

Autoreferat

Przedstawiający dorobek i osiągnięcie naukowe w szczególności określone w 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)

dr inż. Maciej Wojciech Radzieński

Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk

Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych

ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk

Gdańsk, 2019

1. Imię i Nazwisko

Maciej Wojciech Radzieński

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

- 2015** **Doktor** nauk technicznych, dyscyplina: Automatyka i Robotyka, Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, data otrzymania: 2015-10-13, tytuł rozprawy: „Cyfrowe przetwarzanie sygnałów wibracyjnych w detekcji uszkodzeń elementów konstrukcji”, Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Marek Krawczuk
- 2007** **Magister**, dyscyplina: elektrotechnika, specjalność: komputerowe systemy sterowania, Akademia Morska w Gdyni, data otrzymania: 2007-11-07, tytuł pracy magisterskiej: „Cyfrowe przetwarzanie obrazów w środowisku Mathcad”, Opiekun pracy: dr inż. Krystyna Noga
- 2006** **Inżynier**, dyscyplina: elektrotechnika, specjalność: komputerowe systemy sterowania, Akademia Morska w Gdyni, data otrzymania: 2006-03-08, tytuł pracy inżynierskiej: „Opracowanie oprogramowania do przeliczania parametrów modeli statków”, Opiekun pracy: prof. dr hab. inż. Roman Śmierzchalski

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

Obecne miejsce zatrudnienia:

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

Historia zatrudnienia:

- | | |
|------------------------|---|
| 1.11.2015 – obecnie | Adiunkt w Zakładzie Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN |
| 1.05.2011 – 31.10.2015 | Asystent w Zakładzie Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN |
| 1.09.2010 – 30.04.2011 | Specjalista w Zakładzie Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN |
| 1.10.2008 – 30.09.2013 | Doktorant prowadzący zajęcia dydaktyczne w Katedrze Robotyki i Systemów Mechatroniki, wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej |

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. 2017 r. poz. 1789):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Jako osiągnięcie naukowe wskazuję cykl **9 publikacji** oraz **1 patentu** powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:

„Przetwarzanie i analiza sygnałów stojących i propagujących się fal sprężystych w cienkościennych elementach konstrukcji celem identyfikacji uszkodzeń mechanicznych”

b) wykaz prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Wybrany cykl prac powiązanych tematycznie składa się z **9 publikacji i 1 patentu**. Prace te powstały w wyniku badań realizowanych w ramach polskich i międzynarodowych projektów. W skład cyklu wchodzi następujące pozycje:

- **6** artykułów opublikowanych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR),
- **1** rozdział w monografii anglojęzycznej opublikowanej za granicą,
- **1** artykuł, który jest zamieszczony w wydawnictwie pokonferencyjnym SPIE, które występuje w bazie Web of Science. Konferencja SPIE należy do czołowych w mojej tematyce badań
- **1** artykuł, który jest zamieszczony w wydawnictwie pokonferencyjnym European Workshop On Structural Health Monitoring. Konferencja EWSHM należy do czołowych w mojej tematyce badań,
- **1** patent.

Cykl **10** prac przedstawiono jest poniżej:

- Z1. Runbo Bai, **Maciej Radzieński**, Maosen Cao, Wiesław Ostachowicz, Zhongqing Su, 2015, *Non-baseline identification of delamination in plates using wavelet-aided fractal analysis of two-dimensional mode shapes*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, tom: 26(17), strony: 2338-2350, (IF: **1.975** - rok **2015**).

Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- Z2. **Maciej Radzieński**, Paweł Kudela, Wiesław Ostachowicz, 2016, *Assessment of honeycomb core condition in composite sandwich panels by means of guided waves*, 8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), 10 stron. (**Scopus**)

Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- Z3. Runbo Bai, Wiesław Ostachowicz, **Maciej Radzieński**, Maosen Cao, 2016, *Vibrational damage detection using fractal surface singularities with noncontact laser measurement*, Journal of Vibration and Control, tom: 22(11), strony: 2569-2581, (IF: 2.101 - rok 2016).

Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- Z4. Zhibo Yang, **Maciej Radzieński**, Paweł Kudela, Wiesław Ostachowicz, 2016, *Two-dimensional modal curvature estimation via Fourier spectral method for damage detection*, Composite Structures, tom: 148, strony: 155-167, (IF: 3.858 – rok 2016).

Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- Z5. Zhibo Yang, **Maciej Radzieński**, Paweł Kudela, Wiesław Ostachowicz, 2017, *Two-dimensional Chebyshev pseudo spectral modal curvature and its application in damage detection for composite plates*, Composite Structures, tom: 168, strony: 372-383, (IF: 4.101 – rok 2017).

Mój udział procentowy szacuję na 30%.

- Z6. **Maciej Radzieński**, Maosen Cao, Wei Xu, Paweł Kudela, Wiesław Ostachowicz, 2107, *Combined vibration and guided wave-based approach for composite panels health assessment*, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2017, tom: 10170, numer artykułu: 101702D, 8 stron, (Web of Science, Scopus).

Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- Z7. Paweł Kudela, **Maciej Radzieński**, Wiesław Ostachowicz, 2018, *Impact induced damage assessment by means of Lamb wave image processing*, Mechanical Systems and Signal Processing, tom: 102, strony: 23-36 (IF: 4.370 – rok 2017).

Mój udział procentowy szacuję na 45%.

- Z8. Paweł Kudela, **Maciej Radzieński**, Wiesław Ostachowicz, Zhibo Yang, 2018, *Structural Health Monitoring system based on a concept of Lamb wave focusing by the piezoelectric array*, Mechanical Systems and Signal Processing, tom: 108, strony: 21-32 (IF: 4.370 – rok 2017).

Mój udział procentowy szacuję na 40%.

- Z9. Wiesław Ostachowicz, Paweł Kudela, **Maciej Radzieński**, Zhibo Yang, 2018, *Sposób detekcji i lokalizacji uszkodzeń w elementach konstrukcji*, Polska, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej (Patent PL419718-A1).

Mój udział procentowy szacuję na 25%.

Z10. Wiesław Ostachowicz, **Maciej Radzieński**, Maosen Cao, Wei Xu, 2018, *Novel Techniques for Damage Detection Based on Mode Shape Analysis*, Computational and Experimental Methods in Structures - Vol. 10: Vibration-Based Techniques for Damage Detection and Lokalizator in Engineering Structures, ed. Ali S Nobari, M H Ferri Aliabadi, World Scientific Europe, strony: 173 – 196. ISBN 978-1-78634-496-0 (rozdział w monografii), **(Scopus)**.

Mój udział procentowy szacuję na 80%.

Ze względu na interdyscyplinarny, w tym międzynarodowy, charakter prowadzonych przeze mnie badań, na cykl prac powiązanych tematycznie składają się prace, w których jestem współautorem, jednak mój udział merytoryczny w każdej z nich był znaczący.

Zajmowałem się sformułowaniem problemu naukowego, opracowaniem metodyki badań i planu badań, przygotowaniem próbek i stanowiska pomiarowego do badań, przeprowadzeniem badań eksperymentalnych, opracowaniem algorytmów przetwarzania i analizy sygnałów oraz ich zaprogramowaniem, opracowaniem i interpretacją wyników badań, przygotowaniem tekstu i rysunków zawartych w artykułach.

Oświadczenia współautorów publikacji zostały dołączone do wniosku.

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

WSTĘP

Wszystkie konstrukcje pogarszają swój stan techniczny w raz z upływem czasu. Na proces degradacji mają wpływ czynniki takie jak: warunki środowiskowe, cykliczne obciążenia oraz zdarzenia krytyczne takie jak uderzenie pioruna czy trzęsienie ziemi. Z tego powodu obiekty inżynierskie powinny podlegać kontroli ich stanu technicznego zarówno w kontekście badań okresowych jak i wymuszonych zdarzeniem. W celu oceny stanu technicznego konstrukcji wykonuje się inspekcje wizualne oraz wykorzystuje się nieniszczące metody detekcji uszkodzeń (NDT z ang. *Nondestructive Testing*). Inspekcje wizualne wymagają pełnego dostępu do badanej konstrukcji, są czasochłonne i pozwalają na wykrycie jedynie widocznych uszkodzeń takich jak pęknięcia czy ubytki materiału. Z tego powodu od lat rozwijane są metody NDT, które pozwalają na wykrywanie uszkodzeń z dużą dokładnością, skrócenie czasu potrzebnego na przeprowadzenie inspekcji, a tym samym na obniżenie kosztów oraz umożliwiają wykrywanie uszkodzeń podpowierzchniowych. Przeprowadzenie takiej oceny wiąże się jednak z wyłączeniem konstrukcji na czas badań. Dlatego równoległe do metod NDT, rozwijane są metody monitorowania stanu technicznego konstrukcji (SHM z ang. *Structural Health Monitoring*). Ich celem jest wykrywanie zmian stanu technicznego konstrukcji w sposób ciągły, bez konieczności wyłączania obiektu z eksploatacji. Realizacja systemów SHM polega na stałym zintegrowaniu z konstrukcją sieci czujników, których sygnały są rejestrowane i analizowane w sposób ciągły przez dedykowane algorytmy.

W ramach prowadzonych przez mnie prac badawczych rozwijałem metody detekcji, lokalizacji i oceny uszkodzeń bazujące na przetwarzaniu i analizie sygnałów pełnego pola

stojących i propagujących się fal sprężystych, pobudzanych przez przetwornik piezoelektryczny i rejestrowanych przez wibrometr laserowy. Podejście takie należy zaliczyć do metod NDT. Dodatkowo zajmowałem się opracowaniem metody detekcji i lokalizacji uszkodzeń, której zasada działania polega na wzbudzaniu i rejestrowaniu fal sprężystych przez układ czujników piezoelektrycznych. Opracowane rozwiązanie, będąc na stałe zintegrowane z konstrukcją może pracować w sposób ciągły, realizując zadania systemu SHM.

Metody wibracyjne rozwijane są przez ośrodki badawcze na całym świecie od dwóch dekad. Istotą tych metod jest analiza zmian parametrów modalnych struktury, spowodowanych wystąpieniem uszkodzenia. Tradycyjnie badania te opierały się na rejestracji odpowiedzi układu w ograniczonej liczbie punktów, najczęściej wykorzystując do tego celu akcelerometry. W ostatnich dwóch dekadach m. in. za sprawą pojawienia się wibrometrów laserowych, zmieniło się podejście do tych technik. Dzięki możliwości bezkontaktowego pomiaru drgań w niemal dowolnie gęstej siatce pomiarowej, możliwe stało się wykrywanie i lokalizacja uszkodzeń z dużo większą dokładnością, a także możliwość dokładnej oceny ich wielkości. Jednak, aby w pełni wykorzystać zalety nowych technik pomiarowych w systemach NDT niezbędne stało się opracowanie skutecznych metod przetwarzania i analizy tych sygnałów. Ma to szczególnie istotne zastosowanie w przypadku elementów płytowych, gdzie wykorzystanie metod przetwarzania obrazów pozwala na zwiększenie skuteczności identyfikacji uszkodzeń jednocześnie minimalizując ilość błędnych detekcji (z ang. *false alarms*) oraz pozwala na dokładną ocenę wielkości uszkodzenia.

Inną intensywnie rozwijaną nieniszczącą metodą detekcji i lokalizacji uszkodzeń jest metoda bazująca na pomiarze i analizie pełnego pola propagujących się fal sprężystych. Propagujące się fale sprężyste są bardzo czułe na wszelkiego rodzaju nieciągłości materiału. Pojawienie się uszkodzenia, takiego jak pęknięcie, delaminacja, rozklejenie elementów, korozja, itp., powoduje powstanie zmian w amplitudzie, prędkości, kierunku czy długość propagujących się fal. Dodatkowo wystąpić mogą zjawiska takie jak odbicie fali, konwersja modów na krawędzi uszkodzenia czy zatrzymanie część energii fali wewnątrz obszaru o lokalnej zmianie geometrii lub własności mechanicznych. Analiza tych zmian pozwala na wykrywanie, lokalizowanie oraz ocenę wielkości uszkodzenia elementu konstrukcji.

