

Załącznik 2a

Autoreferat

Przedstawiający dorobek i osiągnięcie naukowe w szczególności
określone w art. 16 ust.2 Ustawy

dr inż. Paweł Kudela

Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego PAN
Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych
ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk
pk@imp.gda.pl

Gdańsk 2016

1. Imię i Nazwisko.

Paweł Kudela

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2009 **stopień doktora nauk technicznych w zakresie mechaniki, specjalność: diagnostyka i monitorowanie konstrukcji**

Tytuł rozprawy doktorskiej: „*Detekcja uszkodzeń w wybranych elementach kompozytowych metodą propagacji fal sprężystych*”.

Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych,

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Wiesław Ostachowicz

2004 **stopień magistra inżyniera, specjalność: mechanika komputerowa**

Tytuł pracy magisterskiej: „*Analiza gramatyki i implementacja interpretera MES na przykładzie języka MAJAK*”

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej,

Promotor pracy: dr inż. Aleksander Matuszak

1999 **technik budowlany**

Technikum Budowlane w Wadowicach

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.

Miejsce zatrudnienia:

Instytut Maszyn Przepływowych PAN (IMP PAN), Ośrodek Mechaniki Maszyn, Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych, ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk

Historia zatrudnienia:

Od 05.2009: **adiunkt** - Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN Gdańsk

2005 – 2009: **asystent** - Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN Gdańsk

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego.

Jako osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej, wskazuję cykl 10 publikacji oraz 1 monografię powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:

Anomalie pełnego pola fal Lamba w zastosowaniu do identyfikacji uszkodzeń

b) wykaz wybranego cyklu publikacji

- H1. **Paweł Kudela**, Wiesław Ostachowicz, 2009, *3D time-domain spectral elements for stress waves modelling*, 7th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Book Series: Journal of Physics Conference Series, Edited by Dulieu-Barton JM, 8-10 Wrzesień, Cambridge, England, 181, Numer Artykułu: 012091, 8 stron.
- H2. Wiesław Ostachowicz, **Paweł Kudela**, 2010, *Wave Propagation Numerical Models in Damage Detection Based on the Time Domain Spectral Element Method*, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, Book Series: IOP Conference Series – Materials Science and Engineering, Edited by: Khalili, N; Valliappan, S; Li, Q; et al., 19-23 Lipiec, Sydney, Australia, 10, Article Number: 012068, 10 stron.
- H3. **Paweł Kudela**, 2015, *Parallel implementation of Spectral Element Method for Lamb wave propagation modeling*, International Journal for Numerical Methods in Engineering...
(IF: 2.055 – rok 2014)
- H4. **Paweł Kudela**, Maciej Radzieński, Wiesław Ostachowicz, 2016, *Wave propagation modelling in randomly oriented short fibre composites*, Proceedings of SPIE, 20-24 Marzec, Las Vegas, Numer Artykułu: 9805-2, Sesja: Guided Wave for Composite Inspection.
- H5. Wiesław Ostachowicz, Maciej Radzieński, **Paweł Kudela**, 2011, *Elastic wave field filtering and processing for damage localization in structures*, Proceedings of 14th Asia-Pacific Vibration Conference, 5-8 Grudzień, Hong Kong, Chiny, 9 stron.
- H6. Wiesław Ostachowicz, **Paweł Kudela**, Maciej Radzieński, 2012, *Damage visualization enhancement by the wave field filtering and processing*, Conference on Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure and Homeland Security, Book Series: Proceedings of SPIE, Edited by: Gyekenyesi, AL; Yu, TY; Shull, PJ; et al., 12-15 Marzec, San Diego, USA, Tom: 8347, Numer Artykułu: 83471H, 12 stron.
- H7. Wiesław Ostachowicz, **Paweł Kudela**, Maciej Radzieński, 2013, *Guided wavefield images filtering for damage localization*, Key Engineering Materials, Tom 558, Strony: 92-98.
- H8. Maciej Radzieński, **Paweł Kudela**, Wiesław Ostachowicz, 2013, *Visualization of thermally induced delamination by means of guided waves processing*, Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, Book Series: Proceedings of SPIE, Edited by: Lynch, JP; Yun, CB; Wang, KW, 10 Marzec, San Diego, USA, Tom: 8692, Numer Artykułu: UNSP 86921O, 10 stron.
- H9. Wiesław Ostachowicz, Maciej Radzieński, **Paweł Kudela**, 2014, 50th Anniversary Article: *Comparison Studies of Full Wavefield Signal Processing for Crack Detection*, Strain, Tom: 50(4), Strony: 275-291.
(IF: 1.283)

H10. **Paweł Kudela**, Maciej Radzieński, Wiesław Ostachowicz, 2015, *Identification of cracks in thin-walled structures by means of wavenumber filtering*, Mechanical Systems and Signal Processing, Tom: 50-51, Strony: 456-466.
(IF: 2.256 – rok 2014)

H11. Wiesław Ostachowicz, **Paweł Kudela**, Marek Krawczuk, Arkadiusz Żak, 2012, *Guided Waves in Structures for SHM: The Time-Domain Spectral Element Method*, John Wiley & Sons, ISBN-13: 978-0-470-97983-9 (monografia).

Ze względu na interdyscyplinarny charakter prowadzonych przeze mnie badań, na cykl publikacji powiązanych tematycznie składają się głównie prace, których jestem współautorem, jednak mój udział merytoryczny był znaczący na każdym etapie: projektowania eksperymentu, wykonania badań, opracowania i interpretacji wyników badań oraz przygotowania manuskryptów.

Oświadczenia wszystkich współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku zostały zamieszczone w załączniku 3.

Na liście zgłoszonych przeze mnie do oceny publikacji znajduje się również samodzielna praca naukowa: *Parallel implementation of Spectral Element Method for Lamb wave propagation modeling* opublikowana w czasopiśmie z listy filadelfijskiej - *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.

- c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wstęp

Tematyka prac badawczych, które prowadziłem po obronie rozprawy doktorskiej, wchodzących w zakres osiągnięcia naukowego, dotyczy nieinwazyjnych metod identyfikacji uszkodzeń w konstrukcjach. Metody te oparte są o anomalie propagacji fal sprężystych, które rejestrowane są za pomocą skanującego Dopplerowskiego wibrometru laserowego. Ze względu na gęstą siatkę punktów pomiarowych możliwe jest badanie zachowania się propagacji fal sprężystych z dużą rozdzielczością, co bezpośrednio prowadzi do dokładniejszej identyfikacji anomalii propagacji fal spowodowanych występowaniem uszkodzeń w porównaniu do systemów monitorowania opartych wyłącznie o sieci przetworników piezoelektrycznych. Możliwa jest zatem nie tylko detekcja i lokalizacja uszkodzeń takich jak delaminacja, niedoklejenie czy pęknięcie zmęczeniowe, ale również oszacowanie ich wielkości.

Prowadzone przeze mnie prace badawcze mają charakter zarówno teoretyczny jak i eksperymentalny. Badania teoretyczne mają na celu poznanie zjawiska propagacji fal sprężystych, ich interakcji z uszkodzeniami celem wykorzystania zdobytej wiedzy do tworzenia algorytmów identyfikacji uszkodzeń. Do modelowania zjawiska propagacji fal sprężystych wykorzystuję autorskie oprogramowanie, którego jądro stanowi metoda elementów spektralnych sformułowana w dziedzinie czasu. W odróżnieniu od opracowanych w ramach rozprawy doktorskiej jedno- i dwuwymiarowych spektralnych elementów skończonych obecnie zajmuję się trójwymiarowymi elementami spektralnymi. Umożliwiają one bardziej realistyczne modelowanie zjawiska propagacji fal sprężystych oraz uwzględniają sprzężenie elektromechaniczne niezbędne przy modelowaniu

przetworników piezoelektrycznych. Badania eksperymentalne mają charakter komplementarny i są podstawą do weryfikacji zarówno opracowanych modeli jak i algorytmów identyfikacji uszkodzeń.

