XXV Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW Zakopane, 20-22 marca 2019

WYSOKOROZDZIELCZE OBRAZOWANIE KONSTRUKCJI Z ZASTOSOWANIEM LASEROWYCH ULTRADŹWIĘKÓW

Łukasz AMBROZIŃSKI, Aleksandra ZIAJA-SUJDAK, Patrycja PYZIK, Jakub MRÓWKA, Krzysztof GRABOWSKI AGH w Krakowie ambrozin@agh.edu.pl

1. WSTĘP

Jednym z podstawowych problemów w przypadku stosowania badań ultradźwiękowych jest konieczność stosowania ośrodka sprzęgającego, najczęściej wody lub innego płynu, pozwalającego na transfer energii pomiędzy przetwornikiem a badanym obiektem. W związku z tym od lat prowadzone są prace nad rozwojem bezkontaktowych technik badań ultradźwiękowych.

Jedną z alternatyw jest wykorzystanie powietrza, będącego naturalnym otoczeniem badanych obiektów, jako ośrodka sprzęgającego [1]. Okazuje się jednak, że duża różnica impedancji akustycznej pomiędzy powietrzem, a badanymi materiałami oraz elementami wykorzystywanymi do budowy przetworników uniemożliwia wydajne generowanie oraz odbiór fal w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych [2]. Z tych powodów praktyczne zastosowania tej techniki ogranicza się do materiałów o niskiej impedancji (np. kompozytów wzmacnianych włóknem węglowym). Znaczna różnica amplitudy sygnału nadawanego oraz odbieranego sprawia, że badania te mogą być prowadzone w trybie transmisji lub jednostronnie z wykorzystaniem fal Lamba [3]. Ograniczenia te sprawiają także, że w aplikacjach wykorzystania przetworników ze sprzężeniem powietrznym konieczne jest stosowanie odpowiednich wzmacniaczy, przetworników i urządzeń pomiarowych. Zazwyczaj stosuje się przetworniki rezonansowe o wąskim paśmie.

Kolejnym potencjalnym rozwiązaniem jest wykorzystanie przetworników typu EMAT (ang. *Electro-Magnetic Acoustic Transducers*) mogących bezkontaktowo generować i odbierać selektywne postacie fal podłużnych oraz poprzecznych [4]. Wadą tego podejścia jest możliwość badania jedynie materiałów przewodzących prąd. Choć technika nie wymaga ośrodka sprzęgającego, to w praktyce przetwornik znajduje się w odległości ok. 1 mm od badanego obiektu. Ponadto, rejestrowane sygnały mają znacznie mniejszą amplitudę niż w przypadku wykorzystania głowic piezoelektrycznych, przez co powstają problemy wynikające z niskiego stosunku sygnału do szumu.

Bardzo atrakcyjną metodą pozwalającą na prowadzenie ultradźwiękowych badań w sposób bezkontaktowy jest wykorzystanie technik laserowych zarówno do wzbudzania, jak i odbioru ultradźwięków. Laserowa technika ultradźwiękowa (LUS) jest intensywnie rozwijana od dość długiego czasu, a wdrożone systemy wykonują badania na skalę przemysłową [5].

Jedną z najważniejszych zalet techniki LUS jest to, że przy wykorzystaniu wzbudzenia laserowego można uzyskać szerokopasmowe sygnały dające rozdzielczość znacznie przewyższającą rozdzielczość możliwą do uzyskania stosując konwencjonalne, kontaktowe przetworniki przy tej samej częstotliwości charakterystycznej [6]. Do wad tej metody należy zaliczyć wysoki koszt lasera wymuszającego, niską częstotliwość powtarzania impulsów, problemy z utrzymaniem stabilności oraz niską czułość detektorów optycznych.

Większość wyżej wymienionych ograniczeń, została przezwyciężona dzięki opracowaniu wyjątkowo czułego interferometru typu Sagnac do detekcji fal ultradźwiękowych [7], [8], którego czułość jest porównywalna z przetwornikami kontaktowymi. Rozwój metod detekcji pozwolił na wykorzystanie źródeł o niskich energiach pobudzenia mogących działać w reżimach bezpiecznych dla badanych powierzchni. System oparty o ten interferometr wykorzystany był do badania materiałów kompozytowych pod kątem detekcji delaminacji, porów, obrazowania pojedynczych warstw czy uszkodzeń termicznych [7]–[12].

W niniejszej pracy przedstawiono przykłady opisanego powyżej systemu opartego o zbalansowany interferometr. Przedstawione wyniki uzyskane dla materiałów kompozytowych oraz konstrukcji metalicznych wykorzystane zostaną do przedyskutowania różnic w laserowym badaniu ultradźwiękowym struktur jednorodnych i wielowarstwowych.

