

Załącznik 2a

Autoreferat

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

dr inż. Tomasz Wandowski

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

email: tomaszw@imp.gda.pl

Gdańsk 2016

Zawartość

1.	Imię i Nazwisko.....	3
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.	3
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.):	4
	a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,	4
	b) wykaz wybranego cyklu publikacji	4
	c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	6
	Wstęp	6
	Szczegółowy opis metodyki badań oraz dyskusja	11
	Podsumowanie	34
	Podsumowanie moich oryginalnych osiągnięć	35
5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych).	36

1. Imię i Nazwisko.

Tomasz Wandowski

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

2011 **stopień doktora nauk technicznych w zakresie mechaniki, specjalność: mechanika eksperymentalna**

Tytuł rozprawy doktorskiej: „*Lokalizacja uszkodzeń w płytach z wykorzystaniem różnych konfiguracji przetworników piezoelektrycznych*”.

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

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

2005 **stopień magistra inżyniera, specjalność: automatyka i robotyka, kierunek dyplomowania: robotyka**

Tytuł pracy magisterskiej: „*Modelowanie dynamiki głowicy roboczej podwodnego robota do oczyszczania kadłuba statku*”

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny,

Promotor pracy: dr inż. Grzegorz Rożnowski

2000 **technik mechanik**

Technikum Mechaniczne w Tczewie o kierunku: naprawa i eksploatacja pojazdów samochodowych

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

Miejsce zatrudnienia:

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk (IMP PAN), Ośrodek Mechaniki Maszyn, Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych, ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk

Historia zatrudnienia:

Od 01.11.2011: **adiunkt** - Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN Gdańsk

2005 – 2011: **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 **12** publikacji **zawierający dwa rozdziały w monografiach** powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:

Metody oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji wykonanych z materiałów o własnościach izotropowych oraz ortotropowych na podstawie analizy stojących i propagujących się fal sprężystych

b) wykaz wybranego cyklu publikacji

Wybrany cykl publikacji powiązanych tematycznie składa się z **12** pozycji w skład cyklu wchodzi:

- **6** artykułów opublikowanych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR),
- **2** rozdziały w monografiach anglojęzycznych opublikowanych za granicą,
- **1** artykuł w wydawnictwie pokonferencyjnym ***Proceedings of SPIE*** opublikowany w bazie Web of Science. Konferencja ***SPIE Smart Structures/NDE (Stany Zjednoczone)*** należy do czołowych w mojej tematyce badań,
- **3** artykuły w wydawnictwie pokonferencyjnym ***The e-Journal of Nondestructive Testing - ISSN 1435-4934***. Dwa artykuły dotyczą bardzo ważnej konferencji ***European Workshop on Structural Health Monitoring*** dotyczącej zagadnień monitorowania stanu technicznego (organizowana co dwa lata w Europie). Jeden artykuł dotyczy ważnej konferencji ***Symposium for NDT in Aerospace*** dotyczącej metod badań nieniszczących stosowanych w lotnictwie (w konferencji naukowej oprócz przedstawicieli ośrodków naukowych biorą także udział przedstawiciele firm lotniczych – umożliwia to dyskusję nad praktycznymi aspektami stosowanych rozwiązań).

Cykl **12** publikacji przedstawiony jest poniżej:

- [H1] Wiesław Ostachowicz, Paweł Malinowski, **Tomasz Wandowski (45%)**: *Damage localisation using elastic waves propagation methods. Experimental techniques*. Rozdział 6 w monografii pod redakcją W. Ostachowicz, A. Güemes: *New Trends in Structural Health Monitoring*, pp. 317 – 371, Vol. 542, Wien, Springer, ISBN 978-3-7091-1389-9, 2013. **(rozdział w monografii)**.
- [H2] **Tomasz Wandowski (45%)**, Paweł Malinowski, Wiesław Ostachowicz: *Circular sensing networks for guided waves based structural health monitoring*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volumes 66–67, Pages 248–267, 2016. **(IF: 2,771– 2015 r.)**
- [H3] Wiesław Ostachowicz, **Tomasz Wandowski (40%)**, Paweł Malinowski, Paweł Kudela: *Highlights and challenges in nondestructive evaluation for metallic and composite structures*. *Proc. of SPIE NDE/Smart Structures: Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems*, Paper 9806-15, Las Vegas, USA, 2016. **(Web of Science)**