Należy dodać, że pełne pole propagacji fal sprężystych, a w szczególności fal Lamba, można uzyskać albo na drodze symulacji numerycznych albo na drodze eksperymentalnej za pomocą skanującego wibrometru laserowego. Oba typy danych można wykorzystać do tworzenia algorytmów identyfikacji uszkodzeń. Warto nadmienić, że symulacje numeryczne są bardziej elastyczne w modelowaniu uszkodzeń, które w przypadku badań eksperymentalnych należy za każdym razem wprowadzać do badanego materiału. Stąd też techniki eksperymentalne wykorzystywane są głównie do weryfikacji opracowanych algorytmów.

Elementem nowości w moich badaniach są zarówno techniki modelowania pełnego pola fal Lamba jak i przetwarzania i filtrowania sygnałów w dziedzinie liczb falowych. Zastosowane przeze mnie spektralne elementy skończone umożliwiają odwzorowanie zjawiska propagacji fal Lamba z dużą dokładnością. Ponadto zaproponowana przeze mnie implementacja równoległa na procesorach graficznych GPU (z ang. *Graphics Processing Unit*) umożliwia znaczące skrócenie czasu obliczeń. Moim zdaniem znaczącym wkładem w rozwój technik identyfikacji uszkodzeń są opracowane przeze mnie algorytmy przetwarzania i filtrowania sygnałów pełnego pola fal Lamba. Algorytmy te są konkurencyjne w stosunku do innych znanych metod, a co ważniejsze, ich wysoką skuteczność detekcji uszkodzeń w różnych materiałach potwierdzają eksperymenty przeprowadzone w laboratorium Zakładu Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN. Praktyczne przykłady zastosowania opracowanych metod do wykrywania pęknięć oraz delaminacji prezentuję w niniejszym autoreferacie.

W celu podkreślenia elementów nowości mojej pracy szczegółowy opis metodyki badań podzielę na dwie części. W pierwszej części opiszę mój wkład w obszarze metod modelowania pełnego pola fal Lamba. W drugiej części skupię się na algorytmach identyfikacji uszkodzeń opartych o przetwarzanie sygnałów pełnego pola fal Lamba.

Zanim przejdę do szczegółowego omówienia metodyki badań oraz uzyskanych wyników chciałbym zwrócić uwagę na kwestię pomiaru sygnałów techniką laserową. W prowadzonych przeze mnie badaniach fale Lamba wzbudzane są za pomocą jednego przetwornika piezoelektrycznego. Wzbudzenie zsynchronizowane jest z wibrometrem laserowym, który dokonuje pomiaru prędkości deformacji w punktach na powierzchni badanej struktury. Po wytłumieniu się fali następuje wzbudzenie i pomiar w innym punkcie. Procedurę pomiarową powtarza się aż do uzyskania przebiegów czasowych w zadanej siatce punktów przestrzennych. Siatka przestrzenna musi być stosunkowo gęsta, co wiąże się z długim czasem pomiaru (kilka godzin), ale dzięki temu uzyskuje się wysoką rozdzielczość pomiarową. Odwrotnie jest w przypadku sieci przetworników wykorzystywanych do detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Pomiar jest szybki, ale sygnały rejestrowane są przez niewielką liczbę przetworników piezoelektrycznych, a co za tym idzie uzyskane informacje o potencjalnych uszkodzeniach są ograniczone. Ze względu na czas pomiaru, systemy bazujące na sieciach przetworników piezoelektrycznych można zaliczyć do systemów działających w czasie niemal rzeczywistym, nazywanych SHM (z ang. *Structural Health Monitoring*), natomiast systemy bazujące na pomiarach wibrometrem laserowym należałoby zaliczyć do kategorii metod nieniszczących typu NDT (z ang. *Non-destructive testing*). Przy czym należy nadmienić, że w związku ze znaczącym postępem technik optycznych, w niedalekiej przyszłości zapewne możliwe będzie jednoczesne skanowanie urządzeniem laserowym lub szybką kamerą całej powierzchni badanej struktury. Wówczas opracowane przeze mnie algorytmy awansują do kategorii SHM, przy jednoczesnej poprawie skuteczności identyfikacji uszkodzeń w stosunku do sieci przetworników piezoelektrycznych.

W systemach SHM można wyróżnić co najmniej cztery poziomy:

- detekcja – sprawdzenie czy konstrukcja jest uszkodzona,
- lokalizacja – wykrycie miejsca występowania uszkodzenia,
- szacowanie – określenie wielkości uszkodzenia,
- predykcja – określenie bezpieczeństwa i żywotności konstrukcji.

Należy dodać, że kolejne poziomy są coraz trudniejsze w realizacji i wymagają bazy wiedzy uzyskanej z poprzednich poziomów. Przy obecnym stanie wiedzy można powiedzieć, że systemy bazujące na sieciach przetworników piezoelektrycznych umożliwiają detekcję uszkodzeń oraz niekiedy lokalizację uszkodzeń, podczas gdy opracowane przeze mnie metody umożliwiają identyfikację uszkodzeń rozumianą jako detekcję, lokalizację oraz oszacowanie wielkości uszkodzenia. Metody te mogą również stanowić podstawy do prognozowania żywotności konstrukcji.

Szczegółowy opis metodyki badań oraz dyskusja

I. Metody modelowania pełnego pola fal Lamba

Głównym celem badań było opracowanie metod modelowania pełnego pola fal Lamba, zapewniających dobry stosunek dokładności obliczeń do czasu obliczeń. Dużą dokładność obliczeń uzyskano poprzez wykorzystanie metody elementów spektralnych w dziedzinie czasu. Znaczące skrócenie czasu obliczeń uzyskano poprzez równoległą implementację tej metody na procesorach GPU.

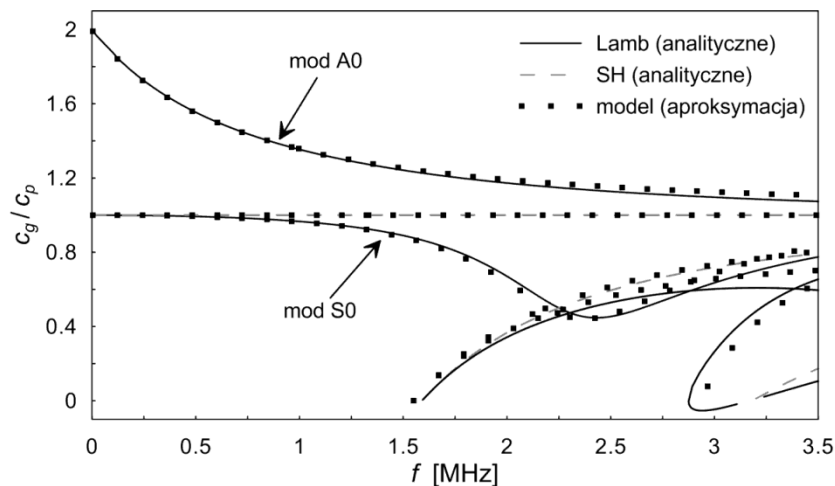
Metoda elementów spektralnych w dziedzinie czasu po raz pierwszy została zastosowana do modelowania przepływów laminarnych przez Paterę w 1984 r. Zespół Mechaniki Strukturalnej IMP PAN zaadaptował tę metodę na potrzeby modelowania fal Lamba w 2006 r. Mój udział w rozwoju oprogramowania, którego rdzeniem są elementy spektralne był znaczący na każdym etapie. Podczas gdy Marek Krawczuk i Arkadiusz Żak wnieśli znaczący wkład w rozwój elementów spektralnych opartych o teorie wyższych rzędów, mój udział polegał na zaproponowaniu i implementacji trójwymiarowych elementów spektralnych uwzględniających sprzężenie elektromechaniczne [H1, H2, H3, H11]. Podejście trójwymiarowe umożliwiło modelowanie i projektowanie kompletnych systemów monitorowania stanu technicznego konstrukcji bazujących na sieciach przetworników piezoelektrycznych jak i modelowanie pełnego pola fal wzbudzonego przez przetwornik piezoelektryczny.