2. LASEROWE WZBUDZANIE ULTRADŹWIĘKÓW

Badanie materiałów techniką LUS posiada wiele wspólnych cech z klasycznymi badaniami ultradźwiękowymi prowadzonymi za pomocą głowic kontaktowych. Należy jednak dodatkowo wziąć pod uwagę szereg mechanizmów występujących podczas interakcji wiązki światła laserowego z badaną powierzchnią. Zagadnienie to należy rozważyć uwzględniając badany materiał oraz to, w jaki sposób oddziałuje on z światłem laserowym o określonej długości. Odpowiedni dobór parametrów wymuszenia przekłada się na typ mechanizmu generacji fal ultradźwiękowych.

Jednym z najbardziej wydajnych mechanizmów generowania ultradźwięków za pomocą lasera jest wykorzystanie ablacji powierzchni badanego materiału. Gwałtowne podgrzanie materiału powoduje wyrzut plazmy w kierunku prostopadłym od próbki, co generuje naprężenia normalne będące źródłem fali podłużnej biegnącej w głąb badanego materiału. Choć amplitudy sygnałów uzyskiwanych w ten sposób są znaczne, to uszkodzenia powstające na powierzchni poddają pod dyskusję klasyfikację tej metody jako nieniszcząca. Z tego powodu, mechanizm ten nie będzie rozważany w dalszej części tej pracy.

Po to, aby metoda LUS mogła być kwalifikowana jako nieniszcząca, należy wykorzystywać mechanizm termosprężysty. W podejściu tym fale sprężyste powstają na skutek naprężeń wywołanych nagrzaniem fragmentu powierzchni. Naprężenia te są na tyle małe, że nie powodują żadnych uszkodzeń. Metoda ta jest odpowiednia do wydajnego wzbudzania fal powierzchniowych oraz poprzecznych biegnących pod kątem do powierzchni. Jednak, jak przedstawiono w poniższych rozdziałach w przypadku materiałów o niejednorodnych właściwościach optycznych możliwe jest wydajne generowanie fal podłużnych, gdy do absorbcji światła dochodzi na pewnej głębokości pod powierzchnią.

2.1. Wielo-fizyczny model termosprężystego wzbudzania i propagacji fal ultradźwiękowych

W przypadku materiału izotropowego, mechanizm wzbudzania w obszarze termosprężystym jest opisany w sposób uproszczony za pomocą następującego układu sprzężonych równań różniczkowych [13]:

$$k\nabla^2 T = \rho c_V \dot{T} - \boldsymbol{q} \tag{1}$$

$$\mu \nabla^2 \boldsymbol{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \boldsymbol{u}) = \rho \ddot{\boldsymbol{u}} + \beta \nabla T$$
⁽²⁾

gdzie:

- wektor przemieszczeń u
- gęstość mocy źródła ciepła q
- Т – temperatura
- k – przewodność cieplna
- ρ gęstość materiału
- c_V ciepło właściwe przy stałej objętości
- β stała termoakustyczna $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha_T$
- α_T liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej

 λ, μ – stałe Lame'go

Równanie (1) opisuje przewodność cieplną i rozszerzalność cieplną w wyniku zmiany temperatury T. Natomiast równanie (2) jest opisem propagującej fali sprężystej wzbudzonej przez rozszerzalność cieplną β∇T. Przedstawiony model matematyczny zaniedbuje pochodną temperatury drugiego rzędu oraz ciepło generowane przez odkształcenie mechaniczne. Sprzężone równania (1-2) można rozwiązać za pomocą procedur numerycznych, uwzględniając odpowiednie warunki brzegowe.

2.1.1 Warunki brzegowe

Rozważanie mechanizmu laserowej generacji na powierzchni swobodnej dla trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej (x_1, x_2, x_3) wymaga uzupełnienia powyższego układu równań o warunki brzegowe. Dla krawędzi zdefiniowanej jako $x_3 = 0$ opisane są następująco:

$$\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0 \qquad \text{dla } x_3 = 0 \qquad (3)$$

$$\mu(u_{3,1} + u_{1,3}) = 0 \qquad \text{dla } x_3 = 0 \qquad (4)$$

$$u_{3,3}) + 2\mu u_{3,3} - \beta \Delta T = 0 \qquad \text{dla } x_2 = 0 \qquad (5)$$

$$\sigma_{31} = \mu (u_{3,1} + u_{1,3}) = 0 \qquad \text{dla } x_3 = 0 \qquad (4)$$

$$\sigma_{33} = \lambda (u_{1,1} + u_{3,3}) + 2\mu u_{3,3} - \beta \Delta T = 0 \qquad \text{dla } x_3 = 0 \tag{5}$$

Gdzie indeks po przecinku oznacza pochodną cząstkową ($np. u_{3,1} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1}$). Warunek termiczny opisany w Rów. 3 zakłada brak wymiany ciepła pomiędzy obiektem a otoczeniem wytworzone przez laser ciepło kumulowane jest bezpośrednio pod powierzchnią. Natomiast zerowe warunki naprężeń normalnych i ścinających na powierzchni, wprowadzone są przez równania (4-5).

