
Jedenaste Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 8-11 marca 2005

**Ultradźwiękowe badania konstrukcji kompozytowych
w przemyśle lotniczym**

Sławomir Mackiewicz, Grzegorz Góra
IPPT PAN, PZL Świdnik S.A.

1. Wstęp

Wzrastające wykorzystanie materiałów kompozytowych w przemyśle lotniczym wynika z faktu, że pod wieloma względami przewyższają one tradycyjne materiały konstrukcyjne takie jak stopy aluminium. Podstawowe znaczenie ma tutaj fakt, że wysokie parametry wytrzymałościowe tych materiałów idą w parze z ich małą gęstością a w konsekwencji małą wagą wytwarzanych z nich elementów konstrukcyjnych. Zmniejszona masa własna samolotu pozwala z kolei na zwiększenie jego ładowności lub zasięgu dając wymierne korzyści ekonomiczne. Dodatkowymi zaletami materiałów kompozytowych w stosunku do duraluminium są także większa odporność na korozję i zmęczenie oraz możliwość wytwarzania dużych monolitycznych części o złożonym kształcie.

Wprowadzanie elementów kompozytowych do konstrukcji samolotów i helikopterów następowało stopniowo, począwszy od lat 60-tych ubiegłego stulecia i wiązało się z opracowywaniem nowych, coraz doskonalszych materiałów kompozytowych. Początkowe zastosowania wiązały się z wykorzystaniem kompozytów wzmacnianych włóknem szklanym następnie wprowadzono znacznie wytrzymalsze i sztywniejsze kompozyty wytwarzane na bazie włókien węglowych i aramidowych.

W latach 70-tych rozpoczęto produkcję pierwszych, całkowicie kompozytowych łopát do śmigłowców zaś w latach 80-tych zapoczątkowano stosowanie materiałów kompozytowych do budowy odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych dużych samolotów pasażerskich (np. stateczniki poziome samolotu Boeing 737-200) oraz wojskowych (struktura płatowca bombowca B-2).

Począwszy od tego czasu liczba elementów konstrukcyjnych samolotu wytwarzanych z różnego typu materiałów kompozytowych stale wzrastała osiągając w chwili obecnej bardzo znaczący udział w całkowitej masie współczesnego samolotu. Przykładowo w najnowszym „superjumbo” Airbus A-380 materiały kompozytowe stanowią ok. 25% całkowitej masy własnej samolotu (bez paliwa i ładunku) wynoszącej ok. 240 ton. Obliczono, że dzięki zastosowaniu materiałów kompozytowych masa tego samolotu została zredukowana o ok. 15 ton co odpowiada możliwości zabrania na pokład dodatkowych 150 pasażerów lub odpowiednio zwiększonej ilości paliwa bądź ładunku. W samolocie A-380 z wysokiej jakości kompozytów węglowych wykonano między innymi tak odpowiedzialne elementy jak: 12 tonowy centroplát, kilkumetrowej średnicy tylną przegrodę ciśnieniową, pionowy i poziomy statecznik wraz ze sterami kierunku i wysokości a także gondole silników oraz liczne elementy konstrukcyjne skrzydeł i kadłuba [1].

Jednym z istotnych aspektów wzrastającego wykorzystania kompozytów do wytwarzania coraz to bardziej odpowiedzialnych części lotniczych jest zapotrzebowanie na specjalistyczne techniki badań nieniszczących umożliwiające ocenę struktury wewnętrznej tych materiałów. Dotyczy to zarówno produkcyjnej kontroli jakości na etapie wytwarzania

poszczególnych części i podzespołów jak też badań eksploatacyjnych wykonywanych na samolotach w czasie rutynowych przeglądów lub po sytuacjach awaryjnych. Rola badań nieniszczących w omawianej dziedzinie jest szczególnie odpowiedzialna również z powodu niskich wartości współczynników bezpieczeństwa stosowanych przy projektowaniu kompozytowych konstrukcji lotniczych [2].

W dalszej części artykułu omówiono metody badań nieniszczących stosowane do kontroli wyrobów kompozytowych. Przed tym jednak przedstawiono podstawowe informacje na temat technologii wytwarzania podzespołów kompozytowych, które są obecnie stosowane w przemyśle lotniczym.

2. Technologia produkcji kompozytów

Kompozytem nazywamy materiał utworzony z co najmniej dwóch komponentów o różnych właściwościach fizyko-chemicznych, którego właściwości są lepsze (lub inne) w stosunku do zastosowanych komponentów. W niniejszym rozdziale opisano podstawy technologii wytwarzania kompozytów polimerowych, które są stosowane w przemyśle lotniczym. Elementy kompozytowe mogą mieć formę laminatów, konstrukcji przekładkowych z wypełniaczem komórkowym (struktury typu plastra miodu) lub też konstrukcji hybrydowych.

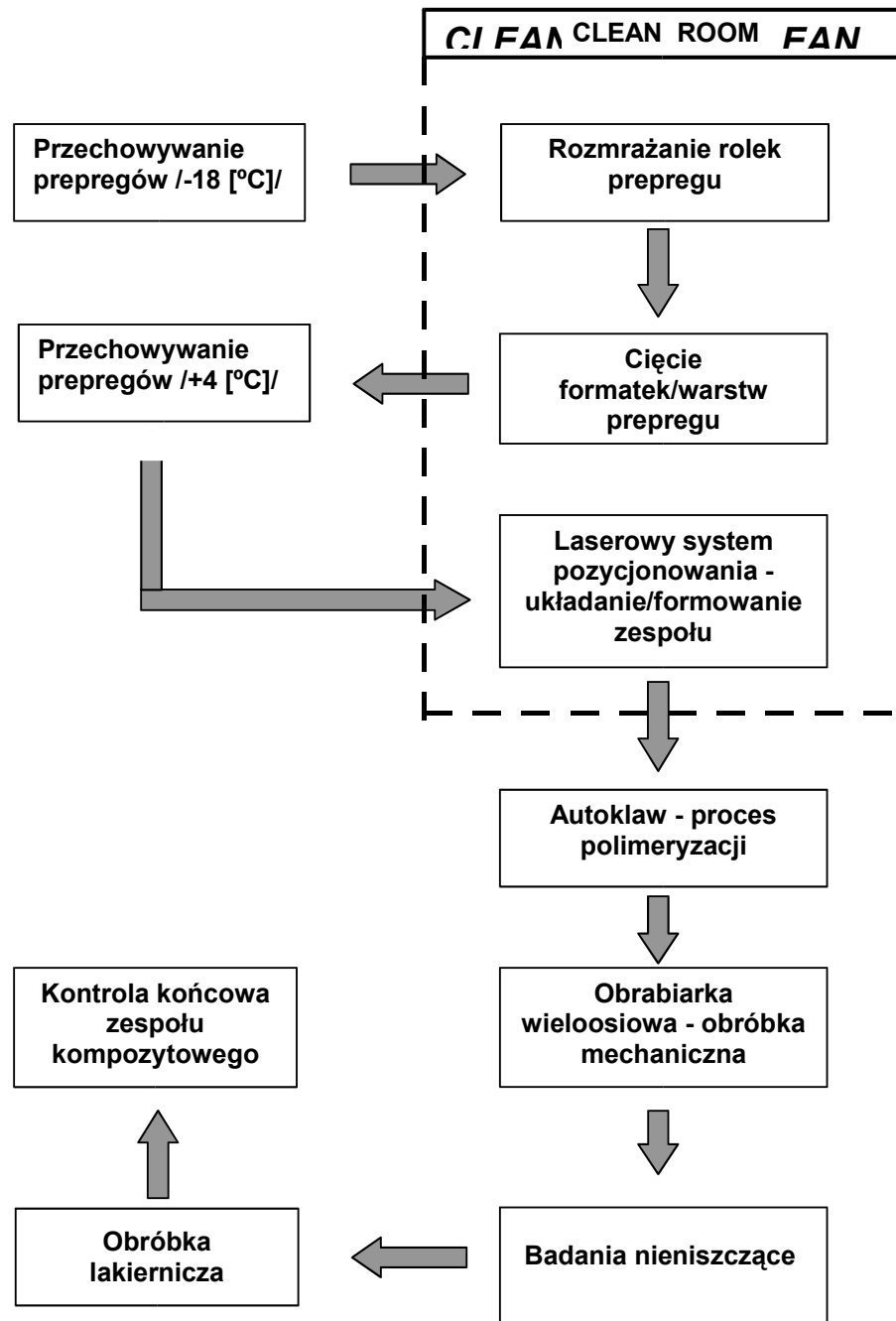
Kompozyt polimerowy składa się z żywicy bazowej (epoksydowej, poliestrowej lub fenolowej) stanowiącej osnowę oraz włókien wzmacniających (szklanych, węglowych lub aramidowych) nadających kompozytowi wytrzymałość i sztywność.