Do modelowania zjawiska propagacji fal sprężystych często wykorzystywane są również: metoda elementów skończonych, metoda LISA (z ang. *Local Interaction Simulation Approach*) bazująca na schematach różnic skończonych oraz metoda elementów spektralnych w dziedzinie częstotliwości. Należy zwrócić uwagę, że metoda elementów spektralnych w dziedzinie czasu wyróżnia się na tle innych, wspomnianych wyżej metod zaletami takimi jak: szybka zbieżność (tzw. zbieżność spektralna), elastyczność modelowania skomplikowanych struktur, naturalna diagonalność macierzy mas, duże możliwości zrównoleglenia obliczeń.

Spośród wymienionych metod, metoda elementów spektralnych w dziedzinie częstotliwości najlepiej nadaje się do modelowania zjawiska propagacji fal sprężystych w elementach jednowymiarowych. Ze względu na specyfikę funkcji kształtu zawierających rozwiązania analityczne, metoda ta jest bardzo szybka w przypadku punktowej analizy fal w postaci wymuszenie-przemieszczenie. Natomiast uzyskanie pełnego pola przemieszczeń wymaga dużych nakładów obliczeniowych i jest nieefektywne. Do modelowania pełnego pola fal lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie technik aproksymacyjnych takich jak metoda elementów skończonych lub metoda różnic skończonych. Niemniej jednak zaproponowana przeze mnie metoda elementów spektralnych w dziedzinie czasu jest szybsza i dokładniejsza niż metoda elementów skończonych. Jest to szczególnie istotne przy modelowaniu interakcji fal z uszkodzeniami, ponieważ fale odbite od uszkodzeń zazwyczaj służą do tworzenia wskaźników uszkodzeń. O ile metoda elementów skończonych dość dobrze sprawdza się przy modelowaniu fal wzbudzonych przez przetworniki piezoelektryczne, o tyle w przypadku fal odbitych występują znaczące dystorsje w porównaniu z pomiarami eksperymentalnymi. W porównaniu do metody LISA, metoda elementów spektralnych sformułowana w dziedzinie czasu odznacza się większą stabilnością rozwiązań równań ruchu, zwłaszcza w przypadku modelowania zjawiska propagacji fal sprężystych w materiałach o cechach ortotropowych lub anizotropowych. Obie metody wykazują podobne możliwości prowadzenia równoległych obliczeń.

Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej było opracowanie narzędzia służącego do określania zakresu stosowalności trójwymiarowego elementu spektralnego o zadanym rzędzie aproksymacji.

Dokładność odwzorowania fal Lamba zależy od liczby węzłów przypadających na długość fali (w płaszczyźnie płyty) oraz od liczby węzłów aproksymujących pole przemieszczeń wzdłuż grubości płyty. Zarówno długość fali jak i rozkład przemieszczeń wzdłuż grubości płyty zależą od częstotliwości wymuszenia, które zazwyczaj jest złożeniem funkcji sinus z oknem (np. Hanninga). Znając częstotliwość nośną wymuszenia łatwo obliczyć długości fal poszczególnych modów i dobrać gęstość siatki w płaszczyźnie płyty, w ten sposób, aby zapewnić co najmniej 5 węzłów na długości najkrótszej fali spośród propagujących się modów. Sytuacja jest o wiele bardziej złożona w stosunku do aproksymacji pola przemieszczeń wzdłuż grubości płyty. Wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia rozkład pola przemieszczeń wzdłuż grubości płyty staje się coraz bardziej złożony i jest inny dla każdego modu. Opracowane przeze mnie narzędzie umożliwia wykreślenie krzywej dyspersji dla elementu spektralnego o zadanej liczbie węzłów wzdłuż grubości elementu, będącej aproksymacją rozwiązania analitycznego wyprowadzonego przez Horacego Lamba (H. Lamb, 1917, *On waves in an elastic plate, Proceedings of the Royal Society of London*, Tom 93, Strony: 293–312). Porównanie obu tych krzywych umożliwia obliczenie błędu aproksymacji w zależności od częstotliwości nośnej wymuszenia. Przykładowe krzywe dyspersji dla elementu o 4 węzłach wzdłuż grubości na tle rozwiązania analitycznego przedstawia Rys. 1. Na osi x znajduje się częstotliwość wymuszenia f , natomiast na osi y jest stosunek prędkości grupowej do prędkości fazowej. Zakładając, że interesuje nas odwzorowanie modu A_0 z błędem nie większym niż 1%, element ten możemy zastosować do częstotliwości nie większej niż 1.65 MHz.



Rys. 1 Krzywe dyspersji fal Lamba: aproksymacja na tle rozwiązania analitycznego

W ramach mojej pracy badawczej opracowałem trójwymiarowe spektralne elementy skończone z uwzględnieniem sprzężenia elektromechanicznego [H1, H2]. Elementy te stanowią integralną część opracowanego przeze mnie programu komputerowego wykorzystywanego do symulacji zjawiska propagacji fal sprężystych. Program ten umożliwia modelowanie zjawiska propagacji fal sprężystych wzbudzanych za pomocą przetworników piezoelektrycznych w materiałach o cechach izotropowych i ortotropowych. W pracy [H1] przedstawiłem opis matematyczny trójwymiarowych elementów spektralnych oraz pokazałem wpływ kształtu przetwornika piezoelektrycznego na postać pełnego pola fal Lamba. W trakcie mojej pracy badawczej wykazałem, że zastosowanie trójwymiarowych elementów spektralnych umożliwia uzyskanie większej dokładności prędkości propagacji modu A0 fal Lamba (który jest najczęściej wykorzystywany do celów detekcji uszkodzeń), w porównaniu z płytowymi elementami spektralnymi bazującymi na teorii Mindlina. W pracy [H2] przedstawiłem zastosowanie opracowanych trójwymiarowych elementów spektralnych do modelowania zjawiska propagacji fal w zakrzywionych elementach konstrukcyjnych. Zaproponowałem również prosty układ liniowy przetworników piezoelektrycznych do generowania płaskiej fali celem detekcji pęknięcia zmęczeniowego. Porównanie energii przejścia fali od układu wzbudników do układu czujników ze stanem referencyjnym pozwala wykryć uszkodzenie. Dzięki zastosowaniu elementów trójwymiarowych możliwe było uwzględnienie warstwy kleju łączącej przetworniki piezoelektryczne z badaną strukturą. Wyniki badania wpływu grubości warstwy kleju na amplitudę wzbudzonej fali przedstawiłem w Rozdziale 6 monografii [H11]. Wyniki symulacji numerycznych uzyskane za pomocą opracowanego przeze mnie programu komputerowego zostały opublikowane w kilkunastu raportach i były przedmiotem kilkunastu doniesień konferencyjnych. Posłużyły również do opracowania wielu algorytmów wizualizacji uszkodzeń [H5–H10].