W przypadku występowania przeźroczystej warstwy na powierzchni materiału, mechanizm termosprężysty zachodzi na granicy dwóch ośrodków. Z powodu ograniczeń ekspansji termicznej przez dodatkową warstwę, w regionie wzbudzenia występują niezerowe naprężenia σ_{33} , oraz σ_{31} . W rezultacie dochodzi do efektywnej generacji fali podłużnej, w głąb badanego materiału.

2.1.2 Model numeryczny

Model przedstawiony przez równanie (1) jest klasyczną formą równania przewodności cieplnej, w której ciepło wytworzone przez mechaniczne odkształcenie i temperaturę drugiej pochodnej są pomijane. Dwuwymiarowy model numeryczny stworzono, przy pomocy klasycznej metody różnic skończonych. W celu rozwiązania równania (2) zastosowano metodę Local Interaction Simmulation Approach (LISA) [14]. Stosując notację macierzową równanie (2) zapisujemy jako:

$$AW_{,11} + BW_{,22} + CW_{,12} = \rho \ddot{W} + \beta \nabla T$$

$$= \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} \lambda + \mu & 0 \\ 0 & \lambda + \mu \end{bmatrix}; W = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$
(6)

gdzie *u*, *v* to przemieszczenia w kierunku *x* i *y* oraz $W_{,12} = \frac{\delta^2}{\delta x \delta y}$

Uwzględniając zmiany temperatury dane równaniem (1), przemieszczenia dla przestrzeni punktów (i, j), można obliczyć jako:

$$W_{t+1} = 2W + \frac{(\Delta t)^2}{\rho \Delta x^2} [A(W_{i+1} + W_{i-1} - 2W) + B(W_{j+1} + W_{j-1} - 2W) + C(W_{i+1,j+1} + W_{i-1,j-1} - W_{i-1,j+1} - W_{i+1,j-1}) - \beta \begin{bmatrix} T_{i+1,j} - T_{i,j'} \\ T_{i,j+1} - T_{i,j'} \end{bmatrix}]$$
(7)

gdzie Δt , Δx oznaczają krok czasowy oraz dyskretyzację w przestrzeni.

2.2. Wymuszenie na powierzchni swobodnej

A

W przypadku mechanizmu termosprężystego, źródłem fal ultradźwiękowych jest rozszerzalność cieplna rozgrzanego fragmentu materiału badanego i wywołane nią naprężenia.

Model źródła akustycznego generowanego przez rozszerzalność cieplną zależy od charakterystyki absorpcji optycznej ośrodka. Jeśli współczynnik absorpcji jest wysoki, jak na przykład w metalach, energia będzie absorbowana w niewielkiej odległości od powierzchni. Powyższy model będzie się, więc opierał się na założeniu cienkiego dysku sięgającego w głąb materiału na głębokość związaną z dyfuzją cieplną. Średnica dysku jest zdeterminowana przez średnicę wiązki lasera [15]. Fala sprężysta w materiałe badanym jest generowana przez odkształcenia spowodowane szybką ekspansją termiczną materiału oświetlonego wiązką lasera. Po gwałtownej ekspansji materiału spowodowanej impulsem lasera następuje zdecydowanie wolniejsze kurczenie się materiału. W wyżej opisanych warunkach, naprężenia powstające w wyniku rozszerzalności cieplnej będą występować głównie w kierunku równoległym do powierzchni, jak pokazano schematycznie na Rys.1. Przykładowe pole temperatur i przebieg czasowy temperatury na powierzchni aluminium przedstawiono na Rys.2.

Grubość nagrzanej warstwy zależy od przewodności cieplnej materiału. Na Rys. 2b widać natomiast, jak po szybkim wzroście temperatury następuje jej powolny spadek i stabilizacja.

W celu zilustrowania propagacji fali ultradźwiękowej powstałej w wyniku mechanizmu termosprężystego przeprowadzono symulację numeryczną. Zamodelowano dwuwymiarową aluminiową płytę o wymiarach 35 x 35 mm. Model zdyskretyzowano w przestrzeni i w czasie zakładając rozmiar elementu $4.2 \ \mu m$ oraz krok czasowy 0.5 ns.



Rys. 1. Ilustracja mechanizmu termosprężystego [16].