W chwili obecnej do produkcji kompozytów polimerowych w PZL Świdnik stosuje się techniki bazujące na dwóch zasadniczych metodach: metodzie „na mokro” oraz metodzie „na sucho”. Ich głównym wyróżnikiem jest sposób tworzenia materiału kompozytowego, z którego wykonany jest dany zespół. W metodzie „na mokro” włókniste zbrojenie kompozytu sycone jest żywicą tuż przed lub w trakcie procesu układania kolejnych warstw w foremniku. Metoda „na sucho” wykorzystuje tzw. prepregi, czyli cienkie warstwy wstępnie zaimpregnowanego włóknistego zbrojenia (z włókna węglowego lub szklanego) z częściowo utwardzoną żywicą bazową. Formowanie zespołu ogranicza się tutaj do odpowiedniego nakładania na siebie kolejnych warstw prepregu.

Ze względu na dużą prącochłonność i słabą powtarzalność metoda „na mokro” nadaje się do produkcji jednostkowej oraz do realizacji napraw gotowych zespołów kompozytowych. Produkcja masowa realizowana jest w procesie technologicznym opartym na wykorzystaniu prepregów. Dalsza część niniejszego rozdziału poświęcona jest szerszemu opisowi w/w procesu.

Ogólny schemat procesu wytwarzania części kompozytowych w ramach technologii prepregowej przedstawiono na rys.1. Prepregi przechowywane są w zamrażarkach, w temperaturze ok. -18°C , w której tempo procesu samoistnej polimeryzacji żywic bazowych jest minimalne.

Prepregi zamrożone do temp -18°C wykazują dużą sztywność uniemożliwiającą formowanie z nich wymaganego kształtu. Dodatkowo, niska temperatura własna materiału w połączeniu ze stosunkowo wysoką temperaturą powietrza w otoczeniu powodowałaby niepożądany efekt kondensacji pary wodnej na ich powierzchni. Celem uniknięcia w/w zjawisk prepregi poddawane są powolnemu rozmrażaniu do temperatury otoczenia w czasie od 24 do 48 godzin.



Rys.1. Schemat procesu produkcyjnego kompozytów w technologii prepregowej.

Prepregi przechowywane są w zamrażarkach w formie hermetycznie zapakowanych rolek. Celem przygotowania do procesu formowania prepreg musi zostać pocięty na formatki/warstwy, z których będzie układany późniejszy zespół. Czynność tą w sposób automatyczny wykonuje ploter wg danych projektowych zawartych w oprogramowaniu.

Pocięte formatki mogą być przekazywane bezpośrednio do procesu formowania lub też czasowo zmagazynowane w zespole lodówek zapewniających temperaturę składowania ok. +4°C. W takich warunkach proces samoistnej polimeryzacji żywic bazowych postępuje szybciej niż ma to miejsce w temp -18°C, jednak zapewniona jest możliwość szybkiego wprowadzenia formatek do produkcji z uwagi na skrócenie czasu rozmrażania.

Formowanie zespołu przeprowadzane jest w specjalnym klimatyzowanym pomieszczeniu tzw. 'Clean room', w którym zapewnione są odpowiednie parametry

wilgotności, temperatury i zapylenia jak również utrzymywane jest pewne nadciśnienie w stosunku do warunków zewnętrznych.

Proces formowania zespołu kompozytowego składa się z następujących etapów:

A/ Przygotowanie foremnik (na zewnątrz „*Clean room*”) polegające na oczyszczeniu jego powierzchni oraz nałożeniu na nią powłoki oddzielającej zapewniającej łatwe wyjęcie zespołu z foremnik po zakończonej polimeryzacji;

B/ Ustawienie foremnik na stanowisku roboczym w „*Clean room*” w pozycji dokładnie skorelowanej z laserowym systemem pozycjonowania układanych warstw. System ten umieszczony jest pod sufitem pomieszczenia a jego działanie polega na wyświetlaniu na foremniku konturów miejsc, w których powinny być układane kolejne formatki;

C/ Układanie na foremniku (w ściśle określonej sekwencji) kolejnych warstw prepregu, wypełniacza komórkowego, kleju, blaszanych wzmocnień itp.

D/ Założenie na foremnik hermetycznej przepony oraz sprawdzenie metodą podciśnienia szczelności układu.

Foremnik z ułożonym zespołem kompozytowym umieszczany jest w autoklawie czyli hermetycznie zamykanej komorze ciśnieniowej umożliwiającej prowadzenie procesu polimeryzacji w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury. W autoklawie foremnik podłączany jest do układu podciśnieniowego, który usuwa powietrze spod przepony zapewniając dokładne przyleganie ułożonych pod nią warstw. Przeprowadzany jest cykl ciśnieniowo-temperaturowy autoklawu, w wyniku którego dokonuje się proces ostatecznej polimeryzacji (utwardzenia) żywic bazowych prepregu. Typowe temperatury procesu polimeryzacji leżą w zakresie 120 – 180 °C, zaś ciśnienie wynosi ok. 0,3 MPa.

Docelowy kształt i wymiary wytwarzanych elementów uzyskiwane są za pomocą wieloosiowego centrum obróbkowego dysponującego podciśnieniowym systemem mocowania obrabianego zespołu.

Końcowymi etapami procesu technologicznego są badania nieniszczące, obróbka wykańczająca powierzchni wraz z nanoszeniem gruntu pod powłokę lakierniczą oraz kontrola końcowa polegająca na sprawdzeniu kompletnego zespołu oraz dokumentacji potwierdzającej proces jego wykonania.

3. Metody badań nieniszczących kompozytów

Tap test

Najstarszą metodą stosowaną do kontroli jakości wyrobów kompozytowych jest tzw. *tap test* polegający na opukiwaniu kompozytu specjalnym młoteczką i wysłuchiwanie uzyskiwanego odgłosu. Na podstawie wysokości uzyskiwanego dźwięku doświadczony badacz potrafi wykryć obszary niedoklejeń lub rozwarstwień znajdujące się pod opukiwaną powierzchnią. Zaletą tej metody badań jest jej prostota a także stosunkowo duża skuteczność w wykrywaniu wad znajdujących się blisko powierzchni. Podstawową jej wadą jest natomiast brak obiektywnej rejestracji wyników badania oraz duży stopień subiektywizmu oceny. Ponadto technika ta nie nadaje się do wykrywania wad typu porowatości zaś jej czułość wyraźnie spada ze wzrostem głębokości wad pod opukiwaną powierzchnią.