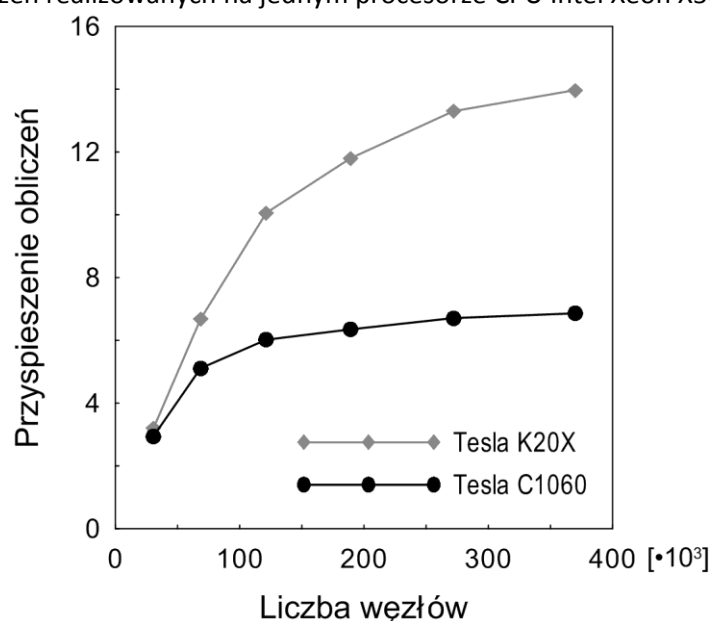
Implementacja równoległa metody elementów spektralnych

Elementem nowości mojej pracy badawczej była implementacja równoległa metody elementów spektralnych na procesorach GPU [H3]. Jest to pierwsza tego typu implementacja w zastosowaniu do symulacji propagacji fal Lamba.

Celem tej pracy badawczej było przyspieszenie obliczeń. Pomimo, że metoda elementów spektralnych odznacza się szybszą zbieżnością niż metoda elementów skończonych, czas trwania obliczeń był niezadowalający. Uzyskana zwiększona dokładność obliczeń związana z zastosowaniem

trójwymiarowych elementów spektralnych zamiast spektralnych elementów powłokowych, okupiona została zwiększeniem liczby stopni swobody. W połączeniu z warunkiem co najmniej pięciu węzłów na długości fali zagadnienie stało się złożone zarówno jeśli chodzi o zasoby pamięci podręcznej komputera jak i długi czas obliczeń. Nawet symulacja propagacji fal Lamba w kwadratowej płycie o boku 50 cm przy częstotliwości 200 kHz prowadzi do rozmiaru zagadnienia rzędu miliona stopni swobody.

Do rozwiązywania tego problemu wykorzystałem kartę GPU, która umożliwia równoległe przetwarzanie operacji macierzowych na setkach procesorów. Zaimplementowałem nowy algorytm tzw. kolorowania siatki w metodzie elementów spektralnych [H3]. W algorytmie tym uwzględniono fakt, że siatki elementów spektralnych posiadają znacznie więcej węzłów niż elementów. Intensywne obliczeniowo operacje wykonywane są na poziomie stopnia swobody elementu spektralnego. Dzięki temu uzyskuje się większą granulację procesów i większą efektywność obliczeń równoległych w porównaniu do kolorowania siatki bazującego na elementach. Zaproponowany przeze mnie algorytm równoległy wykorzystuje dwie podstawowe operacje: mnożenie macierzy rzadkiej przez wektor oraz mnożenie Hadamarda. Zastosowanie macierzy rzadkich jest optymalne z punktu widzenia wykorzystania pamięci karty GPU. Dodatkowo algorytm skonstruowany jest w ten sposób, że nie ma w nim kroku agregacji macierzy sztywności. Dzięki temu możliwe jest rozwiązywanie zagadnień o wielu milionach stopni swobody na pojedynczej karcie GPU. Implementacja równoległa z wykorzystaniem karty GPU Tesla K20X umożliwiła do 14-krotnego przyspieszenia obliczeń w porównaniu do obliczeń realizowanych na jednym procesorze CPU Intel Xeon X5660 2.8GHz (Rys. 2).



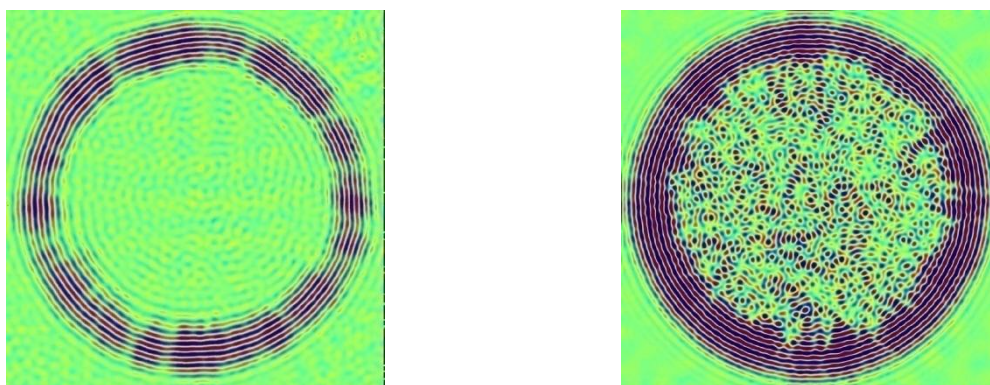
Rys. 2. Przyspieszenie obliczeń w zależności od liczby węzłów uzyskane na kartach Tesla

Modelowanie kompozytów wzmacnianych krótkimi włóknami

W ramach projektu NCN Harmonia zatytułowanego „Badania zjawiska propagacji fal sprężystych w materiałach kompozytowych z imperfekcjami” opracowałem oryginalny iteracyjny algorytm obliczania stałych sprężystych w kompozytach wzmacnianych losowo ukierunkowanymi krótkimi włóknami [H4].

Na potrzeby projektu wykonano metodą infuzji kilka rodzajów próbek kompozytowych w postaci płyt kwadratowych o wymiarach boku 0.5 m. Jednym z rodzajów badanych próbek były próbki wykonane z żywicy epoksydowej wzmacnianej włóknami szklanymi o długości około 4 mm.

Celem pracy było zbadanie zjawiska propagacji fal sprężystych w tego typu kompozytach i sprawdzenie czy możliwe jest wykrywanie imperfekcji powstałych na skutek wadliwego wykonania badanych elementów konstrukcji lub powstałych w czasie eksploatacji. Badania miały charakter zarówno teoretyczny jak i eksperymentalny. Dużym wyzwaniem było stworzenie modelu, który odzwierciedla interakcję propagujących się fal sprężystych z losowo rozmieszczonymi pękami krótkich włókien. W tym celu program komputerowy służący do symulacji propagacji fal sprężystych rozbudowałem o oryginalny iteracyjny algorytm obliczania stałych sprężystych w kompozytach wzmacnianych losowo ukierunkowanymi krótkimi włóknami. Algorytm powstał na bazie mechaniki kompozytów, prawa mieszanin i stanu równowagi masy całkowitej. Algorytm dostosowany jest do siatki elementów spektralnych w taki sposób, aby uzyskać kompromis pomiędzy dokładnością obliczeń a kosztami obliczeń. Symulacje numeryczne zostały wstępnie zweryfikowane poprzez pomiary pełnego pola fal sprężystych wykonane za pomocą wibrometru laserowego. Uzyskano dużą zgodność wyników, co obrazuje Rys. 3. Za pomocą opracowanego przeze mnie modelu udało się uzyskać następujące efekty: wielokrotne odbicia fal od krótkich włókien, poszarpany front fali o zróżnicowanej amplitudzie zależnej od kąta propagacji, wzrost prędkości fali wraz ze wzrostem zawartości wagowej włókien wzmacniających. Wszystkie te efekty zostały potwierdzone w przeprowadzonym eksperymencie.