Zasymulowano wymuszenie termiczne, pulsem lasera o czasie trwania 15 ns i promieniu plamki 150 µm. Sygnały czasowe otrzymane z symulacji poddane zostały filtracji dolnoprzepustowej do częstotliwości 50 MHz tak, aby zapewnić, że rozmiar elementów siatki jest dużo mniejszy niż długość propagujących fal (dla fali podłużnej ok. 14 elementów na długość fali). Warunek ten zapewnia również, spełnienie przez model założenia generacji fali na powierzchni swobodnej. W następnym kroku wykreślono obwiednię z wykorzystaniem transformaty Hilberta. Pole propagacji przedstawiające wartość obwiedni dla jednej chwili czasowej przedstawiono na Rys. 3a. Na obrazie wyraźnie widać wzbudzenie się fali poprzecznej (S), oraz fali powierzchniowej (R). Obecna jest także fala podłużna (L) oraz tzw. fala czołowa (ang. head wave) oznaczona na obrazie jako (H). Mody te mają znacznie mniejszą amplitudę niż fale poprzeczne i powierzchniowe.



Rys. 2. Rozkład temperatur w materiale badanym po czasie $t = 10 \mu s a$), zmiana temperatury w czasie dla punktu $x_0 b$). (Model numeryczny wymuszenia termicznego: puls lasera o czasie trwania 200ns i mocy szczytowej 1 MW/m², wymuszenie jako strumień ciepła na krawędzi na długości o 2 mm, materiał: aluminium)

Otrzymane wyniki zostały przenalizowane w celu wyznaczenia charakterystyk kierunkowych generowanych postaci fal. Wartości amplitud występujących na obrazie dla odległości odpowiadających drodze pokonanej przez falę poprzeczną i podłużną przedstawiono odpowiednio na Rys. 3b i c. Z otrzymanych charakterystyk wyraźnie widać, że nie propaguje żadna fala w głąb materiału w kierunku normalnym do powierzchni wymuszenia. W przypadku wykorzystania do badania fal poprzecznych należy wziąć pod uwagę to, iż jest ona generowana najwydajniej pod pewnym kątem. Również w przypadku wykorzystania fali podłużnej należy uwzględnić jej charakterystykę kierunkową. Należy się jednak spodziewać, że amplituda fali podłużnej może być niewystarczająca do efektywnego przeprowadzenia badania.



Rys. 3 Pole propagacji utworzone przez wykonanie obwiedni symulowanych sygnałów dla stosunku długości fali do rozmiaru komórki $\lambda/dx \approx 14.2$. R - fala powierzchniowa, S - falapoprzeczna, H - fala czołowa, L - fala podłużna a). Charakterystyki kierunkowe uzyskanena podstawie symulacji - fala poprzeczna b), fala podłużna c).

2.3. Wymuszenie pod powierzchnią swobodną

W niektórych strukturach niejednorodnych występować może warstwa, która jest przeźroczysta dla światła, tak więc absorbcja i generacja fali ultradźwiękowej odbywa się na pewnej głębokości pod powierzchnią. Przykładem takich materiałów są kompozyty epoksydowe wzmacniane włóknem węglowym. W przypadku stosowania laserów o działających w bliskiej podczerwieni (światłowodowych lub Nd:Yag), osnowa epoksydowa

nie absorbuje energii lasera. Do absorpcji zachodzi dopiero na powierzchni włókien węglowych, które wykazują wysoką absorpcyjność w szerokim zakresie długości fal.



Rys. 4 Laserowe wzbudzanie fali ultradźwiękowej dla materiału z przeźroczystą warstwą. Głębokości wzbudzania mniejsza niż szerokość impulsu a) głębokości wzbudzania równej połowie szerokości impulsu b)

Uproszczony mechanizm wzbudzania ultradźwięków w warstwie znajdującej się na głębokości d zilustrowano na Rys. 4a. Rozważania ograniczono tylko w do jednego wymiaru, zatem pod uwagę brane są jedynie fale podłużne [6]. W skutek działania mechanizmu termosprężystego warstwa absorbująca wytwarza impuls ultradźwiękowy oznaczony (1). Wytworzona fala propaguje w obu kierunkach wzdłuż osi Z. Po pewnym czasie zaobserwować można dwa odseparowane impulsy oznaczone (2) i (3). Następnie, impuls nr 2 dociera do powierzchni materiału, gdzie dochodzi do jego odbicia. Jeżeli powierzchnia jest swobodna to dochodzi do zmiany fazy, co widoczne jest w przypadku impulsu nr 4. Po odbiciu impuls nr 4 podąża za impulsem nr 5 w głab materiału. Analizując schemat z Rys. 4a można dojść do wniosku, że różnica drogi pomiędzy impulsem wygenerowanym a odbitym wynosi 2d. Jak widać z Rys. 4b parametr ten będzie miał wpływ na pasmo generowanych sygnałów. W przypadku materiałów o powierzchni silnie absorbującej światło, np. metale, głębokość, na której dochodzi do absorbcji jest niezwykle mała. Oznacza to, że w kierunku normalnym możliwe jest jedynie wygenerowanie fal o bardzo wysokiej częstotliwości, które są szybko tłumione. W ten sposób można tłumaczyć brak występowania fali podłużnej w przypadku opisanym w poprzednim podrozdziale.

