

DIAGNOZOWANIE KONSTRUKCJI KOMPOZYTOWYCH Z WYKORZYSTANIEM KONTAKTOWYCH I BEZKONTAKTOWYCH METOD BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

Krzysztof Dragan, Piotr Synaszko, Jarosław Ziemkiewicz
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
krzysztof.dragan@itwl.pl

1. WPROWADZENIE

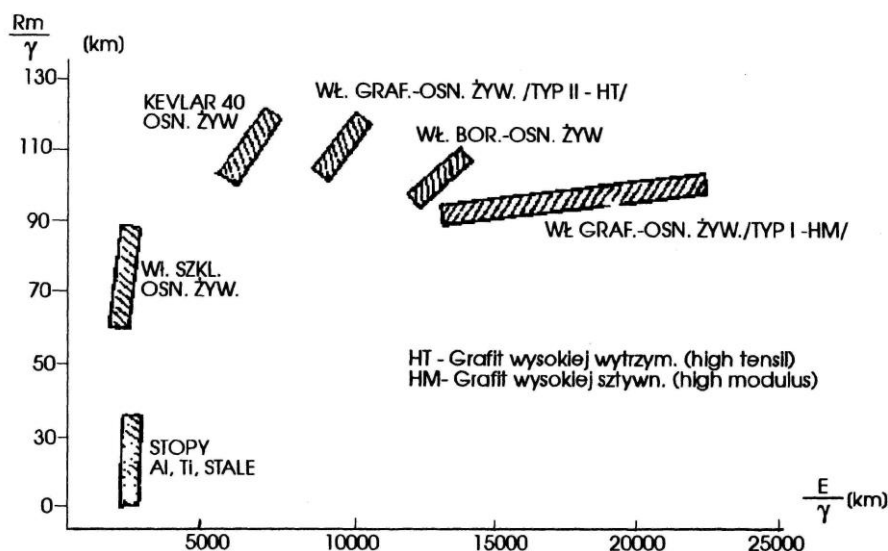
„Kompozyt jest to materiał utworzony, z co najmniej dwóch komponentów (faz) o różnych właściwościach w taki sposób, że ma właściwości lepsze i (lub) właściwości nowe (dodatkowe) w stosunku do komponentów użytych osobno lub wynikających z prostego sumowania tych właściwości – kompozyt jest materiałem zewnętrznym monolitycznym, jednakże z widocznymi granicami między komponentami” [1]. Każdy kompozyt zawiera co najmniej dwa komponenty: osnowę (ang. matrix) i fazę zbrojącą (reinforcement), określaną mianem „zbrojenie”. Osnowa (o postaci metalicznej, ceramicznej, bądź organicznej może być zbrojona włóknem ciągłym, ciętym, nieciągłymi cząsteczkami, wydzieleniami in situ lub dowolnym zestawem wymienionych faz. W przypadku obecności w strukturze więcej niż jednej osnowy czy też dwóch i więcej faz zbrojących, zwykle różnego typu i geometrii, mówimy o kompozytach hybrydowych (np. tzw. metalowe kompozyty włókniste – Fiber Metal Laminates). Istnieje szereg możliwości klasyfikacji i podziału kompozytów. Jednym z możliwych podziałów może być następująca klasyfikacja [2]:

- W zależności od pochodzenia:
 - ✓ „kompozyty naturalne”;
 - ✓ kompozyty zaprojektowane i wytwarzane przez człowieka.
- W zależności od osnowy:
 - ✓ kompozyty o osnowie niemetalicznej:
 - polimerowej;
 - ceramicznej.
 - ✓ kompozyty o osnowie metalicznej.
- W zależności od zbrojenia:
 - ✓ kompozyty zbrojone włóknem;
 - ✓ kompozyty umocnione cząstkami;
 - ✓ kompozyty umocnione dyspersyjnie.

Pod koniec lat sześćdziesiątych rozpoczęto prace wdrożeniowe nad zastosowaniem zaawansowanych organicznych materiałów kompozytowych w konstrukcji statków powietrznych. Początkowo były to żywice epoksydowe zbrojone włóknem węglowym, później stosowano włókna borowe i grafitowe. W latach osiemdziesiątych to zastosowanie uległo znacznemu rozszerzeniu, zarówno w odniesieniu do poszycia kadłuba jak i silnika. Rozpoczęła się era organicznych kompozytów wysokotemperaturowych, metalowych materiałów kompozytowych, superstopów i kompozytów na bazie ceramiki, zwłaszcza kompozytów typu

węgiel/węgiel. Do najważniejszych kompozytów konstrukcyjnych stosowanych w technice lotniczej [3] należą:

- Włókna szklane (typ „S” ze szkła glino-krzemowego lub typu „E” ze szkła krzemowego-kwarcowe)-żywica
- Włókna organiczne (kevlar-włókno z żywicy aramidowej)-żywica
- Włókna borowe-żywica, metal (aluminium)
- Włókna-grafitowe



Rys.1 Zestawienie właściwej (R_m/γ) i sztywności właściwej (E/γ) konstrukcyjnych materiałów lotniczych z kompozytami polimerowymi (zawartość włókna 60% obj.) [3]

Kolejnym czynnikiem powodującym zwiększone zastosowanie kompozytów epoksydowych jest możliwość zmniejszenia kosztów związanych z zużyciem paliwa oraz innych kosztów eksploatacji [4] z uwagi na zwiększoną wytrzymałość przy zmniejszonej masie (Rys.1). Stosowane dotychczas stopy aluminium są podatne na powstawanie uszkodzeń związanych nie tylko z oddziaływaniem atmosferycznym (zjawisko korozji), ale również z oddziaływaniem cykli zmęczeniowych czy połączenia korozji i obciążeń cyklicznych (np. zjawisko pękania zmęczeniowego pod wpływem korozji – ang. Stress Corrosion Cracking – SCC) [5,6]. 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 w szczególności [5]:

- brak powtarzalności przy wytwarzaniu elementów, w szczególności w tzw. „ręcznych technikach laminowania”;
- brak jednoznacznie określonej granicy plastyczności materiału i związana z tym większa jego wrażliwość na obciążenia statyczne oraz ściskanie;
- anizotropia materiału i związane z tym różne rodzaje uszkodzeń;
- niedostatki kontroli jakości elementów opuszczających wytwórnię;
- wysoka podatność na powstawanie uszkodzeń od uderzeń o niewielkich energiach;
- możliwość powstawania uszkodzeń podczas wytwarzania elementów, m.in. takich jak: porowatość, odklejenia, wtrącenia ciał obcych, rozwarstwienia.

W artykule przedstawiono podejście do badań polimerowych kompozytów i laminatów w osnowie epoksydowej z wykorzystaniem metod badań nieniszczących stosowanych zgodnie z wymogami normy kwalifikującej personel badań nieniszczących organizacji lotniczych EN4179/NAS410.

2. CEL BADAŃ

Celem pracy jest przedstawienie obecnie stosowanych metod badań nieniszczących lotniczych struktur kompozytowych wraz z oceną ich stosowalności. Stosowane metody badawcze oparte o badania nieniszczące powinny pozwalać na wykrywanie uszkodzeń w jak najwcześniejszym stadium, aby nie dopuścić do powstania sytuacji niebezpiecznych [7]. Do badań takich struktur, w zależności od rodzaju materiału (zbrojenie kompozytu), grubości badanych elementów, dostępności do miejsca pomiaru, rodzaju konstrukcji (pokrycie, pokrycie-wypełniacz, obszar dźwigara), stosuje się różne metody badawcze [8,9]. W zależności od badanej konstrukcji istnieje szereg wyzwań związanych z wyborem odpowiednich metod do właściwej diagnostyki takiej konstrukcji.