Rys. 3. Porównanie wyników eksperymentalnych (lewa strona) i numerycznych (prawa strona) propagacji fal sprężystych w kompozytach wzmacnianych krótkimi włóknami, zawartość krótkich włókien 30%, $t=0.25$ ms

II. Identyfikacja uszkodzeń – przetwarzanie pełnego pola fal Lamba

Głównym celem tych badań było opracowanie efektywnej, nieinwazyjnej metody diagnostyki cienkościennych elementów konstrukcyjnych oraz identyfikacji uszkodzeń powstałych na skutek eksploatacji lub nieprawidłowego wykonania. W szczególności skupiłem uwagę na najbardziej niebezpiecznych uszkodzeniach takich jak pęknięcie zmęczeniowe oraz delaminacja. W ramach prac badawczych opracowałem metodę przetwarzania pełnego pola fal Lamba, która umożliwia sporządzenie czytelnej mapy uszkodzeń. Na podstawie mapy uszkodzeń można oszacować wielkość i kształt uszkodzeń.

Pełne pole fal Lamba można zapisać w formie trójwymiarowej macierzy, w której dwa wymiary związane są z przestrzenią a trzeci wymiar związany jest z czasem. Odpowiada to klatkom animacji propagujących się fal Lamba na powierzchni badanej struktury. Przetwarzanie pełnego pola fal Lamba polega na przekształceniu macierzy trójwymiarowej w dwuwymiarową w taki sposób, aby uwypuklić cechy związane z uszkodzeniami. Innymi słowy efektem końcowym przetwarzania sygnałów jest mapa uszkodzeń. Położenia i wielkości uszkodzeń wizualizowane są poprzez znacznie większe amplitudy w obszarach ich występowania w stosunku do obszarów nieuszkodzonych.

Motywacją tej pracy badawczej było to, że znane z literatury metody RMS (z ang. *Root Mean Square*) prowadzą do niezbyt czytelnych map uszkodzeń i często uszkodzenia są niewykrywane. W celu poprawy wizualizacji uszkodzeń początkowo zaproponowałem metodę filtrowania sygnałów określonych w dziedzinie liczb falowych [H5] podobną w działaniu do filtrów dolno-przepustowych. Metoda ta znacząco poprawiła kontrast pomiędzy obszarami uszkodzonymi a nieuszkodzonymi. Poprawiła się również czytelność mapy uszkodzeń w porównaniu z metodą RMS. Niestety za pomocą zaproponowanej przeze mnie metody można było wykryć jedynie położenie uszkodzenia, natomiast oszacowanie jego wielkości było niemożliwe.

W dalszych pracach badawczych zaproponowałem skuteczną metodę filtrowania sygnałów zdefiniowanych w dziedzinie liczb falowych, która umożliwia wykrywanie nie tylko położenia uszkodzenia, ale również oszacowanie jego wielkości. Metoda ta była stopniowo udoskonalana i testowana na różnego rodzaju danych, czego wyrazem są publikacje [H6–H10].

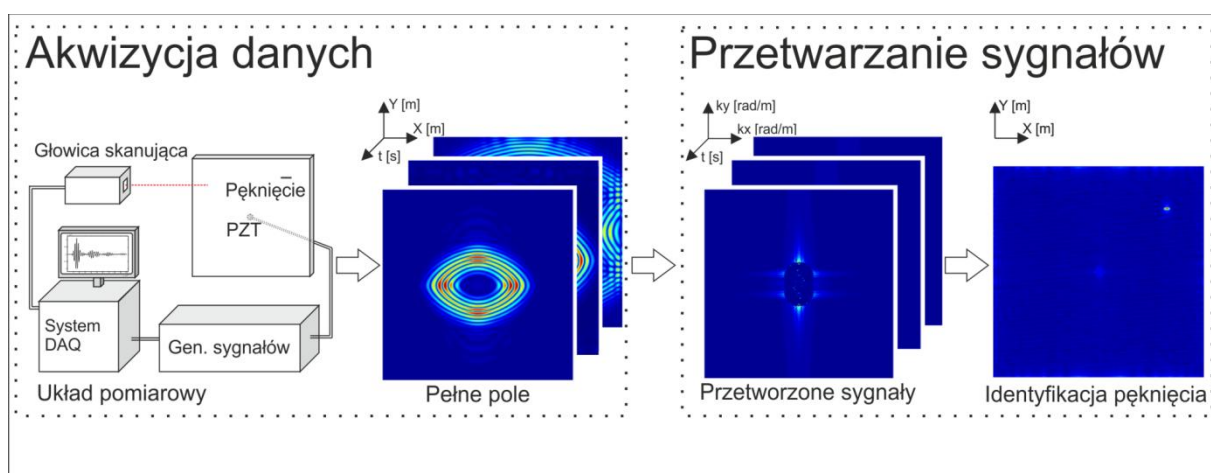
Szczegółowy opis metody filtrowania w dziedzinie liczb falowych i dyskusja

Pomiary pełnego pola fal Lamba uzyskiwane są za pomocą skanującego wibrometru laserowego. Stanowisko pomiarowe przedstawia Rys. 4. Stanowisko pomiarowe składa się z generatora sygnałów, wzmacniacza, próbki z naklejonym po przeciwnej stronie w stosunku do badanej powierzchni przetwornikiem piezoelektrycznym, głowicy wibrometru laserowego oraz systemu akwizycji danych.



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe: 1) generator sygnałów, 2) wzmacniacz, 3) próbka z naklejonym po przeciwnej stronie przetwornikiem piezoelektrycznym, 4) głowica wibrometru laserowego, 5) system akwizycji danych

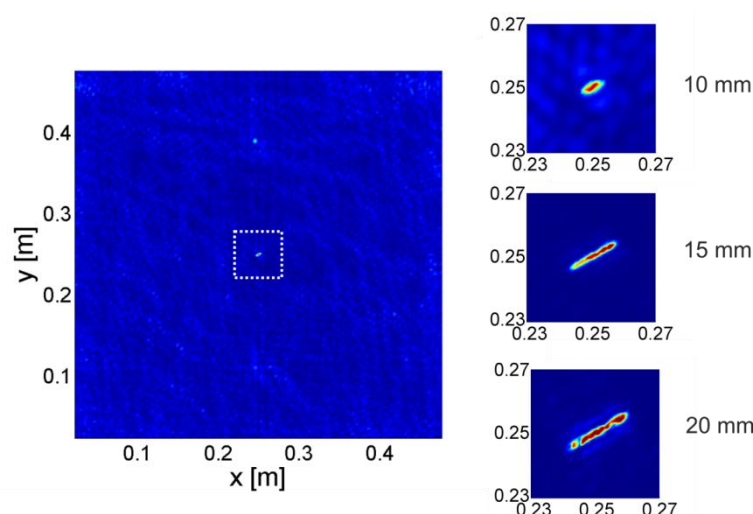
Zarejestrowane dane mają postać obrazów pełnego pola propagujących się fal sprężystych na powierzchni struktury $s(X, Y, t)$. Można je rozważać jako animację obrazów zarejestrowanych w punktach (X, Y) w chwilach czasowych $t_n, n = 1 \dots N$. Zazwyczaj trudno jest zidentyfikować uszkodzenie poprzez oglądanie animacji z powodu wielokrotnych odbić fal od elementów konstrukcyjnych i ogólnej złożoności wzorów fal. Odpowiednie przetwarzanie sygnałów takie jak opisane w pracach [H6–H10] może poprawić wizualizację uszkodzeń. Zaproponowana przeze mnie metoda wykorzystuje dwuwymiarową dyskretną transformatę Fouriera następujących po sobie obrazów pełnego pola (klatek animacji). Transformacja prowadzi do obrazów w dziedzinie liczb falowych. W dziedzinie liczb falowych stosowana jest maska filtru. Odwrotna dwuwymiarowa transformata Fouriera zastosowana do każdego z obrazów skutkuje animacją ze wzmocnionymi efektami indukowanymi przez uszkodzenia. Ostatnim krokiem algorytmu jest obliczenie wartości energii średnio kwadratowej, która bierze pod uwagę tłumienie fal sprężystych. Stąd wpływ uszkodzenia niezależny jest od położenia uszkodzenia. Poszczególne kroki algorytmu przedstawione są na Rys. 5. Elementem kluczowym algorytmu jest tworzenie maski filtru.



