
XIX Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 12-15 marca 2013

**NISKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWE TECHNIKI BADAŃ KOMPOZYTÓW
LOTNICZYCH**

Sławomir MACKIEWICZ, Tomasz KATZ
IPPT PAN, INSTYTUT LOTNICTWA
smackiew@ippt.gov.pl, katz@ilot.edu.pl

1. WSTĘP

Stale wzrastający udział materiałów kompozytowych w wytwarzaniu struktur nośnych nowoczesnych samolotów i śmigłowców powoduje konieczność opracowywania i wdrażania nowych technik badań nieniszczących dostosowanych do specyfiki tych materiałów i wytwarzanych z nich struktur.

W większości przypadków techniki NDT stosowane do badań kompozytów lotniczych wywodzą się z klasycznych metod badań nieniszczących stosowanych od lat w badaniach bardziej konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych. Do tego typu technik należą, między innymi, techniki ultradźwiękowe: *PE*, *C-scan* i *Phased Array* stanowiące obecnie podstawowe narzędzia badań kompozytów w przemyśle lotniczym. Szczegółowe zasady stosowania tych technik w badaniach różnych typów struktur kompozytowych opisywane były w kilku referatach prezentowanych na Seminariach Badań Nieniszczących w Zakopanem [1,2,3,4].

Techniki ultradźwiękowe pozwalają na skuteczne wykrywanie większości wad struktur kompozytowych zarówno na etapie produkcji jak i w eksploatacji. Istnieją jednak przypadki gdzie ich możliwości nie są wystarczające. Przykładowo, wykrywanie niedoklejeń pokrycia do rdzenia w strukturach przekładkowych nie stanowi problemu w kontroli produkcyjnej (badanie *C-scan* techniką przepuszczania) jednak w badaniach eksploatacyjnych prowadzonych w warunkach jednostronnego dostępu stanowi to już poważny problem. Innym przykładem są niedoskonale połączenia adhezyjne charakteryzujące się jednak dobrym stykiem przylegających elementów, tzw. *kissing bonds*. Standardowe techniki ultradźwiękowe są mało skuteczne w wykrywaniu tego rodzaju wad ze względu na mały współczynnik odbicia fal od „zaciśniętego” styku, nawet wówczas, gdy nie wykazuje on żadnej wytrzymałości na naprężenia rozciągające.

Z powodu tych i innych ograniczeń technik ultradźwiękowych, w określonych przypadkach, muszą one być uzupełniane innymi technikami badań nieniszczących. W pierwszym rzędzie należy tutaj wymienić badania termograficzne [5] i szerograficzne [6].

Badanie termograficzne (aktywne) polegają na podgrzewaniu powierzchni kompozytu impulsami ciepła i obserwowaniu dynamicznych zmian rozkładu temperatury na powierzchni za pomocą kamery termowizyjnej. Na podstawie rozkładu i dynamiki zmian temperatury można wykryć nieciągłości materiału (np. rozwarstwienia, niedoklejenia), które blokują przepływy ciepła w materiale. Czułość i precyzja metody termograficznej silnie zależy od głębokości zalegania wad pod powierzchnią i jest generalnie niższa niż czułość metod ultradźwiękowych. Do szczególnych zalet metody termograficznej można natomiast zaliczyć jej bezkontaktowość, wydajność oraz łatwość wykrywania obecności wody w strukturach kompozytowych.

Technika szerograficzna polega na wykorzystaniu interferencji światła laserowego do zobrazowania niewielkich odkształceń powierzchni materiału pod wpływem obciążeń mechanicznych wytworzonych przez podciśnienie lub podgrzanie badanego elementu. Szerografia wykorzystuje dwa obrazy powierzchni materiału uzyskane metodą interferometrii plamkowej (ESPI) przesunięte względem siebie o kilka mm w kierunku poprzecznym. W rezultacie nałożenia na siebie takich obrazów na finalnym zobrazowaniu uwidocznione zostają gradienty przemieszczeń powierzchni w kierunku prostopadłym. Porównując obrazy szerograficzne tej samej powierzchni przed i po zastosowaniu obciążenia wyodrębnić można jedynie te deformacje, które powstały wskutek obciążenia i które można wiązać z wewnętrznymi wadami materiału (w odróżnieniu od naturalnych nierówności powierzchni, które występują zarówno przed jak i po obciążeniu).

Do najważniejszych zalet metody szerograficznej zaliczyć można wysoką wydajność badań oraz dużą skuteczność w wykrywaniu wad struktur przekładkowych w warunkach eksploatacji, tj. przy jednostronnym dostępie do badanych części.

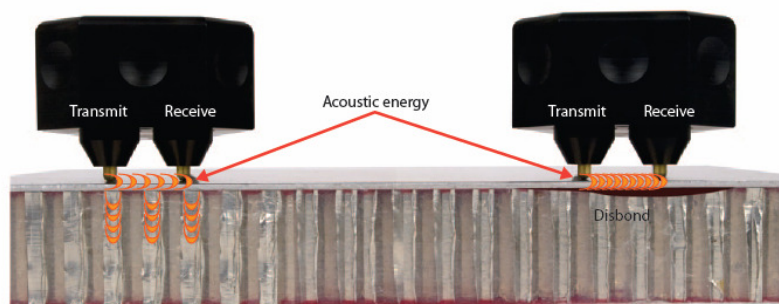
Obie wymienione techniki są obecnie uznane i stosowane w dużym przemyśle lotniczym gdzie stanowią podstawowe uzupełnienie technik ultradźwiękowych. Jednak w przypadku małych i średnich firm lotniczych poważną przeszkodą w ich szerszym wykorzystaniu jest wysoki koszt systemów badawczych.