- [H4] Jochen Moll, **Tomasz Wandowski (35%)**, Paweł Malinowski, Maciej Radzieński, Szymon Opoka, Wiesław Ostachowicz: *Experimental analysis and prediction of antisymmetric wave motion in a tapered anisotropic waveguide*. Journal of Acoustical Society of America, 138(1):299. doi: 10.1121/1.4922823, 2015. (IF: 1,572 – 2015 r.)
- [H5] **Tomasz Wandowski (60%)**, Paweł Kudela, Paweł Malinowski, Łukasz Sarniak, Radosław Karczewski, Wiesław Ostachowicz: *Damage detection in composite materials*. The e-Journal of Nondestructive Testing, Vol.21, No.08, Proc. of 8th European Workshop on Structural Health Monitoring, Bilbao, Hiszpania, 2016.
- [H6] **Tomasz Wandowski (50%)**, Paweł Malinowski, Wiesław M. Ostachowicz: *Delamination detection in CFRP panels using EMI method with temperature compensation*. Composite Structures, Volume 151, Pages 99–107, 2016. (IF: 3,853 – 2015 r.)
- [H7] **Tomasz Wandowski (45%)**, Paweł H. Malinowski, Wiesław M. Ostachowicz: *Temperature and damage influence on electro-mechanical impedance method used for CFRP panels*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, DOI: 10.1177/1045389X16657423, 2016. (IF: 1.975– 2015 r.)
- [H8] **Tomasz Wandowski (75%)**, Paweł Malinowski, Wiesław Ostachowicz: *Calibration Problem of AD5933 Device for Electromechanical Impedance Measurements*. The e-Journal of Nondestructive Testing, Vol.20, No.02, Proc. of 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, 480-487, Nantes, France, 2014.
- [H9] **Tomasz Wandowski (40%)**, Szymon Opoka, Paweł Malinowski, Wiesław Ostachowicz: *The performance of three Electromechanical Impedance damage indicators on structural element with bolted joints*. The e-Journal of Nondestructive Testing, Vol.20, No.01, Proc. of 6th Symposium for NDT in Aerospace, Madrid, Spain, 2014.
- [H10] Wiesław M. Ostachowicz, **Tomasz Wandowski (45%)**, Paweł H. Malinowski: *Structural Health Monitoring for Composite Materials - rozdział w monografii* (strony 22-39): Giju Rajan, B. Gangadhara Prusty: Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods. CRC Press, ISBN 9781498733175 (**rozdział w monografii**)
- [H11] **Tomasz Wandowski (40%)**, Paweł Malinowski, Łukasz Skarbek, Wiesław Ostachowicz: *Moisture detection in carbon fiber reinforced polymer composites using electromechanical impedance technique*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 230, no. 2, 331-336, 2016. (IF: 0,730–2015 r.)
- [H12] Paweł Malinowski, **Tomasz Wandowski (30%)**, Wiesław Ostachowicz: *The use of electromechanical impedance conductance signatures for detection of weak adhesive bonds of carbon fibre–reinforced polymer*. Structural Health Monitoring, 1–13, DOI: 10.1177/1475921715586625, 2015. (IF: 3,193 – 2015 r.)