Metody rezonansowe

Drugą chronologicznie grupę technik jakie stosowano do wykrywania wad w strukturach kompozytowych stanowią ultradźwiękowe techniki rezonansowe bazujące na pomiarze drgań rezonansowych badanego materiału. Czujnik piezoelektryczny pobudzany jest do drgań napięciem sinusoidalnym i wprowadza do materiału falę ciągłą, która odbija się

wielokrotnie od jego powierzchni ulegając rezonansowemu wzmocnieniu lub wygaszeniu. Amplituda i faza drgań na powierzchni materiału jest zależna od modułu sprężystości oraz grubości materiału znajdującego się pod głowicą. W przypadku wystąpienia rozwarstwienia efektywna grubość materiału ulega zmniejszeniu co powoduje zmianę zarówno amplitudy jak i fazy drgań. Zmiany te są widziane przez układ pomiarowy aparatu jako zmiana impedancji elektrycznej czujnika piezoelektrycznego. Skalując miernik na wzorcu reprezentującym zarówno dobry jak i rozwarstwiony kompozyt można dokładnie określić zakresy parametrów drgań dla akceptowalnych oraz nieakceptowanych obszarów kompozytu.

W odróżnieniu od techniki opukiwania technika rezonansowa nie jest oparta na subiektywnym wrażeniu słuchowym lecz na obiektywnym pomiarze ściśle określonych parametrów drgań. Pomimo tego fizyczne podstawy obu tych technik są podobne, obie wykorzystują zjawisko drgań rezonansowych materiału z tą różnicą, że w teście opukiwania „pomiaru” częstotliwości drgań dokonuje się przez subiektywne wrażenie słuchowe a nie za pomocą przyrządu pomiarowego. Czułość i dokładność metody rezonansowej zmniejsza się wraz ze wzrostem głębokości rozwarstwień pod powierzchnią. Ponadto jest ona stosunkowo czasochłonna i trudna do zautomatyzowania wskutek czego bardziej nadaje się do wyrwykowych pomiarów punktowych niż do dokładnego skanowania dużych powierzchni.

Metody termowizyjne i interferometryczne

W ostatnich latach do badań kompozytów wprowadzono nowoczesne techniki termowizyjne i interferometryczne [2]. Badanie termowizyjne polega na podgrzaniu powierzchni kompozytu silnym impulsem ciepła i obserwowaniu dynamicznych zmian rozkładu temperatury na powierzchni za pomocą kamery termowizyjnej. Obszary, pod którymi znajdują się rozwarstwienia, wolniej tracą ciepło i tym samym będą charakteryzować się wyższą temperaturą niż znajdujące się obok obszary prawidłowe. Na podstawie rozkładu oraz dynamiki zmian temperatury na powierzchni kompozytu można w przybliżeniu określić zarówno rozmiary poprzeczne jak też głębokość zalegania rozwarstwień lub innych wad, które blokują przepływ ciepła w materiale.

Techniki interferometryczne takie jak holografia i szerografia bazują na wykorzystaniu interferencji światła laserowego w celu zobrazowania niewielkich odkształceń powierzchni materiału pod wpływem wymuszonych obciążeń mechanicznych. Typowym sposobem obciążania materiałów kompozytowych jest wytwarzanie podciśnienia na ich powierzchni za pomocą specjalnych przyssawek. Wskutek różnicy ciśnień między powietrzem znajdującym się wewnątrz rozwarstwienia a powietrzem na zewnątrz obszary powierzchni kompozytu znajdujące się ponad rozwarstwieniami ulegają niewielkim wybrzuszeniom. Deformacje te mogą być uwidocznione na obrazach holograficznych lub szerograficznych w postaci serii prążków interferencyjnych otaczających wybrzuszenia powierzchni.

Podstawowa różnica między techniką holograficzną a szerograficzną polega na tym, że w technice holograficznej w celu uzyskania obrazu interferencyjnego nakłada się obrazy powierzchni przed i po obciążeniu uzyskując zobrazowanie absolutnych wielkości przemieszczeń wskutek obciążenia. Oznacza to, że na obrazie holgraficznym uwidocznione są zarówno przemieszczenia powierzchni wskutek występowania wad jak też wszelkie inne przemieszczenia związane np. ze sposobem montowania układu podciśnieniowego lub przypadkowym poruszeniem badanej części. Niedogodności tej nie posiada technika szerograficzna, w której wykorzystuje się dwa obrazy już obciążonej powierzchni przesunięte jednak względem siebie o kilka mm w kierunku poprzecznym (stąd nazwa szerografia). W rezultacie na obrazie szerograficznym zobrazowane są jedynie przyrosty przemieszczeń na obciążonej powierzchni (liczone w kierunku przesunięcia obu obrazów) nie zaś absolutne przemieszczenia powierzchni między stanem obciążonym a nieobciążonym. Obraz powierzchni w stanie nieobciążonym nie jest w ogóle wykorzystywany w technice szerograficznej.

Dzięki opisanej specyfice tworzenia obrazu szerografia jest bardziej czuła na lokalne deformacje powierzchni charakterystyczne dla rozwarstwień niż na ogólne przemieszczenia całego obiektu wynikające zazwyczaj z niedoskonałości techniki badawczej.

Zarówno techniki termowizyjne jak też interferometryczne dobrze nadają się do badań kontrolnych dokonywanych bezpośrednio na eksploatowanych statkach powietrznych. Ich podstawową zaletą jest możliwość szybkiego badania dużych, jednostronnie dostępnych powierzchni bez potrzeby ich demontażu, stosowania środków sprzęgających, penetrantów itp.

Metody radiograficzne i ultradźwiękowe

Cechą wspólną opisanych powyżej metod badania materiałów kompozytowych jest fakt, że ich czułość i dokładność szybko spada wraz ze wzrostem głębokości wad pod powierzchnią. W celu skutecznego badania większych grubości materiałów w klasycznych badaniach nieniszczących stosuje się metody radiograficzne i ultradźwiękowe. W przypadku materiałów kompozytowych stosowanych w przemyśle lotniczym metody radiograficzne mają ograniczone zastosowanie. Wynika to z faktu, że kompozyty na bazie włókna węglowego lub szklanego oraz żywicy epoksydowej są niemal przezroczyste dla promieniowania rentgenowskiego. Techniki radiograficzne mogą być jednak skutecznie wykorzystane np. do wykrywania uszkodzeń metalowego wypełniacza ulowego w strukturach przekładkowych lub też sprawdzania prawidłowości montażu metalowych elementów konstrukcyjnych wewnątrz struktury kompozytowej.

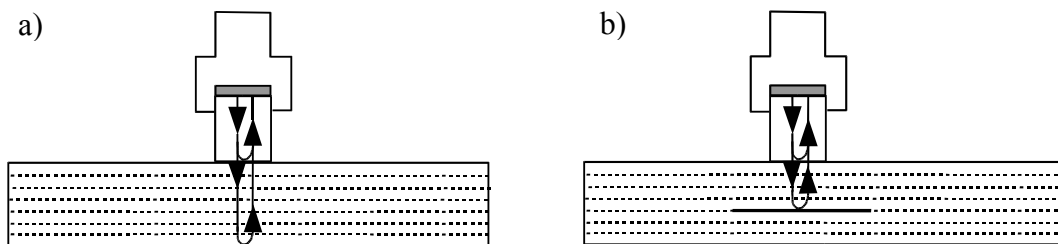
Zdecydowanie większe zastosowanie znalazła w badaniach kompozytów lotniczych metoda ultradźwiękowa. Podstawową zaletą tej metody jest wysoka czułość na typowe wady kompozytów (rozwarstwienia, delaminacje, niedoklejenia) połączona z wysoką dokładnością określania położenia i rozmiarów tego rodzaju wad. Metoda ultradźwiękowa pozwala ponadto na skuteczne wykrywanie i ocenę wad laminatów typu porowatości, które są trudno wykrywalne innymi technikami badań nieniszczących. 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. Dotyczy to zwłaszcza badań wykonywanych w procesie produkcji części kompozytowych, kiedy ułatwione jest zastosowanie zautomatyzowanych badań ultradźwiękowych.