W tym kontekście warto zwrócić uwagę na grupę mniej znanych technik badań nieniszczących, które od pewnego czasu funkcjonują w przemyśle lotniczym i również stanowią dobre uzupełnienie metod ultradźwiękowych w badaniach materiałów i struktur kompozytowych. Są to techniki oparte na wzbudzeniu i pomiarze drgań mechanicznych o częstotliwościach znacznie niższych niż normalnie stosowane w badaniach ultradźwiękowych. Postęp w dziedzinie elektroniki umożliwił zbudowanie niewielkich i stosunkowo niedrogich przyrządów umożliwiających praktyczne stosowanie tych technik do badań struktur kompozytowych zarówno w warunkach produkcji jak i w eksploatacji. Przykładami tego typu urządzeń są BondMaster 1000e firmy Olympus [7] oraz BondaScope 3100 firmy NDT Systems [8].

W niniejszym artykule omówiono podstawowe techniki badań zaimplementowane w tego typu urządzeniach oraz pokazano ich przykładowe zastosowania do badania struktur kompozytowych. Pokazano przykłady zastosowań, w których techniki te wykazują wyższą skuteczność niż badania prowadzone standardowymi technikami ultradźwiękowymi [9,10,11]. Wszystkie opisywane badania wykonano za pomocą urządzenia BondMaster 1000e firmy Olympus.

2. TECHNIKA PITCH-CATCH

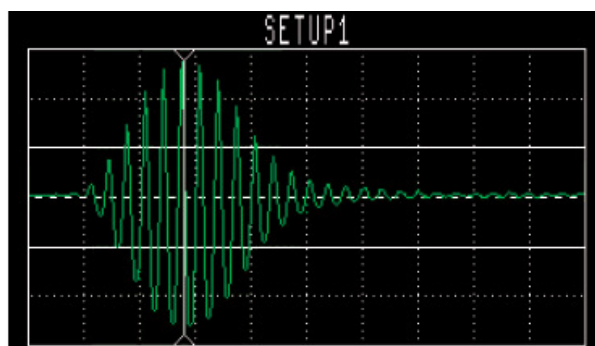
Schemat badania struktury kompozytowej techniką *Pitch-Catch* pokazano na rys. 1. Głowica badawcza zawiera dwa przetworniki piezoelektryczne obciążone ostro zakończonymi trzpieniami przekazującymi drgania do powierzchni badanego materiału. Jeden z przetworników pełni funkcję nadajnika, drugi, umieszczony w odległości kilkunastu mm, funkcję odbiornika drgań. Jest to konfiguracja podobna do stosowanej w badaniach ultradźwiękowych techniką głowic podwójnych z tym jednak, że stosowane częstotliwości drgań są tutaj znacznie niższe i leżą w zakresie od 5 do 100 kHz.



Rys. 1. Schemat wykorzystania techniki *Pitch-Catch* do wykrywania niedoklejeń pokrycia do rdzenia w strukturach przekładkowych [7].

Niska częstotliwość wytwarzanych drgań oraz punktowy sposób ich wzbudzenia powoduje, że w warstwie pokrycia badanego elementu mogą propagować się jedynie antysymetryczne mody fal Lamba. Fale te rozchodzą się we wszystkich kierunkach od trzpienia pobudzającego. Amplituda fali rejestrowanej na przetworniku odbiorczym zależy od tego czy na swej drodze fala traciła energię wskutek odpromieniowania do przylegającego wypełniacza komórkowego (patrz rys. 1). W miejscach występowania niedoklejeń pokrycia do rdzenia amplituda fali przechodzącej jest znacznie wyższa niż w miejscach prawidłowego połączenia tych materiałów.

W najprostszym wariantcie techniki *Pitch-Catch* przebieg czasowy rejestrowanego impulsu jest bezpośrednio zobrazowany na ekranie aparatu (patrz rys. 2). Oceny stanu materiału pod głowicą dokonuje się na podstawie poziomu amplitudy rejestrowanego sygnału RF.

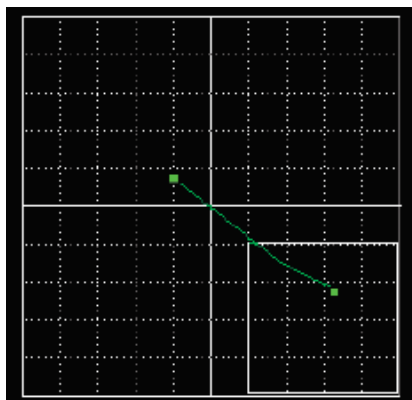


Rys. 2. Zobrazowanie impulsu fal Lamba w technice *Pitch-Catch* RF.