Wyzwania te są związane z:

- metodą wytwarzania takich konstrukcji;
- zbrojeniem konstrukcji;
- wielkością powierzchni;
- konstrukcją elementu (laminat, konstrukcja przekładkowa);
- geometrią badanego elementu;
- sumaryczną grubością badanych elementów;
- występowaniem połączeń klejonych lub nitowych.

W niniejszym artykule przedstawiono metody badań nieniszczących mające zastosowanie w trakcie eksploatacji statków powietrznych z wykorzystaniem urządzeń mobilnych jakie prowadzone są przez Zakład Zdatności do Lotu ITWL na statkach powietrznych lotnictwa sił zbrojnych oraz lotnictwa państwowego i cywilnego wraz z przykładami wykrywanych uszkodzeń oraz badanych elementów.

W badaniach wykorzystano następujące urządzenia:

- Multiskaner MAUS V - umożliwiający badanie metodami: ultradźwiękową w tym z wykorzystaniem Phased Array, prądów wirowych, metodą impedancji akustycznej, metodą pitch-catch, metodą rezonansową;
- Termografia impulsowa EchoTherm - umożliwiający badanie metodą termografii impulsowej;
- Laser Shearography FlawExplorer - umożliwiający badanie z wykorzystaniem szearografii;
- Bond tester Bondmaster - umożliwiający badanie z wykorzystaniem metody impedancji akustycznej, metody pitch-catch, metody rezonansowej;

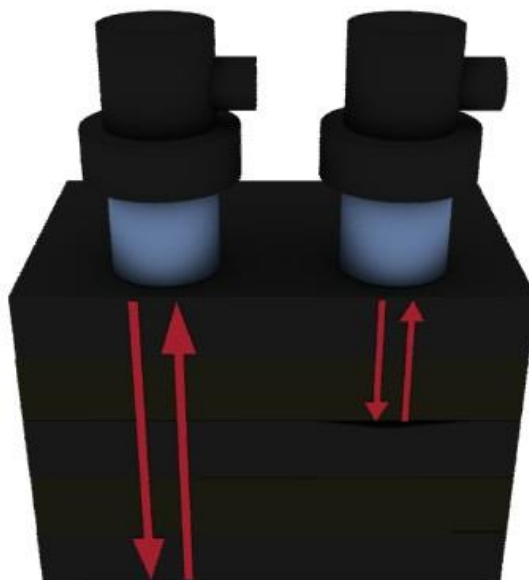
3. METODY BADAŃ

Poniżej przedstawiono podstawy teoretyczne stosowanych metod badawczych stosowanych do badań kompozytowych konstrukcji lotniczych [10]:

Metoda ultradźwiękowa

W badaniach ultradźwiękowych wykorzystuje fale akustyczne z zakresu częstotliwości powyżej progu słyszalności wynoszącego 16 [kHz], oraz zjawisko odbicia fali akustycznej od krawędzi obiektów badanych, lub wewnętrznych przeszkód w postaci defektów [11, 12]. Lokalizowanie defektów podobnie jak pomiar grubości odbywa się na podstawie pomiaru czasu przejścia fali, oraz zmian jej amplitudy. Dwa podstawowe rodzaje badań ultradźwiękowych to:

- **metoda odbicia** - polegająca na wykorzystaniu zjawiska odbicia fali na krawędzi dwóch ośrodków o różnych właściwościach. Fala odbija się od przeciwległej powierzchni przedmiotu badanego czyli tzw. „dna”, jak również nieciągłości w materiale. Ponadto może ona ulegać innym zjawiskom takim jak np. załamanie co w efekcie prowadzi do dyssypacji energii i stanowi informację o defekcie.



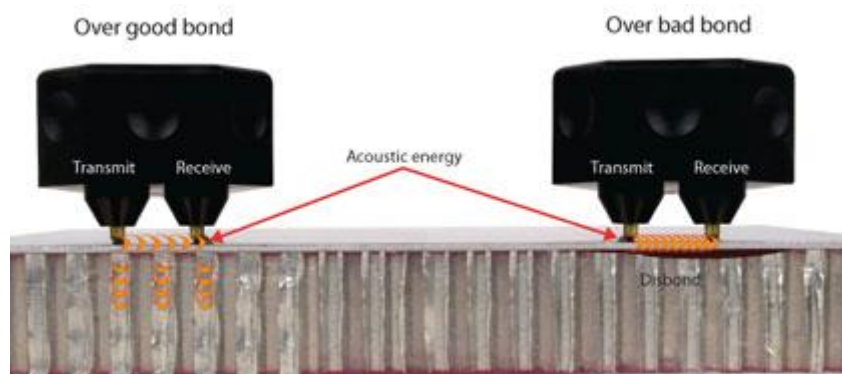
Rys.2 Badanie metodą odbicia

- **metoda przepuszczania** (TT- ang. Through- Transmission)- polega na wykorzystaniu efektu przejścia fali przez badany materiał i rejestracji sygnału z wykorzystaniem dwóch czujników w konfiguracji nadajnik- odbiornik. Technika pomiaru polega na rejestracji czasu przejścia sygnału pomiędzy czujnikami, oraz ewentualnych zmian w jego amplitudzie.

Metoda przepuszczania nie pozwala określić głębokości położenia uszkodzenia. Pozwala jedynie określić czy uszkodzenie istnieje czy nie. Natomiast do zalet należą: możliwość wykrywania uszkodzeń położonych blisko powierzchni, większy niż przy metodzie odbicia zakres grubości badanych materiałów, możliwość badania materiałów o większym tłumieniu. Podstawową zaletą metod ultradźwiękowych w stosunku do kompozytów jest wysoka czułość na typowe wady występujące w nich (rozwarstwienia, odklejenia) połączona z wysoką dokładnością określania położenia (głębokości) i rozmiarów tego rodzaju wad. Kolejną ważną zaletą badań ultradźwiękowych jest także łatwość ich automatyzacji i komputeryzacji co bezpośrednio prowadzi do podwyższenia ich dokładności, powtarzalności i wydajności oraz umożliwia pełną rejestrację wyników badań na nośnikach komputerowych. Dzięki wspomnianym zaletom badania ultradźwiękowe są obecnie podstawową i najważniejszą techniką badań nieniszczących kompozytów stosowaną w przemyśle lotniczym.

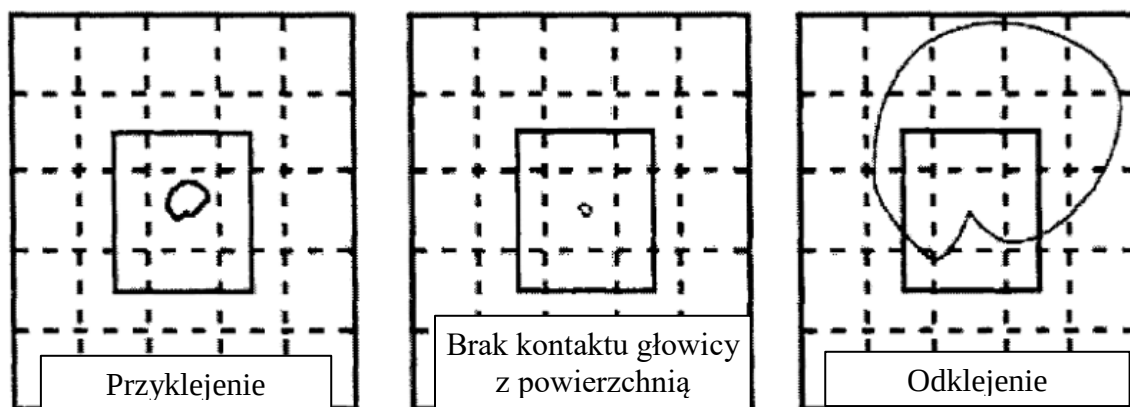
Metoda pitch - catch

Jest to porównawcza metoda badania połączeń klejonych polegająca na przesyłaniu akustycznego sygnału powierzchniowego (tzw. fale powierzchniowe) pomiędzy dwoma przetwornikami (nadawczym i odbiorczym) umieszczonymi obok siebie. Fala akustyczna propagując przez badany element jest tłumiona poprzez ścianki wypełniacza komórkowego.