Problem ten można zilustrować także wykorzystując dane numeryczne przedstawione na Rys. 5a. Ponieważ przedstawione rezultaty obejmują sygnały w pełnym zakresie częstotliwości, stąd przy założonej dyskretyzacji przestrzennej, model uwzględnia generowanie się fal o krótszej długości, na głębokości równej rozmiarowi elementu modelu.



Rys. 5 Pole propagacji w pełnym zakresie częstotliwości symulacji; $\lambda/dx \approx 4$ (a). Charakterystyki kierunkowe uzyskane na podstawie symulacji – fala poprzeczna (b), fala podłużna L (c).

Na otrzymanych charakterystykach kierunkowych wyraźnie widać falę podłużną propagującą w głąb materiału w kierunku normalnym do powierzchni wymuszenia. Fala poprzeczna generowana jest silnie w kierunku około 33 stopni. Pole propagacji przestawione na Rys. 5 jest typowe dla źródła wzbudzenia znajdującego się pod powierzchnią [17].

3. WYNIKI EKSPERYMENTALNE

Jak przedstawiono w poprzednich rozdziałach, mechanizm wzbudzania ultradźwięków zależy do rodzaju badanego materiału. W dalszej części artykułu przedstawione zostaną przykłady zastosowania sytemu LUS do badania zarówno metali jak i kompozytów. Wyniki eksperymentalne przedstawione w tym artykule otrzymano z wykorzystaniem systemów do badań LUS posiadających kilka kluczowych komponentów: impulsowy laser światłowodowy do generowania sygnałów w badanych próbkach (Model Tech 1053 Advanced, Laser Export Co. Ltd., <u>http://www.laser-export.com</u>) o maksymalnej energii impulsu 2 mJ oraz częstotliwości powtarzania impulsów równej 1 kHz, zbalansowany interferometr typu Sagnac [9], napęd pozycjonujący próbki i wyzwalający impulsy laserowe. W zależności od badanego materiału skonfigurowano odpowiedni układ optyczny. Szczegóły zostaną opisane w odpowiednich podrozdziałach.

3.1. Metale

W poniższym podrozdziale przedstawiono dwa przykłady wykorzystania systemu laserowego do generowania i detekcji ultradźwięków: najpierw przedstawiono wyniki ilustrujące powstawanie fal Lamba mające na celu walidację numerycznego modelu propagacji fal, następnie przedstawiono wyniki obrazowania próbki klejonego aluminium z uszkodzeniem w postaci wkładki teflonowej.

Jak przedstawiono na Rys. 6, w rozważanych eksperymentach wiązkę nadawczą zogniskowano za pomocą soczewki cylindrycznej do wąskiej linii, co pozwoliło na wydajne generowanie płaskiej fali powierzchniowej oraz poprzecznej w głąb materiału. Układ pozwalał na zmianę odległości pomiędzy źródłem i odbiornikiem, co pozwoliło na zbadanie zawartości modalnej generowanych fal oraz na optymalny wybór odległości pozwalającej na maksymalizację czułości dla zdefiniowanej głębokości zalegania wad.

3.1.1 Fale Lamba w aluminiowej płycie

W badaniu cienkich płyt aluminiowych należy wziąć pod uwagę możliwość generowania się fal płytowych, tzw. fal Lamb'a. Powstają one na skutek wielu odbić i związanych z nimi konwersji modów fal podłużnych i poprzecznych [18]. Wykreślenie krzywych dyspersji pozwala na wyodrębnienie modów fal prowadzonych powstałych na skutek zadanego wymuszenia.



Rys. 6 Schemat rozmieszczenia wiązek lasera w badaniu konstrukcji metalowych. Powyżej przekrój przez grubość elementu, poniżej widok z góry.

W celu zbadania poprawności modelu numerycznego, przeprowadzono eksperyment na płycie aluminiowej o grubości 2 mm. Strukturę wymuszono wąską wiązką lasera o długości ok. 15 mm i szerokości około 100 µm, natomiast do pomiaru użyto interferometru typu Sagnac. Sygnał został zmierzony w 92 punktach oddalonych prostopadle od źródła z rozdzielczością 0.25 mm. Otrzymane wyniki zostały poddane dwuwymiarowej transformacie Fouriera. Charakterystyki dyspersji z eksperymentu (Rys.7 a.) oraz symulacji (Rys.7 b.) są ze sobą zgodne, co świadczy o poprawnej implementacji modelu numerycznego.



Rys. 7 Krzywe dyspersji uzyskane przez dwuwymiarowe przekształcenie Fouriera sygnałów zarejestrowanych na powierzchni próbki (a) oraz sygnałów pochodzących z górnej powierzchni modelu numerycznego (b).

