

Ultradźwiękowe badania laminatów węglowych techniką Phased Array

Technika Phased Array – cz. 2

SŁAWOMIR MACKIEWICZ, TOMASZ KATZ

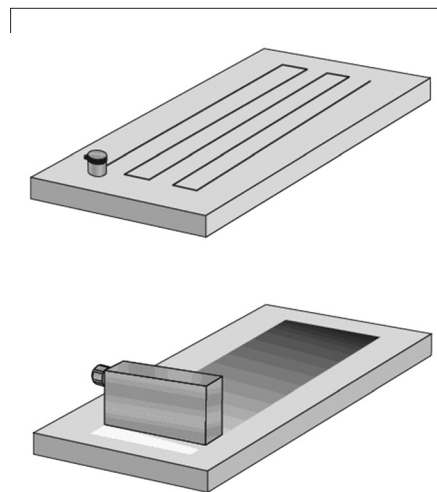
Podstawową techniką stosowaną w badaniach laminatów węglowych metodą Phased Array jest kontaktowa metoda echa z ręcznym przesuwem głowicy. Pod względem mobilności i uniwersalności jest to technika zbliżona do konwencjonalnych badań defektoskopowych ze zobrażeniem typu A, zapewniająca jednak pełny zapis wyników badania oraz znacznie większe możliwości ich analizy.

Podstawową zasadę elektronicznego skanowania laminatu za pomocą głowicy liniowej wprowadzającej fale podłużne pod kątem 0° pokazano na rys. 1. Skanowanie odbywa się wzdłuż kierunku, w którym ułożone są przetworniki szeregu fazowego głowicy i polega na elektronicznym przełączaniu grup przetworników generujących kolejne wiązki ultradźwiękowe.

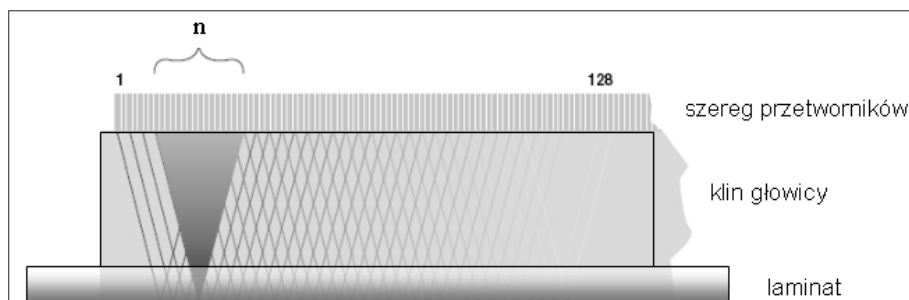
Częstotliwości głowic PA stosowanych do badań laminatów węglowych są zbliżone do częstotliwości głowic konwencjonalnych stosowanych do badań tych materiałów. W większości przypadków optymalnym wyborem jest częstotliwość 5 MHz, jednak w przypadkach, kiedy priorytetem jest wysoka rozdzielczość systemu można próbować zwiększyć częstotliwość stosowanych głowic do 7,5 MHz, a nawet 10 MHz. Należy jednak pamiętać, że zwiększanie częstotliwości nieuchronnie prowadzi do zwiększenia tłumienia fal ultradźwiękowych oraz wzrostu rejestrowanych szumów strukturalnych.

Przy badaniu laminatów węglowych nie stosuje się elektronicznego ogniskowania wiązki ultradźwiękowej, natomiast celowe i korzystne jest wykorzystanie efektu ogniskowania naturalnego w ostatnim maksimum pola bliskiego. W tym celu parametry

głowicy PA (częstotliwość, skok, elewacja) oraz współpracującego z nią klina należy dobrać tak, aby długość pola bliskiego generowanych wiązek fal była nieco większa niż grubość klina (patrz rys. 1). Dzięki temu szerokość wiązki skanującej wprowadzanej do laminatu będzie znacznie mniejsza niż apertura wirtualnego przetwornika, a ostat-



Rys. 2. Zasada skanowania powierzchni laminatu głowicą liniową Phased Array w zestawieniu z konwencjonalnym skanowaniem techniką A-scan



Rys. 1. Zasada elektronicznego skanowania liniowego przy badaniu laminatów techniką PA

nie maksimum ciśnienia wystąpi w objętości badanego laminatu. W celu zapewnienia symetrii wiązki skanującej szerokość i długość przetwornika wirtualnego powinny być zbliżone. Oznacza to, że iloczyn liczby przetworników grupy - n oraz skoku głowicy - s powinien być w przybliżeniu równy elewacji głowicy - e .

$$e \cong n \cdot s \quad (1)$$

Przypominamy tutaj, że skok głowicy - s oznacza odległość między środkami sąsiadujących elementów piezoelektrycznych głowicy, natomiast elewacja - e długość elementu piezoelektrycznego, czyli jego wymiar w kierunku poprzecznym głowicy.