Rys.3 Interpretacja sposobu realizacji pomiaru metodą pitch-catch [13]

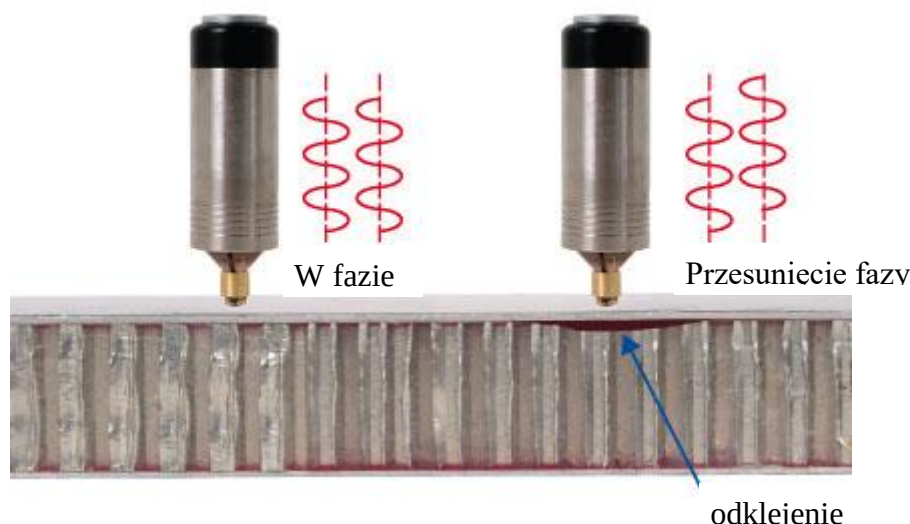
Poziom tłumienia energii akustycznej jest zależny od rodzaju struktury oraz jej stanu. W przypadku wystąpienia odklejenia rdzenia od pokrycia bądź uszkodzenia rdzenia wzrasta amplituda sygnału pomiarowego. Wzrost ten wynika z tego, że sygnał docierający do odbiornika w przypadku uszkodzonej struktury ulega mniejszemu rozpraszaniu niż w przypadku nieuszkodzonej struktury (Rys.3). Metoda ta wykorzystywana jest do wykrywania odklejeń pokrycia od rdzenia w przekładkowych konstrukcjach kompozytowych i metalowych. Zakres częstotliwości sygnałów pomiarowych wynosi 1-40 [kHz]. Ograniczenia minimalnego rozmiaru wykrywanych uszkodzeń wynikają z odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem jak również z rozmiaru komórek rdzenia. Standardowo przyjmuje się, że minimalny wykrywalny rozmiar uszkodzenia jest równy odległości pomiędzy przetwornikami. Jako graniczne głębokości na których wykrywane są uszkodzenia przyjmuje się dla stopów aluminium około 2 mm natomiast dla kompozytów około 7 mm [14].



Rys.4 Wynik- wskazania na ekranie defektoskopu Pitch-catch [14]

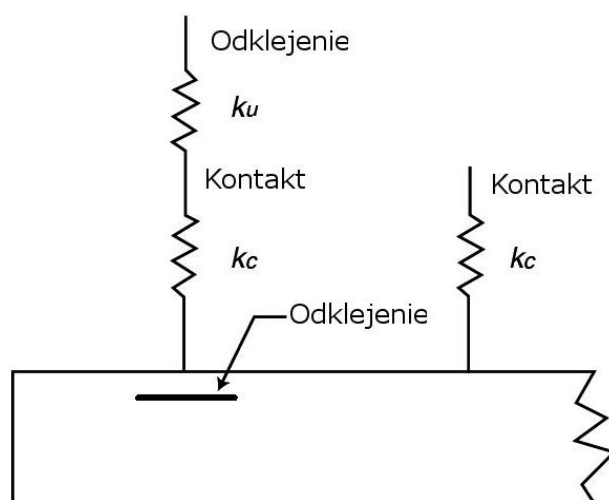
Metoda impedancji akustycznej

Jest to metoda akustyczna niskoczęstotliwościowa. Głowica pomiarowa, zbudowana jest z dwóch przetworników nadawczego i odbiorczego. Przetwornik nadawczy generuje w badanym materiale (obiekcie) stojącą falę akustyczną, która odbierana jest przez przetwornik odbiorczy. W przypadku występowania zmian sztywności badanego obiektu zmienia się kąt fazowy (pojawia się przesunięcie w fazie) i amplituda sygnału. (Rys. 5). Największe zmiany obserwowane są przy częstotliwości pomiaru zbliżonej do częstotliwości rezonansowej badanej warstwy materiału. Typowe częstotliwości wykorzystywane w tej metodzie mieszczą się w zakresie 1-23 kHz.



Rys.5 Interpretacja sposobu realizacji pomiaru metodą impedancji akustycznej [13]

Metoda ta może być również wyjaśniana za pomocą modelu połączonych sprężyn (Rys.6). Sztywność w obszarze bez uszkodzeń można wyrazić jako sztywność kontaktu natomiast sztywność w obszarze uszkodzenia można wyrazić jako sztywność kontaktu, oraz sztywność uszkodzenia. Jest to metoda porównawcza wykorzystywana głównie do badań struktur przekładkowych i klejonych.



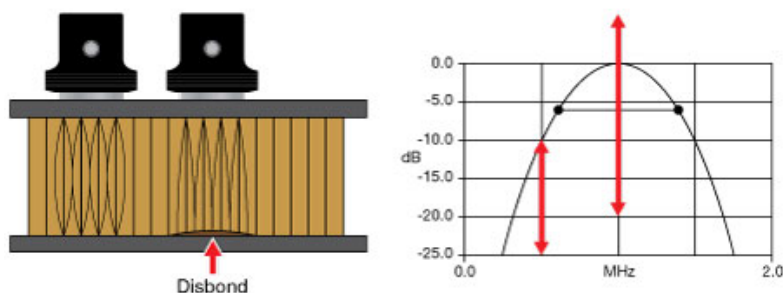
Rys.6 Zasada działania metody impedancji akustycznej

Wykrywalność tej metody jest porównywalna z wykrywalnością w metodzie pitch-catch zarówno w odniesieniu do aluminium jak i kompozytu. Istotną różnicą jest możliwość

łatwiejszego pozycjonowania uszkodzenia dzięki bardziej zwartej konstrukcji głowicy pomiarowej.