Wadą zastosowania wibrometrii laserowej jest to, że pomiar wykonywany jest punkt po punkcie, co prowadzi do wydłużenia czasu pomiaru wraz ze wzrostem ilości punktów pomiarowych. Problem ten dotyczy zarówno metod wibracyjnych jak i bazujących na pomiarze propagujących się fal sprężystych. Jednak z dużym prawdopodobieństwem można powiedzieć, że w przyszłości wielopunktowe pomiary umożliwią wykonywanie tego typu inspekcji w bardzo krótkim czasie zapewniając obecnie osiągnięty poziom dokładności. Już trwają prace nad systemami luster umożliwiającymi skanowanie całej powierzchni samolotu w hangarach przeglądowych. Implementacja tego typu metod inspekcji umożliwi zmniejszenie kosztów przeprowadzania przeglądów, zmniejszenie czasu potrzebnego na ich wykonanie oraz zwiększenie ich dokładności. Dodatkowo umożliwi częstszą okresową ocenę wzrastających uszkodzeń, by wyznaczyć i monitorować pozostały czas bezpiecznej pracy konstrukcji.

Zjawisko propagacji fal sprężystych jest stosowane także w systemach SHM. Układ czujników piezoelektrycznych zamontowanych na badanym elemencie wykorzystywany jest zarówno do wzbudzania jak i rejestrowania fal sprężystych. Pojawiające się zmiany w sygnałach przejścia fali

sprężystej pomiędzy czujnikami, bądź pojawienie się dodatkowych odbić fal, wracających do wzbudnika i/lub sąsiadujących przetworników może być wykorzystywane do detekcji i lokalizacji uszkodzenia.

Warto nadmienić, że systemy NDT i SHM nie stanowią dla siebie konkurencji, a mogą nawzajem uzupełniać się. Wspomniany system SHM, którego działanie polega na zintegrowaniu na stałe w konstrukcji układu czujników PZT może stanowić źródło wzbudzenia dla metod analizy pełnego pola (NDT) podczas okresowej inspekcji. Informacja diagnostyczna z systemu SHM, może także stanowić podstawę do wykonania szczegółowej inspekcji o zawężonym obszarze badań.

Rozwijane przeze mnie metody NDT i SHM wykorzystują fakt, że zmiany w badanym materiale powstałe na skutek wystąpienia uszkodzenia, wywołują zmiany zarówno we wzbudzanych falach stojących jak i propagujących się w obecności tych uszkodzeń. Śledzenie zmian rejestrowanych sygnałów i ich odpowiednia analiza pozwala na wykrywanie uszkodzeń oraz ocenę stanu technicznego badanego obiektu. Metody te rozwijane są przez ośrodki naukowe na całym świecie. Zagadnienie NDT i SHM środków transportu, infrastruktury morskiej i lądowej jest istotne z punktu widzenia ich użytkowników i twórców, ponieważ ma na celu zapewnienie bezpiecznej eksploatacji oraz zmniejszenie kosztów użytkowania.

OPIS METODYKI BADAŃ ORAZ DYSKUSJA

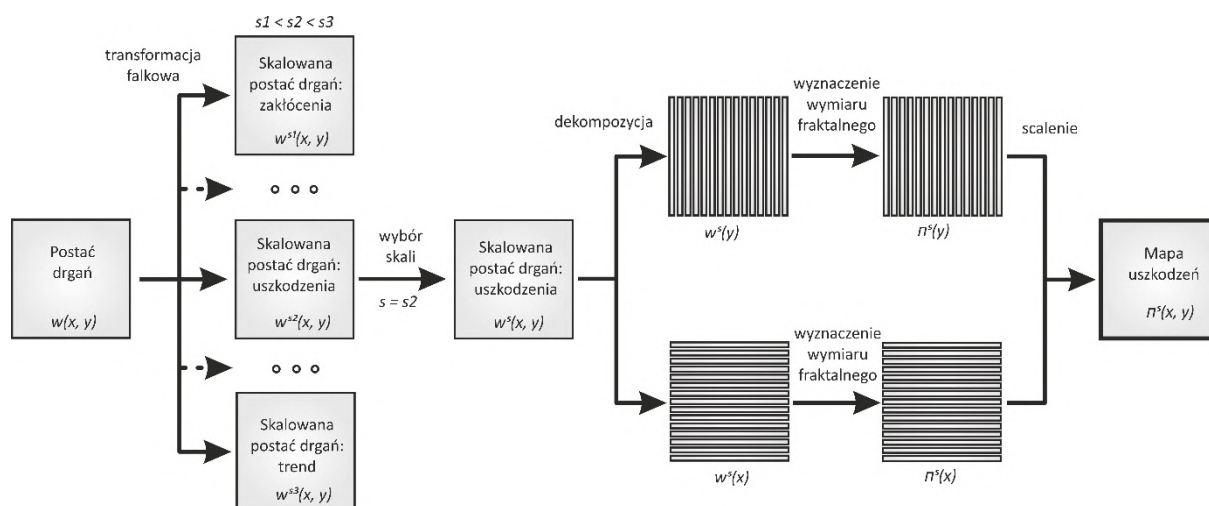
Omówienie metodyki badań i uzyskanych wyników podzielono na trzy grupy, biorąc pod uwagę wykorzystywane zjawisko w identyfikacji uszkodzeń. Pierwsza część dotyczy przetwarzania i analizy fal stojących, druga część opisuje metody wykorzystujące pomiar propagujących się fal, a trzecia część przedstawia metodę łączącą oba te zjawiska.

I. Fale stojące – metody wibracyjne

Głównym celem tych badań było opracowanie efektywnych metod detekcji, lokalizacji i oceny wielkości uszkodzeń elementów płytowych. Proponowane metody bazują na analizie postaci drgań mierzonych w gęstej siatce pomiarowej metodą wibrometrii laserowej i nie wymagają danych referencyjnych badanych struktur.

W pracy [Z1] zaproponowana została metoda identyfikacji delaminacji i ubytków materiału laminatu zbrojonego włóknem szklanym. W przedstawionym podejściu przyjęto założenie, że postać drgań uszkodzonego laminatu może być przedstawiona jako suma trzech składowych: komponentu zawierającego zakłócenia, komponentu zawierającego informację o uszkodzeniu oraz głównego trendu postaci drgań. W celu rozdzielania poszczególnych składowych, badane postacie drgań zostały poddane analizie falkowej. W zależności od przyjętej skali przekształcenia falkowego, możliwe jest rozdzielenie trzech wyżej wymienionych komponentów. Duże wartości współczynnika skali odpowiadają małym wartościom liczb falowych i reprezentują trend postaci drgań, średnie wartości skali zawierają informację o lokalnych zmianach w postaci drgań spowodowanych nieciągłościami badanej próbki, natomiast małe wartości skali odpowiadające dużym wartością liczb falowych reprezentują zakłócenia. W pracy [Z1] wykazano, że dobór odpowiedniej wartości skali pozwala na ekstrakcję komponentu zawierającego informację o uszkodzeniach, eliminując w znacznej mierze pozostałe składowe analizowanych sygnałów.

Jednak wpływ badanych uszkodzeń laminatu ze zbrojeniem szklanym był na tyle niewielki, że nawet nieznaczna część informacji z pozostałych komponentów mogła utrudniać wytypowanie miejsca uszkodzenia w sposób jednoznaczny. Z tego powodu skalowana postać drgań została w dalszej kolejności poddana analizie fraktalnej. Skalowana postać drgań jest dzielona na serię poziomych i pionowych linii. Dla każdej z linii wyznaczana jest wartość wymiaru fraktalnego Katz'a (KFD – z ang. *Katz's Fractal Dimension*). Połączenie wszystkich KFD wyznaczonych dla poziomych i pionowych linii skalowanej postaci drgań wykorzystywane jest do utworzenia końcowej mapy uszkodzeń. Algorytm działania zaproponowanej metody przedstawiono na Rys. 1.

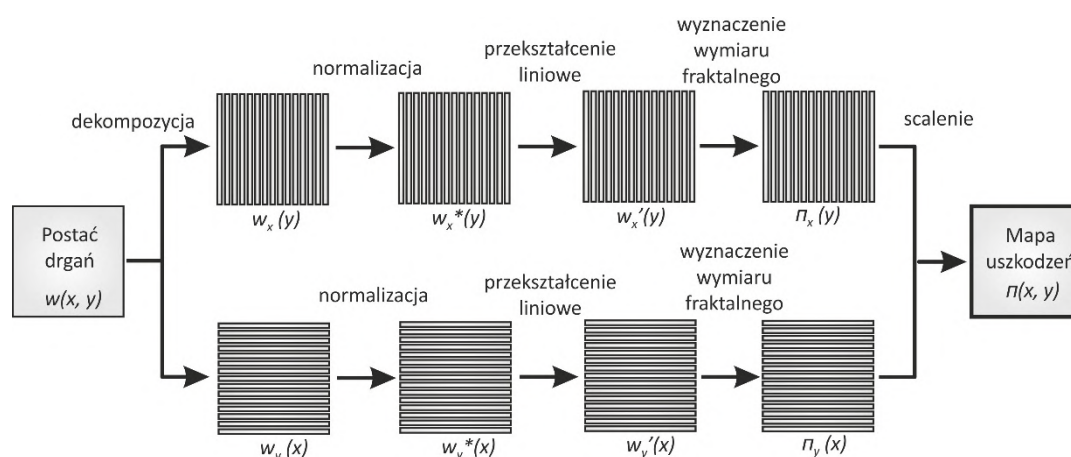


Rys. 1. Algorytm detekcji uszkodzeń bazującej na wieloskalowej analizie fraktalnej postaci drgań

Połączenie dwóch technik analizy sygnałów tj. transformacji falkowej oraz wymiaru fraktalnego, pozwoliło na wykorzystanie zalet obu z nich. Zaproponowany wskaźnik uszkodzenia łączy czułość wykrywania osobliwości sygnału wymiaru fraktalnego, jednocześnie dzięki wieloskalowemu ujęciu transformacji falkowej jest odporny na zakłócenia występujące w sygnale oraz cechuje go brak wrażliwości na lokalne ekstrema. Skuteczność tej metody została potwierdzona na podstawie badań numerycznych, w których analizowano postacie drgań materiału funkcjonalnego z rozwarstwieniem, ze szczególnym uwzględnieniem odporności metody na zakłócenia. Ponadto, efektywność proponowanej metody została zweryfikowana w badaniach eksperymentalnych, w których indukowana termicznie delaminacja oraz niewielkie ubytki lepiska w laminacie zbrojonym włóknem szklanym zostały poprawnie zobrazowane.