W bardziej zaawansowanych modach pracy aparat umożliwia śledzenie zarówno zmian amplitudy jak i fazy impulsu przechodzącego. Jest to możliwe przez zobrazowanie obu tych parametrów w postaci punktu (*flying dot*) przesuwającego się na wykresie impedancyjnym. Przykładowy odcinek trajektorii zmian sygnału RF zarejestrowany przy przesuwaniu głowicy po powierzchni badanego elementu pokazano na rys. 3.

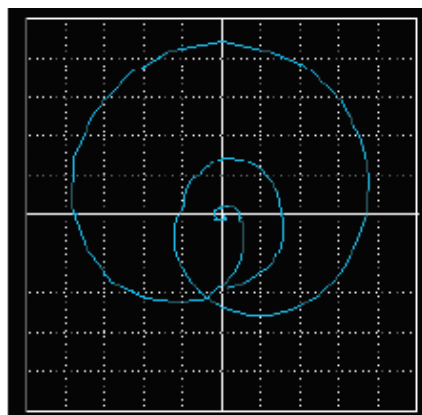
Badanie wymaga przeprowadzenia kalibracji systemu na reprezentatywnym wzorcu badanego elementu. Wzorec taki musi zawierać zarówno obszary prawidłowe jak i wadliwe. Sygnał zeruje się (tj. ustawia na środku wykresu impedancyjnego) przykładając głowicę w miejscu prawidłowym. Następnie przykładają się głowicę w miejscu wadliwym i nastawia parametry badania (częstotliwość, wzmocnienie, długość impulsu pobudzającego) tak, aby uzyskać możliwie duże odchylenie punktu

sygnałowego od położenia zerowego. Na tej podstawie ustala się też obszar alarmowy (prostokąt na rys. 3), którego przekroczenie uruchamia sygnały alarmowe aparatu informujące o wykryciu nieprawidłowości.



Rys. 3. Zobrazowanie trajektorii parametrów (fazy i amplitudy) sygnału RF na wykresie impedancyjnym

Najbardziej zaawansowanym wariantem techniki *Pitch-Catch* jest badanie, w którym wykorzystuje się technikę przemiatań częstotliwości (*frequency sweep*). W tym przypadku przetwornik nadawczy nie pracuje na jednej ustalonej częstotliwości, lecz jest pobudzany napięciem o częstotliwości zmieniającej się w ustalonych granicach. Przemiatań częstotliwości jest na tyle szybkie, że w danym punkcie przyłożenia głowicy rysowana jest od razu cała trajektoria zmian parametrów sygnału przechodzącego w funkcji częstotliwości (rys. 4).



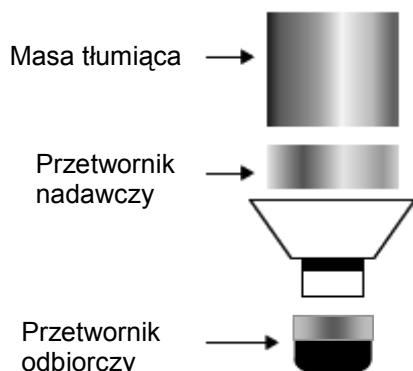
Rys. 4. Zobrazowanie trajektorii zmian impulsu przechodzącego w technice *Pitch-Catch* z przemiatań częstotliwości.

Należy zauważyć, że w odróżnieniu od trajektorii pokazanej na rys. 3, której zmiany odpowiadają przemieszczaniu głowicy po obiekcie, trajektoria pokazana na rys. 4 uwidacznia zmiany parametrów sygnału wskutek przemiatań częstotliwości wyznaczone w jednym punkcie na powierzchni obiektu.

Technika *Pitch-Catch* z przemiatań częstotliwości pozwala na lepsze rozróżnianie różnych rodzajów wad a także łatwiejsze eliminowanie fałszywych wskazań związanych np. z nieprawidłowym sprzężeniem głowicy z powierzchnią badanego obiektu.

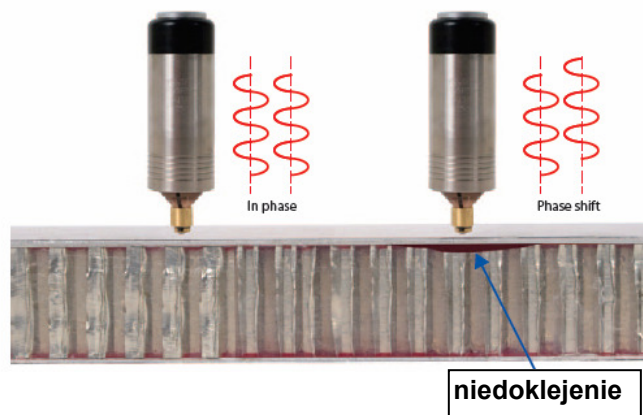
3. TECHNIKA IMPEDACJI MECHANICZNEJ - MIA

Technika MIA (*Mechanical Impedance Analysis*) polega na analizie impedancji mechanicznej (sztywności dynamicznej) elementu pobudzanego do drgań za pomocą specjalnej głowicy pomiarowej. Schemat takiej głowicy pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Konstrukcja głowicy pomiarowej do badań techniką impedancji mechanicznej MIA.