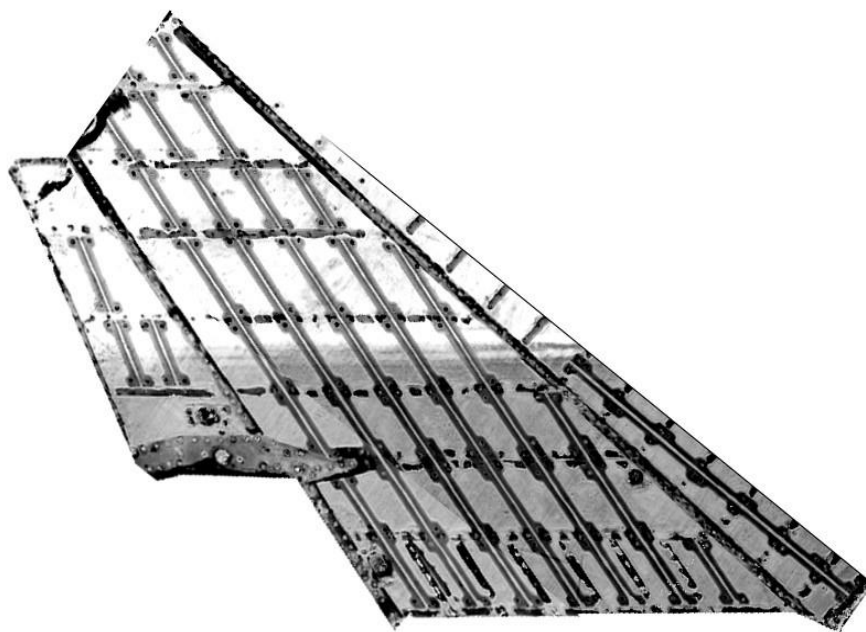
Metoda rezonansowa

Metoda rezonansowa jest metodą porównawczą polegającą na wzbudzeniu przetwornika piezoelektrycznego jego częstotliwością rezonansową i obserwacji zmiany jego impedancji elektrycznej powodowanej obecnością defektów w badanym materiale (zmianami impedancji akustycznej)[14]. Metoda ta wykorzystywana jest do wykrywania rozwarstwień i odklejeń w konstrukcjach kompozytowych i klejonych.



Rys.7 Interpretacja sposobu realizacji pomiaru metodą rezonansową [13]

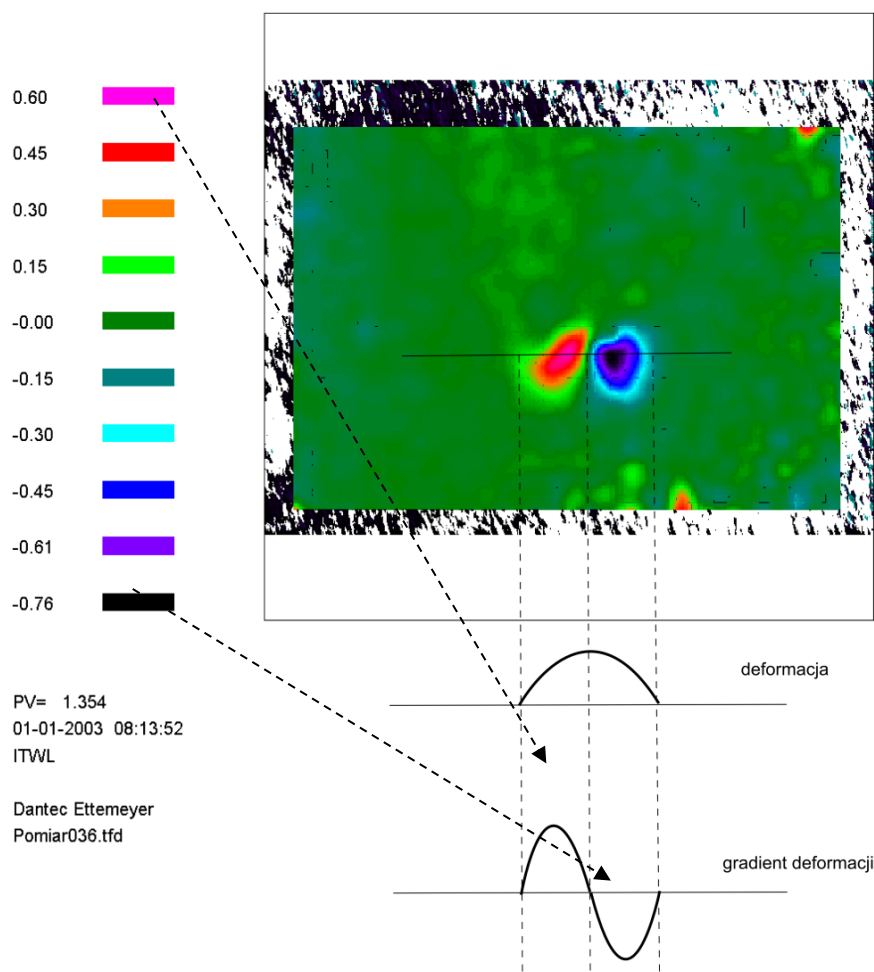
Odklejenia stanowią barierę dla sygnału akustycznego wobec czego mierzony sygnał w obszarze odklejenia będzie odpowiadał grubości materiału pomiędzy badaną powierzchnią i odklejeniem. Pojawienie się odklejenia wpływa na rejestrowaną wartość amplitudy i fazy sygnału, przy czym kąt fazowy sygnału jest powiązany z głębokością na której znajduje się odklejenie (Rys.7). Metoda rezonansowa w porównaniu do pozostałych metod niskoczęstotliwościowych daje możliwość wykrywania uszkodzeń położonych głębiej [15]. Na Rys.8 przedstawiono przykładowy wynik badania kompozytowego poszycia statecznika pionowego samolotu MiG-29 metodą rezonansową przedstawioną w zobrazowaniu w trybie C. Na obrazie wyraźnie widoczne są tzw. kształtowniki omegowe wraz z dźwigarem i podłużnicami przyklejone do poszycia. Analiza zmian kąta fazowego pozwala na rejestrację i opisywanie uszkodzeń o charakterze odklejeń. Zakres częstotliwości wykorzystywanych w badaniach wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset kHz. Ze względu na zastosowanie wyższych częstotliwości wymaga ona zastosowania środka sprzęgającego (woda).



Rys.8 Wynik rezonansowego badania kompozytowego poszycia statecznika pionowego samolotu MiG-29.

Metoda szearografii (Laser shearography)

Metoda szearografii oparta jest o rejestrację i porównywanie obrazów interferencyjnych badanej powierzchni. Poszczególne obrazy rejestrowane są przy różnych stanach wymuszonego obciążenia (deformacji) badanej powierzchni realizowanych termicznie lub podciśnieniowo. W wyniku porównania zarejestrowanych obrazów otrzymuje się graficzną informację o gradiencie deformacji powierzchni jaki uzyskano podczas badania. Należy zaznaczyć, że poziom naprężeń wprowadzanych do badanego obiektu jest niższy od dopuszczalnego dla konstrukcji klejonej i nie powoduje ryzyka wystąpienia uszkodzenia. Metoda pozwala na wykrywanie uszkodzeń wywołujących lokalny spadek sztywności. Jest ona stosowana do wykrywania odklejeń pokrycia struktury przekładkowej oraz innych uszkodzeń powodujących lokalny spadek sztywności [16]. Spadek ten może być wywołany odklejeniem pokrycia od struktury wewnętrznej bądź też uszkodzeniem tej struktury. Metodę szearografii można wykorzystywać do wykrywania płytko położonych rozwarstwień w strukturach kompozytowych. Na Rys.9 przedstawiono przykładowy obraz uszkodzenia w postaci odklejenia pokrycia od wypełniacza komórkowego (ulowego) wraz z graficzną interpretacją. Rysunek przedstawia zobrazowanie tzw. mapy fazowej powiązanej z gradientem deformacji badanego elementu. Ważną zaletą tej metody jest krótszy od 2,5 do 120 razy czas realizacji badań w stosunku do metod opartych o skanowanie powierzchni [17]. Z tego powodu metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w badaniu dużych powierzchni takich jak lotki, klapy usterzenia, panele kadłuba, powłoki skrzydeł. Stosowana jest ona w badaniach łopat wirników nośnych, powierzchni sterowych, oraz paneli przekładkowych lub stosuje się ją w kontroli napraw konstrukcji.