W pracy [Z3] zaproponowano metodę lokalizacji oraz oceny wielkości i kształtu pęknięć w aluminiowych elementach płytowych. W opracowanej metodzie podobnie jak w pracy [Z1] wykorzystano zdolność wymiaru fraktalnego Katz'a do lokalizowania nieregularności postaci drgań, które są wynikiem występowania uszkodzenia badanego elementu. Tym samym, lokalny wzrost wartości KFD, jest traktowany jako wskaźnik uszkodzenia. W pracy tej wykazano, że wykorzystanie postaci drgań wyższych rzędów umożliwia identyfikację uszkodzenia z większą dokładnością. Jednak wraz ze wzrostem złożoności analizowanych sygnałów problem wrażliwości KFD na lokalne ekstrema wzrasta. Aby wyeliminować to zjawisko, zaproponowano wykorzystanie liniowego mapowania poziomych i pionowych składowych postaci drgań. W ten sposób przetransponowany sygnał pozbawiony jest lokalnych ekstremów, jednocześnie zachowując

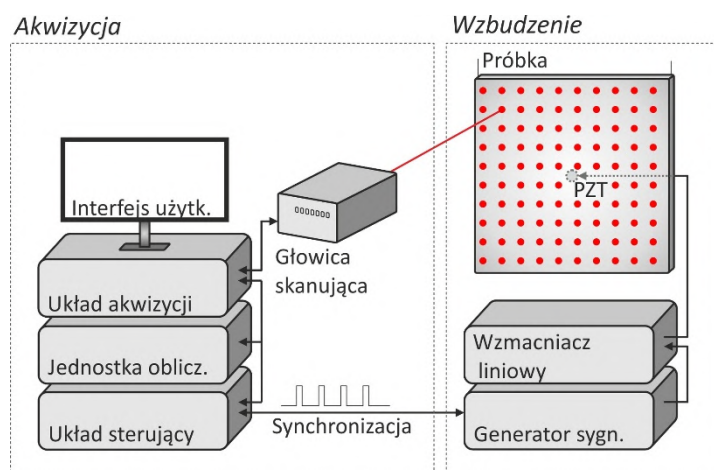
informację o potencjalnych uszkodzeniach. Algorytm proponowanej metody przedstawia Rys. 2. Zmierzona postać drgań jest dekomponowana na serię poziomych i pionowych linii, których znormalizowane wartości podlegają liniowemu mapowaniu. Przetransponowane sygnały dla każdej z linii poddawane są analizie fraktalnej, a uzyskane wyniki wykorzystane do utworzenia mapy uszkodzeń całej analizowanej powierzchni.



Rys. 2. Algorytm detekcji uszkodzeń bazującej analizie fraktalnej powierzchni postaci drgań

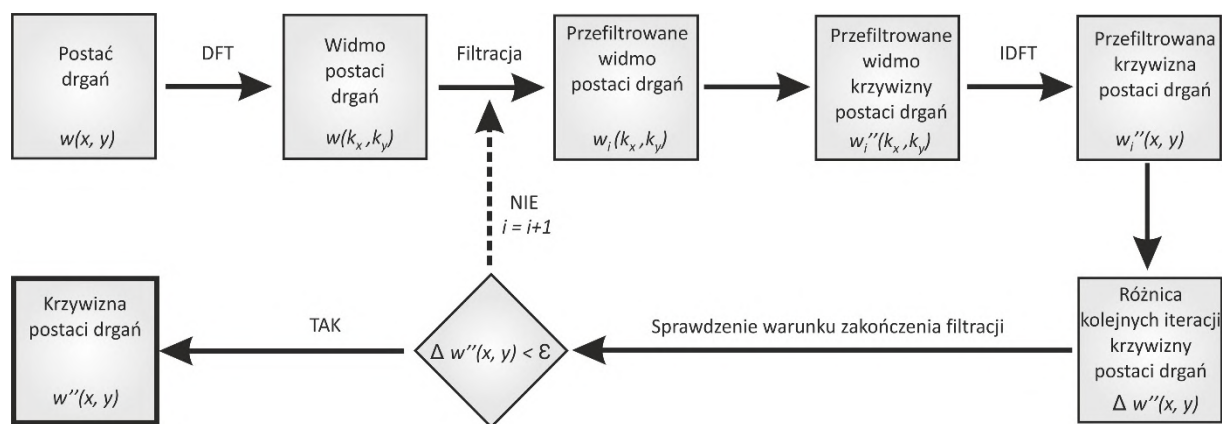
Przedstawiona metoda znalazła potwierdzenie swojej skuteczności w badaniach numerycznych, w których zasymulowano 8 przypadków pęknięć o różnej długości, orientacji i głębokości w aluminiowej płycie. Poza poprawną lokalizacją, oceną wielkości i kształtu symulowanych pęknięć, wykazano korelację pomiędzy głębokością uszkodzenia a wartością wyznaczonego wskaźnika. Skuteczność tej metody została również zweryfikowana eksperymentalnie. Nacięcie w kształcie litery „x” o głębokości 1 mm wykonane w aluminiowej płycie o grubości 4 mm, zostało dokładnie odzwierciedlone w uzyskanych mapach uszkodzeń.

Moim udziałem w badaniach, których wyniki przedstawione zostały w pracach [Z1, Z3], poza wkładem w opracowanie i zalgorytmizowaniem opisanych metod identyfikacji uszkodzeń, było przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Przygotowałem stanowisko pomiarowe do badań postaci drgań laminatu zbrojonego włóknem szklanym oraz aluminiowej płyty z nacięciem. Schemat układu pomiarowego przedstawia Rys. 3. Badane próbki były wzbudzane do drgań poprzez przyklejony przetwornik piezoelektryczny, zasilany sygnałem z programowanego generatora funkcyjnego przez liniowy wzmacniacz sygnałów. Pomiar w regularnej, gęstej siatce punktów pokrywających całą powierzchnię badanego elementu, realizowane były przy użyciu skanującego wibrometru laserowego zsynchronizowanego z systemem wzbudzania. Na potrzeby wprowadzenia do badanego laminatu delaminacji, przeprowadziłem serię badań oraz opracowałem metodykę indukowania rozwarstwienia poprzez krótkotrwałe lokalne przegrzanie materiału strumieniem gorącego powietrza o regulowanej temperaturze.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego

Wiele znanych z literatury przedmiotu metod detekcji uszkodzeń bazujących na analizie postaci drgań wykorzystuje informację o zmianach w krzywiznie postaci drgań – wartości drugiej pochodnej po powierzchni. W większości tych prac numeryczne różniczkowanie realizowane jest metodą różnic skończonych. Wadą takiego podejścia jest lokalny charakter omawianego przekształcenia, gdyż do oszacowania wartości krzywizny postaci drgań w rozpatrywanym punkcie wykorzystywane są wartości postaci drgań jedynie w niewielkiej liczbie punktów usytuowanych wokół rozpatrywanego. W przypadku występowania zakłóceń, prowadzi to do podbijania ich wartości, a tym samym może uniemożliwić wykrycie uszkodzenia. Jednym ze sposobów na zmniejszenie wpływu tego zjawiska jest wykorzystanie własności transformaty Fouriera. Istnieje bowiem możliwość wyznaczenia drugiej pochodnej sygnału po przestrzeni w dziedzinie liczb falowych, a następnie transformację sygnału z powrotem do dziedziny przestrzeni. Podejście takie skutkuje tym, że do wyznaczenia wartości krzywizny postaci drgań w danym punkcie wykorzystywana jest informacja z całego sygnału a nie tylko sąsiadujących punktów. Dodatkową zaletą przetwarzania sygnału w dziedzinie liczb falowych jest możliwość przeprowadzenia efektywnej filtracji postaci drgań w celu zminimalizowania szumów pomiarowych. Schemat algorytmu opracowanej metody wyznaczania i filtracji krzywizny postaci drgań w dziedzinie liczb falowych przedstawiono na Rys. 4. Postać drgań przekształcana jest z dziedziny przestrzeni do dziedziny liczb falowych dwuwymiarową transformacją Fouriera. W dalszej kolejności sygnał podlega filtracji dolnoprzepustowej, a jej wynik wykorzystywany jest do wyznaczenia drugiej pochodnej w dziedzinie liczb falowych. Przetransformowana do dziedziny przestrzeni krzywizna postaci drgań jest porównywana z wynikiem uzyskanym w poprzedniej iteracji (lub nieprzefiltrowaną krzywizną postaci drgań w przypadku pierwszej iteracji). Proces filtracji powtarzany jest do momentu spełnienia warunku filtracji.



Rys. 4. Algorytm wyznaczania i filtracji krzywizny postaci drgań w dziedzinie liczb falowych

Wyznaczenie krzywizny postaci drgań w dziedzinie liczb falowych niesie za sobą pewnie niekorzystne zjawiska. Funkcje interpolujące szeregu Fouriera są zdefiniowane w nieskończonym przedziale funkcji okresowych. Indukuje to konieczność okresowego powielania analizowanych sygnałów w celu minimalizacji efektów brzegowych. To działanie może z kolei powodować powstanie niekorzystnego zjawiska zawijania widma sygnału (z ang. *wrap-around effect*) oraz prowadzi do zwiększenia czasu obliczeń, co ma szczególne znaczenie w przypadku zaproponowanej metody iteracyjnego filtrowania.

Innym sposobem na wyeliminowanie tego problemu jest wykorzystanie funkcji interpolujących w postaci wielomianów Czebyszewa. Takie podejście nazwane metodą pseudospektralną Czebyszewa zaproponowano w pracy [Z5]. W pracy tej zastosowano analogiczną do przedstawionej na Rys. 4 metodę iteracyjnego filtrowania.

Obie zaproponowane w pracach [Z4, Z5] metody wyznaczania krzywizny postaci drgań zostały poddane weryfikacji na podstawie danych z modeli numerycznych. Analizowano trzy różne przypadki uszkodzeń oraz wrażliwość na zakłócenia. Skuteczność prezentowanych metod została również zweryfikowana na podstawie analizy wyników pomiarowych laminatów z trzema przypadkami uszkodzeń (udostępnionymi na stronie <http://ipkm.polsl.pl/wavstructdams/>).

Istotną cechą przedstawionych powyżej metod identyfikacji uszkodzeń [Z1, Z3, Z4, Z5] jest fakt, że nie wymagają one danych ze stanu referencyjnego badanej struktury ani i żadnych informacji związanych z własnościami badanego materiału. W literaturze przedmiotu, metody takie nazywane są nowoczesnymi w przeciwieństwie do technik wykorzystujących informację o stanie referencyjnym nazywanymi klasycznymi. Z uwagi na znaczącą liczbę różnych rozwiązań przedstawionych w literaturze przedmiotu, w rozdziale monografii [Z10] zestawiono wybrane nowoczesne metody detekcji uszkodzeń bazujące na analizie postaci drgań.

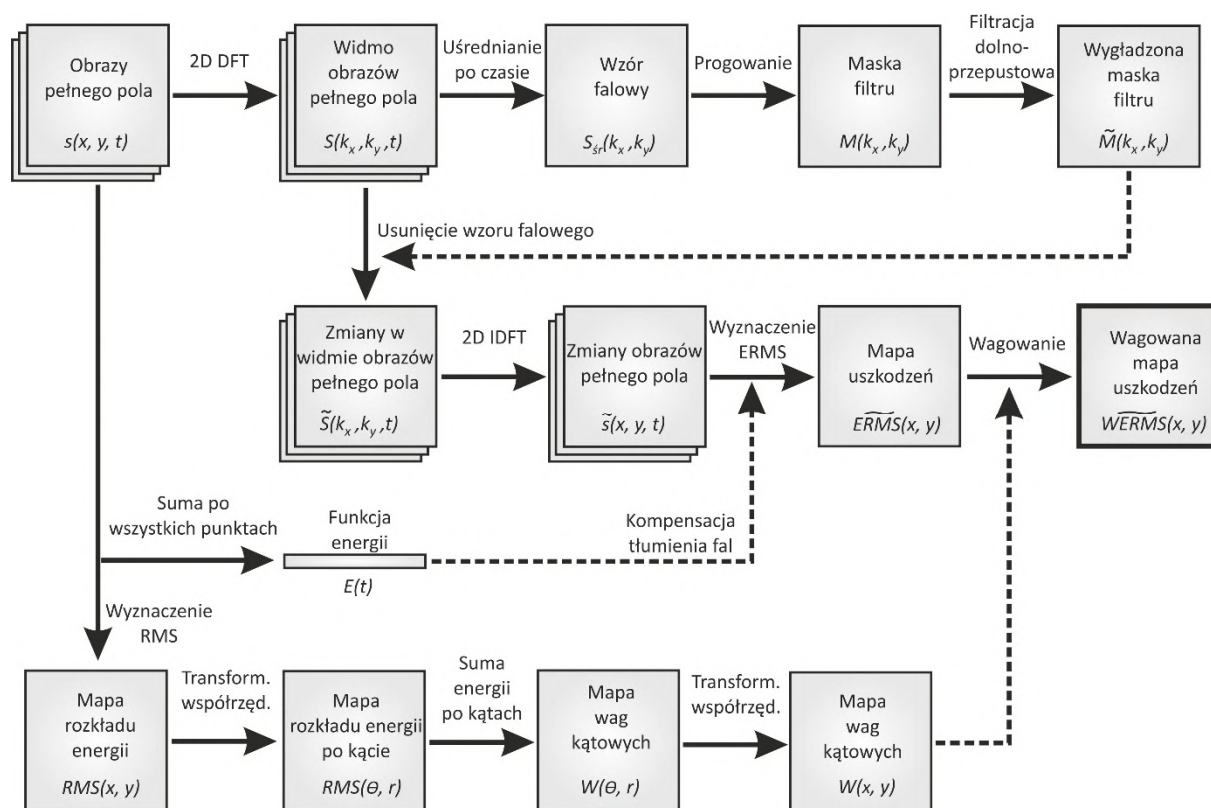
II. Fale propagujące się

Analiza sygnałów pełnego pola propagujących się fal sprężystych

Głównym celem tej części badań było opracowanie efektywnych metod detekcji, lokalizacji i oceny wielkości uszkodzeń materiałów kompozytowych. Opracowane metody bazują na analizie sygnałów pełnego pola propagujących się fal sprężystych, mierzonych przy użyciu wibrometrii laserowej.