Rys. 5. Algorytm identyfikacji uszkodzeń bazujący na przetwarzaniu sygnałów w dziedzinie liczb falowych

Koncepcja maski filtru polega na tym, żeby uchwycić odciski cyfrowe propagujących się fal sprężystych w konstrukcji. Zarejestrowane przebiegi czasowe sygnałów można podzielić na dwa zbiory. Pierwszy zbiór odpowiada czasowi wzbudzenia fal oraz formacji frontu fal i złożony jest z $1 \dots N_e$ klatek. Drugi zbiór zawiera pozostałe $N_e + 1 \dots N$ klatki. Zakłada się, że w pobliżu źródła wzbudzenia fal (np. przetwornika piezoelektrycznego) uszkodzenie nie występuje. Innymi słowy nie ma interakcji frontu fal z uszkodzeniem w klatkach $1 \dots N_e$. Jeśli założenie to jest prawdziwe, klatki ze zbioru $1 \dots N_e$ mogą zostać użyte jako odcisk cyfrowy propagujących się fal sprężystych w strukturze bez konieczności akwizycji sygnałów referencyjnych. Można tego dokonać efektywnie w dziedzinie liczb falowych poprzez obliczenie średniej wartości wybranych obrazów pełnego pola. Reasumując filtrowanie w dziedzinie liczb falowych opiera się na koncepcji, że większość składników propagujących się fal, które pasują do odcisku cyfrowego jest usuwanych ze wzorca fal. Pozostają

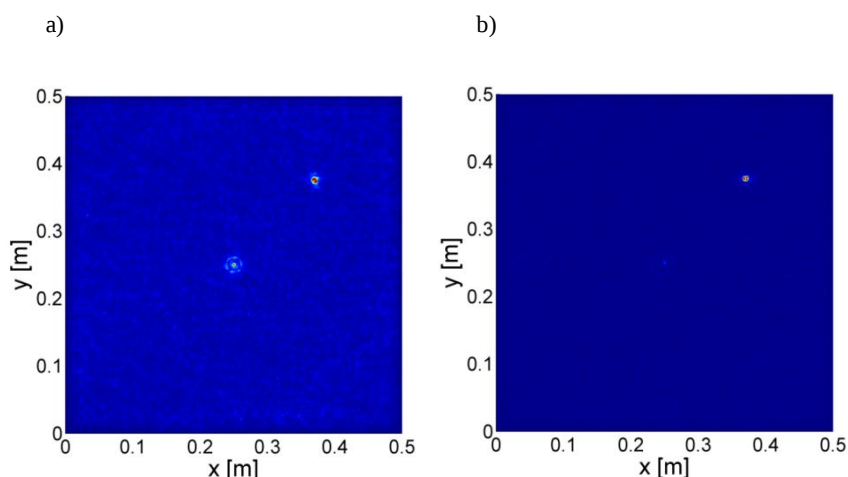
tylko te komponenty, które związane są z anomaliami (spowodowanymi np. przez występowanie uszkodzeń).



Rys. 6. Mapa uszkodzeń bazująca na danych numerycznych obrazująca zdolność zaproponowanej metody do oszacowania wielkości pęknięcia (powiększone obrazy) [H10]

Przykładowe wyniki zastosowania opisanej metody przedstawione są na Rys. 6 i Rys. 7. Dane służące do wygenerowania map uszkodzeń pochodzą z symulacji numerycznych. Rys. 6 przedstawia mapę obrazującą pęknięcie zmęczeniowe w aluminiowej płycie o grubości 1 mm. Mapa uszkodzeń charakteryzuje się dwoma obszarami o zwiększonej amplitudzie. Pierwszy z obszarów związany jest z miejscem wzbudzenia fal za pomocą przetwornika piezoelektrycznego (jasny punkt o współrzędnych 0.243 m, 0.403 m). Drugi z obszarów związany jest z pęknięciem zmęczeniowym (obszar środkowy płyty). Przeprowadziłem trzy symulacje numeryczne, w których pęknięcie zmęczeniowe o różnej długości modelowane było przez rozdzielanie węzłów odpowiednich elementów spektralnych. Powiększone obrazy na Rys. 5 dowodzą, że za pomocą opracowanego algorytmu można oszacować długość pęknięcia z bardzo dużą dokładnością.

Rys. 7 przedstawia wizualizację delaminacji o rozmiarze planarnym 10 na 10 mm. Badałem przypadki symetrycznego i niesymetrycznego położenia delaminacji względem grubości płyty kompozytowej. Współrzędne środka delaminacji to (0.375 m, 0.375 m). Otrzymane wyniki świadczą o bardzo dużej skuteczności opracowanej przeze mnie metody. Istotne jest również to, że badanym materiałem był kompozyt wzmocniany krótkimi włóknami. Krótkie włókna wprowadzają dodatkowe zaburzenia w propagujących się falach sprężystych, a mimo to zaproponowana przeze mnie metoda poprawnie wskazuje położenie i wielkość delaminacji.

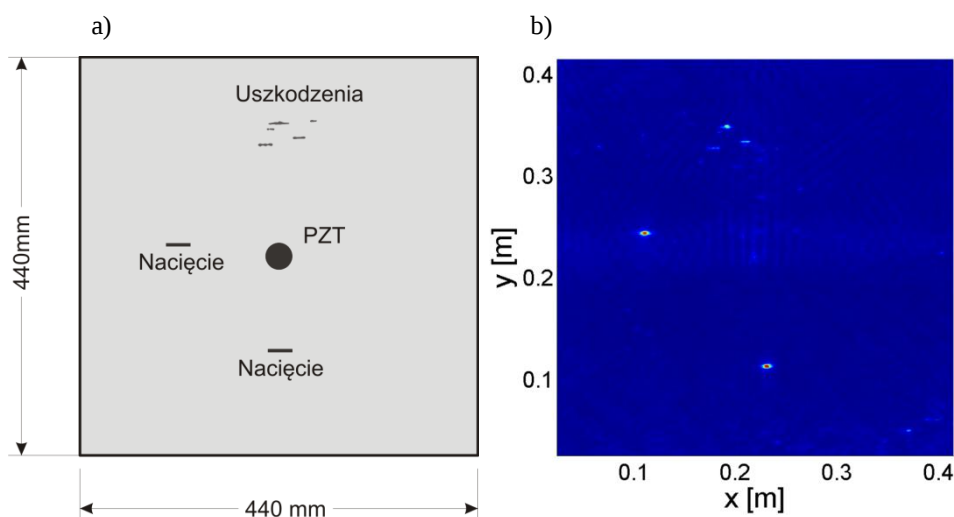


Rys. 7. Wizualizacja delaminacji w kompozycie wzmacnianym krótkimi włóknami dla delaminacji umieszczonej (a) symetrycznie, (b) niesymetrycznie względem grubości kompozytu [H4]