Rys.9 Wynik badania metodą szearografii.

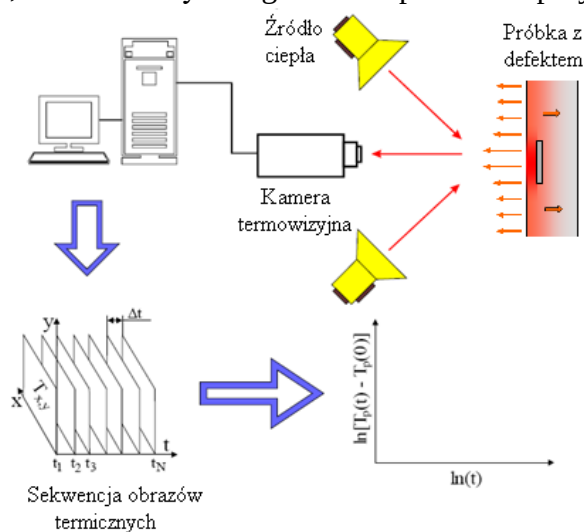
Metoda termografii impulsowej

Termin termografia obejmuje metody badawcze polegające na zdalnej i bezdotykowej ocenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała. Metody te są oparte na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania na światło widzialne.

Jeśli do powierzchni materiału dostarczymy pewną ilość energii, na przykład w formie impulsu ciepła, to po jego wygaśnięciu temperatura powierzchni będzie raptownie się zmieniać. Dzięki dyfuzji cieplnej, front termiczny zacznie przesuwać się w głąb materiału. Obecność obszarów różniących się właściwościami termicznymi (zawierających defekty) od obszarów bez defektów wywołuje zmianę szybkości tej dyfuzji. Zatem monitorując pole temperatury na powierzchni stygnącej próbki, uwidoczniamy położenia defektów. Takie stosowanie termografii podczerwieni wymaga zewnętrznej stymulacji cieplnej badanej powierzchni. Dlatego nazwano je termografią aktywną. Konsekwentnie, jeśli użycie termografii podczerwieni nie wymaga zewnętrznej stymulacji cieplnej, to wówczas mamy do czynienia z termografią bierną. W zależności od sposobu stymulacji rozróżnia się kilka rodzajów termografii aktywnej, a mianowicie, termografie:

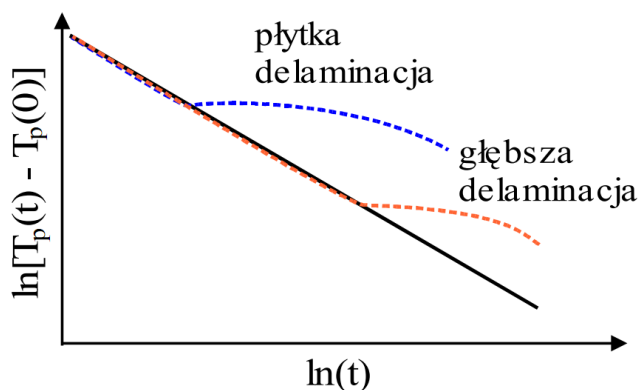
- impulsową (pulsed thermography),
- modulacyjną (lock-in thermography),
- impulsowo-fazową (pulsed phase thermography).

W termografii impulsowej wymuszeniem jest jednokrotny impuls energii - Rys.10. Polega ona na wyznaczaniu i analizie rozkładu temperatury na badanej powierzchni w czasie jej stygnięcia po uprzednim, równomiernym nagraniu impulsem cieplnym [18,19].



Rys.10 Schemat zasady działania termografii impulsowej.

Obecność wad i uszkodzeń w materiale zmniejsza prędkość dyfuzji termicznej powodując różnice temperaturowe w obrębie obszaru zawierającego wadę od obszaru wolnego od nieciągłości materiałowych. Uszkodzeniami takimi są wtrącenia ciał obcych, rozwarstwienia warstw laminatu, które można ocenić sporządzając wykres zależności $\ln\Delta T$ od $\ln(t)$ - rys.11. Natomiast dla materiału jednorodnego wykresem będzie linia prosta o nachyleniu $-1/2$.



Rys.11 Wykrywanie rozwarstwienia za pomocą termografii impulsowej.

Zaletami metody termografii impulsowej jest to, że układ pomiarowy nie zakłóca badanego pola temperatury oraz czas odpowiedzi detektora na sygnał jest stosunkowo krótki. Wykrywanie wad i uszkodzeń materiałowych odbywa się dzięki różnym właściwościom termicznym i daje możliwość badania szerokiej klasy materiałów. Istotnym czynnikiem na dokładność badania jest równomierne wzbudzenie badanej powierzchni. Trudności pojawiają się dla dużych przekrojów badanych obiektów oraz dla powierzchni polerowanych (błyszczących), które wymagają stosowania środków matujących eliminujące zjawisko refleksyjności.

4. BADANIA KONSTRUKCJI KOMPOZYTOWYCH

Poniżej przedstawiono wyniki badań kompozytowych konstrukcji lotniczych jakie wykonywane są w trakcie badań konstrukcji lotniczych. Na potrzeby niniejszego artykułu przyjęto następujące kryteria oceny stosowanych metod badań nieniszczących:

- możliwość badania obiektów o złożonym kształcie;
- możliwość wykrywania najczęściej występujących rodzajów uszkodzeń
- możliwość oceny laminatów oraz struktur przekładkowych;

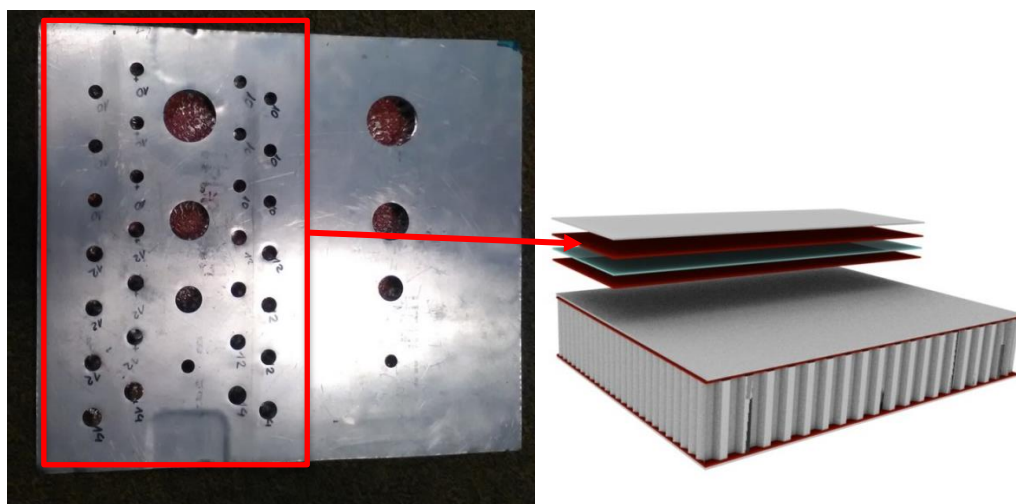
Biorąc pod uwagę powyższe kryteria przygotowano zestaw próbek:

1. Element kompozytowy o silnie zakrzywionej powierzchni z rozwarstwieniami - Rys.12



Rys.12. Element kompozytowy o złożonej geometrii

2. Próbką przekładkowa klejona okładki i rdzeń ze stopu aluminium. Próbką zawiera odklejenia pokrycia od rdzenia zamodelowane w postaci otworów płaskodennych - Rys.13