3.1.2. Klejone płyty aluminiowe

Systemy laserowe pozwalają na uzyskanie sygnałów szerokopasmowych, co przekłada się na wysoką rozdzielczość otrzymywanych zobrazowań. W związku z tym metoda ta nadaje się do badania elementów cienkościennych. Jako przykład takiej aplikacji przedstawiono obrazowanie połączeń klejonych blach aluminiowych.

W przedstawionym poniżej eksperymencie wykorzystano próbkę, której przekrój pokazano na Rys. 8a. Próbka ta składała się z 3 blach o grubości 1, 1.5 oraz 3.5 mm. W warstwie pomiędzy pierwsza i drugą blacha umieszczono wkładkę teflonową. Do zeskanowania próbki wykorzystano układ przedstawiony na Rys. 6 ustawiając odległość pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem na 2 mm. Skanowanie przeprowadzono z krokiem przestrzennym równym 0.02 x 0,02 mm. Częstotliwość powtarzania impulsów wynosiła 1 kHz.

Otrzymane dane zostały poddane filtracji przestrzennej z wykorzystaniem dwuwymiarowego okna Gaussa wykonującego średnią ważoną na obszarze 25x25 mm. Dla czasu przelotu odpowiadającego drodze jaką pokonuje odbita fala poprzeczna wykreślono amplitudę uzyskanych sygnałów. Wynik został przedstawiony na Rys. 8 b z wykorzystaniem skali logarytmicznej do przedstawienia wartości amplitudy. Na rysunku wyraźnie widać różnicę amplitud zarejestrowanych w czasie eksperymentu. Obszar uszkodzenia jest niejednorodny, co może wynikać z rozszczelnienia przygotowanej wkładki teflonowej.



Rys. 8 Przekrój próbki klejonego aluminium składającej się z 3 blach o grubości 1, 1.5, 3.5 mm a). Zobrazowanie wkładki teflonowej znajdującej się pod pierwszą blachą uzyskane poprzez obrazowanie amplitudy odbitej fali poprzecznej b).

3.2. Obrazowanie kompozytów węglowych

Podczas laserowego badania kompozytów węglowych możliwe jest wykorzystywanie fali podłużnej wzbudzanej w kierunku normalnym do powierzchni. W celu przeprowadzenia badania próbki kompozytowej wiązka nadawcza została zogniskowana do kołowej plamki o środku pokrywającym się ze środkiem wiązki odbiorczej. Średnica plamki wynosiła około 2 mm, co pozwoliło na utrzymanie gęstości energii poniżej progu zniszczenia.

3.2.1. Kompensacja sygnału fali powierzchniowej

Dla obrazowania defektów w materiałach kompozytowych z pobudzaniem laserem najbardziej interesujące są fale podłużne pozwalające na uzyskanie informacji o strukturze pod powierzchnią wymuszaną. Jednakże, jak pokazano w poprzednich rozdziałach, impuls

laserowy generuje wiele postaci fal. Zatem oprócz fali podłużnej wzbudzana jest także fala poprzeczna oraz bardzo efektywnie fala powierzchniowa. W stosowanym stanowisku pomiarowym średnica plamki wiązki pomiarowej jest dużo mniejsza niż średnica plamka wiązki wymuszającej. Fala powierzchniowa generowana w obszarze objętym plamką wymuszającą propaguje w kierunku zewnętrznym, ale także do środka plamki. Dochodzi w ten sposób do zogniskowania fali powierzchniowej w miejscu detektora. Amplituda tej fali jest na tyle duża, że może uniemożliwić detekcję defektów znajdujących się na niedużej głębokości. Przykładowy B-skan przedstawiający zobrazowanie próbki wykonanej z kompozytu wzmacnianego włóknem węglowym przedstawiono na Rys. 9. Na obrazie można zaobserwować występowanie komponentów sygnału charakterystycznych dla obrazowania kompozytów: impuls wejściowy, odbicia od kolejnych warstw struktury, echo dna, echa defektów. Ponadto, w górnej części obrazu można zobaczyć ciemny pasek wynikający z rejestracji fali powierzchniowej.



Rys. 9 Zobrazowanie typu B kompozytu wzmacnianego włóknem węglowym z defektem powstałym poprzez uderzenie. Nieprzetworzone dane.

Jak pokazano fala powierzchniowa może mocno utrudniać wykrywanie defektów, zwłaszcza znajdujących się blisko powierzchni, zatem bardzo ważne jest jej usunięcie. W tym celu zastosowano filtr odwrotny wykorzystujący widmo specjalnie zaprojektowanego sygnału referencyjnego, który jest tworzona dla całej badanej próbki.



Rys. 10 A-skan początkowy, uśredniony na nieuszkodzonym obszarze (RAW) po filtracji dolnoprzepustowej (LPF) a) referencja powstała jako średnia ważona z poprzednich przebiegów b).

W procesie filtracji odwrotnej widmo kolejnych A-skanów jest dzielone przez widmo referencji pozostawiając wyłącznie komponenty sygnału niosące informacje o badanej strukturze.