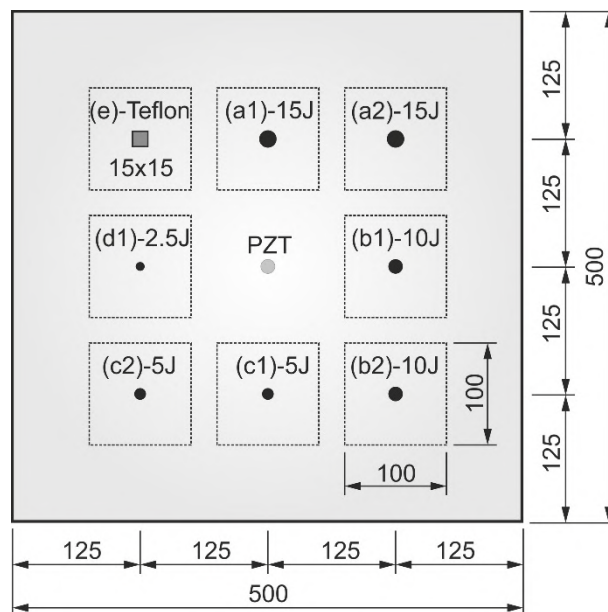
W ramach realizowanych przeze mnie badań zajmowałem się rozwijaniem metod przetwarzania i analizy sygnałów pełnego pola propagujących się fal sprężystych celem identyfikacji uszkodzeń elementów kompozytowych [Z2, Z7]. Przedstawiona w pracy [Z7] metoda jest rozwinięciem metody opracowanej wspólnie z Pawłem Kudelą we wcześniejszych pracach [A11]. Zasada jej działania opiera się na założeniu, że wystąpienie nieciągłości w materiale powoduje lokalne zmiany w propagujących się w jej obecności falach sprężystych. Ekstrakcja informacji o występujących zmianach poprzez zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania obrazów, umożliwia identyfikację uszkodzeń. Schemat algorytmu opracowanej metody przedstawia Rys. 5. Zarejestrowane sygnały $s(x, y, t)$ mogą być rozpatrywane jako seria obrazów propagujących się fal zarejestrowanych w punktach o współrzędnych (x, y) rozłożonych na powierzchni badanej struktury, uzyskanych w kolejnych chwilach czasowych t . Każdy z zarejestrowanych obrazów podlega przekształceniu do dziedziny liczb falowych $S(k_x, k_y, t)$, poprzez zastosowanie dwuwymiarowej dyskretniej transformacji Fouriera. Uśredniając wybraną liczbę początkowych widm obrazów pełnego pola, wyznaczony zostaje spektralny wzór falowy $S_{sr}(k_x, k_y)$. Na jego podstawie określona zostaje maska filtru $M(k_x, k_y)$, wykonując operację progowania. Wygładzona postać maski filtru $\tilde{M}(k_x, k_y)$ jest w dalszej kolejności wykorzystywana do filtracji w dziedzinie liczb falowych wszystkich zarejestrowanych klatek czasowych. Operacja ta prowadzi do usunięcia regularnego komponentu z zarejestrowanych sygnałów, pozostawiając jedynie informację o lokalnych zmianach w propagujących się falach sprężystych. W kolejnym kroku przefiltrowane dane $\tilde{S}(k_x, k_y, t)$ transformowane są z powrotem do dziedziny przestrzeni. Połączenie informacji ze wszystkich klatek czasowych realizowane jest przez wyznaczenie wartości średniej kwadratowej (RMS - z ang. *Root Mean Square*) po czasie, dla każdego z mierzonych punktów. Ponieważ, propagujące się fale podlegają zjawisku tłumienia, takie same uszkodzenia znajdujące się w różnej odległości od miejsca wzbudzenia fal dawałyby zróżnicowane wyniki. Aby zminimalizować to zjawisko, podczas wyznaczania wartości RMS, każdej próbce czasowej przypisywana jest odpowiednia waga. Jej wartość wyznaczana jest jako odwrotność wartości energii obrazu $E(t)$ dla rozpatrywanej chwili czasowej t . W ten sposób wyznaczana jest mapa uszkodzeń $\widehat{ERMS}(x, y)$. W realizowanych badaniach zauważono występowanie dodatkowego niekorzystnego zjawiska. Fale propagujące się w laminacie zbrojonym włóknem długim, miały zróżnicowaną amplitudę w zależności od kierunku propagacji fali względem zbrojenia. Aby zredukować wpływ tego zjawiska na uzyskane mapy uszkodzeń, zaproponowano przeprowadzenie dodatkowej procedury polegającej na wagowaniu kątowym. W tym celu wyznaczana jest mapa rozkładu energii w przestrzeni nieprzefiltrowanych obrazów falowych $RMS(x, y)$. Uzyskany wynik przekształcany jest ze współrzędnych kartezjańskich do współrzędnych biegunowych, gdzie wyznaczana jest średnia wartość energii sygnału w funkcji kąta $W(\theta, r)$. Po przetransformowaniu

do współrzędnych kartezjańskich funkcja $W(x,y)$ jest wykorzystywana do wyznaczenia wagowanej mapy uszkodzeń $\widetilde{WERMS}(x,y)$.

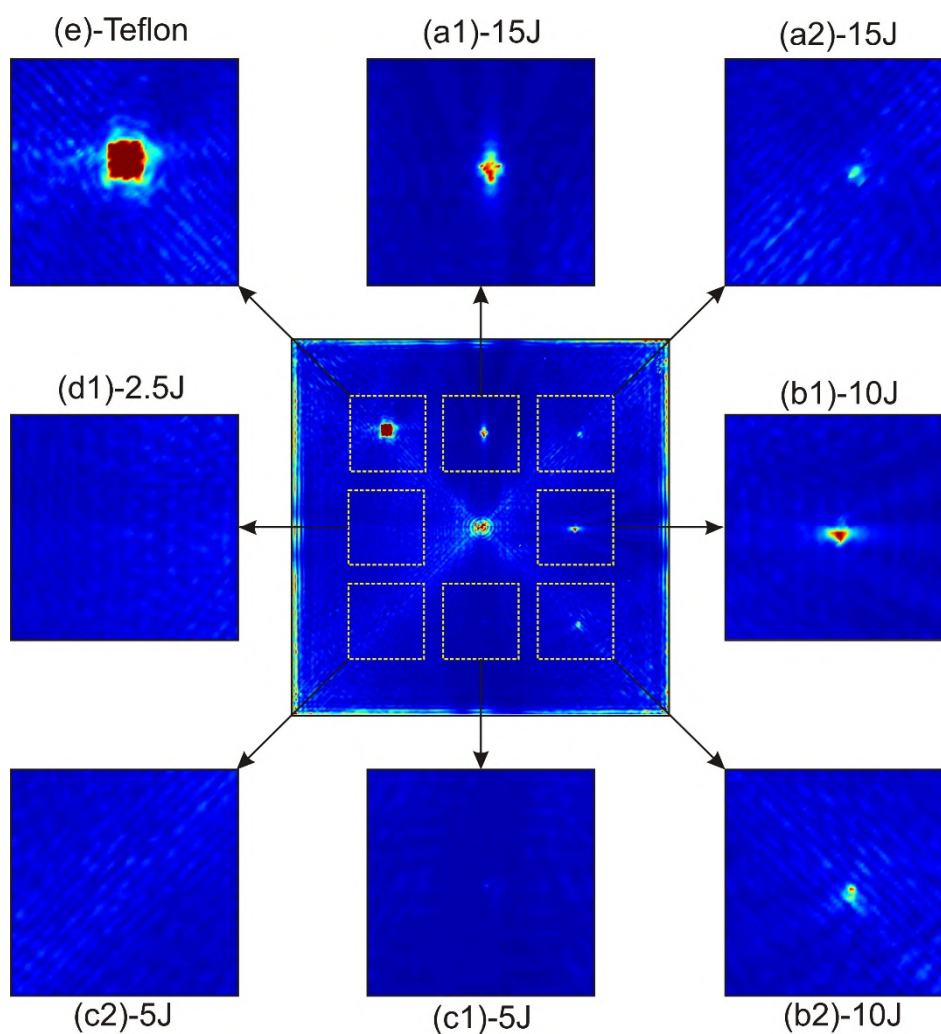


Rys. 5. Schemat algorytmu adaptacyjnego filtrowania sygnałów pełnego pola propagujących się fal sprężystych

Elementem nowości w prezentowanym algorytmie adaptacyjnego filtrowania sygnałów pełnego pola jest zastosowanie wygładzonej maski filtru poprawiającej efektywność metody i redukującej efekt Gibbsa spowodowany powstaniem skokowych zmian wartości w filtrowanych widmach obrazów przy zastosowaniu binarnej maski. Zaproponowano również wprowadzenie mapy wag kątowych, co stanowi istotny element poprawnej identyfikacji uszkodzeń w materiałach anizotropowych. Skuteczność opisanej metody została zweryfikowana na podstawie wyników numerycznych i pomiarów przy użyciu wibrometrii laserowej. W modelach numerycznych symulowano uszkodzenia płyty kompozytowej poprzez miejscowe obniżenie modułu Younga (o 20%-90% co 10%) na powierzchni o kształcie koła o zmiennej średnicy (10-25 mm co 5 mm). W badaniach eksperymentalnych zmierzono pełne pole propagujących się fal w laminacie zbrojonym włóknem węglowym z wprowadzoną na etapie produkcji przekładką teflonową. Do próbki wprowadzono dodatkowo poprodukcyjnie uszkodzenia wywołane udarami o zadanej energii uderzenia. Schemat badanej eksperymentalnie próbki przedstawiono na Rys. 6. Uzyskaną mapę uszkodzeń wraz ze zbliżeniami uszkodzonych regionów przedstawiono na Rys. 7.