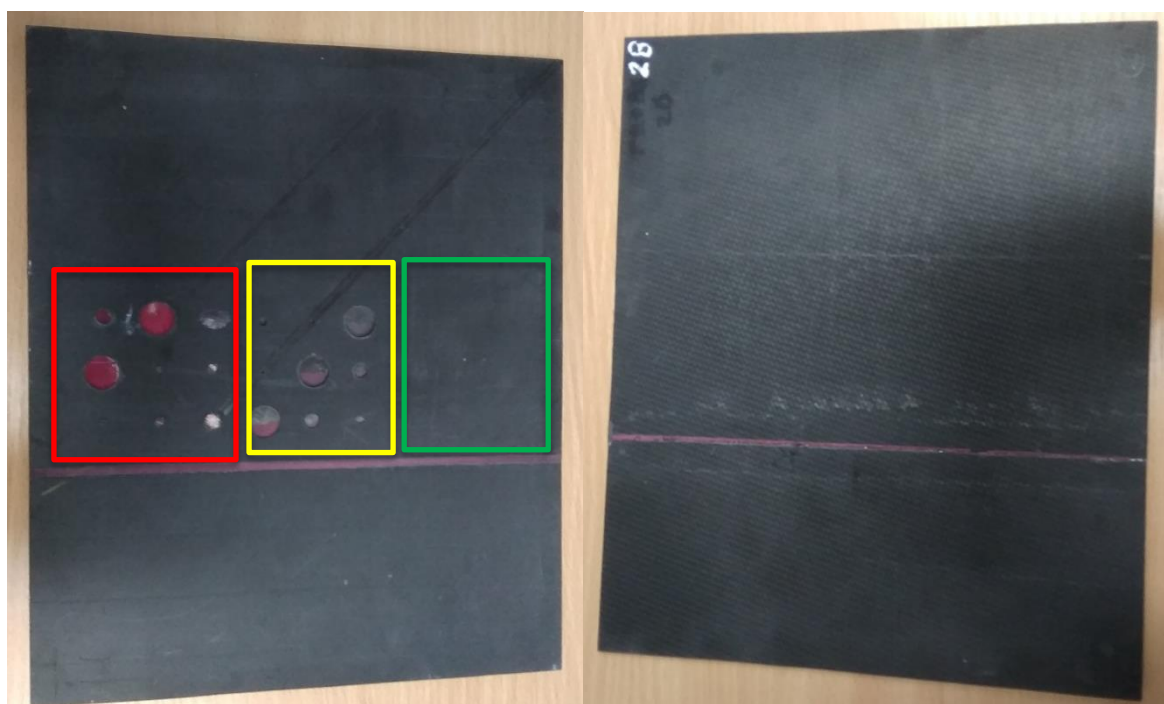
Rys.13 Element przekładkowy klejony wykonany ze stopu Al. Obszar zaznaczony czerwonym kolorem to obszar pokryty (od przeciwnej strony) dodatkowymi warstwami pakietu naprawczego.

3. Próbką kompozytowa przekładkowa z wtrąceniami wody w rdzeniu komórkowym



Rys. 14 Element przekładkowy wykonany z kompozytu

4. Próbką kompozytowa z wtrąceniami ciał obcych oraz porowatością



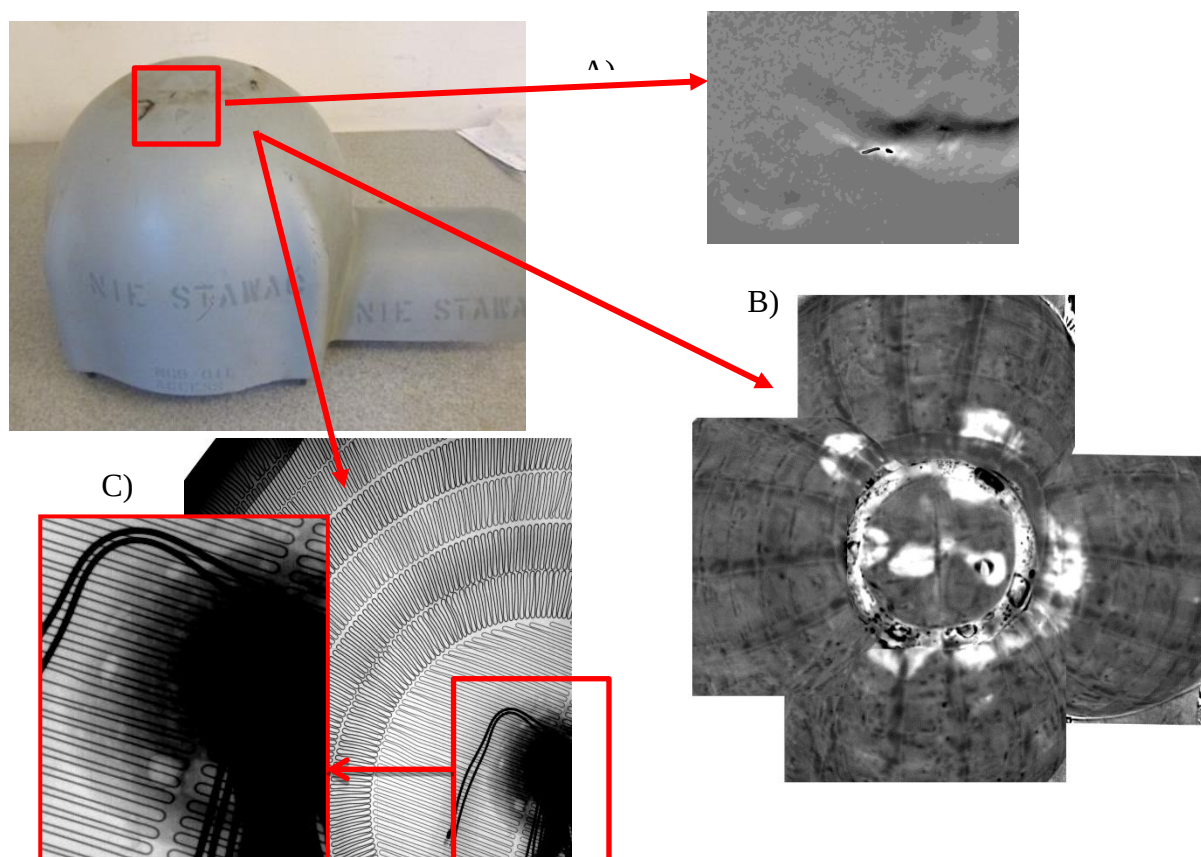
Rys. 15 Próbką kompozytowa złożona z dwóch elementów kompozytowych zukosowanych i sklejonych na odcinku 100 mm. W próbce znajdują się otwory płaskodenne (obszar zaznaczony na żółto). Otwory płaskodenne wypełnione filmem adhezyjnym (obszar zaznaczony na czerwono), oraz wtrącenia folii ochronnej stosowanej do zabezpieczania prepregu (obszar zaznaczony na zielono). Wszystkie wskazane uszkodzenia znajdują się w obszarze skleiny (na różnych głębokościach (względem płaszczyzny klejenia)).