Przykładowo, w przypadku głowicy 5L64-64X7 firmy Olympus, której częstotliwość wynosi $f = 5$ MHz, elewacja $e = 7$ mm, zaś skok $s = 1$ mm optymalna liczba przetworników grupy biorącej udział w formowaniu wiązki wynosi $n = 7$. Przy takich parametrach głowicy klin wykonany z rexolitu powinien mieć grubość ok. 20 mm, tj. nieco mniejszą niż długość pola bliskiego generowanych wiązek.

Sposób skanowania powierzchni laminatu przy wykorzystaniu głowicy liniowej PA pokazuje rys. 2. Skanowanie w kierunku szerokości próbki (wzdłuż głowicy) realizowane jest elektronicznie i obejmuje odcinek równy długości aktywnej części głowicy. Dla 64 elementowej głowicy typu 5L64-64X7 wynosi on 64 mm.

Skanowanie w kierunku poprzecznym do długości głowicy odbywa się poprzez ręczny przesuw głowicy, który może być jednak rejestrowany automatycznie przy wykorzystaniu enkodera zainstalowanego na obudowie głowicy. W czasie przesuwu głowicy system rejestruje dane ultradźwiękowe z całej szerokości pasa skanowania z rozdzielczością rzędu 1 mm. Bardziej zaawansowane systemy, jak np. Omniscan MX, pozwalają zarejestrować pełne przebiegi czasowe sygnałów typu A-scan w każdym punkcie skanowanego obszaru. Jest to niezwykle użyteczna właściwość systemu badawczego, ponieważ umożliwia wszechstronną analizę danych pomiarowych po

zakończeniu skanowania. W szczególności możliwe są korekty ustawień bramek pomiarowych w celu poprawy lub zmiany typu uzyskanych obrazowań typu C. Najprostsze systemy PA rejestrują jedynie maksymalne amplitudy oraz opóźnienia ech występujących w bramkach pomiarowych, co ogranicza możliwości późniejszej analizy danych oraz wymaga bardziej precyzyjnego ustawienia parametrów systemu badawczego przed badaniem (np. położenia i poziomów bramek pomiarowych).

Na podstawie zarejestrowanych danych oprogramowanie systemu PA buduje obrazowania ultradźwiękowe typu B, C i D badanych elementów, które są podstawą do oceny wyników badania.

Na kolejnych rysunkach pokazano przykładowe obrazowania typu B i C płaskiej płytki laminatu węglowego o grubości 4,5 mm z otworami płaskodennymi o średnicach 3, 5 i 10 mm o różnej głębokości modelującymi potencjalne wady. Przedstawione obrazowania uzyskano systemem Omniscan MX współpracującym z głowicą typu 5L64-64X7 z klinem 0° wykonanym z rexlitu. Jako środek sprzęgający stosowano demineralizowaną wodę.

Na rys. 3 pokazano obrazowanie typu B (przekrój pionowy) próbki laminatu węglowego, pokazujące trzy otwory płaskodenne znajdujące się na jednakowej głębokości. Na obrazowaniu widać echo od powierzchni laminatu, zwane też echem interfejsu (górny zespół linii poziomych), echo dna (dolny zespół linii poziomych) oraz wskazania 3 otworów płaskodennych. Widać, że najmniejszy otwór płaskodenny o średnicy 3 mm został wykryty bez problemu przy znacznym stosunku sygnału do szumu. Należy zwrócić uwagę na występujące echa wielokrotne den otworów, których nie należy mylić ze wskazaniami wad.

Zobrazowanie typu B jest wyświetlane na bieżąco na ekranie aparatu i nie wymaga stosowania enkodera położenia. Może być ono wykorzystywane do szybkich ręcznych badań konstrukcji kompozytowych z oceną dokonywaną na bieżąco podobnie jak ma

to miejsce w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych.

Uzyskanie obrazowania typu C (widok z góry) wymaga zastosowania enkodera położenia i wykonania kontrolowanego przesuwu głowicy po obiekcie z automatyczną rejestracją wyników. Należy zauważyć, że na obrazowaniu typu C można przedstawić w formie mapy różne parametry rejestrowanych sygnałów ultradźwiękowych. Najczęściej jest to maksymalna amplituda sygnału ultradźwiękowego w bramce pomiarowej ustawionej między echem interfejsu a echem dna. Przykład takiego C-scanu testowej próbki laminatu węglowego pokazano na rys. 4. Amplituda ech uzyskanych od poszczególnych reflektorów jest zobrazowana przez ich kolory. Położenia i rozmiary poprzeczne poszczególnych wskazań mogą być określone za pomocą pomiarów kursorowych. Dokładność określenia średnic wykrytych otworów płaskodennych w badanej próbce wynosiła ok. 1 mm.