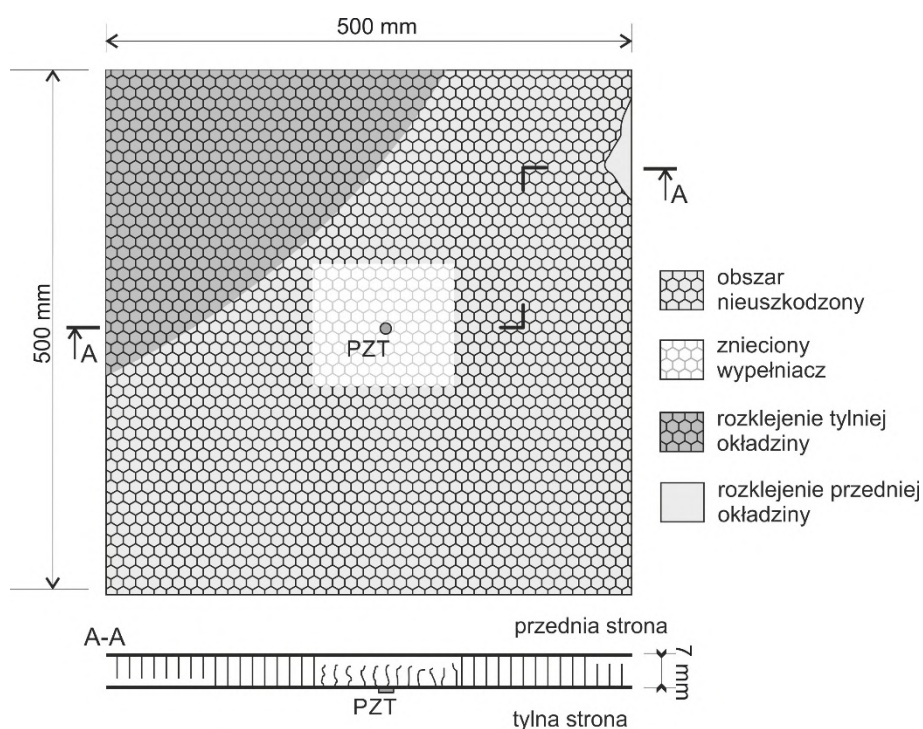
Rys. 6. Schemat laminatu ze zbrojeniem węglowym z przekładką teflonową oraz miejscami wykonanych uderzeń



Rys. 7. Mapa uszkodzeń laminatu zbrojonego włóknem węglowym

W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że przekładka teflonowa wprowadzona do materiału na etapie produkcji, nie jest dobrym odpowiednikiem delaminacji powstałej na skutek uderzenia. Przekładka teflonowa jest często wykorzystywana jako analogia delaminacji w literaturze przedmiotu. W analizowanych wynikach przekładka teflonowa prowadziła do większych zmiany w amplitudzie fal oraz powodowała występowanie zjawiska uwięzienia fal w jej obrębie, czego nie zaobserwowano dla uszkodzeń udarowych. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że możliwe jest wykrywanie uszkodzeń wywołanych udarem o energii 15 J (a1, a2) oraz 10 J (b1, b2), natomiast ocena intensywności takich uszkodzeń (z ang. *damage severity*), może być wykonana z ograniczoną dokładnością. Wykazano również, że nie jest możliwe wykrycie uszkodzeń wywołanych udarem o energii 5 J (c1,c2) i 2.5 J (d1).

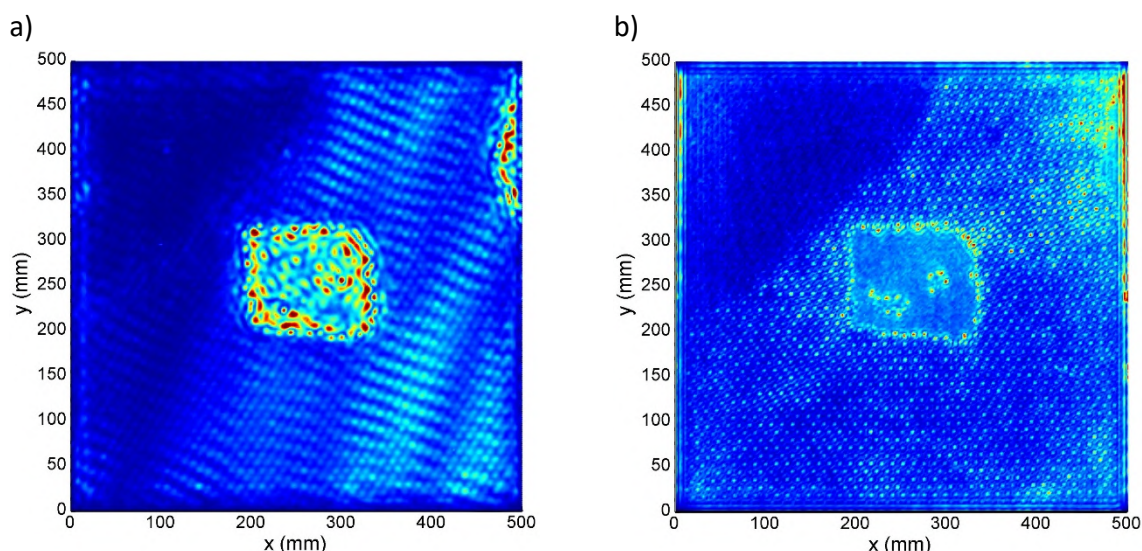
Kolejny przykład zastosowania metod przetwarzania sygnałów pełnego pola propagujących się fal to detekcja uszkodzeń lub wad produkcyjnych w kompozycie przekładkowym z wypełniaczem ulowym [Z2]. Z uwagi na swoją złożoną strukturę jest to materiał bardzo trudny do analizy. Wady produkcyjne w analizowanej płycie zostały wprowadzone sztucznie, na etapie produkcji próbek, w postaci zgniecionego wypełniacza ulowego oraz obszarów rozklejenia wypełniacza od warstw zewnętrznych. Schemat badanej próbki przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8. Schemat płyty przekładkowej z wypełniaczem ulowym z zaznaczonymi miejscami wad produkcyjnych

W prowadzonych badaniach sprawdzono skuteczność identyfikacji uszkodzeń w kompozycie przekładkowym przy wymuszeniu fal sprężystych sygnałem wąskopasmowym o różnej częstotliwości nośnej dla dwóch różnych miejsc wzbudzenia. Ponadto, w pracy [Z2] po raz pierwszy zaproponowano wykorzystanie wzbudzenia szerokopasmowego (w postaci impulsu o kształcie okna Hann'a o czasie trwania 25 μ s) w połączeniu z metodą adaptacyjnego filtrowania

obrazów falowych. Uzyskane przykładowe mapy uszkodzeń dla wzbudzenia wąskopasmowego o częstotliwości nośnej 50 kHz oraz wzbudzenia szerokopasmowego przedstawiono na Rys. 9.



Rys. 9. Mapy uszkodzeń kompozytu przekładkowego wyznaczone dla zbudzenia a) wąskopasmowego b) szerokopasmowego

W obu przedstawionych przypadkach, obszar zgniecenia wypełniacza ulowego zastał poprawnie zwizualizowany. Rozkolejanie przedniej okładziny zostało lepiej odzwierciedlone w przypadku wzbudzenia wąskopasmowego, gdzie możliwa jest dokładna ocena jego wielkości i kształtu. Rozkolejanie tylnej okładziny, zobrazone zostało jako obszar, w którym nie widoczna jest struktura wypełniacza jest wyraźniej widoczna dla wzbudzenia szerokopasmowego.

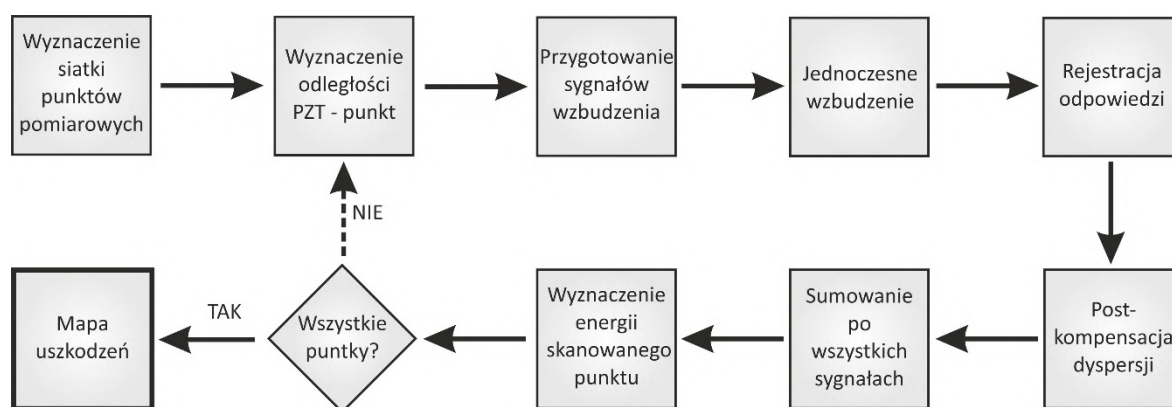
Reasumując, rozwijane przez mnie algorytmy wizualizacji uszkodzeń wykazują wysoką skuteczność identyfikacji szerokiego spektrum uszkodzeń w różnych materiałach kompozytowych. Metody te mogą znaleźć zastosowanie jako nieniszczące metody detekcji uszkodzeń (NDT) oraz w systemach kontroli jakości produkowanych elementów kompozytowych.

Metoda monitorowania stanu technicznego wykorzystująca skupianie fal sprężystych

Głównym celem tych badań było opracowanie skutecznej metody detekcji i lokalizacji uszkodzeń w elementach płytowych poprzez zastosowanie zjawiska skupiania fal sprężystych. Opracowana metoda wykorzystuje układ przetworników piezoelektrycznych do wzbudzania i rejestracji propagujących się fal sprężystych w elementach cienkościennych.

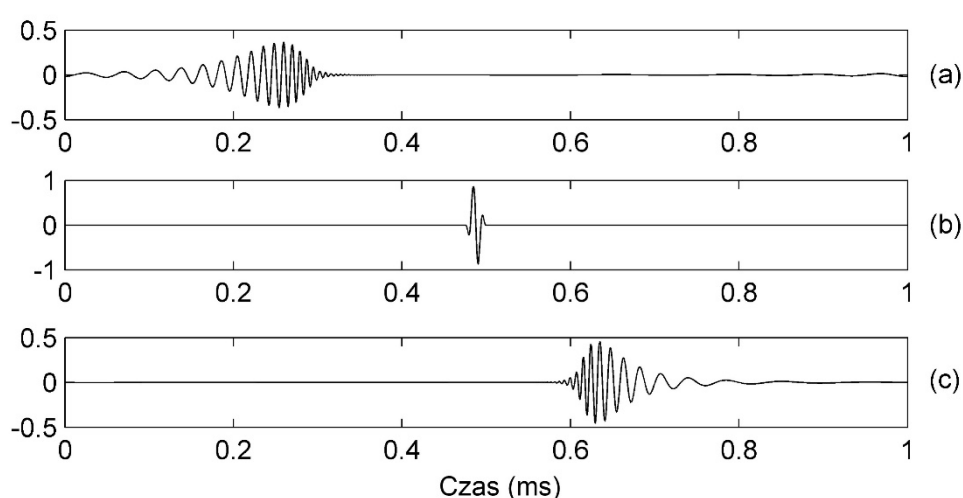
Ideą proponowanego w pracy [Z8] algorytmu identyfikacji uszkodzeń jest wykorzystanie metody echa (z ang. *pulse-echo*) realizowanej przez sieć przetworników piezoelektrycznych. Fale sprężyste wzbudzane są w taki sposób, aby nastąpiło ich skupienie w wybranych punktach, a następnie rejestrowane odbicia fal (jeśli występują uszkodzenia) wykorzystywane są jako informacja diagnostyczna. W przypadku, gdy uszkodzenie pokrywa się z punktem skupienia, spodziewane jest silne odbicie dzięki uzyskiwanej dużej amplitudzie fal w tym punkcie. Ogólna koncepcja skanowania obszaru poprzez skupianie fal sprężystych przedstawiona jest na Rys. 10.