5. WYNIKI BADAŃ

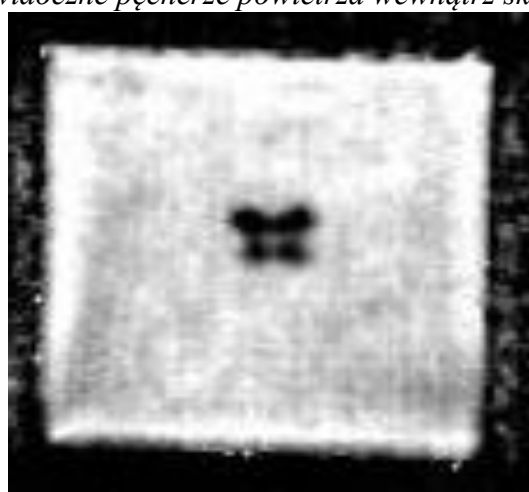
Badania metodami: ultradźwiękową, rezonansową, impedancji akustycznej przeprowadzono z wykorzystaniem zautomatyzowanego skanera MAUS V z prezentacją wyników w trybie C. Badania metodą pitch - catch przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia BondMaster z zobrazowaniem w trybie A. Badania metodą termografii impulsowej wykonano urządzeniem EchoTherm. W metodzie Shearography wykorzystano urządzenia FlawExplorer i Q810.

Poniżej na rysunku 16 przedstawiono wybrane wyniki badań elementu o zakrzywionej geometrii. Wyniki dla metod termografii impulsowej (IRT) oraz szearografii (ST)

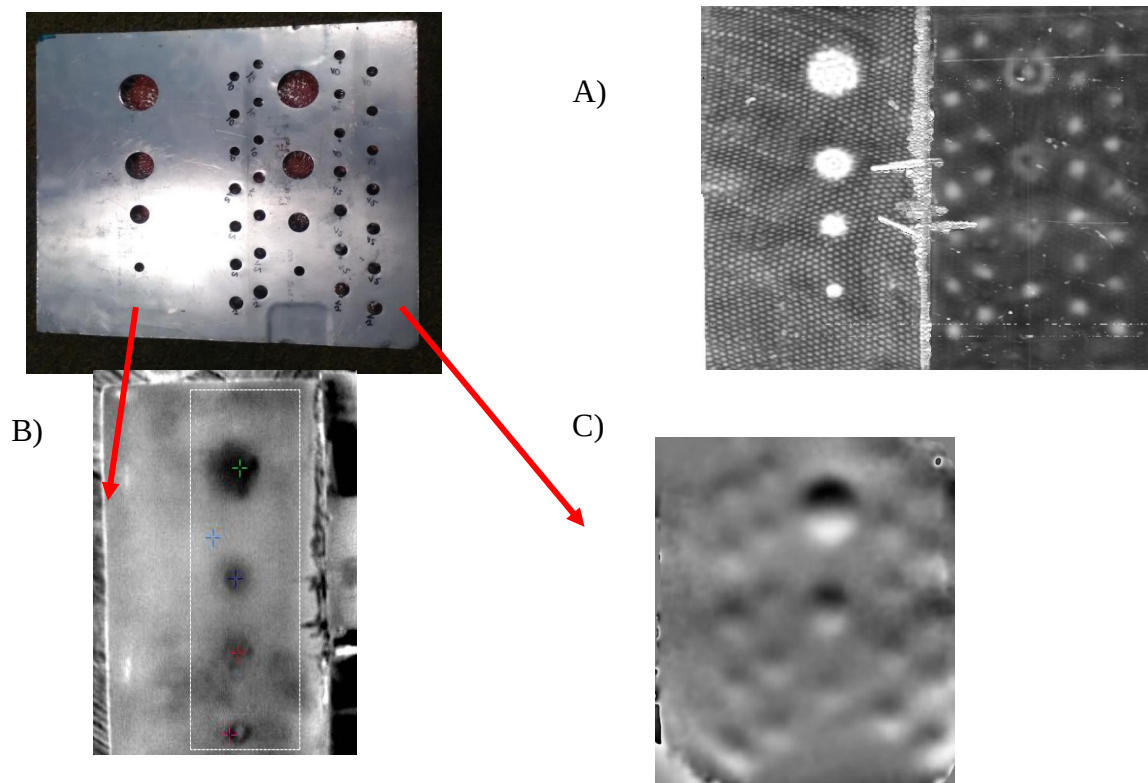
przedstawiają wyraźne wskazania w obszarach które uległy rozwarstwieniu na skutek przegrzania. Ponadto dodatkowo wykonano badania metodą radiografii cyfrowej. Wyniki tych badań nie zawierają żadnych informacji na temat rozwarstwień natomiast widoczne są pory powietrzne w obszarze wypełnionym klejem w górnej części elementu. Metoda Radiografii pozwala w takich elementach na ocenę stanu elementów grzejnych. Dalsze rysunki (17-19) przedstawiają wybrane wyniki badań pozostałych próbek.



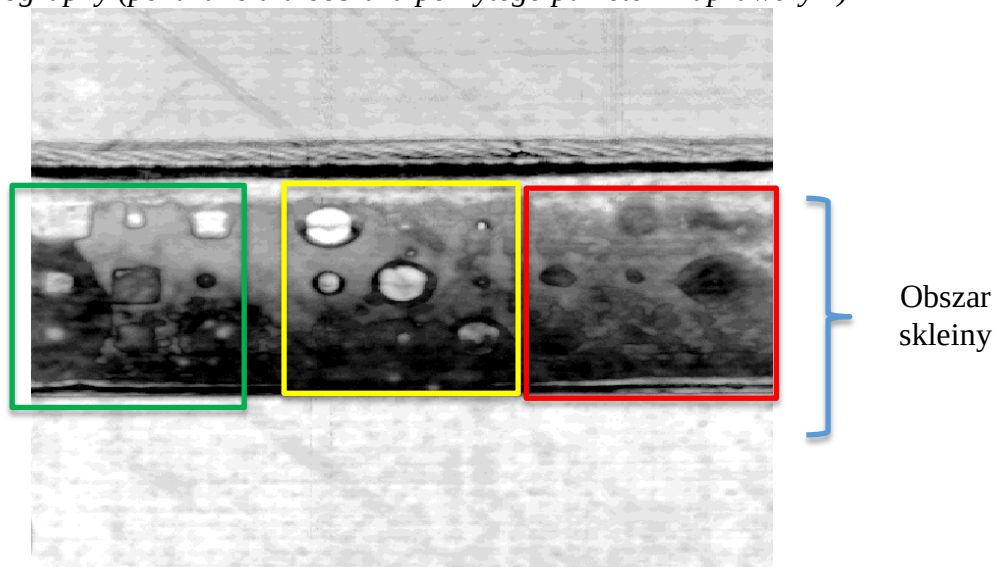
Rys. 16. Wyniki badań próbki o złożonej geometrii. A) metoda LS, B) metoda IRT, C) metoda RT- widoczne pęcherze powietrza wewnątrz skleiny.



Rys. 17. Wyniki badań metodą termografii impulsowej. Ciemne obszary na środku to wskazania komórek rdzenia wypełnionych wodą.



Rys. 18. Wyniki badań próbki przekładkowej: A) metodą impedancji akustycznej. Na lewej połowie wyraźnie widoczne są komórki rdzenia. Prawa połowa różni się grubością okładki (dodatkowa warstwa blachy ze stopu 2024). Nieregularne kształty na łączeniu spowodowane są wypływką kleju spod dodatkowej warstwy okładki. B) Wyniki badań metodą termografii impulsowej (nie uzyskano wskazań w obszarze pakietu naprawczego). C) Wyniki badań metodą shearography (pokazane dla obszaru pokrytego pakietem naprawczym)



Rys. 19. Wyniki badań ultradźwiękowych próbki kompozytowej. Otwory płaskodenne wypełnione filmem adhezyjnym (obszar zaznaczony na czerwono), wtrącenia folii ochronnej stosowanej do zabezpieczania prepregu (obszar zaznaczony na zielono). Wszystkie wskazane uszkodzenia znajdują się w obszarze skleiny (na różnych głębokościach (względem płaszczyzny klejenia). Różnice w tłumieniu (poziomie szarości) w obszarze skleiny wynikają z różnic w poziomie porowatości skeliny.