Po to, aby algorytm ten był skuteczny referencja jest projektowana w oparciu o kolejne kroki. Początkowo, wybierany jest nieuszkodzony obszar w którym uśredniane są przebiegi czasowe (Rys 10 a)). Ma to na celu poprawę stosunku sygnału do szumu oraz usunięcie informacji o strukturze. W następnym kroku, uśredniony A-skan jest filtrowany dolnoprzepustowo celem usunięcia pozostałej informacji o odbiciach od kolejnych warstw z struktury z referencji. Dla wielu standardowych kompozytów weglowych, informacja o strukturze znajduje się powyżej częstotliwości 7-8 MHz, podczas gdy fala powierzchniowa obserwowana jest poniżej 6 MHz. Wynik filtracji dolnoprzepustowej przedstawiono na Rys. 10 a. Ponieważ w procesie dekonwolucji widmo referencji jest w mianowniku, to referencja powinna zawierać odpowiednio szerokie pasmo, aby nie doprowadzić do wzmocnienia szumu poprzez dzielenie przez wartości dążące do zera. W związku z tym wykonuje się średnią ważoną między uśrednionym A-skanem, a przefiltrowanym uśrednionym A-skanem. Dodatkowo, zastosowanie średniej ważonej ma na celu zapewnienie płynnego przejścia pomiędzy łączonymi sygnałami. Na tak powstały sygnał nakładane jest okno czasowe, w celu usuniecia echa dna. W ten sposób powstaje sygnał przedstawiony na Rys. 10 b. Następnie każdy A-skan z próbki jest poddawany operacji rozplatania z referencją w dziedzinie częstotliwości



Rys. 11 Wynikowe zobrazowanie typu B powstałe po dekonwolucji obrazu przedstawionego na rysunku 9.

Kolejnym krokiem jest filtrowanie pasmowo przepustowe, aby stłumić artefakty wynikające z dzielenia przez wartości bliskie zeru. Ostatnim krokiem jest użycie na każdym A-skanie zasięgowej regulacji wzmocnienia (ang. Time-gain compensation TGC), co zapewnia odpowiednią amplitudę na całej długości sygnału niwelując wpływ tłumienia sygnału wnikającego w głąb próbki.

Wynikiem tego jest nowe zobrazowanie typu B przedstawione na Rys 11, w którym fala powierzchniowa został stłumiona. Jak można zaobserwować oprócz stłumienia fali warstwy kompozytu są lepiej widoczne. Ponadto dolna część B-skanu ma lepszy zakres kolorów dzięki użyciu wzmocnienia czasowego (TGC).

Ponieważ w czasie eksperymentu gromadzono kompletne dane trójwymiarowe to możliwe jest przedstawienie amplitudy sygnału dla danej głębokości. Na Rys. 12 a i b

przedstawiono zobrazowania typu C dla próbki uzyskane na różnych głębokościach równych odpowiednio 0.28 mm i 2.51 mm.



Rys. 12 Zobrazowanie typu C próbki kompozytowej uzyskane dla głębokości zalegania 0.28 mm a) duży obszar uszkodzenia dla głębokości 2.51 mm b)

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Technika laserowego wzbudzania i pomiaru ultradźwięków daje duże możliwości wykonywania badań przy zachowaniu nieniszczącego reżimu wzbudzenia sygnału fotoakustycznego. Nowe detektory, takie jak wykorzystywany w tej pracy zbalansowany interferometr, pozwalają znacząco obniżyć koszt zakupu takiego systemu. Po pierwsze, detektor zbudowany jest z wykorzystaniem komponentów światłowodowych w standardzie 1550 nm, które ze względu na powszechność ich zastosowania w telekomunikacji są stosunkowo tanie. Ponadto, dzięki samo-zbalansowaniu interferometru można także uzyskać wysoką czułość, która przekłada się na niższe wymogi co do stosowanych amplitud wymuszenia. W związku z tym możliwe jest wykorzystanie do wzbudzania laserów światłowodowych. Lasery te są szybkie, tanie, mają niewielkie rozmiary, a ponadto są chłodzone powietrzem co ułatwia ich eksploatację i zwiększa mobilność.

Wielomodowa natura wzbudzenia laserowego jest często wymieniana jako jedna z wad tego podejścia. Rzeczywiście jak pokazano na przykładzie kompozytu, fala powierzchniowa współistniejąca z falą podłużną utrudnia interpretację wyniku. Okazuje się jednak, że możliwe jest skompensowanie tego artefaktu poprzez zastosowanie odpowiedniego filtra odwrotnego. Ponadto, jak pokazano w rozdziale o badaniu metali, za pomocą tego samego sprzętu możliwe jest skanowanie z wykorzystaniem zarówno fal podłużnych jak i poprzecznych.