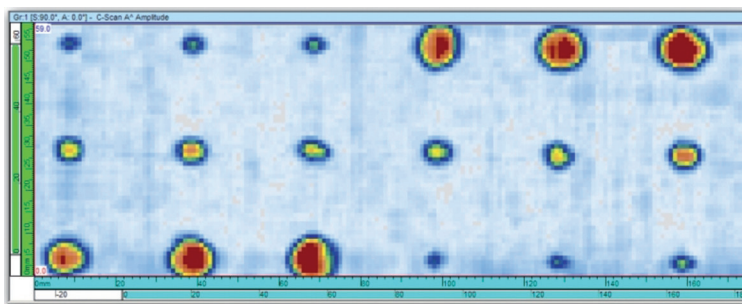
Przedstawiony na rys. 4 rodzaj obrazowania typu C pozwala na wykrycie i ocenę rozmiarów poprzecznych typowych wad laminatów węglowych takich jak rozwarstwienia i wtrącenia obcych materiałów.

Zobrazowanie takie nie daje jednak informacji o ich głębokości pod powierzchnią laminatu. Drugim istotnym brakiem tego sposobu obrazowania wyników badania jest niemożność uwidocznienia na nim wad typu porowatości. Wady takie nie dają wyraźnych ech ultradźwiękowych, a jedynym symptomem ich obecności w kompozycie jest zanik echa dna powodowany przez zwiększone tłumienie fal ultradźwiękowych w porowatym materiale.

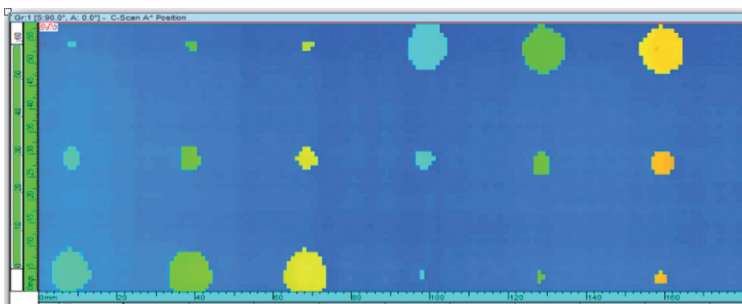
W celu uzyskania dodatkowych informacji o badanym materiale można (na podstawie tych samych danych zarejestrowanych w pamięci aparatu) wygenerować dwa dodatkowe obrazowania typu C: tzw. C-scan czasowy z bramką pomiarową ustawioną jak poprzednio oraz C-scan amplitudowy z bramką pomiarową ustawioną na echo dna.

Pierwsze z tych obrazowań pokazano na rys. 5.

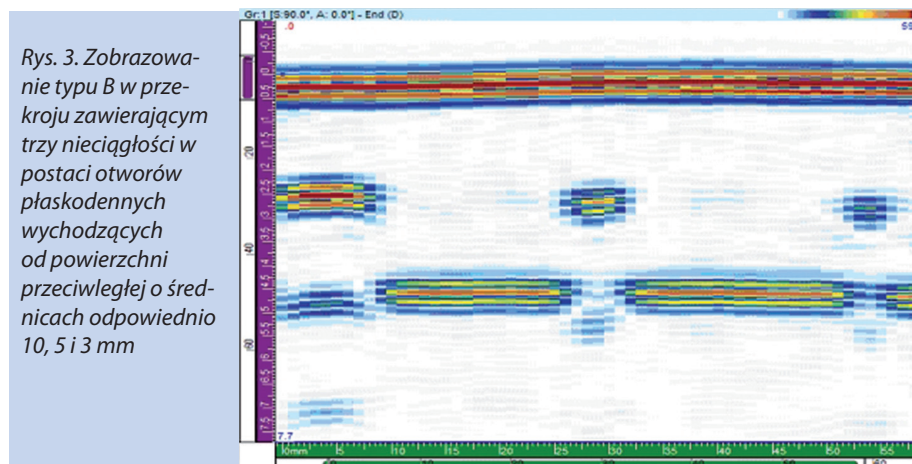
W tym przypadku kolory wskazań uzyskanych od poszczególnych reflektorów obrazują nie amplitudę, ale opóźnienie czasowe ich ech ultradźwiękowych. Ponieważ opóźnienia ech są bezpośrednio związane z odległością reflektorów od głowicy, obrazowanie tego typu pokazuje głębokości re-



Rys. 4. C-scan amplitudowy próbki laminatu węglowego z otworami płaskodennymi



Rys. 5. C-scan czasowy (grubościowy) próbki laminatu węglowego z otworami płaskodennymi.