Artykuł przedstawia wybrane wyniki badań elementów i próbek konstrukcji lotniczych. Na podstawie szeregu uzyskanych wyników autorzy opracowali podsumowanie

charakteryzujące możliwości badawcze poszczególnych metod. W tabeli 1 przedstawiono podsumowanie wyników badań w której plusami oznaczono wykryte uszkodzenia natomiast minusami brak wskazania lub bardzo słabe wskazanie dla możliwych typów uszkodzeń. Opracowane wyniki ocenione zostały dla pewnych charakterystycznych typów konstrukcji kompozytowych i klejonych. Należy również pamiętać, iż dotyczą one wybranych technik i urządzeń zastosowanych w badaniu. Przykładowo w przypadku zastosowania techniki przepuszczania możliwe byłoby wykrywanie wtrąceń wody w strukturze przekładkowej. Natomiast w przypadku rzeczywistego odklejenia okładki od rdzenia struktury przekładkowej metoda radiografii jest nieskuteczna.

	badanie silnie zakrzywionych powierzchni	rozwarstwienia	wtrącenia	porowatość	odklejenia	wtrącenia wody
UT PE	+	+	+	+	+	-
MIA	+	+	-	-	+	-
RES	+	+	+	-	+	-
PC	+	+	+	-	+	-
IRT	+	+	+	+	+	+
ST	+	+	-	-	+	+

Tab. 1. Podsumowanie wyników badań

Dokonując prostego przyporządkowania uzyskanych wyników za każdą dodatnią ocenę dokonano przypisania punktu co pozwoliło na uzyskanie następującej oceny dla poszczególnych metod badań nieniszczących wykorzystanych w badaniu gdzie:

- ST - oznaczono metodę szearografii;
- IRT - oznaczono metodę termografii impulsowej;
- PC - oznaczono metodę pitch - catch;
- MIA - oznaczono metodą impedancji akustycznej;
- RES - oznaczono metodę rezonansową;
- UT PE - oznaczono metodą ultradźwiękową metodę odbicia;

6. PODSUMOWANIE

Odnosząc się do podsumowania przedstawionego w tabeli nr 1 najskuteczniejszym rozwiązaniem w przypadku możliwości zastosowania tylko jednej metody/urządzenia do badań o szerokim polu zastosowań (badania laminatów, konstrukcji klejonych, badania elementów o złożonym kształcie, chropowatości powierzchni) jest termografia impulsowa ponieważ daje największe możliwości bez ograniczenia geometrią badanej powierzchni. Metoda ultradźwiękowa jakkolwiek w wyniku testu oceniona na nieznacznie niższym poziomie jest bardzo szeroko stosowana - w szczególności zawsze w przypadku gdzie konieczne jest uzyskanie szczegółowego wymiarowania uszkodzenia. Metoda ta zapewnia największą dokładność pomiaru spośród przedstawionych. Ograniczeniem tej metody jest jej wysoka wrażliwość na rodzaj zastosowanych materiałów i technologii. W przypadku stosowania siatek antystatycznych lub elementów grzejnych badanie może być utrudnione lub wręcz niemożliwe do realizacji. Podobnie w przypadku stosowania technologii wytwarzania bez docisku naciśnieniowego (różnice w poziomie tłumienia wykorzystywane są do oceny prawidłowości wykonania napraw kompozytowych). W dalszej kolejności znajdują się metody akustyczne

niskoczęstotliwościowe. Metody te dedykowane są do badań sklein jednakże wykrywają wszystkie klasy uszkodzeń mające wpływ na lokalną sztywność. Metody te zostały ocenione jako nie znajdujące zastosowania do wykrywania porowatości. Stanowi to jednak pewnego rodzaju zaletę ponieważ możliwe jest zastosowanie ich do badań połączeń klejonych w kompozytach niskiej jakości (wykonywanych metodą kontaktową) oraz w pewnym zakresie do badań struktur przekładkowych z rdzeniem piankowym[20].

Druga z przedstawionych metod bezkontaktowych- metoda szearografii. Posiada nieco mniejsze możliwości niż termografia, dodatkowo należy zwrócić uwagę na podatność na oddziaływania zewnętrzne (drżania, cieplny ruch powietrza oraz refleksyjność badanego elementu). Istotną zaletą tej metody jest porównywalna z termografią szybkość wykonywania badań. Metoda ta dobrze sprawdza się w odniesieniu do uszkodzeń struktur przekładkowych.

LITERATURA

- [1] Encyklopedia Powszechna PWN 1988,t. 5, s. 187:
- [2] Boczkowska A., et.al. Kompozyty, Wydanie 2, Politechnika Warszawska, 2003;
- [3] Hyla I.: Elementy mechaniki kompozytów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995;
- [4] Probabilistic Design of Damage Tolerant Composite Aircraft Structures, DOT/FAA/AR-01/55, Final Report, Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591, January 2002;
- [5] Composite Qualification Criteria, 51st Annual Forum of the American Helicopter Society, Forth Worth, TX, May 1995
- [6] Aging of U.S. Air Force Aircraft, final report, Washington D.C. 1997;
- [7] Review of Damage Tolerance for Composite Sandwich Airframe Structures, DOT/FAA/AR-99/49, Final Report, August 1999;
- [8] Jones T. S., Berger H.: Application of Nondestructive Inspection Methods to Composites, Materials Evaluation, Vol.47, pp.390, 1989 Madaras E.: Highlights of NASA's Role In Developing State-Of-The-Art Nondestructive Evaluation For Composites, American Helicopter Society Structure Specialist Meeting, Williamsburg, VA, 30 Oct. – 1 Nov. 2001;
- [9] Register J.D.: Nondestructive Testing Of Aircraft Composites, Aircraft Maintenance Technology, April 1998 ,
- [10] Dragan K. et.al., Problematyka diagnozowania kompozytowych konstrukcji lotniczych, Przegląd Spawalnictwa, R.83, nr 13, 2011;
- [11] Sliwinski A, Ultradźwięki i ich zastosowania, WNT, Warszawa 2001 r;
- [12] K.Graff, „Wave Motion In Elastic Solids”, Dover Publications, Inc, New York, 1975;
- [13] <http://www.olympus-ims.com/pl>
- [14] Davies, G.A.O. and Zhang, X. Impact Damage Prediction in Carbon Composite Structures. Int. J. Impact Engineering. 1995
- [15] Dragan K., Synaszko P. , “In-service Flaw Detection and Quantification in the composites structures of the aircrafts”,II Conference "Fatigue of Aircraft Structures", Warsaw, 15-16 January 2009
- [16] NEWMAN, J. W Aerospace NDT with Advanced Laser Shearography.. Shangai : 2008. 17th World Conference on Nondestructive Testing.
- [17] Bobo, Stephen N. Shearographic Inspection of Boeing 737. Washington : U.S. Department of Transportation, 1992. DOT/FAA/CT-TN92/19.
- [18] Łukasz Kornas, Krzysztof Dragan, Jarosław Bieniasz: „Nieniszczące badania materiałów kompozytowych typu FML”, 41 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Toruń 2012

- [19] Łukasz Kornas, Krzysztof Dragan, Piotr Synaszko, Adam Latoszek: „Zastosowanie metody termografii impulsowej do diagnostyki staków powietrznych”, 39 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 2010.
- [20] Synaszko P., Dragan K., Sałaciński M. „Badania nieniszczące kompozytowych struktur szybowca PW-5”, Proceedings of the 37th National Conference on Non-Destructive Testing, 21-23