W pierwszej kolejności wyznaczana jest siatka punktów inspekcyjnych, w których będą skupiane fale sprężyste. W następnym kroku dla wybranego punktu inspekcji, wyznaczane są odległości do wszystkich przetworników PZT. Na podstawie tej informacji oraz krzywych dyspersji fal dla badanego materiału, wyznaczane są sygnały wzbudzenia. Po wygenerowaniu przygotowanych sygnałów przez wszystkie przetworniki jednocześnie, następuje przełączenie ich z trybu wzbudzania w tryb rejestracji fal. Zarejestrowane sygnały poddawane są procedurze post-kompensacji dyspersji, również z uwzględnieniem odległości od testowanego punktu. Na podstawie wszystkich przetworzonych sygnałów z czujników wyznaczona zostaje energia fal odbitych w skanowanym punkcie. Procedura ta powtarzana jest dla kolejnych punktów siatki pomiarowej, do momentu uzyskania pełnej mapy uszkodzeń.



Rys. 10. Schemat algorytmu skanowania konstrukcji poprzez skupianie fal sprężystych

Przykładowy sygnał wzbudzenia dla pojedynczego przetwornika PZT przedstawiono na Rys 11a. Został on zaprojektowany w ten sposób, by w miejscu skupienia w czasie $t_0 = 0.5$ ms uzyskać formę wąskiej paczki falowej – co przedstawia Rys. 11b. Kształt paczki falowej w odległości dalszej niż założony punkt skupienia, ulega rozciągnięciu wskutek zjawiska dyspersji fal – Rys 11c.

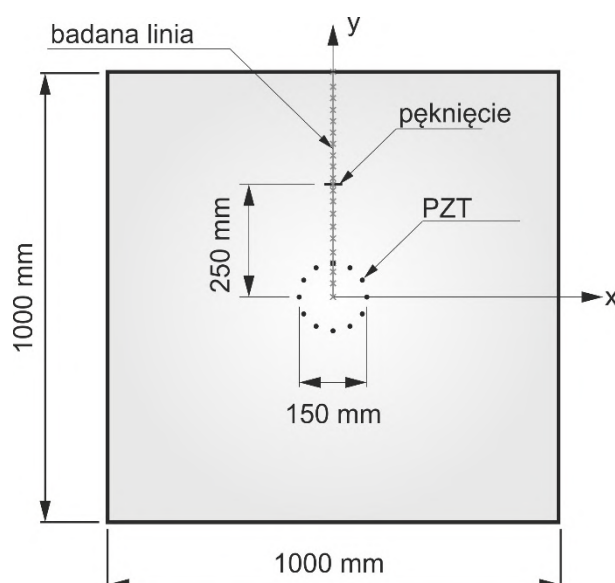


Rys. 11. Przebiegi czasowe pokazujące efekt dyspersji fal sprężystych a) sygnał wzbudzenia – poddany pre-kompensacji dyspersji, b) sygnał w miejscu skupienia c) sygnał poza miejscem skupienia

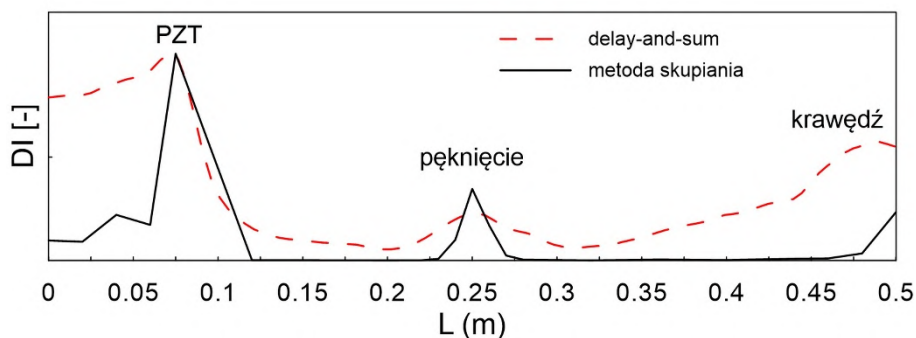
W pracy [Z8] zaproponowano dwie strategie inspekcji, polegające na globalnym lub lokalnym zagęszczaniu siatki pomiarowej, celem zwiększenia rozdzielczości wyznaczonych map uszkodzeń. Drugie podejście polega na zagęszczaniu siatki pomiarowej wokół miejsca, w którym wykryto odbicie fal sprężystych, aby możliwe było wykonanie dokładnej oceny lokalizacji i wielkości uszkodzenia lub śledzenie procesu jego powiększania się. Warto nadmienić, że metoda ta może być stosowana zarówno dla pojedynczej skupionej grupy czujników, jak i konfiguracji grupowo-rozproszonej, w której niewielkie grupy przetworników rozłożone są na powierzchni monitorowanej struktury.

Do wyznaczenia sygnałów wzbudzenia oraz kompensacji dyspersji odebranych odbić, niezbędna jest znajomość krzywych dyspersji dla badanego materiału. Obecnie realizuję badania w ramach projektu OPUS „Identyfikacja stałych sprężystych laminatów kompozytowych przez wykorzystanie krzywych dyspersji fal Lamba i metod optymalizacji”, mające m.in. na celu opracowanie metod wyznaczania krzywych dyspersji, bazując na układzie przetworników PZT. Zaimplementowanie tego typu algorytmów w połączeniu z opisywaną metodą skupiania fal pozwoli na stworzenie systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji samokalibrującego się, czyli niewymagającego informacji o badanym materiale. Warto wspomnieć, że wykorzystanie krzywych dyspersji, umożliwia łatwą kompensację zjawiska wpływu temperatury na propagujące się fale, które jest niekorzystne z punktu widzenia metod SHM.

Opracowana metoda wykorzystująca skupianie fal sprężystych pozwala na identyfikację uszkodzeń z wyższą niż znane z literatury przedmiotu metody typu pulse-echo. Jednocześnie umożliwia ona realizację inspekcji większych obszarów. Skuteczność metody została potwierdzona badaniami numerycznymi aluminiowej płyty z nacięciem, przedstawionej na Rys. 12. Znormalizowane wskaźniki uszkodzeń, uzyskane dla proponowanej metody i znanej z literatury przedmiotu metody delay-and-sum zestawiono na Rys. 13. Wartości wskaźników uszkodzeń zostały wyznaczone dla pionowej linii punktów inspekcji przebiegających przez symulowane pęknięcie.



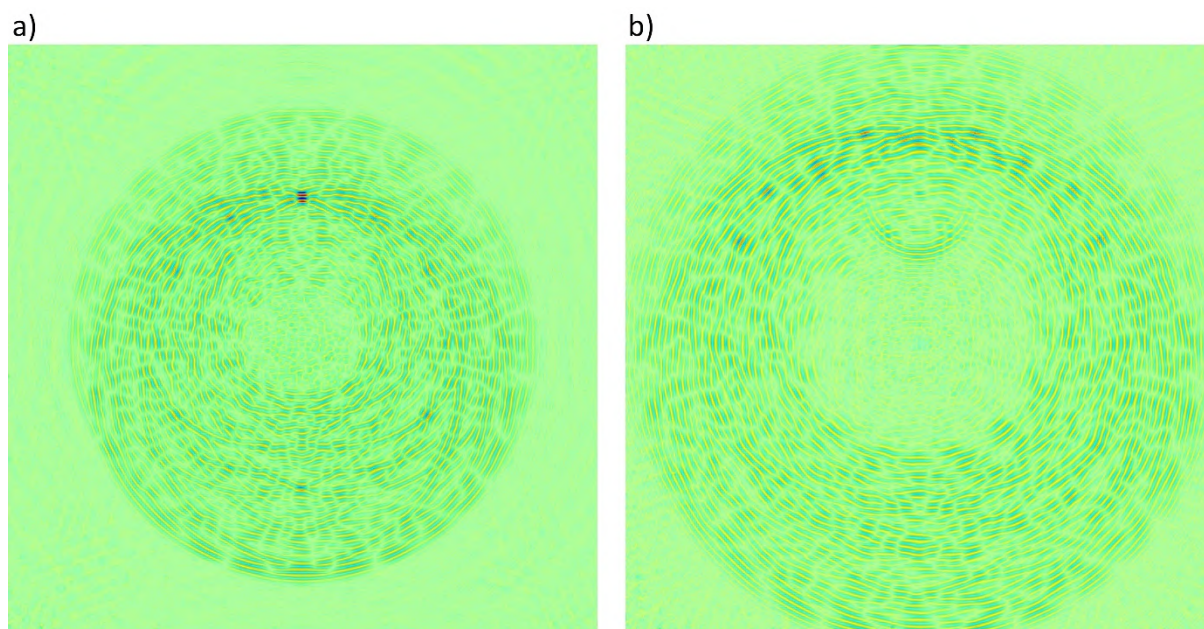
Rys. 12 Schemat aluminiowej płyty z układem czujników PZT i uszkodzeniem, użytej w symulacjach numerycznych i badaniach eksperymentalnych



Rys. 13 Porównanie wskaźników uszkodzeń uzyskanych dla proponowanej metody skupiania fal i metody delay-and-sum

Proponowany wskaźnik uszkodzenia w porównaniu do metody sum-and-delay cechuje wyższa wartość i lepsze skupienie w miejscu pęknięcia oraz mniejsze wartości w pozostałych obszarach. Problem martwej strefy (miejsc, w których uszkodzenie nie może być wykryte) w pobliżu krawędzi próbki, powodowane odbiciem fal, został niemal całkowicie wyeliminowany.

Skuteczność skupiania fal została potwierdzona ekperymentalnie z wykorzystaniem wibrometrii laserowej. Sygnał wzbudzony przez 12 przetworników PTZ został dobrany tak, by skupienie fal wystąpiło w miejscu uszkodzenia (Rys. 12). Dwie przykładowe zarejestrowane klatki czasowe pełnego pola propagujących się fal przedstawiono na Rys. 14. Na uzyskanych obrazach można zaobserwować znaczny wzrost amplitudy propagujących się fal w założonym punkcie skupienia (Rys. 14a), dając w rezultacie wyraźne odbicie od uszkodzenia (Rys. 14b).



Rys. 14 Zarejestrowane obrazy pełnego pola propagujących się fal, dla przypadku skupienia miejscu uszkodzenia, w chwili czasowej a) $t = 0.627$ ms, b) $t = 0.678$ ms

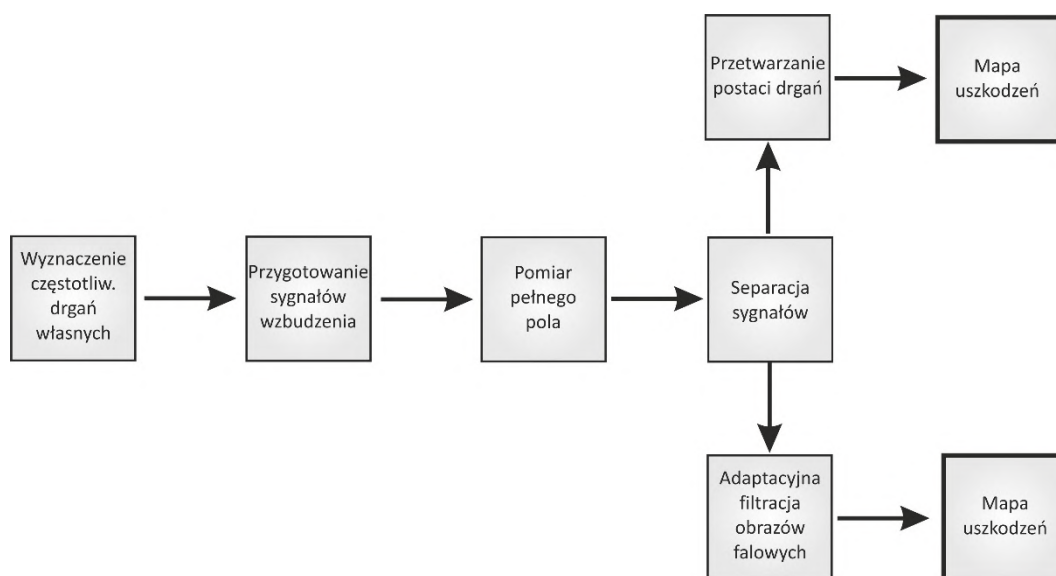
Należy nadmienić, że opracowana metoda uzyskała ochronę patentową [Z9].