4. Techniki badań ultradźwiękowych

4.1. Technika A-scan

W badaniach kompozytów termin *technika A-scan* stosowany jest często jako synonim standardowych badań ultradźwiękowych prowadzonych kontaktową metodą echa. Technika ta stosowana jest głównie do badań monolitycznych struktur laminatowych i służy do wykrywania wad typu rozwarstwień, wtrąceń ciał obcych oraz porowatości. Zasada badań jest podobna jak w przypadku typowych badań blach na rozwarstwienia jednak specyfika materiału kompozytowego nakłada dodatkowe warunki na szczegóły techniki badawczej.



Rys.2. Zasada badania laminatów techniką A-scan, a) laminat prawidłowy bez wad, b) laminat z rozwarstwieniem.

Fakt, że struktura laminatu składa się z dwóch odrębnych faz (matryca epoksydowa i włókno wzmacniające) powoduje, że materiał ten charakteryzuje się stosunkowo dużym tłumieniem a także znacznym rozpraszaniem wstecznym generującym tzw. szumy strukturalne. Aby zmniejszyć niekorzystny efekt tych zjawisk należałoby zastosować fale ultradźwiękowe o możliwie małej częstotliwości, które w mniejszym stopniu reagują na niejednorodności ośrodka. Z drugiej jednak strony należy uwzględnić fakt, że laminaty stosowane w przemyśle lotniczym mają zazwyczaj małe grubości (zaczynające się od wartości ok. 0,5 mm) co nakłada na system ultradźwiękowy wymaganie wysokiej rozdzielczości czasowej tak aby możliwe było odróżnianie ech wad od echa powierzchni materiału czy też echa dna. Warunek ten oznacza, że impulsy ultradźwiękowe stosowane do badań laminatów powinny być możliwie jak najkrótsze co z kolei wiąże się z podwyższeniem ich częstotliwości i poszerzeniem pasma.

W celu spełnienia tych częściowo sprzecznych wymagań należy dokonać kompromisowego wyboru częstotliwości głowicy w odniesieniu do konkretnego typu materiału kompozytowego. Wyboru takiego dokonuje się na podstawie badań testowych przeprowadzanych na reprezentatywnej próbce materiału (wzorcu) z zaimplementowanymi wadami sztucznymi. Typowe częstotliwości fal stosowanych do badań laminatów CFRP wykonanych w technologii prepregowej leżą w granicach 5 do 10 MHz. Z drugiej strony dla kompozytów wzmacnianych włóknem szklanym optymalne częstotliwości ultradźwiękowe mogą leżeć znacznie niżej, zwłaszcza jeśli kompozyty te wykonano w tzw. technologii mokrej. Należy podkreślić, że w badaniach kompozytów staranny wybór częstotliwości głowicy ma znacznie większe znaczenie niż w standardowych badaniach wyrobów metalowych.

Niezależnie od wybranej częstotliwości głowice ultradźwiękowe stosowane do badań laminatów techniką A-scan powinny być silnie wytłumione (szerokopasmowe) oraz wyposażone w linię opóźniającą eliminującą wpływ strefy martwej impulsu nadawczego.

Również defektoskop ultradźwiękowy stosowany do badań materiałów kompozytowych powinien spełniać kilka dodatkowych warunków, nie zawsze spełnianych przez standardowe defektoskopy stosowane do badań wyrobów metalowych.

Wspomniany warunek wysokiej rozdzielczości czasowej układu ultradźwiękowego wymaga aby defektoskop umożliwiał rozciągnięcie podstawy czasu przynajmniej do wartości 0,5 $\mu\text{s}/\text{dz}$. W związku z wykorzystaniem głowic szerokopasmowych powinien też posiadać filtr szerokopasmowy po stronie odbiornika oraz nadajnik zapewniający silne pobudzenie przetwornika głowicy szerokopasmowej krótkim ale wysokoenergetycznym impulsem.

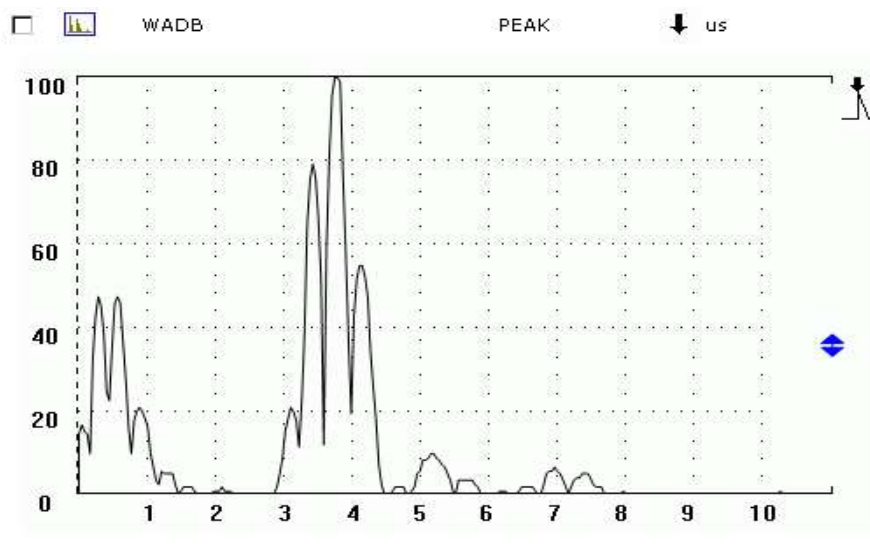
W związku z dużym tłumieniem fal ultradźwiękowych w niektórych rodzajach materiałów kompozytowych bardzo istotne znaczenie ma możliwość przełączenia nadajnika defektoskopu w tryb pobudzania impulsem wypełnionym o regulowanej częstotliwości podstawowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu częstotliwość nadajnika można dostroić do częstotliwości głowicy uzyskując wzrost amplitudy impulsów rzędu kilkunastu dB. Należy

podkreślić, że uzyskuje się w ten sposób rzeczywisty wzrost amplitudy impulsów ultradźwiękowych wprowadzanych do materiału nie zaś jedynie zwiększenie ich wzmocnienia w układzie odbiorczym defektoskopu. Dzięki temu możliwe jest podwyższenie amplitudy rejestrowanych impulsów bez jednoczesnego podwyższania poziomu szumów układu odbiorczego.

Sposób przeprowadzania badania ultradźwiękowego laminatów techniką A-scan jest podobny do badania cienkich blach na rozwarstwienia. Z uwagi jednak na duże różnice tłumienia pomiędzy różnymi rodzajami/grubościami laminatów do nastawiania czułości badania należy stosować specjalne próbki wzorcowe wykonane według tej samej technologii co badany kompozyt. Wzorce takie powinny zawierać wady sztuczne (np. w postaci wkładek teflonowych) reprezentujące rozwarstwienia laminatu znajdujące się na różnej głębokości. Po nastawieniu parametrów badania należy sprawdzić czy wszystkie wady są wykrywalne i dają jednoznaczne wskazania. W szczególności istotne jest wykazanie, że echa wad znajdujących się blisko powierzchni badania są rozróżnialne od echa tej powierzchni, zaś echa wad znajdujących się blisko powierzchni przeciwległej rozróżnialne od echa dna.