Końcówka głowicy dociskana jest do badanego elementu z pewną siłą i pobudza go drgań mechanicznych o częstotliwości rzędu kilku do kilkudziesięciu kHz. (patrz rys. 6). Jeśli powierzchnia materiału jest sztywna i nie poddaje się drganiom wymuszonym przez głowicę (czyli ma dużą impedancję mechaniczną) amplituda napięcia rejestrowanego na przetworniku odbiorczym jest duża i zgodna w fazie z amplitudą napięcia pobudzającego.



Rys. 6. Zasada działania techniki impedancji mechanicznej MIA [7].

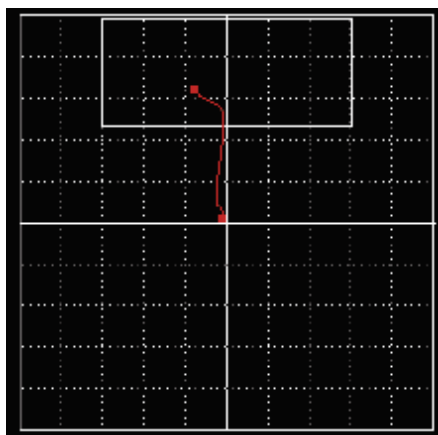
Jeśli natomiast powierzchnia materiału łatwo poddaje się drganiom wymuszonym przez głowicę (ma małą impedancję mechaniczną) amplituda napięcia rejestrowanego na przetworniku odbiorczym jest mała i przesunięta w fazie względem amplitudy napięcia pobudzającego. Różnica amplitud oraz przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem sterującym a odbiorczym określa wartość impedancji mechanicznej badanego elementu w punkcie przyłożenia głowicy.

Optymalną częstotliwość drgań głowicy oraz inne parametry systemu badawczego odpowiednie do badań określonej struktury kompozytowej ustala się doświadczalnie na reprezentatywnej próbce wzorcowej. Optymalizacja polega na

znalezieniu takiej częstotliwości drgań pobudzających, przy której występuje największa różnica wskazań między obszarem prawidłowym i wadliwym.

Wynik badania określany jest, podobnie jak w przypadku techniki *Pitch-Catch*, za pomocą punktu *flying dot* na wykresie impedancyjnym (patrz rys. 7). Kryteria oceny ustalane są metodą porównawczą na próbce wzorcowej z modelowymi wadami o znanych rozmiarach i oznaczane na wykresie impedancyjnym w postaci prostokątnych obszarów alarmowych.

Metoda impedancji mechanicznej wykazuje przy badaniach kompozytów podobne możliwości diagnostyczne jak metoda *Pitch-Catch*. Istotną zaletą techniki MIA jest jednak fakt, że stosowana głowica ma pojedynczą końcówkę pomiarową stykającą się z badanym materiałem w jednym punkcie. Oznacza to, że może być ona łatwiej zastosowana do badań powierzchni silnie zakrzywionych lub badań prowadzonych w trudno dostępnych miejscach, gdzie decydującą rolę odgrywają małe wymiary i łatwość uzyskania sprężenia głowic pomiarowych.



Rys. 7. Zobrazowanie wyniku badania MIA w postaci punktu *flying dot* na wykresie impedancyjnym.

4. TECHNIKA REZONANSOWA

Technika rezonansowa polega na zastosowaniu specjalnej wąskopasmowej głowicy ultradźwiękowej pobudzanej do drgań ciągłych na swojej częstotliwości rezonansowej. Głowicę przykłada się do powierzchni badanego elementu i sprzęga za pomocą ośrodka sprzęgającego podobnie jak w klasycznej metodzie ultradźwiękowej.

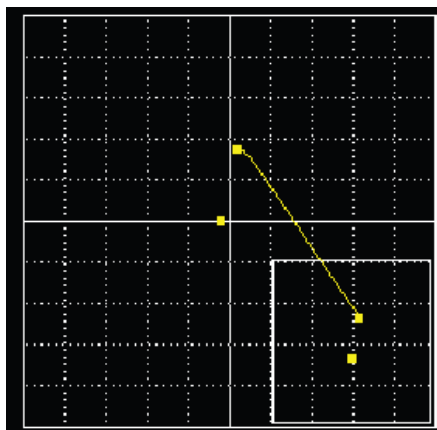


Rys. 8. Zasada badania połączeń klejonych techniką rezonansową.

Wskutek obciążenia powierzchni głowicy grubością badanego materiału (patrz rys. 8) zmienia się impedancja elektryczna przetwornika piezoelektrycznej głowicy widziana przez układ elektroniczny aparatu. Zmiana impedancji przetwornika silnie zależy od grubości materiału znajdującego się pod głowicą, w szczególności od tego czy grubość ta odpowiada wytworzeniu drgań rezonansowych układu głowica-materiał.

Fakt ten wykorzystuje się przy badaniach połączeń klejonych typu kompozyt-kompozyt i kompozyt-metal.

Impedancję mierzoną po przyłożeniu głowicy do prawidłowo wykonanego połączenia traktuje się jako wartość odniesienia, którą ustawia się (zeruje) w środku impedancyjnego układu współrzędnych (patrz rys.9). Wartość impedancji zmienia się gdy głowicy zostanie przyłożona do materiału w miejscu występowania rozwarstwienia lub niedoklejenia. Wynika to z faktu, że zmienia się wówczas efektywna grubość warstwy drgającej pod głowicą.