III. Metoda łączona

Głównym celem tych badań było opracowanie nieniszczącej metody detekcji, lokalizacji i oceny wielkości uszkodzenia poprzez analizę jednocześnie wzbudzanych fal stojących i propagujących się.

Dużą część swojej uwagi w realizowanych badaniach poświęciłem rozwojowi metod detekcji i lokalizacji uszkodzeń, których działanie polega na analizie wysoko-rozdzielczościowych pomiarów fal stojących i propagujących się. W obu opisywanych technikach wykorzystywałem wzbudzenie elementem piezoelektrycznym oraz rejestrację odpowiedzi skanującym wibrometrem laserowym. W prowadzonych badaniach weryfikację wyników uzyskanych metodą wibracyjną starałem się potwierdzić wynikami z metody propagujących się fal i odwrotnie. Ponieważ, realizacja tego typu pomiarów jest długotrwała, zaistniała potrzeba opracowania metody wykorzystującej zalety obu rodzaju metod jednocześnie.

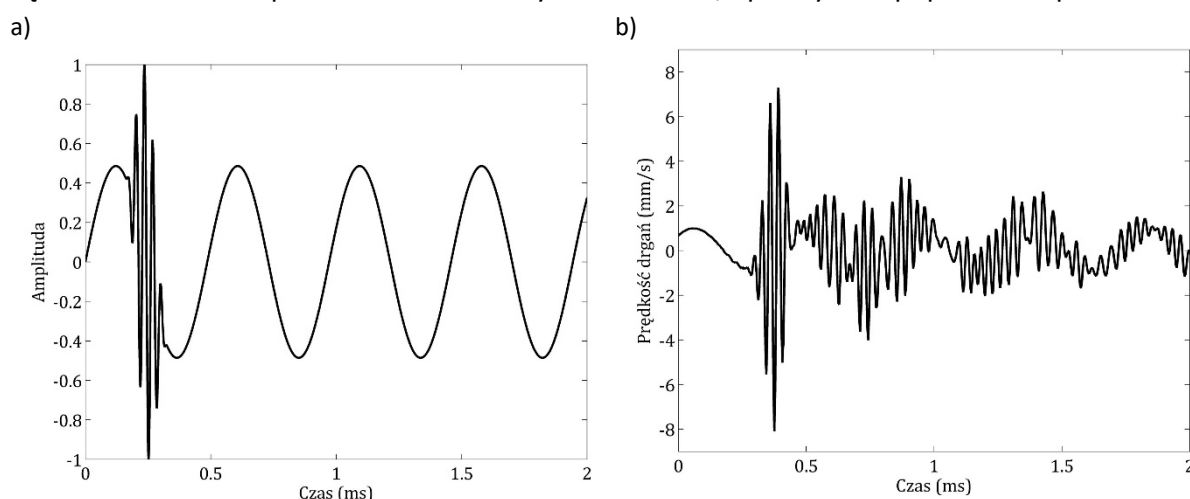
W pracy [Z6] zaproponowano metodę łączoną, w której fale stojące i propagujące się są wzbudzane w tym samym czasie (przez jeden wzbudnik) i rejestrowane przy użyciu wibrometrii laserowej. Podejście takie umożliwia przeprowadzenie równolegle dwóch rodzajów nieniszczących badań, bazujących na innych zjawiskach. Przy czym, czas przeprowadzenia inspekcji metody łączonej w porównaniu z pojedynczym badaniem, nie zostaje wydłużony. Schemat postępowania dla proponowanej metody przedstawiony jest na Rys. 15.



Rys. 15. Schemat algorytmu postępowania w metodzie łączonej

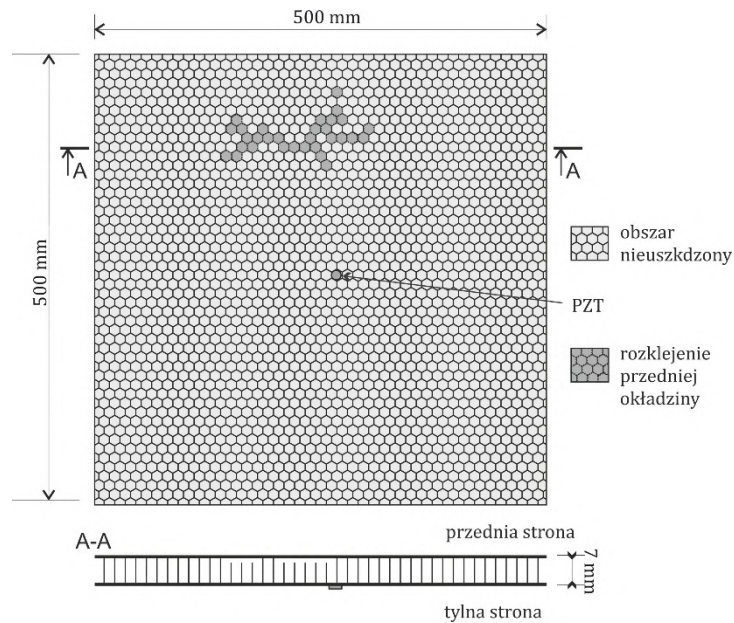
W proponowanym algorytmie, sygnał wzbudzenia jest wyznaczany jako złożenie ciągłego sygnału sinusoidalnego o częstotliwości odpowiadającej wybranej częstotliwości drgań własnych oraz paczki falowej o zadanej (odpowiednio wyższej) częstotliwości nośnej. Paczka falowa umiejscowiona jest w sygnale wzbudzenia w ten sposób, by jej środek przypadał na przejście przez zero sygnału sinusoidalnego. Długość sygnału wzbudzenia dobierana tak, by zapewnić pełne wytłumienie wzbudzonych fal sprężystych w poprzednim cyklu zbudzenia. Przykładowy sygnał

wzbudzenia postaci drgań o częstotliwości 2058 Hz i paczce falowej o częstotliwości nośnej 30 kHz przedstawiono na Rys 16a. W kolejnym kroku wykonywany jest pomiar odpowiedzi czasowej w każdym punkcie zadanej siatki pomiarowej, przy ciągłym, cyklicznym zbudzeniu zaprojektowanym sygnałem i synchronizacji rejestracji z początkiem sygnału wzbudzenia. Zarejestrowaną odpowiedź czasową dla wybranego punktu przedstawia Rys. 16b. Wykorzystując fakt, że komponenty związane z postacią drgań i propagującymi się falami, są rozłączne w dziedzinie częstotliwości, separacja sygnałów przeprowadzana jest przez filtrację pasmowo-przepustową każdego z punktów pomiarowych. Odseparowane komponenty zarejestrowanych sygnałów związane z postacią drgań własnych oraz propagacją fal sprężystych wykorzystywane są do utworzenia map uszkodzeń stosownymi metodami, opisanymi w poprzednich punktach.

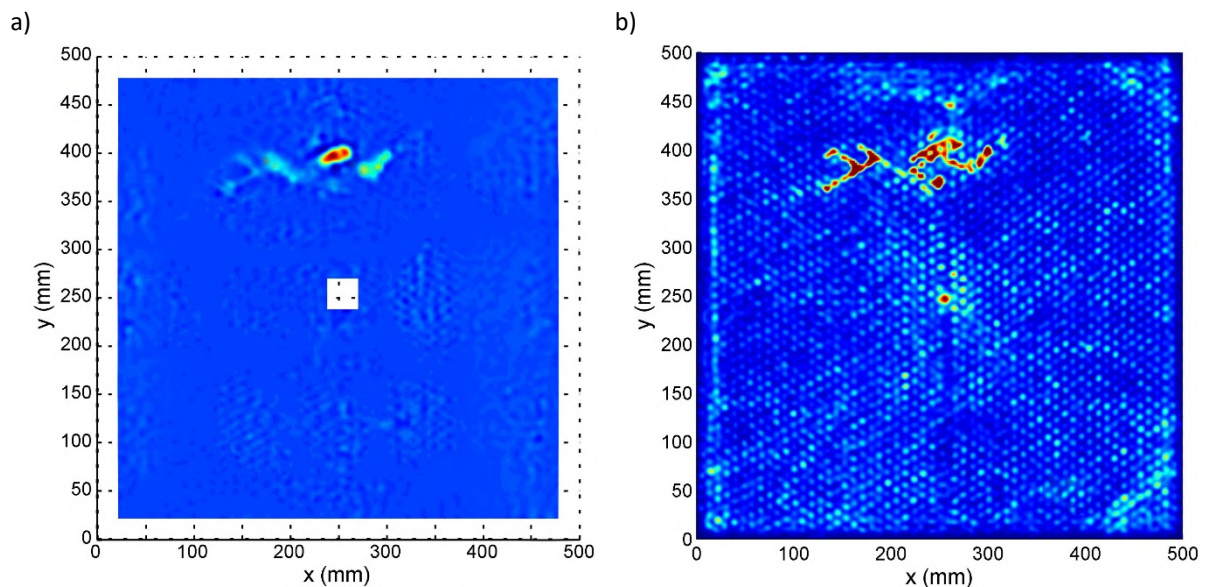


Rys. 16. Przebiegi czasowe a) sygnału wzbudzenia b) zarejestrowanej odpowiedzi w wybranym punkcie

Skuteczność zaproponowanej metody łączonej została potwierdzona eksperymentalnie. Przeprowadzono badania kompozytu przekładkowego z wypełniaczem ulowym, w którym występowały miejscowe roklejenia przedniej okładziny (Rys 17). Wyniki uzyskane dla analizy odseparowanych komponentów zarejestrowanych sygnałów pokazano na Rys. 18. Obie uzyskane mapy uszkodzeń pozwoliły na identyfikację rozklejenia z różną dokładnością. Wyższa rozdzielczość metody propagujących się fal wynika z faktu wykorzystania wyższych częstotliwości tj. krótszych fal.



Rys. 17. Schemat badanej próbki wykonane z kompozytu przekładkowego z uszkodzeniem



Rys. 18 Mapy uszkodzeń uzyskane metodą łączoną: a) fal stojących b) fal propagujących się

W pracy [Z6] wykazano, że mapy uszkodzeń uzyskane w sposób łączony, dają niemal identyczne wyniki jak w przypadku wykonania badań każdą z nich z osobna. Dodatkowo istnieje przypuszczenie, że dla pewnych typów uszkodzeń może wystąpić zjawisko synergii, tj. połączenie obu technik może powodować uzyskanie lepszych rezultatów niż każdej z osobna. Dla przykładu, fala stojąca jest w stanie spowodować chwilowe otwarcie lub osłabienie kontaktu zamkniętego pęknięcia (z ang. *breathing crack*) czy zamkniętego rozwarstwienia (z ang. *kissing-bond*). To spowodowałoby powstanie większych anomalii propagujących się fal sprężystych. Efekt ten nie został potwierdzony i będzie przedmiotem dalszych badań.

Warto nadmienić, że badania kompozytów przekładowych z wypełnieniem ulowym [Z2, Z6] prowadzone były bez wiedzy na temat wprowadzonych na etapie produkcji uszkodzeń. Próbkę do badań została celowo przekazana przez wykonawcę bez opisu o charakterze i umiejscowieniu wprowadzonych wad. Zastosowanie opracowanych algorytmów pozwoliło na identyfikację wprowadzonych uszkodzeń z dużą dokładnością, co zostało potwierdzone po rozdzieleniu warstw kompozytu.