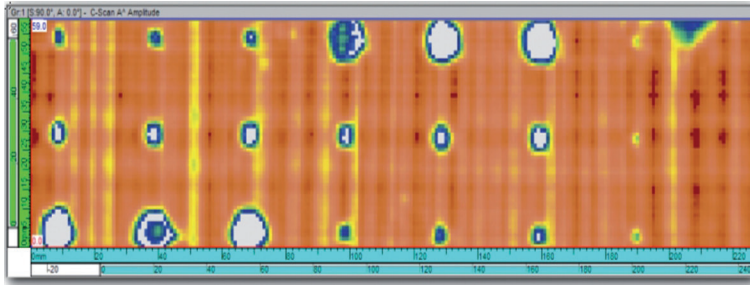


Rys. 3. Zobrazowanie typu B w przekroju zawierającym trzy nieciągłości w postaci otworów płaskodennych wychodzących od powierzchni przeciwległej o średnicach odpowiednio 10, 5 i 3 mm

flektorów (wad) występujących w badanym materiale. W szczególności na pokazanym C-scanie widać, że echa od różnych otworów o tej samej średnicy mają różne kolory co oznacza, że ich dna znajdują się na różnej głębokości. Informacji tej nie można było odczytać z podstawowego obrazowania amplitudowego pokazanego na rys. 4.

Przykładowy C-scan amplitudowy echa dna pokazano na rys. 6. W tym przypadku kolor obrazowania odpowiada amplitudzie echa dna badanej próbki laminatu węglowego.

Wskazania o kolorze ciemnym i białym odpowiadają w tym przypadku miejscom,



Rys. 6. C-scan amplitudowy echa dna próbki laminatu węglowego z otworami płaskodennymi.

gdzie zarejestrowano silne osłabienia bądź całkowite zaniki echa dna. Oprócz miejsc, w których znajdowały się otwory płaskodenne, w prawym górnym rogu obrazu zarejestrowano obszar naturalnej porowatości laminatu całkowicie niewidoczny na poprzednio prezentowanych zobrazowaniach. Stanowi to dobry przykład przydatności przeprowadzenia pełnej, kompleksowej analizy zarejestrowanych danych ultradźwiękowych w technice Phased Array.

Przygotowanie systemu Phased Array do badań określonego typu laminatu wymaga wykonania szeregu procedur kalibracyjnych i nastaw systemu badawczego. Jest to etap, który w dużej mierze zależy od specyfiki konkretnego systemu badawczego, ale w ogólnym zarysie procedury te sprowadzają się do wyznaczenia lub ustawienia następujących parametrów:

- prędkości fali w badanym materiale;
- opóźnienia fali w klinie głowicy;
- czułości badania;
- odległościowej korekcji wzmocnienia – TCG;
- kalibracji enkodera położenia.

Są to czynności analogiczne do wykonywanych w standardowych badaniach ultradźwiękowych, warto jednak zwrócić uwagę na dużo większe znaczenie odległościowej korekcji wzmocnienia TCG w badaniach Phased Array laminatów węglowych, niż ma to miejsce w typowych badaniach materiałów metalowych. Ze względu na stosunkowo duże tłumienie fal ultradźwiękowych w materiałach kompozytowych, amplitudy ech ultradźwiękowych od takich samych wad silnie zależą od ich głębokości pod powierzchnią materiału, czyli od drogi, jaką fala przebywa w kompozycie tam i z powrotem. Bez stosowania korekcji TCG wskazania od takich samych wad zlokalizowanych na różnych głębokościach miałyby na C-skanie amplitudowym różne kolory. Utrudniałoby to ich interpretację, np. ze względu na fakt, że nie byłoby jasne czy obniżona amplituda wskazania wynika z jego większej głębokości pod powierzchnią czy też z obniżonego współczynnika odbicia od powierzchni wady wynikającego z jej charakteru (tzw. wady półprzepuszczalne). Jedynie dzięki zastosowaniu prawidłowej korekcji TCG wskazania od wszystkich otworów płaskodennych o jednakowej średnicy mają na zobrazowaniu pokazanym na rys. 4 jednakowe kolory.

Druga istotna różnica w stosunku do badań typowych materiałów metalowych dotyczy wzorców stosowanych do nastawiania czułości badania oraz wyznaczania korekcji TCG. Ze względu na duże zróżnicowanie tłumienia fal ultradźwiękowych w różnych typach laminatów węglowych nie stosuje się tutaj standardowych wzorców kalibracyjnych takich jak wzorec nr 1 czy nr 2. W badaniach odbiorczych odpowiedzialnych konstrukcji lotniczych, praktycznie dla każdej części kompozytowej, należy przygotować reprezentatywny wzorec odniesienia wykonany z tych samych materiałów i według tej samej technologii, co badana część. Reflektorami odniesienia mogą być otwory płaskodenne lub zalaminowane wkładki teflonowe o określonej średnicy. Do prawidłowego wykonania wzorców odniesienia przykłada się tak bardzo dużą wagę, że w praktyce produkcyjnej firm lotniczych wymaga się ich indywidualnej weryfikacji i zatwierdzenia przez specjalistów z certyfikatem stopnia 3 w badaniach ultradźwiękowych.