Rys. 9. Zobrazowanie wskazań głowicy rezonansowej w różnych miejscach próbki wzorcowej.

Zmiana taka zostaje uwidoczniiona na wykresie impedancyjnym jako odchylenie punktu sygnałowego *flying dot* od położenia zerowego (patrz rys. 9). Poprzez porównanie położenia punktów sygnałowych w prawidłowych i wadliwych miejscach próbki wzorcowej określić można kryteria akceptacji wyników badania w postaci prostokątnych obszarów alarmowych oznaczonych na wykresie impedancyjnym.

W technice rezonansowej częstotliwość badania określona jest przez częstotliwość rezonansową stosowanej głowicy ultradźwiękowej. Częstotliwość głowicy należy więc dobrać do rodzaju badanego materiału oraz grubości łączonych elementów. W przypadku badań połączeń klejowych wartości stosowanych częstotliwości zawierają się w zakresie od 35 kHz do 500 kHz. Wyższe częstotliwości stosuje się do badań cieńszych warstw wykonanych z materiałów o wyższej impedancji akustycznej (metale), niższe częstotliwości do badań grubszych warstw wykonanych z materiałów o niskiej impedancji akustycznej (kompozyty). Ostatecznego wyboru częstotliwości głowicy dokonuje się doświadczalnie wykonując testy na reprezentatywnej próbce połączenia z zaimplementowanymi wadami sztucznymi lub naturalnymi.

Metoda rezonansowa dobrze sprawdza się w przypadku badań połączeń klejowych typu metal-metal, laminat-metal oraz laminat-laminat. Połączenia laminat-metal są szczególnie trudne do badania standardowymi technikami ultradźwiękowymi, ponieważ impulsy fal ultradźwiękowych odbijają się zarówno od połączeń wadliwych (wskutek braku ciągłości) jak też od połączeń prawidłowych (wskutek dużej różnicy impedancji akustycznych między metalem i kompozytem). Prawidłowe rozróżnienie tych przypadków w metodzie rezonansowej jest możliwe, ponieważ analizuje ona nie tylko sam obszar styku, ale właściwości akustyczne (drgania) całego układu przylegających warstw.

5. BADANIE STRUKTURY PRZEKŁADKOWEJ TECHNIKĄ P-C

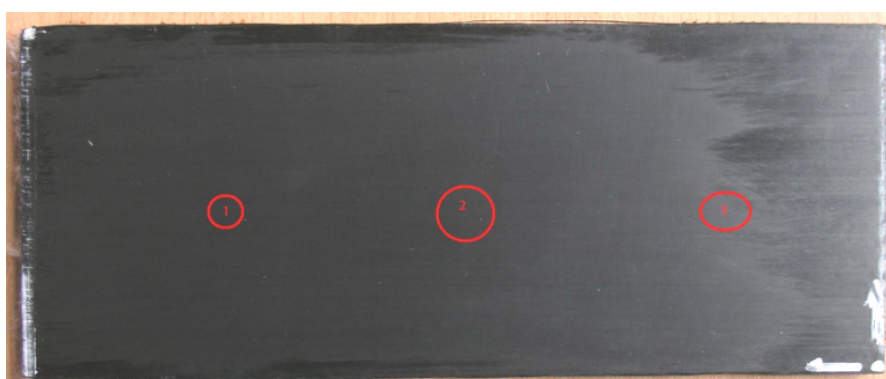
Jako przykład zastosowania techniki *Pitch-Catch* przedstawione zostanie badanie struktury przekładkowej z pokryciem wykonanym z kompozytu węglowego o grubości 1,2 mm i wypełniaczem ulowym wykonanym z Nomexu o grubości ok. 5 mm.

W celu przeprowadzenia badań porównawczych i oceny skuteczności poszczególnych technik badań nieniszczących wykonano specjalny panel testowy o wymiarach 240x100 mm z 3 różnymi wadami połączenia pokrycia do rdzenia. Fotografiją panelu testowego z uwidocznionymi położeniami wad pokazano na rys. 10.

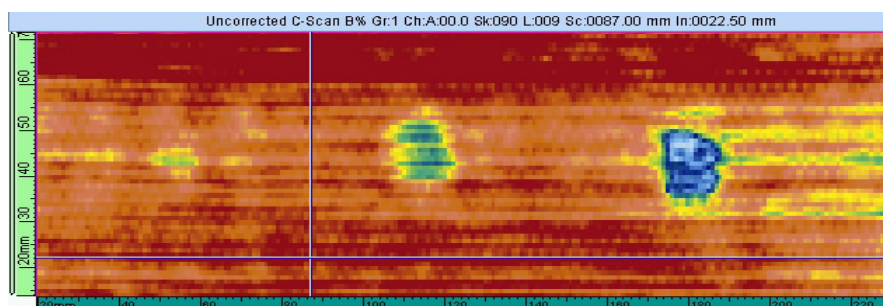
Wady nr 1 i nr 2 zamodelowano poprzez umieszczenie między wypełniaczem i pokryciem wkładek z taśmy teflonowej o grubości 0,02 mm i średnicy odpowiednio 12 i 20 mm. Obecność wkładek uniemożliwiła wytworzenie dobrego połączenia adhezyjnego między wypełniaczem a laminatem w trakcie utwardzania zespołu metodą worka próżniowego. Pomimo uniemożliwienia połączenia adhezyjnego wkładki teflonowe nie eliminowały jednak mechanicznego styku pomiędzy przylegającymi elementami struktury przekładkowej modelując tym samym wady typu *kissing bonds*.