PODSUMOWANIE

Wszystkie opisane osiągnięcia dotyczą tematyki nieniszczących metod detekcji uszkodzeń oraz systemów monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Oba te podejścia mogą być implementowane niezależnie od siebie jak i uzupełniające się systemy. Tego typu metody mają szerokie zastosowanie w samolotach, turbinach wiatrowych, zbiornikach, rurociągach oraz innej infrastrukturze powietrznej, lądowej i morskiej, gdzie występują elementy cienkościenne. Monitorowanie tego typu konstrukcji może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa ich użytkowania oraz zmniejszenia kosztów związanych z przeglądami i przerwami w eksploatacji. Z tego powodu rozwój tej tematyki jest istotny, a mój wkład w tę dyscyplinę uważam za znaczący. Potwierdzeniem tego stwierdzenia jest udział w wielu międzynarodowych i krajowych projektach badawczych związanych z tematyką NDT i SHM, uzyskane nagrody oraz liczne, wysoko cytowane publikacje w branżowych czasopismach.

Podsumowanie moich oryginalnych osiągnięć podczas realizacji prac badawczych w ramach przedstawionego cyklu:

- Zaproponowanie efektywnych metod detekcji uszkodzeń bazujących na transformacji falkowej i wymiarze fraktalnym postaci drgań elementów płytowych.
- Opracowanie metody wyznaczania i filtracji dwuwymiarowej krzywizny postaci drgań w oparciu o metodę spektralną Fouriera i metodę pseudospektralną Czebyszewa.
- Rozwój metod adaptacyjnej filtracji obrazów pełnego pola propagujących się fal sprężystych do wykrywania delaminacji w laminatach zbrojonych włóknem długim.
- Rozwój metod przetwarzania obrazów pełnego pola propagujących się fal sprężystych do wykrywania uszkodzeń kompozytów przekładkowych z wypełniaczem ulowym.
- Opracowanie efektywnego systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji bazującego na skupianiu fal sprężystych w zadanej siatce punktów.
- Opracowanie metody łączonej, polegającej na jednoczesnym wzbudzaniu i rejestracji stojących i propagujących się fal sprężystych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.

Wszystkie odnośniki odwołują się do publikacji zebranych w wykazie opublikowanych prac naukowych 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 metod przetwarzania sygnałów wibracyjnych w detekcji uszkodzeń elementów konstrukcji [A1, E4, E5, E6, E7]. W swojej pracy skupiłem się głównie na prostych elementach, tj. aluminiowych i stalowych belkach wspornikowych z nacięciami. Po zakończeniu prac związanych z realizacją pracy doktorskiej tematyka ta była rozwijana z rozszerzeniem obszaru badań na elementy belkowe wykonane z materiałów kompozytowych [A14, A15, A16, A18, A19, A21, E30] oraz elementy płytowe wykonane z materiałów izotropowych [A3, A4, A13, A24, E22] oraz różnego rodzaju laminatów [A6, A10, A17, E42]. Większość tych prac powstała w ramach współpracy z Uniwersytetem Hohai oraz Politechniką w Hongkongu. Współpraca ta została wyróżniona prestiżową nagrodą Dragon-Star Innovation Award przyznaną przez Komisję Europejską [K2 - zał. 7].
- Po zakończeniu prac związanych z realizacją pracy doktorskiej, tematykę swoich badań skupiłem dodatkowo na badaniu zjawiska propagacji fal sprężystych. Opracowałem metodę wagowanych map RMS, zezwalających na łatwiejszą interpretację uzyskanych wyników [A2, E12, E15], badałem możliwość wykrywania uszkodzeń w płycie z nitowanymi uźebrowaniami [A5, E19], zajmowałem się walidacją wyników z modeli numerycznych [E8], analizą zjawiska propagacji fal sprężystych w materiałach o zmiennej grubości [A12, E27] oraz kompensacją wpływu temperatury na zjawisko propagacji fal [E26].
- Zajmowałem się i nadal zajmuję rozwojem metody przetwarzania sygnałów pełnego pola propagujących się fal sprężystych do detekcji różnego typu degradacji i uszkodzeń materiałów izotropowych i anizotropowych. Najciekawsze wyniki były publikowane w czasopismach z listy JCR [A7, A11], czasopiśmie z listy B MNISW [E7] oraz przedstawiane na konferencjach międzynarodowych i publikowane w materiałach pokonferencyjnych [E9, E10, E16, E17, E21, E23, E37].
- W ramach realizacji projektu NCN – HARMONIA (*Badanie zjawiska propagacji fal sprężystych w materiałach kompozytowych z imperfekcjami*) prowadziłem badania nad lokalizacją i oceną imperfekcji w materiałach kompozytowych, takich jak kompozyty wzmacniane włóknem krótkim [A23 - zał. 7, E32] oraz z wypełnieniem „3D core” [A22, E39]. Badania te były prowadzone we współpracy z zespołem z Uniwersytetu w Bolonii.
- W ramach współpracy z naukowcami Uniwersytetu w Bolonii (Luca de Marchi i Alessandro Marzani) oraz Uniwersytetu Goethego we Frankfurcie (Jochen Moll) opracowana została nowatorska metoda kodowania i przetwarzania sygnałów pełnego pola wzbudzanych przez kilka przetworników piezoelektrycznych jednocześnie. Wyniki prac zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR [A20 – zał. 7] oraz przedstawione na konferencji i opublikowane w materiałach pokonferencyjnych [E29].
- Poza analizą sygnałów pełnego pola propagujących się fal zajmowałem się także wykorzystaniem czujników PZT do pomiaru tego zjawiska [E18]. Opracowany został układ czujników PZT w postaci matrycy umieszczonej w elastycznej osłonie, która uzyskała ochronę wzoru użytkowego [D1]. Prace nad tematyką fal sprężystych są kontynuowane w ramach realizacji projektu OPUS – NCN (Identyfikacja stałych sprężystych laminatów

kompozytowych przez wykorzystanie krzywych dyspersji fal Lamba i metod optymalizacji), gdzie obecnie jestem zatrudniony w pełnym wymiarze godzinowym.

- Kolejną tematyką, którą zajmuję się i zajmowałem się ramach realizacji projektu badawczego NCN – Maestro („Wzbudzanie i kontrola fal mechanicznych w ośrodkach nieliniowych”) jest bezkontaktowy system wzbudzania i pomiaru fal sprężystych. Brałem udział w opracowaniu i testowaniu różnych konfiguracji sieci wzbudników ultradźwiękowych, które dzięki skupieniu emitowanych sygnałów akustycznych pozwoliły na wzbudzenia fal sprężystych w laminacie wzmacnianym włóknem węglowym [E44], a także na opracowaniu bezkontaktowego systemu detekcji uszkodzeń [E45].
- W ramach realizacji projektu NCBiR („Technologie autonomicznej rekonfiguracji materiałów w pojazdach”) we współpracy z Politechniką Warszawską przeprowadziłem serię badań oraz opracowałem nowatorską, nieinwazyjną metodę oceny stanu samonaprawienia laminatów zawierających mikrokapsułki lub wypełniane włókna. Opracowana metoda polegała na analizie i przetwarzaniu cyklicznie wykonywanych pomiarów pełnego pola propagujących się fal.
- Zajmowałem się i zajmuję się badaniami z zakresu metamateriałów, które prowadzę we współpracy z Marco Miniaci (Uniwersytet w Bolonii, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology). Badania dotyczą własności akustycznych metamateriałów. Współpraca ta jest kontynuowana, a wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie [E41 - zał. 7].
- Zajmowałem się również badaniem jakości połączeń kolejnych w ramach realizacji projektów - ENCOMB (Extended Non-Destructive Testing for Composite Bonds) oraz projektu H2020 ComBoNDT (Quality assurance concepts for adhesive bonding of aircraft composite structures by advanced NDT) [E40].
- Brałem udział w badaniach we współpracy z Uniwersytetem w Arizonie nad problemem oceny degradacji termicznej materiału kompozytowego przy wykorzystaniu spektroskopii Terahertzowej. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na konferencji i opublikowane w materiałach pokonferencyjnych [E28].
- We współpracy z Laboratorium Badań Wibroakustycznych, Centrum Techniki Okrętowej, przeprowadziłem serię badań bezkontaktowych pomiarów drgań okna przy wymuszeniu akustycznym. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na konferencji i opublikowane w materiałach pokonferencyjnych [E34, E43]
- Moje prace dotyczyły również techniki wykrywania uderzenia w elementach konstrukcji poprzez zastosowanie techniki time reversal wspomaganej wibrometrią laserową. Prace te były realizowane we współpracy z pracownikami uczelni i instytucji naukowych z 5 krajów. Współpraca ta jest kontynuowana a wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie [E46].

Należy podkreślić, że wymienione powyżej badania są aktualne, nowatorskie i będą kontynuowane. Na kolejnych stronach zamieściłem tabele zawierające zestawienia moich osiągnięć naukowych.

5.1. Wybrane osiągnięcia naukowo – badawcze przed i po otrzymaniu stopnia doktora zostały ilościowo porównane w poniższej tabeli.

Warto nadmienić, że moja praca doktorska została zakończona i przedłożona do recenzji w grudniu 2011 roku. Natomiast jej obrona nastąpiła w październiku 2015 roku. Stąd wiele prac, które w rzeczywistości zostały przygotowane po zakończeniu badań związanych z realizacją rozprawy doktorskiej została opublikowana przed jej obroną.

Nazwa osiągnięcia	Wartość wskaźnika przed obroną doktoratu	Wartość wskaźnika po obronie doktoratu	Sumaryczna wartość wskaźnika
Publikacje z listy Journal Citation Reports	11	19 (w tym 6 z wybranego cyklu publikacji)	30
Publikacje z listy B MNISW	4	7	11
Monografie	2	0	2
Rozdziały w monografiach	1	1 z wybranego cyklu publikacji j. angielski	2
Inne prace naukowe	28	17 (w tym 2 z wybranego cyklu publikacji)	47
Wygłoszenie referatów na konferencjach (wszystkie w języku angielskim)	6	3	9
Aktywny udział w konferencjach	23	9	32
Sumaryczny Impact Factor IF	27,369	61,975	89,344
Projekty badawcze międzynarodowe	1 (FP7)	1 (H2020)	2
Projekty badawcze krajowe	7	4	11
Patenty	0	1 z wybranego cyklu	1
Wzory użytkowe	0	1	1
Recenzje artykułów do czasopism	1	25	26

5.2. Informacje o cytowaniach publikacji

Nazwa bazy	Liczba cytowań	Indeks Hirsha
Web of Science (WoS)	601	15
Scopus	737	15
Google Scholar	847	16

5.3 W poniższej tabeli podsumowano ilościowo informacje zebrane w poszczególnych punktach dokumentu pt. „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacji o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”

Punkt	Nazwa pozycji	Wartość
I B	Publikacje i inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	10
II A	Publikacje z listy Journal Citation Reports	24 (+6 w I B)
II B	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	Brak
II C	Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe	Brak (1 w I B)
II D	Wzory użytkowe, które uzyskały ochronę	1
II E	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR	46 (+3 w I B)
II F	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	37
II G	Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	89,344
II H	Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)	601
II I	Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	15
II J	Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	13
II K	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną	4
II L	Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	9
III A	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	10
III B	Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych (bez referatów wymienionych w pkt II L)	32
III C	Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	Brak
III D	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione w pkt II K	Brak
III E	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	6
III F	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami, innymi niż wymienione w pkt II J	Brak
III G	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	Brak
III H	Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	Brak
III I	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki	1
III J	Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji	2
III K	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	Brak
III L	Stáže w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	3
III M	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	3
III N	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	Brak
III O	Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	Brak
III P	Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	26
III Q	Inne osiągnięcia, nie wymienione w pkt III A – III P	2

Podpis