Innym elementem badania, do którego w badaniach laminatów węglowych przykłada się dużą wagę jest ośrodek sprzęgający. W przypadku badań odpowiedzialnych

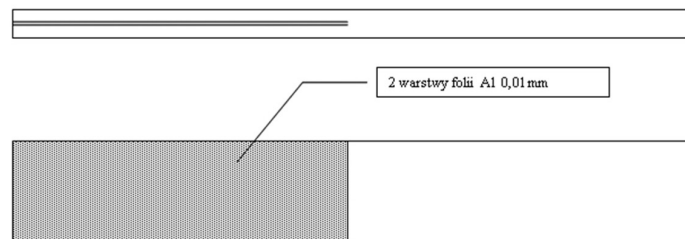
części lotniczych wymagane jest sprawdzenie ośrodka sprzęgającego pod kątem jego chemicznej nieszkodliwości dla badanego materiału. Dopuszczalne jest stosowanie wyłącznie zatwierdzonych środków sprzęgających lub demineralizowanej wody.

Przykłady zastosowań techniki Phased Array

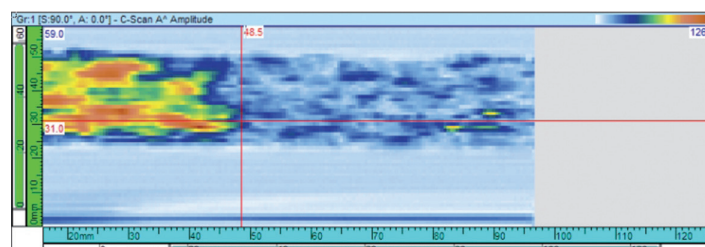
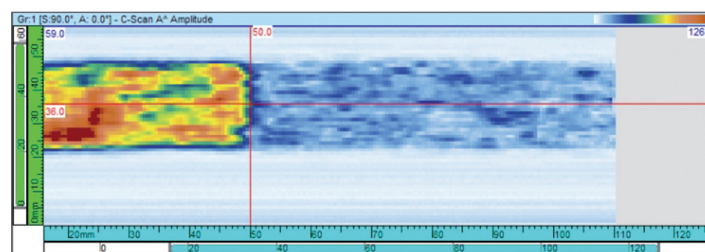
Poniżej pokazano dwa przykłady zastosowań techniki Phased Array do badania próbek laminatów węglowych poddawanych testom wytrzymałościowym i udarowym. Badania te wykonano w laboratorium badań kompozytów Instytutu Lotnictwa w ramach projektu badawczego pt. „Opracowanie technologii badań odporności na uszkodzenia lotniczych i kosmicznych kompozytowych struktur nośnych – TEBUK”.

Celem badań na rozrywanie było wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych laminatu niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń dopuszczalnych rozmiarów wad konstrukcji kompozytowej w zależności od wielkości i charakteru występujących obciążeń. Próbkę wykonano technologią tradycyjną przez ręczne nasycanie żywicą epoksydową jednokierunkowych tkanin węglowych. We wszystkich próbkach kierunek ułożenia włókien był równoległy do długości próbek. Podstawowe wymiary próbek były następujące: długość 125 mm, szerokość 25 mm, grubość ok. 2,5 mm.

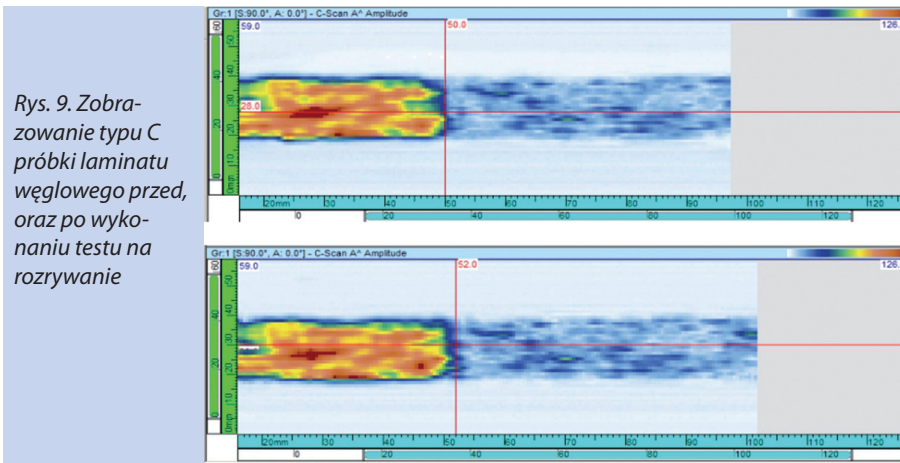
W celu zamodelowania początkowych rozwarstwień w połowie grubości próbek zalaminowano dwie warstwy folii aluminiowej.



Rys. 7. Schemat próbki laminatu węglowego z rozwarstwieniem zamodelowanym za pomocą podwójnej warstwy folii aluminiowej.