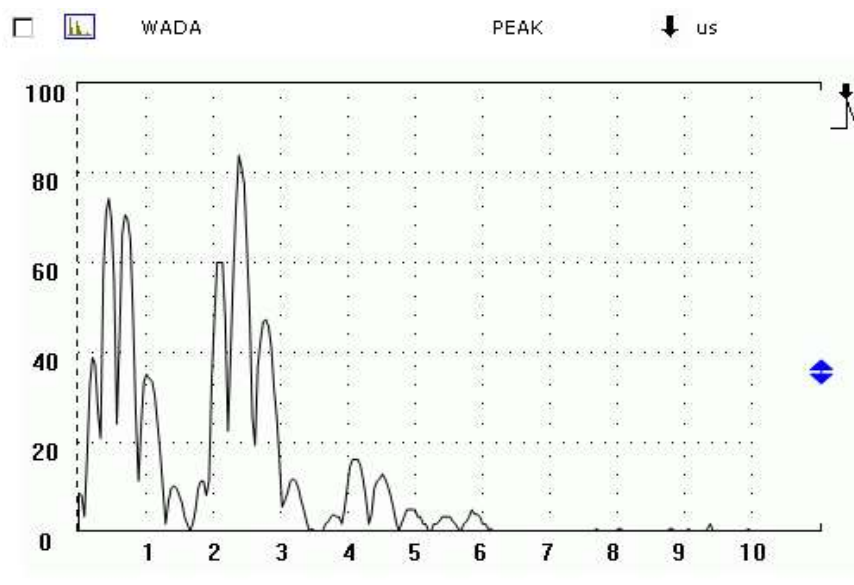
Ważnym elementem badania, do którego nie przykładamy większej wagi w przypadku badań metali, jest stosowany środek sprzęgający. W przypadku badań kompozytowych części lotniczych wymagane jest sprawdzenie środka sprzęgającego pod kątem jego chemicznej nieszkodliwości dla badanego materiału. Dopuszczalne jest stosowanie wyłącznie zatwierdzonych środków sprzęgających lub ewentualnie czystej wody.

Typowy obraz uzyskiwany na ekranie defektoskopu podczas skanowania prawidłowo wykonanego laminatu pokazano na rys.3. Widoczne jest echo od powierzchni materiału (echo interfejsu) oraz echo dna.



Rys. 3. Typowy obraz ultradźwiękowy prawidłowo wykonanego laminatu

Obraz uzyskiwany w przypadku wykrycia dużego rozwarstwienia przedstawiono na rys. 4. Echo dna zanika i jest zastępowane wyraźnym echem od powierzchni rozwarstwienia. Rozmiary poprzeczne rozwarstwienia wyznacza się metodą 6-dB spadku amplitudy, zaś jego głębokość na podstawie położenia echa na skali podstawy czasu.



Rys. 4. Obraz ultradźwiękowy dużego rozwarstwienia umiejscowionego w środkowej strefie grubości laminatu.

Rozwarstwienia nie są jedynym rodzajem wad wykrywanym w laminatach techniką A-scan. Wskazania o podobnym charakterze dają również wady typu zalaminowanych wtrąceń obcych materiałów (folii ochronnych, taśm maskujących) które dostały się przypadkowo pomiędzy warstwy prepregu w procesie produkcyjnym. W takich przypadkach należy się jednak liczyć z mniejszą amplitudą ech ultradźwiękowych od wady oraz niecałkowitym zanikiem echa dna. Wynika to z faktu, że obce materiały mogą być połączone adhezyjnie z przylegającymi warstwami laminatu i częściowo przepuszczać padające fale ultradźwiękowe.

Kolejną grupę wad stanowią tzw. porowatości czyli skupiska drobnych porów i pęcherzy znajdujące się zazwyczaj na granicach pomiędzy warstwami laminatu. Wady te ujawniają się w badaniu ultradźwiękowym jako spadki amplitudy echa dna, połączone ze wzrostem poziomu szumów strukturalnych obserwowanych przed tym echem.

Wykonanie badania ultradźwiękowego płaskich, jednorodnych laminatów jest stosunkowo proste i nie nastręcza trudności nawet niedoświadczonym operatorom. Problemy interpretacyjne zaczynają się w przypadku elementów o zmiennej grubości i skomplikowanym kształcie. Zmienna grubość laminatu powoduje że echo dna, w trakcie skanowania, zmienia swoje położenie i amplitudę co może być łatwo pomyłone ze wskazaniem od rozwarstwienia znajdującego się blisko przeciwległej powierzchni. W przypadkach wątpliwych skutecznym rozwiązaniem jest dotknięcie przeciwległej powierzchni laminatu palcem zwilżonym ośrodkiem sprzęgającym i obserwowanie echa interpretowanego jako echo dna. Jeśli echo to maleje po przyłożeniu palca naprzeciwko głowicy ultradźwiękowej jest ono faktycznym echem dna. W przypadku jednak gdy nie reaguje ono na przykładanie palca oznacza to, że jest to echo od rozwarstwienia lub innego typu wady.

Innym problemem są badania elementów laminatowych w miejscach o silnie zakrzywionej powierzchni (na promieniach). Z uwagi na niedokładne przyleganie głowicy do powierzchni badania jak też skutek krzywizny powierzchni przeciwległej obserwuje się silne fluktuacje echa dna, utrudniające wykrycie rzeczywistych wskazań wad.

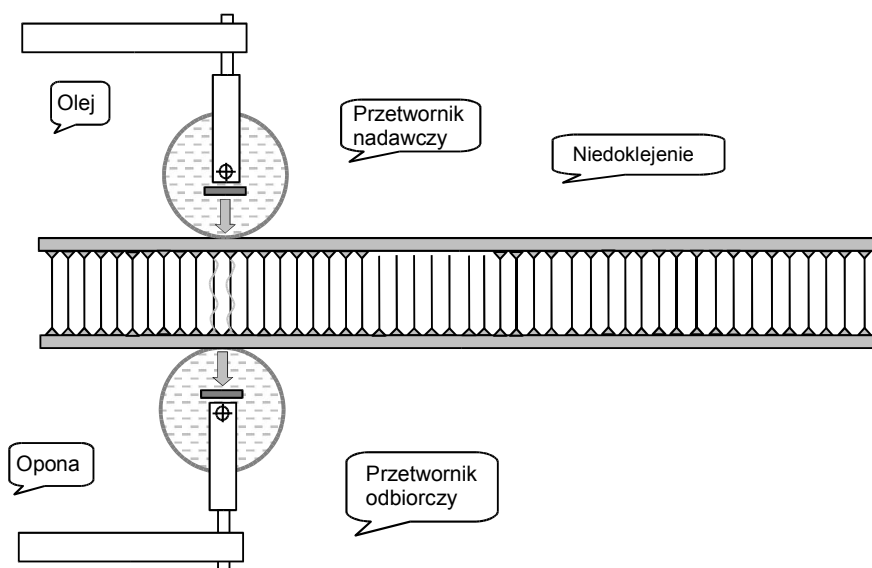
Z uwagi na dużą różnorodność produkowanych części kompozytowych (co do kształtu, grubości oraz struktury wewnętrznej materiału) pojawiające się problemy interpretacyjne wymagają od operatorów zarówno solidnej wiedzy teoretycznej jak też dużej praktyki w badaniach tego rodzaju wyrobów.

