratoryjne.

Literatura

- [1] Roach D., DiMambro J.: Enhanced Inspection Methods to Characterize Bonded Joints: Moving Beyond Flaw Detection to Quantify Adhesive Strength, Air Transport Association Nondestructive Testing Forum, Forth Worth (USA) 17-19.10.2006.
- [2] Roach D., Nikhilesh A., Composite Structure Utilization – Commercial Airplanes, SAE International 05AMT-51, 2005.
- [3] NDE of Hidden Corrosion, report NTIAC, Austin TX, 1998.
- [4] Aging of U.S. Air Force Aircraft, final report, Washington D.C. 1997.
- [5] Composite Qualification Criteria, 51st Annual Forum of the American Helicopter Society, Forth Worth, TX, May.
- [6] Baza wiedzy o strukturach kompozytowych: www.netcomposites.com.
- [7] Abaris Training Resources: Advanced Composite Structures: Fabrication and Damage Repair, Copyright, 1998.
- [8] Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S.: Kompozyty, podstawy projektowania i wytwarzania, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
- [9] Surowska B.: Materiały Funkcjonalne i Złożone W Transporcie Lotniczym, Eksploatacja i Niezawodność, nr 3/2008, s. 30-39.
- [10] K. Dragan, J. Bieniaś, P. Synaszko, M. Sałaciński, Problematyka badania kompozytów typu FML w konstrukcjach lotniczych, strony 130-135, Czasopismo naukowe Polskiego Towarzystwa Materiałów Kompozytowych, nr 2/2011, ISSN: 1641-8611.
- [11] Rutz F. et al.: Non-Destructive Testing of Glass-Fibre Reinforced Polymers using Terahertz Spectroscopy, ECNDT 2006.
- [12] Yun-Shik Lee: Principles of Terahertz Science and Technology, Springer, 2009.

przegląd SPAWALNICTWA

Welding Technology Review

Redakcja Przegląd Spawalnictwa, ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa,
tel.: 22 827 25 42, fax: 22 336 14 79; e-mail: pspaw@ps.pl, www.pspaw.ps.pl