Rys. 8. Zobrazowanie typu C-scan próbek laminatu węglowego przygotowanych do badań wytrzymałościowych: a) próbka prawidłowa b) próbka z zaburzoną przebiegiem frontu rozwarstwienia.



wej o grubości ok. 0,01 mm. Podwójna warstwa folii pozwalała na uzyskanie pełnego rozdzielania materiału niezależnie od możliwości połączenia adhezyjnego zewnętrznych powierzchni folii z przylegającym z laminatem.

Przed przeprowadzeniem badań wytrzymałościowych na rozrywanie (I typ obciążenia) konieczne było sprawdzenie prostoliniowości frontu zamodelowanego rozwarstwienia oraz tego czy przygotowana próbka nie zawiera żadnych innych wad. Odchylenia frontu rozwarstwienia od prostoliniowości mogą wynikać zarówno z niedokładności ułożenia warstw folii w laminacie, jak też z możliwości penetracji żywicy epoksydowej pomiędzy warstwy folii i utworzenia między nimi połączenia adhezyjnego.

Badania wykonano techniką Phased Array przy wykorzystaniu systemu Omniscan MX 128:32 z głowicą liniową typu 5L64-64X7-NW1-P-2.5-OM o częstotliwości 5 MHz współpracującą z klinem SNW1-0L-I-HC-C wykonanym z materiału rexolite. Na rys. 8 pokazano dwa przykładowe C-skany amplitudowe wykonanych próbek

Widać dużą różnicę w jakości wykonania obu przebadanych próbek. Próbka pokazana na rys. 8b wykazuje zaburzony przebieg frontu rozwarstwienia spowodowany wnikieniem żywicy do przestrzeni między foliami i utworzeniem połączenia adhezyjnego. Dodatkowo, w prawym dolnym rogu, próbka zawiera naturalną wadę, która mogłaby wpłynąć na wynik próby rozrywania. Zobrazowania obu próbek wykazują duży poziom szumów, co bezpośrednio wynika z technologii ich wykonania metodą „na mokro”.

Na rys. 9 pokazano zobrazenia amplitudowe jednej z próbek przed oraz po wykonaniu testu na rozrywanie. Porównując oba C-skany, można zaobserwować niewielki przyrost obszaru rozwarstwienia wskutek zastosowania obciążających szczelinę początkową. Przyrost ten jest w przybliżeniu jednakowy na całej szerokości próbki i wynosi ok. 2 mm. Uzyskane zobrazenia potwierdzają prawidłowy

przebieg testu wytrzymałościowego, gdyż przebieg frontu rozwarstwienia jest w przybliżeniu prostoliniowy i prostopadły do długości próbki zarówno przed jak i po wykonaniu próby wytrzymałościowej.

Należy podkreślić, że ocena wyników prób na rozrywanie oparta jedynie na pomiarach przyrostu długości szczeliny na bocznych krawędziach próbki, jest obarczona znacznym ryzykiem błędu. Wynika to z możliwości nierównomiernego przyrostu rozwarstwienia na szerokości próbki, co zilustrowano na rys. 10. Badania ultradźwiękowe techniką Phased Array są w tym przypadku skutecznym narzędziem monitorowania przebiegu badań wytrzymałościowych laminatów.

Drugi przykład zastosowania techniki Phased Array dotyczy badań próbek laminatów węglowych poddawanych testom udarowym na maszynie typu CEAST. Próbki wykonane były z jednokierunkowych taśm typu Sigratex KDU 1007 technologią tradycyjną z zastosowaniem techniki worka próżniowego. Wszystkie próbki wykonano z takiej samej ilości warstw tkaniny węglowej jednak przy różnych kierunkach ułożenia włókien w poszczególnych warstwach. Głównym celem badań było przetestowanie techniki prowadzenia prób udarowych laminatów węglowych oraz metodyki pomiarów powstających uszkodzeń metodą ultradźwiękową.

Próbki miały kształt kwadratowych płytek o długości boku 100 mm i grubości ok. 5,6 mm. W próbce nr 1 układ warstw był

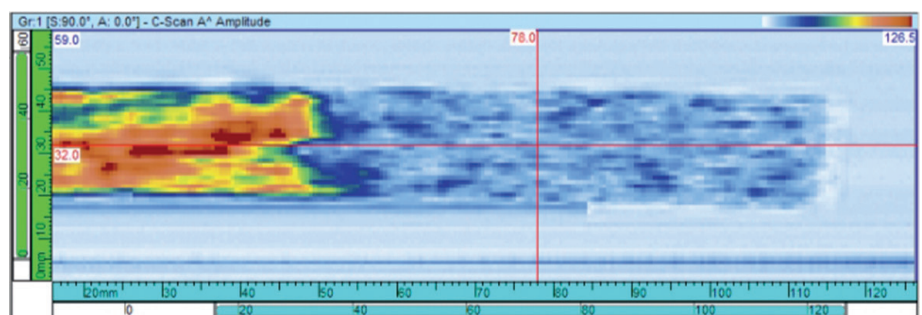
typu $[0_{10}/90_{10}]$, w próbce nr 2 typu $[0/90]_{10}$ zaś w próbce nr 3 typu $[0_5/90_5/0_5/90_5]$. Oczekiwany efekt różnicowania rozkładów kierunkowości warstw było uzyskanie różnych rozkładów uszkodzeń laminatów powstających w wyniku jednakowych obciążeń udarowych. Wszystkie testy udarowe przeprowadzono w standaryzowanych warunkach, przy jednakowej energii uderzenia wynoszącej 8 J (uderzenie niskoenergetyczne).