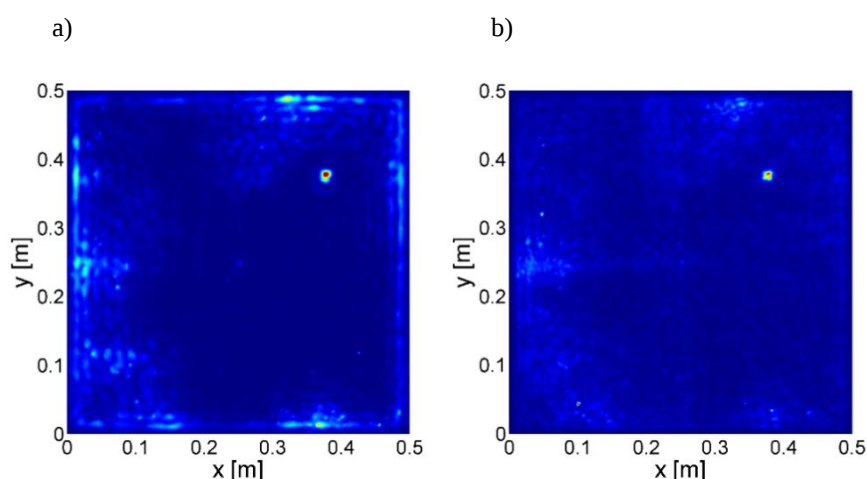
Należy dodać, że w dalszych pracach badawczych koncepcja filtrowania w dziedzinie liczb falowych została rozszerzona o kompensację amplitudy fal [H8, H10]. Kompensacja amplitudy fal niweluje efekty tłumienia fal. Dzięki temu anomalie spowodowane uszkodzeniami mają taki sam udział w mapie uszkodzeń niezależnie od odległości od źródła wzbudzenia fal.

Przedstawione powyżej metody wizualizacji uszkodzeń testowane były również w warunkach laboratoryjnych na różnego rodzaju próbkach, zarówno metalowych jak i kompozytowych. Wybrane wyniki przedstawiają Rys. 8–9. Na Rys. 8(a) pokazana jest próbka kompozytowa o grubości 3.2 mm ze sztucznie wprowadzonymi dwoma nacięciami na głębokość 2 mm oraz defektami powstałymi podczas procesu wytwarzania. Pomiaru wibrometrem laserowym prowadzone były na powierzchni próbki przeciwnej do powierzchni z defektami. Zastosowanie zaproponowanej metody uwidoczniało wszystkie defekty (Rys. 8(b)). Należy zwrócić uwagę, że jedno z nacięć znajduje się prostopadle do frontu fal wzbudzanego przez przetwornik piezoelektryczny. Jest to jeden z najtrudniejszych do wykrycia przypadków, ponieważ takie położenie nacięcia względem frontu fal powoduje, że odbicia fal sprężystych od uszkodzenia nie występują. Mimo to zaproponowana metoda jest skuteczna, ponieważ wykorzystuje również odbicia fal sprężystych od krawędzi płyty, które propagują w kierunku nacięcia pod innym kątem, co skutkuje tym, że w miejscu uszkodzenia powstają fale odbite.

Kolejny przykład zastosowania to detekcja ubytku w bardzo trudnym do analizy materiale jakim jest kompozyt wzmacniany krótkimi włóknami. Ubytek został wprowadzony sztucznie na głębokość około połowy grubości próbki. Kształt ubytku był kwadratowy o długości boku 15 mm. Wyniki działania algorytmu dla dwóch częstotliwości sygnałów wzbudzenia w postaci sinusoidy modulowanej oknem Hanninga z pięcioma cyklami zostały przedstawione na Rys. 9. Zarówno dla częstotliwości centralnej wzbudzenia 16.5 kHz (Rys. 9(a)) jak i 50 kHz (Rys. 9(b)) położenie i wielkość uszkodzenia zostały prawidłowo wskazane.



Rys. 8. Identyfikacja wielu uszkodzeń w płycie kompozytowej a) scenariusz uszkodzeń, b) mapa uszkodzeń [H10]



Rys. 9. Wizualizacja uszkodzeń w płycie kompozytowej wzmocnionej krótkimi włóknami poprzez zastosowanie metody filtrowania w dziedzinie liczb falowych a) wzbudzenie o częstotliwości centralnej 16.5 kHz, b) wzbudzenie o częstotliwości centralnej 50 kHz.
Uszkodzenie w postaci ubytku materiału o rozmiarze planarnym 15x15 mm [H10]

Opracowane przeze mnie algorytmy wizualizacji uszkodzeń testowane były również w celu wykrycia niedoklejenia usztywnienia w konstrukcjach kompozytowych jak i uszkodzenia fragmentu rdzenia konstrukcji typu plaster miodu. Uzyskano zadowalające rezultaty, co ma niebagatelne znaczenie, ponieważ tego typu konstrukcje znajdują szerokie zastosowanie zwłaszcza w przemyśle lotniczym i kosmicznym.

Reasumując opracowane przeze mnie algorytmy wizualizacji uszkodzeń znajdują zastosowanie w nieinwazyjnej inspekcji szerokiego spektrum materiałów wykonanych ze stopów metali lub kompozytów.

Przeprowadzone badania i analiza porównawcza z innymi dostępnymi w literaturze metodami wykazały, że jest to obecnie prawdopodobnie najlepsza na świecie metoda przetwarzania i filtrowania pełnego pola fal Lamba [H9]. Odznacza się cechami takimi jak:

- duża dokładność w identyfikowaniu położenia i wielkości uszkodzenia oraz czytelność uzyskanych wyników,
- brak konieczności stosowania sygnałów referencyjnych, a co za tym idzie brak wpływu czynników zewnętrznych takich jak temperatura czy zawilgocenie,
- wykorzystanie wielokrotnych odbić fal w algorytmie identyfikacji, dzięki czemu uszkodzenia można wykrywać niezależnie od ich orientacji względem źródła fal,
- brak występowania tzw. stref martwych, w których detekcja uszkodzeń jest niemożliwa,
- kompensacja zjawiska tłumienia fal,
- szybkość działania dzięki wykorzystaniu szybkiej transformaty Fouriera,
- możliwość pełnej automatyzacji.

Podsumowując, do oryginalnych moich osiągnięć podczas realizacji badań mogę zaliczyć:

- Zaproponowanie i implementację trójwymiarowych elementów spektralnych uwzględniających sprzężenie elektromechaniczne.
- Opracowanie narzędzia służącego do określania zakresu stosowalności trójwymiarowego elementu spektralnego o zadanym rzędzie aproksymacji.
- Implementację równoległą metody elementów spektralnych na procesorach GPU wliczając w to nowy algorytm tzw. kolorowania siatki.
- Opracowanie iteracyjnego algorytmu obliczania stałych sprężystych w kompozytach wzmacnianych losowo ukierunkowanymi krótkimi włóknami.
- Opracowanie skutecznej metody filtrowania w dziedzinie liczb falowych, która umożliwia wykrywanie nie tylko położenia uszkodzenia, ale również oszacowanie jego wielkości.
- Wykonanie serii badań diagnostycznych różnych materiałów kompozytowych poprzez zastosowanie metody przetwarzania pełnego pola fal sprężystych w dziedzinie liczb falowych umożliwiającą scharakteryzowanie integralności materiału.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych).