Wadę nr 3 zamodelowano wykonując zagniecenie wypełniacza ulowego tak, aby w czasie wytwarzania panelu nie doszło do mechanicznego połączenia pokrycia z wypełniaczem. Jest to rodzaj wady modelujący całkowitą utratę ciągłości materiału na granicy pokrycie-wypełniacz.

W pierwszym etapie wykonano badanie panelu techniką *Phased Array* przy zastosowaniu 64 elementowej głowicy liniowej o częstotliwości 5 MHz. Na rys. 11 pokazano C-scan amplitudowy echa dna pokrycia węglowego.



Rys. 10. Struktura przekładkowa z pokryciem węglowym i wypełniaczem komórkowym z Nomexu z zaimplementowanymi wadami.

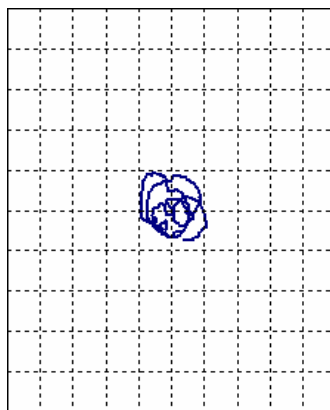


Rys. 11. Amplitudowy C-scan echa dna pokrycia węglowego uzyskany techniką *Phased Array*.

Obszary o kolorze niebieskim i zielonym na zobrazowaniu oznaczają miejsca, w których amplituda echa dna laminatu pokrycia jest wyraźnie niższa niż w otaczających

obszarach o kolorze żółtym i pomarańczowym. Amplituda echa dna w miejscach występowania wad nr 2 i 3 uległa więc wyraźnemu zmniejszeniu natomiast w miejscu występowania wady nr 1 spadek amplitudy jest nieznaczny. Stosunkowo najlepiej została zobrazowana wada nr 3 reprezentująca brak mechanicznej ciągłości materiału na granicy laminat-wypełniacz.

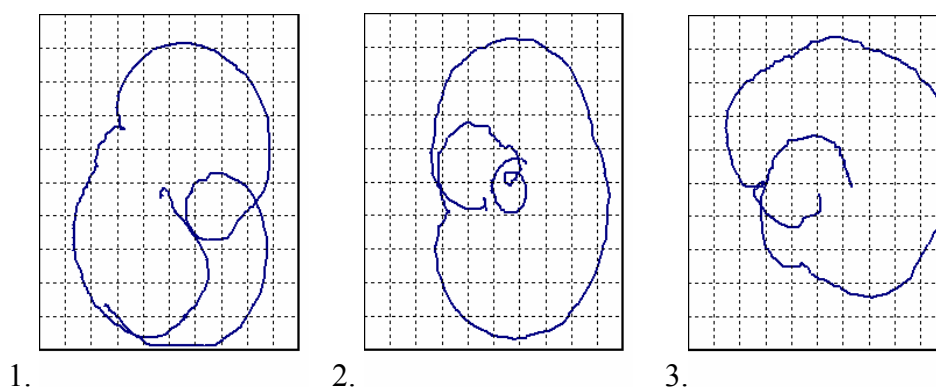
Opisywany panel testowy poddano następnie badaniom techniką *Pitch-Catch* z przemiataaniem częstotliwości za pomocą aparatu BondMaster 1000e. Na rys. 12 pokazano trajektorię zmian sygnału przechodzącego, w zakresie częstotliwości 28 – 38 kHz, zarejestrowaną na prawidłowo wykonanym fragmencie panelu.



Rys. 12. Trajektorja sygnału *Pitch-Catch* dla zakresu częstotliwości 28-38 kHz uzyskana w miejscu prawidłowego połączenia pokrycia i rdzenia.

Trajektorja ta stanowiła obraz odniesienia przy badaniu całej powierzchni panelu testowego.

Poniżej, na rysunku 13, pokazano trajektorie sygnałów uzyskane w miejscach występowania wad panelu testowego. Wszystkie trajektorie wyraźnie różnią się od wskazania referencyjnego i jednoznacznie wskazują na występowanie wad. Dotyczy to również najmniejszej wady nr 1, która dawała bardzo słabe wskazanie w badaniu ultradźwiękowym techniką *Phased Array*.

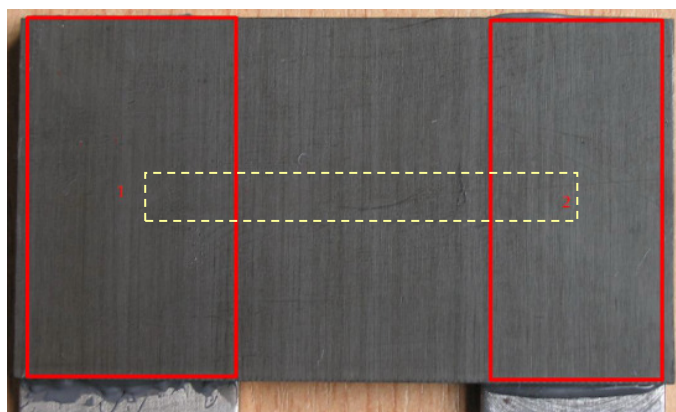


Rys. 13. Trajektorie sygnałów *Pitch-Catch* uzyskane w miejscach występowania wad połączenia pokrycia do rdzenia: 1. Wkładka teflonowa Ø12, 2. Wkładka teflonowa Ø20, 3. Zagniecenie rdzenia.