Badania wykonano tym samym aparatem ultradźwiękowym oraz tą samą głowicą jak poprzednio, z tym jednak, że klin wykonany z rexolitu, zastąpiono klinem wykonanym z materiału Aqualene. Jest to specjalny materiał o impedancji akustycznej równej impedancji wody, który umożliwia zredukowanie artefaktów związanych z nierównomierną grubością warstwy sprzęgającej pod głowicą. Problem ten jest charakterystyczny dla badań próbek kompozytowych po testach udarowych i wynika z lekkiego wklęsnięcia powierzchni próbki w miejscu uderzenia bijaka.

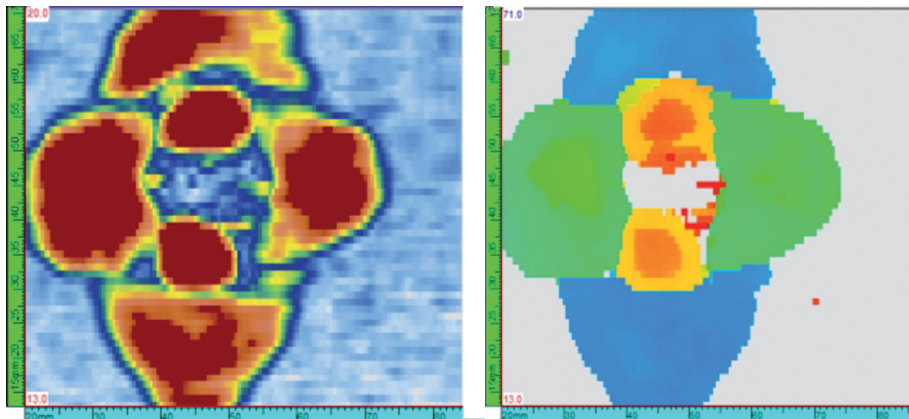
Jako przykład uzyskanych wyników pokazano C-skany amplitudowe oraz czasowe próbki nr 3 (układ warstw $[0_5/90_5/0_5/90_5]$) uzyskane zarówno od strony uderzenia bijaka (rys. 11), jak i od strony przeciwległej (rys. 12). Widoczny jest rozległy obszar uszkodzeń wokół punktu uderzenia w środkowym fragmencie próbki. Analizując C-skany czasowe pokazany na rys. 11b, można zauważyć, że główne rozwarstwienia powstały na 3 różnych głębokościach dokładnie odpowiadających granicom układów warstw o różnej orientacji włókien. Widać też, że powierzchnia rozwarstwień wzrasta z ich głębokością. Najmniejsze „pomarańczowe” rozwarstwienie znajduje się na 1/4 grubości próbki, średnie „zielone” na 1/2 grubości próbki, a największe „niebieskie” na 3/4 grubości próbki.

W samym epicentrum uderzenia brak jest wyraźnych ech od rozwarstwień, ale całkowity zanik echa dna w tym punkcie (biały kolor na zobrażowaniu czasowym) wskazuje, że struktura laminatu jest tu silnie uszkodzona.

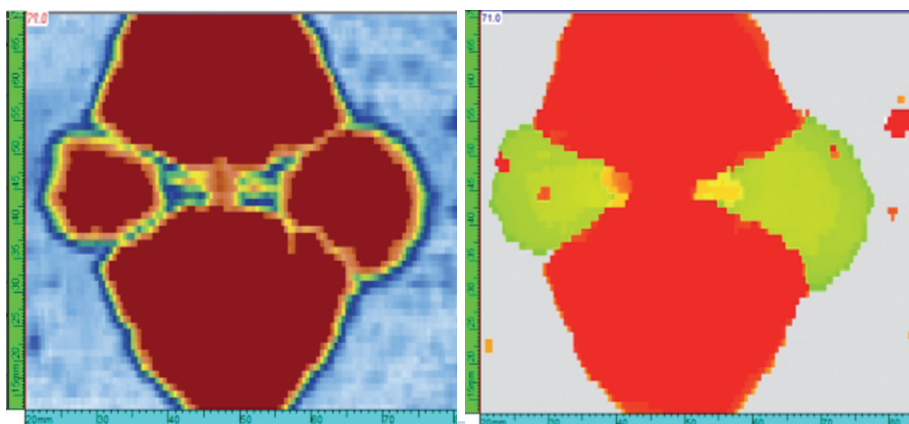
Uzupełniające C-skany wykonane z przeciwległej powierzchni próbki pokaza-