W nawiasach kwadratowych podano odniesienia do publikacji zamieszczonych w „Wykazie opublikowanych prac naukowych lub twórczych” w punkcie II „Wykaz innych nie wchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w pkt I opublikowanych prac naukowych oraz wskaźniki dokonań naukowych.

W ramach mojej pracy doktorskiej zajmowałem się tematyką związaną z zastosowaniem sieci przetworników piezoelektrycznych do detekcji i lokalizacji uszkodzeń w konstrukcjach cienkościennych. Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem badania w tematyce sieci

przetworników piezoelektrycznych i fal Lamba. Badałem skupione [PD1–PD3, PDe3] i rozproszone [PDe1] konfiguracje czujników piezoelektrycznych. Kontynuowałem również prace badawcze związane z zagadnieniami modelowania zjawiska propagacji fal sprężystych i ich interakcji z uszkodzeniami, zwłaszcza w laminatach [PDe2, PDe4]. Podsumowanie tej działalności badawczej znalazło wyraz w publikacji rozdziału w monografii [PDe5] oraz powstaniu monografii [PDe6], których jestem współautorem.

W ramach badań zleconych przez firmę Boeing Research and Technology Europe S.L. prowadziłem badania analityczne i numeryczne zachowania się fal sprężystych generowanych i rejestrowanych przez przetworniki piezoelektryczne typu MFC (z ang. *Macro Fiber Composites*) w układach rozet. Efektem tej współpracy są dwie ekspertyzy oraz udzielenie patentu na skalę międzynarodową (patent nr EP 2485026 A1 oraz 20120203474 A1 „System monitorowania konstrukcji”). Mój wkład w powstanie patentu polegał na opracowaniu algorytmu lokalizacji uszkodzeń bazującym na układzie rozet MFC i znajomości prędkości grupowej fali Lamba.

Istotnym elementem systemów monitorowania konstrukcji bazujących na układach przetworników piezoelektrycznych oraz anomaliach fal Lamba jest wpływ czynników zewnętrznych na generowane i rejestrowane sygnały. Podczas rocznego stypendium na Uniwersytecie Stanforda wraz z zespołem Prof. Fu-Kuo Changa badałem wpływ temperatury, zawilgocenia oraz obciążeń zewnętrznych na zachowanie propagujących się fal Lamba. Prace te realizowane były w ramach stypendium KOLUMB ufundowane przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej.

Szczególnie istotny jest wpływ temperatury, która zmienia fazę oraz amplitudę sygnałów. Tematyka ta była przedmiotem przewodu doktorskiego Codruta Alexandru Dan prowadzonego w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN, którego byłem promotorem pomocniczym. Doktorant opracował m.in. metodę kompensacji wpływu temperatury na zmianę fazy rejestrowanych sygnałów. Kompensacja w istotny sposób poprawiła skuteczność detekcji i lokalizacji uszkodzeń w konstrukcjach. Przeprowadzone badania wykazały, że bez kompensacji wskazania lokalizacji uszkodzeń, uzyskane za pomocą standardowych algorytmów są nieprawidłowe. Rozprawa doktorska została obroniona z wyróżnieniem, co uważam za swój sukces dydaktyczny.

Poza głównymi tematami badawczymi, które są przedmiotem autoreferatu zajmuję się również badaniami z zakresu metamateriałów, które prowadzę we współpracy z Marco Miniaci (Uniwersytet w Bolonii, a obecnie Uniwersytet w Turynie). Badania dotyczą własności akustycznych metamateriałów. Współpraca jest realizowana w ramach projektu NCN – Harmonia (UMO-2012/06/M/ST8/00414).

Równolegle z badaniami, które są przedmiotem autoreferatu prowadzę badania nad detekcją imperfekcji w różnego rodzaju materiałach kompozytowych, takich jak kompozyty przekładkowe typu plaster miodu oraz z wypełnieniem „3D core”, PVC i balsa. Badania prowadzone są w ramach projektu we współpracy z zespołem Uniwersytetu w Bolonii. W projekcie analizowane są niedoskonałości materiału takie jak delaminacje, mikropęknięcia oraz zawilgocenia.

W ramach współpracy z naukowcami Uniwersytetu w Bolonii (Luca de Marchi i Alessandro Marzani) oraz Uniwersytetu Goethego we Frankfurcie (Jochen Moll) opracowana została interesująca metoda kodowania i przetwarzania sygnałów pełnego pola wzbudzanych przez kilka przetworników

piezoelektrycznych jednocześnie. Jak do tej pory pojawiło się jedno doniesienie konferencyjne na ten temat, którego jestem współautorem. Rozwinięcie tej metody zostało zgłoszone do publikacji w czasopiśmie Mechanical Systems and Signal Processing.

Moje najnowsze prace badawcze skupiają się wokół dwóch projektów badawczych, w których aktualnie jestem wykonawcą. Jednym z projektów jest projekt NCN – Maestro (DEC-2013/10/A/ST8/0007) zatytułowany: „Wzbudzenie i kontrola fal mechanicznych w ośrodkach nieliniowych”. W projekcie badane są możliwości skupiania fal sprężysto–akustycznych za pomocą soczewek zbudowanych z układów periodycznych (kryształów fononicznych) celem wytworzenia „pocisków dźwiękowych” (ciśnienia akustycznego skupionego w małej objętości). Badania dotyczą wzbudzenia fal sprężysto–akustycznych za pomocą przetworników piezoelektrycznych, umożliwiających kontrolę wzbudzenia (przesunięcie fazowe oraz amplituda). Zakłada się, że dzięki odpowiednio dobranym rozmiarom kryształów i kontrolowanemu wzbudzeniu fal możliwe jest skupienie fali w powietrzu znajdującym się poza soczewką akustyczną. Moim zadaniem jest modelowanie zjawiska propagacji fal sprężysto–akustycznych oraz projektowanie stanowiska badawczego.

Drugi z projektów związany jest z badaniem materiałów samo–naprawialnych w elementach konstrukcji autonomicznej ratunkowej platformy transportowej. Zastosowanie materiałów samo–naprawialnych ma na celu umożliwienie dokończenia zadania mimo trudnych warunków zewnętrznych oddziałujących na platformę, prowadzących do pojawiania się uszkodzeń. Uszkodzenia te zostaną samo–naprawione dzięki własnościom zastosowanych kompozytów natychmiast po ich powstaniu bez ingerencji z zewnątrz. Prowadzone badania przez zespół IMP PAN ukierunkowane są na opracowanie metod oszacowania efektywności samo–naprawienia, tak aby można było stwierdzić czy konstrukcja platformy kołowej jest bezpieczna i można ją wykorzystać do realizacji kolejnego zadania transportowego. Do oceny efektywności samo–naprawienia mają służyć wskaźniki uszkodzeń określone na drodze prób zmęczeniowych. Projekt wykonywany jest we współpracy z Politechniką Warszawską. Współpraca jest realizowana w ramach projektu NCBiR (PBS3/A9/30/2015). Obecnie prowadzone są badania na stanowisku badawczym zaprojektowanym według mojego pomysłu. Po seriach cykli zmęczeniowych przeprowadzane są pomiary pełnego pola fal Lamba za pomocą skanującego wibrometru laserowego. Dla każdego pomiaru wykonywana jest mapa uszkodzeń. Mapy uszkodzeń będą stanowić dane wejściowe do systemu wnioskowania o stanie technicznym konstrukcji platformy ratunkowej. Zespół IMP PAN ma za zadanie opracować metodologię oceny efektywności naprawienia materiału samo–naprawiającego, w postaci wskaźników otrzymywanych w sposób nieinwazyjny.

Wymienione powyżej badania są aktualne, unikatowe i będą kontynuowane.



Podpis