6. BADANIE POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH LAMINAT-METAL TECHNIKĄ REZONANSOWĄ

Jako przykład zastosowania techniki rezonansowej przedstawiono badanie połączeń klejowych laminatu węglowego z płytkami metalowymi wykonanymi z tytanu oraz stali. Grubość laminatu węglowego wykonanego z taśm prepregowych metodą worka próżniowego wynosiła ok. 4 mm. Grubość płytek metalowych wynosiła odpowiednio: 2,95 mm płytki z tytanu oraz 4,45 mm płytki ze stali. Do wykonania połączenia zastosowano klej *Henkel Hysol 9461 A&B*, utwardzany 24 godziny w temperaturze pokojowej. Grubość warstwy kleju wynosiła ok. 0,25 mm.

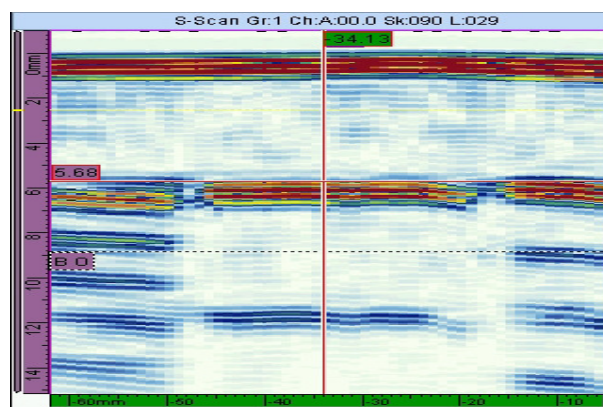
Na rys. 14 pokazano fotografię panelu testowego z doklejonymi od spodu płytkami metalowymi. W celu realistycznego zamodelowania wady połączenia klejowego obszar środkowy laminatu pokryto od spodu warstwą kleju tak aby wykazywała ona nierówności i charakterystykę akustyczną podobną do niedoklejenia.



Rys. 14. Próbką laminatu węglowego z połączeniami klejowymi laminat-tytan (po lewej) oraz laminat-stal (po prawej).

W pierwszym etapie wykonano badanie panelu testowego ultradźwiękową techniką *Phased Array*. Na rys. 15 pokazano obraz typu B-scan uzyskany przy ustawieniu głowicy liniowej w środkowej części laminatu tak, aby częściowo obejmowała ona również obszary połączeń klejowych laminat-tytan oraz laminat-stal. Położenie głowicy oznaczono żółtym prostokątem na rys. 14.

Widoczne jest, że amplituda echa dna w miejscach prawidłowych połączeń laminat-metal jest bardzo zbliżona do amplitudy uzyskiwanej w środkowym odcinku zobrazowania od obszaru zamodelowego niedoklejenia.

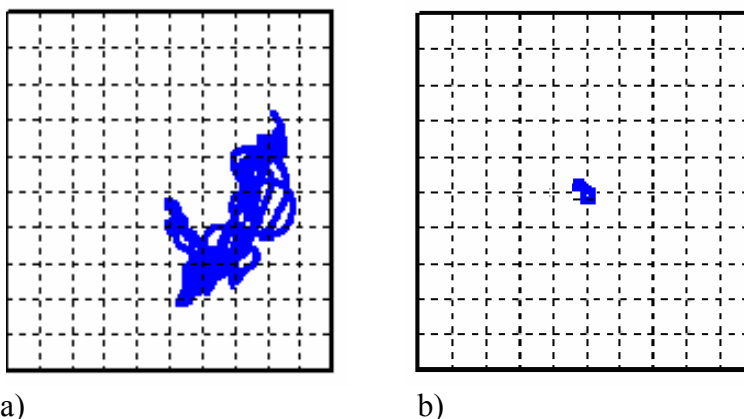


Rys. 15. Zobrazowanie B-scan próbki laminatu węglowego z doklejonymi płytkami metalowymi: tytanową po lewej oraz stalową po prawej stronie.

W praktyce nie byłoby możliwości odróżnienia niedoklejenia jedynie na podstawie amplitudy echa dna warstwy laminatu. Doświadczony operator posłużyłby się w tym przypadku analizą ech wielokrotnych. W obszarach obu prawidłowo wykonanych połączeń pod echem dna widoczne są echa wielokrotne z płytek metalowych. Ich położenia dokładnie odpowiadają grubości płytek. W środkowej strefie B-skanu, odpowiadającej obszarowi niedoklejenia, brak jest tych wskazań natomiast widoczne są echa wielokrotne płytki laminatu.

Przedstawiona analiza ech wielokrotnych połączeń klejowych laminat-metal nie zawsze jednak jest możliwa, np. z uwagi na dużą grubość, wysokie tłumienie lub brak równoległości powierzchni elementów łączonych. W takich przypadkach metoda ultradźwiękowa nie pozwoliłaby na prawidłowe zdiagnozowanie stanu połączeń klejowych.