Rys. 10. Zobrazenie typu C próbki laminatu węglowego po wykonaniu testu na rozrywanie. Widoczny jest nierównomierny przesuw frontu rozwarstwienia



Rys. 11. C-skan amplitudowy a) oraz czasowy b) próbki nr 3 uzyskany przy badaniu próbki laminatu węglowego od strony uderzenia



Rys. 12. C-skan amplitudowy a) oraz czasowy b) próbki nr 3 uzyskany przy badaniu od strony przeciwległej do uderzenia

ne są na rys. 12. Na obrazowaniach tych najlepiej uwidocznione jest największe rozwarstwienie znajdujące się teraz najbliższej głowicy (kolor czerwony na rys. 12b). Pozostałe rozwarstwienia znajdują się w cieniu akustycznym tego rozwarstwienia i są tylko częściowo widoczne.

Z przedstawionego przykładu widać, że technika Phased Array pozwala na łatwe wykrywanie i stosunkowo dokładne charakteryzowanie uszkodzeń laminatów węglowych powstających w wyniku obciążeń udarowych.

Podsumowanie

W artykule omówiono podstawowe aspekty badań laminatów węglowych ultradźwiękową techniką Phased Array. Wskazano na ważne konsekwencje dla badań ultradźwiękowych wynikające z silnej anizotropii oraz warstwowej struktury tych materiałów. Omówiono przyczyny oraz pokazano typowe rodzaje wad laminatów węglowych powstających w procesie produkcji oraz podczas eksploatacji lotniczych struktur kompozytowych. Wskazano na problemy mogące utrudnić lub uniemożliwić wykonywanie badań ultradźwiękowych niektórych rodzajów laminatów węglowych.

Omówiono podstawowe zasady stosowania techniki Phased Array do badań

laminatów węglowych, określając zasady doboru najważniejszych parametrów badania takich jak częstotliwość fali, apertura wirtualna oraz sposób kształtowania wiązki ultradźwiękowej. Wskazano na konieczność stosowania reprezentatywnych wzorców odniesienia do nastawiania czułości badania oraz wyznaczania korekcji TCG. Wzorce powinny być wykonane z tych samych materiałów i według tej samej technologii, co badane części produkcyjne.

W dalszej kolejności omówiono i zilustrowano na prostych przykładach podstawowe typy obrazowań ultradźwiękowych stosowanych do analizy wyników badań ultradźwiękowych techniką Phased Array.

Pokazano przykłady zastosowań techniki Phased Array do badań próbek laminatów węglowych poddawanych testom wytrzymałościowym i udarowym. Uzyskane wyniki wskazują na duży potencjał systemów Phased Array do prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w tym zakresie. Potencjał ten wynika w dużej mierze z wysokiej dokładności i różnorodności graficznych obrazowań wyników badań możliwych do uzyskania za pomocą oprogramowania tych systemów.

Biorąc pod uwagę duże możliwości badawcze, jak też wydajność, mobilność oraz uniwersalność techniki Phased Array należy stwierdzić, że jest ona bardzo atrakcyjną

alternatywą dla konwencjonalnych badań ultradźwiękowych laminatów węglowych techniką A-scan. Może być ona efektywnie zastosowana zarówno w warunkach produkcyjnych, eksploatacyjnych, jak i laboratoryjnych. Oprócz podstawowego wariantu stosowania w układzie półautomatycznym (ręczny przesuw głowicy połączony z automatyczną rejestracją wyników) może być ona wykorzystana również w systemach całkowicie zautomatyzowanych, gdzie pozwala uzyskać znaczny wzrost szybkości i wydajności badań w porównaniu do analogicznych systemów konwencjonalnych.

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. Spychalski, K.J. Kurzydłowski: Badania ultradźwiękowe z zastosowaniem głowic wieloprzetwornikowych – system Phased Array, Materiały XI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 13-16 marca 2007.
- [3] W. Manaj, W. Spychalski, K.J. Kurzydłowski: Wieloprzetwornikowe głowice ultradźwiękowe, Materiały XV Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 10-13 marca 2009.
- [4] M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Ostrowski, M.J. Wójcik: Zaawansowane badania diagnostyczne wirników turbin energetycznych techniką Phased Array na przykładzie badania kształtowych elementów mocowania łopatek, Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 08-11 marca 2011.
- [5] M. Lewandowski: Układy głowic wieloprzetwornikowych – Podstawy fizyczne., Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 08-11 marca 2011.
- [6] K. Dragan: Zastosowania głowic Phased Array w diagnostyce konstrukcji lotniczych., Materiały XVII Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”, Zakopane 08-11 marca 2011.
- [7] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications., R/D Tech Guideline., 2004, 2005, 2007 by Olympus NDT.
- [8] D.L. Van Otterloo, V. Dayal: How isotropic are quasi-isotropic laminates., Composites: Part A 34 (2003).