PODZIĘKOWANIE

Laserowy system do badania materiałów metalicznych jest rozwijany w ramach projektu "Bezkontaktowe techniki laserowe do szybkich ultradźwiękowych badań nieniszczących metalowych elementów konstrukcyjnych" realizowanego w ramach programu LIDER VIII Nr LIDER/15/0085/L-8/16/NCBR/2017. Wyniki obrazowania kompozytów, przedstawione w artykule, zostały uzyskane w ramach projektu pod tytułem "Nondestructive evaluation of

inhomogeneous layered materials using synthetic and self-focusing techniques" realizowanego w ramach program HOMING fundacji na Rzecz Nauki Polskiej, finansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 (PO IR), Oś IV: Zwiększenie potencjału kadrowego sektora B+R. Autorzy składają podziękowania dla I. Pelivanova i M. O'Donnel'a z University of Washington za dostarczenie surowych skanów próbek kompozytowych.

LITERATURA

- [1] D. E. Chimenti, "Review of air-coupled ultrasonic materials characterization," *Ultrasonics*, vol. 54, no. 7, pp. 1804–1816, 2014.
- [2] S. MACKIEWICZ, "BADANIA ULTRADŹWIĘKOWE W SPRZĘŻENIU POWIETRZNYM," in XXIV Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, 2018, pp. 14–16.
- [3] L. Ambrozinski, B. Piwakowski, T. Stepinski, and T. Uhl, "Application of air-coupled ultrasonic transducers for damage assessment of composite panels," *Proc. 6th Eur. Work. Struct. Heal. Monit. 2012, EWSHM 2012*, vol. 1, pp. 122–129, 2012.
- [4] P. Wilcox, M. Lowe, and P. Cawley, "Omnidirectional guided wave inspection of large metallic plate structures using an EMAT array.," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 52, no. 4, pp. 653–65, Apr. 2005.
- [5] J. Szelążek, "Laserowe badania ultradźwiękowe," Dozór Tech., vol. 6, pp. 131–136, 2006.
- [6] V. E. Gusev and K. A.A., *LaserOptoacoustics*. New York, NY: American Institute of Physi, 1993.
- [7] I. Pelivanov, T. Buma, J. Xia, C.-W. Wei, A. Shtokolov, and M. O'Donnell, "Non-destructive evaluation of fiber-reinforced composites with a fast 2D fiber-optic laser-ultrasound scanner," in *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1650, no. 1, pp. 43–50.
- [8] I. Pelivanov, A. Shtokolov, C. W. Wei, and M. O'Donnell, "A 1 kHz a-scan rate pump-probe laser-ultrasound system for robust inspection of composites," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 62, no. 9, pp. 1696–1703, Sep. 2015.
- [9] I. Pelivanov, T. Buma, J. Xia, C. W. Wei, and M. O'Donnell, "A new fiber-optic non-contact compact laser-ultrasound scanner for fast non-destructive testing and evaluation of aircraft composites," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 11, 2014.
- [10] I. Pelivanov, T. Buma, J. Xia, C. W. Wei, and M. O'Donnell, "NDT of fiber-reinforced composites with a new fiber-optic pump-probe laser-ultrasound system," *Photoacoustics*, vol. 2, no. 2, pp. 63–74, 2014.
- [11]I. Pelivanov *et al.*, "High resolution imaging of impacted CFRP composites with a fiber-optic laser-ultrasound scanner," *Photoacoustics*, vol. 4, no. 2, pp. 55–64, 2016.
- [12] I. Pelivanov, Ł. Ambrozinski, and M. O'Donnell, "Heat damage evaluation in carbon fiberreinforced composites with a kHz A-scan rate fiber-optic pump-probe laser-ultrasound system," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 84, pp. 417–427, 2016.
- [13] I. Arias and J. D. Achenbach, "Thermoelastic generation of ultrasound by line-focused laser irradiation," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 40, no. 25, pp. 6917–6935, 2003.
- [14] P. P. Delsanto, R. S. Schechter, H. H. Chaskelis, R. B. Mignogna, and R. Kline, "Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials . II: The two-dimensional case," vol. 20, pp. 295–314, 1994.
- [15] S. J. Davies, C. Edwards, G. S. Taylor, and S. B. Palmer, "Laser-generated ultrasound: Its properties, mechanisms and multifarious applications," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 26, no. 3, pp. 329–348, 1993.
- [16] J. R. Bernstein and J. B. Spicer, "Line source representation for laser-generated ultrasound in

aluminum," J. Acoust. Soc. Am., vol. 107, no. 3, pp. 1352-1357, 2000.

- [17] P. Jilek, "Radiation Patterns of Point Sources Situated Close to Structural Interfaces and to the Earth's Surface," vol. 148, 1996.
- [18] D. A. Hutchins, *Ultrasonic Generation by Pulsed Lasers*, vol. 18, no. C. ACADEMIC PRESS, INC., 1988.