Kryteria oceny wad laminatów wykrywanych techniką ultradźwiękową nie są jak dotąd znormalizowane i są indywidualnie ustalane przez producentów dla poszczególnych typów części kompozytowych. W przypadku rozwarstwień oraz wtrąceń ciał obcych podstawowym kryterium oceny są rozmiary poprzeczne indywidualnych wad oraz ich odległości od krawędzi i otworów technologicznych. W przypadku wad typu porowatości bierze się pod uwagę rozmiary powierzchni laminatu, w obrębie której amplituda echo dna spada o określoną ilość decybeli względem amplitudy wzorcowej. Szczegółowe kryteria akceptacji dla poszczególnych rodzajów części kompozytowych zawarte są w specyfikacjach producentów wyrobów lotniczych.

4.2. Technika głowic rolkowych

Technika A-scan wykorzystująca standardową metodę echa stosowana jest z powodzeniem do badań kompozytów monolitycznych (laminatów) o względnie niskim współczynniku tłumienia fal ultradźwiękowych. W przypadku kompozytowych struktur przekładkowych składających się z warstw laminatu oraz wypełniacza ulowego technika ta nie zdaje egzaminu z uwagi na duże tłumienie oraz silne odbicia fal na granicach wypełniacza i laminatu.

W badaniach tego rodzaju struktur kompozytowych skuteczna okazała się natomiast ultradźwiękowa metoda przepuszczania. W jednym z wariantów tej metody stosuje się układ dwóch głowic rolkowych usytuowanych przeciwsobnie po obu stronach badanego elementu. Głowice zamontowane są w specjalnym widelcowym uchwycie zapewniającym ich naprzeciwległe prowadzenie oraz docisk do powierzchni kompozytu w czasie skanowania. Schemat badania kompozytu tego typu układem pokazano na rys.5.



Rys.5. Schemat badania struktury przekładkowej metodą przepuszczania za pomocą układu dwóch głowic rolkowych.

Zastosowanie głowic rolkowych (oponowych), zamiast zwykłych głowic kontaktowych, zapewnia łatwiejsze przemieszczanie głowic po badanej części oraz możliwość uzyskania stosunkowo dobrego sprzężenia akustycznego bez potrzeby stosowania środków sprzęgających. Wynika to z faktu, że powierzchnia czołowa rolki głowicy (opona) wykonana jest z miękkiego tworzywa, które dokładnie przylega do powierzchni kompozytu wypełniając drobne nierówności.

Kluczowym elementem badania jest taki dobór parametrów głowic rolkowych aby na prawidłowo wykonanym kompozycie impuls przejścia znajdował się na możliwie wysokim poziomie w stosunku do poziomu szumów. Dynamika spadku amplitudy impulsu w przypadku najechania głowicami na obszar wady powinna wynosić co najmniej 20 dB. W przypadku zbyt małej dynamiki spadku impulsu trudno byłoby odróżnić wskazanie wady od wahań amplitudy impulsu spowodowanych naturalną niejednorodnością struktury wypełniacza ulowego oraz niestabilnością sprzężenia. Typowe częstotliwości głowic rolkowych stosowanych do badań kompozytowych struktur przekładkowych zawierają się w przedziale od 0,5 do 2 MHz. Przykładowy układ głowic rolkowych przedstawiono na fot.1.



Fot.1. Układ głowic rolkowych do badań struktur przekładkowych techniką przepuszczania

Do badań techniką głowic rolkowych wykorzystać można standardowy defektoskop ultradźwiękowy ze zobrażowaniem typu A, który jednak powinien zapewniać odpowiednio silne pobudzenie przetwornika głowicy nadawczej. Najlepiej do tego celu nadają się defektoskopy posiadające opcję pobudzania głowicy impulsem wypełnionym o regulowanej częstotliwości. Istotne znaczenie ma również dobry odbiornik zapewniający wysoki stosunek sygnału do szumu oraz możliwość wąskopasmowego filtrowania odbieranych impulsów.

Technika głowic rolkowych umożliwia skuteczne wykrywanie wad kompozytów typu niedoklejeń między warstwami laminatu i wypełniacza a także większych rozwarstwień samego laminatu. Warunkiem jej zastosowania jest jednak zapewnienie swobodnego dostępu głowic do obu stron badanego elementu co z reguły jest możliwe tylko podczas badań wykonywanych na etapie wytwarzania półfabrykatów kompozytowych. Dużą zaletą tej techniki jest natomiast możliwość badania elementów o dużej krzywiznie i skomplikowanym kształcie.

Do wad opisanej techniki należy zaliczyć niezbyt dużą dokładność określania położenia i rozmiarów wad (ręczne prowadzenie i pozycjonowanie głowic), brak obiektywnego zapisu wyników skanowania oraz dużą czasochłonność badań. Z uwagi na wspomniane wady technika ta stosowana jest na ogół jako metoda uzupełniająca w stosunku do zautomatyzowanych technik bazujących na zobrażowaniu typu C.

4.3. Technika C-scan

Naturalnym rozwinięciem ręcznej techniki przepuszczania bazującej na prostym zobrazowaniu typu A było jej zautomatyzowanie polegające na zmechanizowaniu przesuwu głowic oraz wprowadzeniu komputerowego zapisu danych ultradźwiękowych (np. amplitudy impulsu przejścia) w powiązaniu z danymi o położeniu głowic (np. współrzędne X, Y). Dane zebrane w taki sposób umożliwiają zbudowanie zobrazowania typu C czyli np. mapy tłumienia ultradźwiękowego w badanej części.

Rozwiązanie takie daje wiele istotnych korzyści w badaniach struktur kompozytowych. Dzięki automatyzacji procesu rejestracji położenia głowic dane ultradźwiękowe są zobrazowane z dużą dokładnością przestrzenną co umożliwia dokładne określenie obszarów materiału wykazujących odmienne właściwości akustyczne. Zmechanizowany system przesuwu głowic zintegrowany z systemem wodnego sprzężenia akustycznego redukuje przypadkowe zmiany amplitudy impulsu związane z niestabilnością sprzężenia.

Przykład urządzenia ultradźwiękowego typu C-scan przeznaczonego do badań dużych elementów kompozytowych o płaskim kształcie (skaner X-Y) przedstawiono na fot.2. Podstawowym elementem strukturalnym systemu jest duży zbiornik na wodę, na którym zabudowano mechanizmy przesuwu głowic w kierunku długości i szerokości. Przesuwu głowic są w pełni kontrolowane przez system komputerowy i mogą być zaprogramowane stosownie do wymiarów i kształtu badanego elementu.

Układ ultradźwiękowy zastosowany w opisywanym urządzeniu jest w pełni sterowany komputerowo i w porównaniu ze standardowym defektoskopem ultradźwiękowym posiada kilka specjalnych właściwości wymaganych w badaniach struktur kompozytowych.



Fot. 2. System C-scan z wodnym sprzężeniem strumieniowym do badań zespołów kompozytowych techniką przepuszczania. Laboratorium PZL Świdnik S.A.