Przedmiotowe połączenia klejowe poddano badaniom niskoczęstotliwościową techniką rezonansową opisaną w pkt. 4. Na rys. 16 pokazano trajektorie zmian impedancji głowicy o częstotliwości 113 kHz zarejestrowane podczas jej przesuwu po powierzchni panelu testowego.



Rys. 16. Trajektorie sygnału *flying dot* uzyskane za pomocą głowicy rezonansowej o częstotliwości $f = 113$ kHz przy badaniu próbki laminatu węglowego z doklejonymi płytkami z tytanu oraz stali.

W przypadku połączenia prawidłowego (rys. 16 b) impedancja głowicy zmienia się od punktu do punktu jedynie w niewielkim stopniu i oscyluje wokół położenia zerowego ustawionego na panelu wzorcowym.

W przypadku skanowania obszaru niedoklejenia (rys. 16 a) zmiany impedancji głowicy są znacznie większe i wyraźnie odbiegają od położenia zerowego ustawionego na panelu wzorcowym w miejscu prawidłowego połączenia.

Pomimo tego, że w wielu przypadkach, techniki ultradźwiękowe (np. *Phased Array*) potrafią skutecznie wykrywać wady połączeń klejowych typu laminat-laminat czy laminat-metal technika rezonansowa stanowi dla nich ważne uzupełnienie w tzw. trudnych przypadkach. W szczególności jest ona dużo bardziej skuteczna przy badaniach kompozytów wykazujących duże tłumienie fal ultradźwiękowych a także przy wykrywaniu wad połączeń klejowych typu *kissing bonds*. Ta ostatnia przewaga metody rezonansowej wynika z faktu, że drgania rezonansowe wytwarzają w badanym połączeniu znacznie wyższe naprężenia rozciągające, które mogą łatwiej rozdzielać, i w konsekwencji rozróżniać połączenia stykowe nie wykazujące wytrzymałości na rozciąganie.

7. PODSUMOWANIE

W artykule opisano kilka specjalistycznych technik badań materiałów i struktur kompozytowych opartych na wzbudzaniu i analizie drgań mechanicznych o częstotliwościach znacznie niższych niż stosowane w badaniach ultradźwiękowych. Techniki te stosowane są w światowym przemyśle lotniczym jako uzupełnienie podstawowych badań ultradźwiękowych wykonywanych technikami *PE*, *C-scan* lub *Phased Array*.

Ich podstawową zaletą jest duża uniwersalność oraz mobilność systemów badawczych umożliwiającą prowadzenie badań zarówno w warunkach produkcji jak i podczas eksploatacji lotniczych struktur kompozytowych. Ich ograniczenia wiążą się z punktowym charakterem badań, koniecznością ręcznego skanowania badanych powierzchni oraz ograniczonymi możliwościami charakteryzowania wskazań (położenie, rozmiary, rodzaj nieciągłości).

W przypadku małych i średnich firm sektora lotniczego chcących wprowadzić do produkcji zaawansowane materiały kompozytowe techniki te mogą stanowić ważne uzupełnienie technik ultradźwiękowych i stanowić, w tym zakresie, korzystną alternatywę dla znacznie droższych i trudniejszych do wdrożenia technik termograficznych i szerograficznych.

LITERATURA

- [1] S. Mackiewicz, G. Góra, Ultradźwiękowe badania konstrukcji kompozytowych w przemyśle lotniczym, Materiały XI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 8-11 marca 2005.
- [2] W. Manaj, G. Wojas, M. Szwed, A. Zagórski, M. Sychalski, K.J. Kurzydłowski, Badania ultradźwiękowe z zastosowaniem głowic wieloprzetwornikowych – system *Phased Array*, Materiały XI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 13-16 marca 2007.
- [3] K. Dragan., Zastosowania głowic *Phased Array* w diagnostyce konstrukcji lotniczych., Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 08-11 marca 2011.
- [4] S. Mackiewicz, T. Katz, Ultradźwiękowe badania laminatów węglowych techniką *Phased Array*, Materiały XVIII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 13-16 marca 2012.
- [5] W. Oliferuk, Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń., Biuro Gamma, Warszawa, 2007
- [6] P. Synaszko, M. Sałaciński, K. Dragan, Ocena rozmiaru odklejeń w strukturach przekładkowych z rdzeniem komórkowym z zastosowaniem metody Laser Sherography, 41 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Toruń 2012.
- [7] BondMaster. Multimode Adhesive Bond Testing Application Guide, Olympus NDT, 2010, www.olumpus-ims.com.
- [8] BondaScope 3100., NDT Systems, Inc., Huntington Beach, CA www.ndtsystems.com.
- [9] J.H. Heida, D.J. Platenkamp, In-service Inspection Guidelines for Composite Aerospace Structures, 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa, 2012
- [10] E. Greenhalgh, Ch. Meeks, A. Clarke, J. Thatcher, The effect of defects on the performance of post-buckled CFRP stringer-stiffened panels., Composites: Part A 34 (2003) 623-633.
- [11] A. Kapadia, Non-Destructive Testing of Composite Materials., National Composites Network.