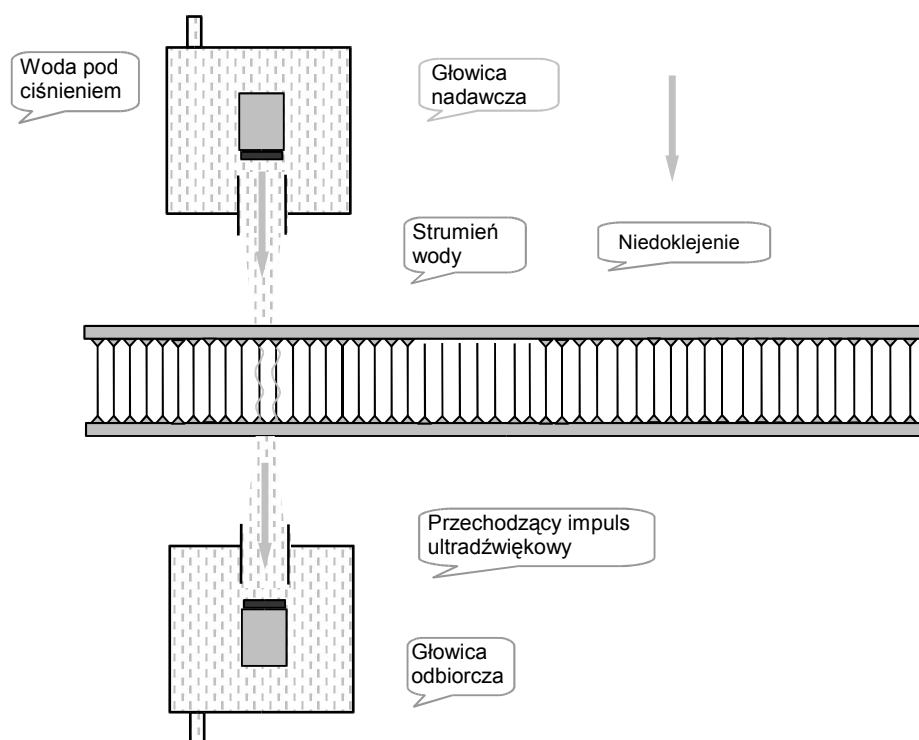
Z uwagi na duży zakres zmian tłumienia występujący w materiałach kompozytowych układ nadawczo-odbiorczy defektoskopu musi cechować się dużą dynamiką toru Y sięgającą

90 dB. Taki zakres dynamiki został osiągnięty dzięki zastosowaniu specjalnego wzmacniacza logarytmicznego oraz nadajnika wytwarzającego impulsy wypełnione o regulowanej częstotliwości, którą można dopasować do częstotliwości głowicy oraz amplitudzie napięcia sięgającej 1000V.

Systemy C-scan przeznaczone do badań elementów kompozytowych z reguły opierają się na wykorzystaniu strumieniowego sprzężenia wodnego nie wymagającego zanurzania kontrolowanych części w wodzie. Klasyczne badania zanurzeniowe nie są w tym przypadku wskazane z uwagi na możliwość dostania się wody do wnętrza struktur kompozytowych a także z powodu trudności związanych z utrzymywaniem pod wodą lekkich elementów kompozytowych wpływających na powierzchnię pod wpływem siły wyporu.

Schemat działania głowic ultradźwiękowych wykorzystujących strumieniowe sprzężenie wodne przedstawiono na rys. 6. Właściwe głowice ultradźwiękowe umieszczone są wewnątrz pojemników, do których doprowadzona jest woda pod ciśnieniem. Woda ta wypływa następnie z pojemników przez specjalne dysze wylotowe formując strumień dochodzący do powierzchni badanej części. Impulsy ultradźwiękowe wytwarzane przez głowice przemieszczają się wzdłuż strumienia wody dochodząc ostatecznie do powierzchni badanego elementu. Woda niesiona przez strumień s płynie do zbiornika i poprzez system filtrów i pomp wraca do głowic cyrkulując w obiegu zamkniętym.

Podstawowym problemem związanym z opisywanym typem sprzężenia akustycznego jest uzyskanie stabilnego, laminarnego strumienia wody. Uzyskuje się to przez odpowiednią konstrukcję obudów głowic oraz precyzyjną regulację ciśnienia doprowadzanej do nich wody. Prawidłowe ustawienie i utrzymanie strumieni wody jest jednym z ważniejszych zadań dla obsługi systemu.

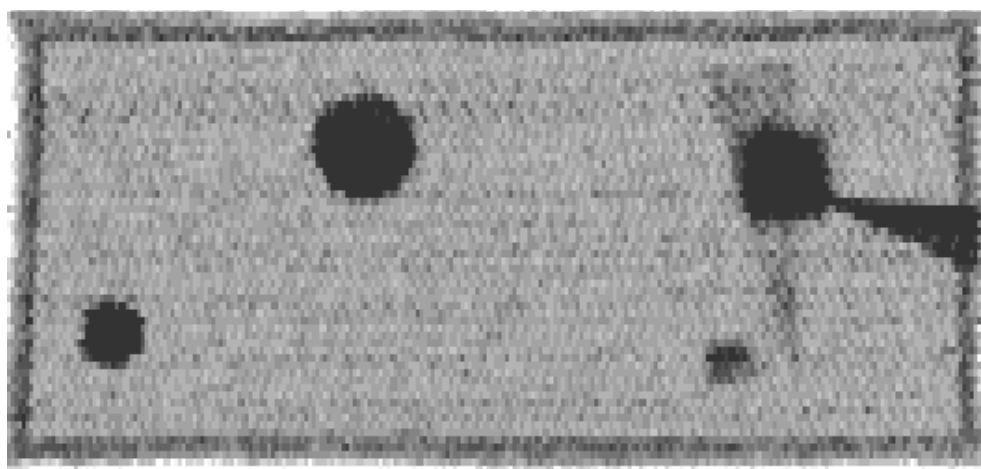


Rys.6. Schemat badania kompozytu za pomocą głowic ultradźwiękowych ze strumieniowym sprzężeniem wodnym.

Pokazany na fot. 2 podstawowy wariant systemu C-scan umożliwia przeprowadzenie skanowania w jednej płaszczyźnie X-Y i tym samym nadaje się do badań elementów w

przybliżeniu płaskich. W badaniach kompozytowych konstrukcji lotniczych stosowane są również systemy do skanowania powierzchni walcowych, a w ostatnim czasie także systemy wieloosiowe umożliwiające zautomatyzowane badanie części kompozytowych o niemal dowolnym profilu powierzchni.

Niezależnie od kształtu skanowanej powierzchni wartości wybranego parametru akustycznego (zazwyczaj tłumienia) rejestrowane w wyniku badania przedstawione są na płaskim zobrazowaniu typu C za pomocą odpowiedniego kodu kolorów lub odcieni szarości. Uzyskana w ten sposób mapa tłumienia pozwala na uwidocznienie struktury wewnętrznej badanej części jak również ewentualnych wad lub innych nieprawidłowości wykonania. Przykładowy obraz elementu kompozytowego z wypełniaczem ulowym pokazano na rys.7. Element ten zawiera specjalnie przygotowane wady sztuczne imitujące niedoklejenia (obszary silnie zaczerwienione) oraz trudniejszą do wykrycia wadę typu wtrącenia obcego materiału w postaci zalaminowanego odcinka taśmy maskującej (lekko ciemniejszy duży trójkąt)



Rys.7. Obraz ultradźwiękowy typu C elementu kompozytowego z wypełniaczem komórkowym.

Jest to przykład pokazujący, że technika C-scan umożliwia wykrywanie również takich wad, które są praktycznie niewykrywalne standardowymi technikami manualnymi. Niewielki, 2-3 dB spadek amplitudy impulsu przejścia w obszarze występowania tego rodzaju wady byłby bardzo trudny do wychwycenia na dynamicznym zobrazowaniu typu A natomiast jest stosunkowo dobrze uwidoczniony na zobrazowaniu typu C. Jakość tego rodzaju zobrazowania można dodatkowo poprawić przez zastosowanie odpowiednich technik cyfrowej obróbki obrazu.

Podobnie jak w innych technikach badań ultradźwiękowych kompozytów podstawowe znaczenie przy stosowaniu techniki C-scan ma prawidłowy dobór parametrów głowic. Oprócz częstotliwości i średnicy przetwornika istotne znaczenie ma również średnica dyszy formującej strumień wody. Z uwagi na zautomatyzowany charakter badania nieco bardziej skomplikowany jest proces nastaw parametrów układu ultradźwiękowego (nadajnika i odbiornika) oraz układu automatycznej akwizycji danych (położenia i poziomy bramek pomiarowych). Układ wymaga ponadto zaprogramowania obszaru skanowania, szybkości przesuwu głowic oraz rozdzielczości skanowania w kierunkach X i Y.

Badane elementy umieszcza się na specjalnych wspornikach nad zbiornikiem wody w taki sposób aby elementy podtrzymujące w jak najmniejszym stopniu przesłaniały obszar badanych części. Istotną regułą badań techniką C-scan jest umieszczanie obok badanych elementów próbki wzorcowej zawierającej zarówno obszary prawidłowego kompozytu jak też sztuczne wady o ściśle zdefiniowanych parametrach. Wynika to z faktu, że interpretacja

wyników badania opiera się w dużej mierze na porównaniu obrazu ultradźwiękowego badanej części z obrazem elementu wzorcowego. Obraz próbki wzorcowej stanowi ponadto potwierdzenie, że badanie zostało przeprowadzone w sposób prawidłowy tj. umożliwiając wykrycie określonych wad wzorcowych.

Rozmiary oraz poziomy tłumienia wstępnie zidentyfikowanych wad określa się za pomocą specjalnych kursorów programowych i porównuje z wartościami dopuszczalnymi określonymi w kryteriach odbiorczych obowiązujących dla danego elementu.

Ultradźwiękowa technika C-scan jest obecnie najdokładniejszą i najbardziej wiarygodną techniką badań nieniszczących elementów kompozytowych w przemyśle lotniczym. Znajduje to odzwierciedlenie w specyfikacjach technicznych dla kompozytowych wyrobów lotniczych, gdzie występuje ona często jako podstawowa metoda kontroli NDT. Dużym atutem tej techniki, w porównaniu do wcześniej omówionych technik ultradźwiękowych, jest komputerowy zapis wyników badania, który stanowi udokumentowaną podstawę do decyzji odbiorczych i może być łatwo archiwizowany lub przesyłany drogą elektroniczną do zainteresowanych stron.

Podstawowe ograniczenia techniki C-scan wynikają z faktu, że jest to technika stacjonarna bazująca na metodzie przepuszczania. Oznacza to, że głównym obszarem jej stosowania jest produkcyjna kontrola części kompozytowych w zakładach wytwórczych nie zaś badania eksploatacyjne, które muszą być prowadzone na samolotach w warunkach jednostronnego dostępu do kontrolowanych elementów.

5. Podsumowanie

Badania niszczące materiałów kompozytowych są stosunkowo nową dziedziną, której rozwój był w dużej mierze stymulowany wzrastającym wykorzystaniem tych materiałów w przemyśle lotniczym. Wśród wielu metod badań znajdujących zastosowanie w tej dziedzinie najważniejsze znaczenie mają obecnie metody ultradźwiękowe. Dotyczy to zwłaszcza badań prowadzonych na etapie wytwarzania części kompozytowych. W badaniach eksploatacyjnych konkurencyjne dla ultradźwięków są takie metody jak szerografia i termografia, które dają możliwość szybkiego badania dużych powierzchni w warunkach jednostronnego dostępu.

Techniki ultradźwiękowych badań kompozytów pod wieloma względami różnią się od technik stosowanych w badaniach metali. Wynika to ze złożonej struktury materiałów kompozytowych, która skutkuje zwiększonym tłumieniem, rozpraszaniem oraz odbiciami wewnątrz materiału. Ze względu na dużą różnorodność warunków badań ultradźwiękowych poszczególnych wyrobów kompozytowych procedury badawcze opracowywane są jednostkowo i weryfikowane na reprezentatywnych próbkach odniesienia. W chwili obecnej brak jest jakichkolwiek norm regulujących ten obszar badań, nie ma też uniwersalnych wzorców, reflektorów odniesienia czy też reguł nastawiania czułości badania. Pewne wskazówki w tym zakresie można znaleźć w literaturze naukowej oraz w specyfikacjach technicznych firm lotniczych produkujących wyroby kompozytowe. Te ostatnie dokumenty są jednak z reguły objęte tajemnicą handlową.

Podobny problem wiąże się z kwalifikacją i certyfikacją personelu badającego wyroby kompozytowe. Ze względu na specyfikę badań kompozytów standardowe szkolenie nastawione na badania wyrobów metalowych nie jest wystarczające. W kilku ośrodkach zagranicznych prowadzone są specjalistyczne kursy badań ultradźwiękowych wyrobów kompozytowych.

Biorąc pod uwagę wspomniane trudności na uwagę zasługuje stworzenie w PZL Świdnik S.A. pierwszego w krajowym przemyśle lotniczym nowoczesnego laboratorium

ultradźwiękowych badań kompozytów. Laboratorium to dysponuje wszystkimi opisanymi w artykule technikami badań UT w tym, bardzo nowoczesnym systemem C-scan.

Dzięki współpracy z zachodnimi firmami lotniczymi oraz IPPT PAN personel pracujący w laboratorium został przeszkolony i certyfikowany w zakresie badań ultradźwiękowych kompozytów zgodnie ze standardami obowiązującymi w światowym przemyśle lotniczym. Laboratorium od ponad roku prowadzi badania odbiorcze kompozytowych części lotniczych produkowanych w PZL Świdnik.

Biorąc pod uwagę coraz powszechniejsze wykorzystanie kompozytów w przemyśle lotniczym a także w innych dziedzinach przemysłu można oczekiwać dalszego szybkiego rozwoju badań nieniszczących tych materiałów. Jednym z ważnych kierunków rozwoju w dziedzinie badań ultradźwiękowych jest np. opracowywanie metod i technik, które mogą być zastosowane nie tylko do wykrywania wad makroskopowych kompozytów lecz także do oceny stopnia degradacji ich mikrostruktury oraz utraty własności wytrzymałościowych [5,6].

Literatura

1. Serwis internetowy <http://www.netcomposites.com>
2. Belzowski A., Rechul Z., Współczynniki bezpieczeństwa konstrukcji z materiałów kompozytowych, Dozór Techniczny Nr 1/2005, s. 2-8
3. Krapez J.C., Balageas D., Deom A. and Lepoutre F
Comparison of Established and Emerging NDE Techniques Applied to Delaminations In Composite Materiale, Proceedings of 6th European Conference on Non Destructive Testing, Nice 94, pp 257-261
4. Hillger W., Ultrasonic Imaging of Internal Defects In CFRP-Composites, Proceedings of 6th European Conference on Non Destructive Testing, Nice 94, pp 449-261-453
5. Fei D., Hsu D.K. and Warchol M., Simultaneous Velocity, Thickness and Profile Imaging by Ultrasonic Scan., Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 20, N0 3, September 2001
6. Jian X.M., Guo N., Li M.X. and Zhang H.L., Characterization of Bonding Quality in a Multilayer Structure Using Segment Adaptive Filtering, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 21, No 2, June 2002.