Ponieważ przeprowadzone przez mnie badania mają charakter interdyscyplinarny, na cykl publikacji powiązanych tematycznie składają się prace, których jestem współautorem. Jednak mój udział merytoryczny w tworzeniu każdej z prac 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 sygnałów i ich zaprogramowaniem, opracowaniem i interpretacją

wyników badań, przygotowaniem tekstu i rysunków zawartych w artykułach oraz pozyskiwaniem środków finansowych umożliwiających finansowanie badań (kierowane przez mnie projekty badawcze: MNiSW IUVENTUS Plus IP2011 058971 oraz NCN SONATA nr 2014/13/D/ST8/03167).

Oświadczenia wszystkich współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku zostały zamieszczone w załączniku 4.

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

Wstęp

Osiągnięcie naukowe związane jest z badaniami zjawisk fizycznych: propagacji fal sprężystych oraz powstawania stojących fal sprężystych. Niniejsze zjawiska wykorzystane zostały do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji wykonanych z materiałów o własnościach izotropowych oraz ortotropowych.

W zagadnieniach oceny stanu technicznego wyróżnia się minimum cztery poziomy diagnostyki: detekcja, lokalizacja, ocena wielkości oraz predykcja (ocena pozostałego bezpiecznego czasu eksploatacji). Ocena stanu technicznego może być realizowana w sposób okresowy poprzez zastosowanie metod badań nieniszczących (z ang. *Non Destructive Testing, NDT*) lub w sposób ciągły (z ang. *Structural Health Monitoring, SHM*). Metody NDT (np. badania ultradźwiękowe, prądów wirowych) wykorzystywane są do oceny stanu technicznego konstrukcji w sposób okresowy i wymagają bardzo często wstępnego przygotowania konstrukcji do badań oraz wyłączenia jej z eksploatacji na czas badań. Natomiast celem systemu SHM jest wykrywanie w sposób ciągły wszelkich zmian stanu technicznego konstrukcji na skutek powstałych i rozwijających się uszkodzeń, podczas normalnej eksploatacji konstrukcji.

Konstrukcje oraz ich elementy podczas eksploatacji są narażone na proces degradacji. Przez pojęcie degradacji w niniejszej pracy rozumie się powstawanie uszkodzeń typu pęknięcia, ubytki materiału oraz delaminacje/rozwarstwienia, zmiany stanu technicznego połączeń elementów konstrukcji, a także zawilgocenie elementów kompozytowych, które może prowadzić do zmian fizyko-chemicznych.

Jak już wspomniano osiągnięcie naukowe obejmuje badania dwóch zjawisk wykorzystywanych do oceny stanu technicznego konstrukcji a w szczególności oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Pierwsze zjawisko związane jest z propagacją fal sprężystych w elementach konstrukcji. Metoda identyfikacji uszkodzeń wykorzystująca to zjawisko bazuje na fakcie, że uszkodzenia mechaniczne (np. pęknięcia, korozja, delaminacje) powodują zmiany w rozchodzeniu się fal sprężystych. Zmiany te przejawiają się w odbiciu, rozproszeniu, załamaniu oraz konwersji modów fal sprężystych. Zjawisko to może zostać wykorzystane do detekcji, lokalizacji oraz określenia kształtu i rozmiaru uszkodzeń w elementach konstrukcji.

Drugie ze zjawisk dotyczy powstawania stojących fal sprężystych w elementach konstrukcji. Na skutek interferencji propagujących się fal sprężystych w elemencie konstrukcji mogą powstawać fale stojące. Cechą charakterystyczną fali stojącej są węzły i strzałki, które nie przemieszczają się. Zjawisko to wykorzystywane jest w metodzie impedancji elektromechanicznej (zwanej w skrócie metodą impedancji E/M). W metodzie tej analizuje się charakterystyki rezonansowe elementu konstrukcji sprzężonego z przetwornikiem piezoelektrycznym pobudzającym element do drgań.

Metoda impedancji E/M może być wykorzystana do detekcji uszkodzeń oraz wykrywania rozwoju uszkodzeń (wzrostu rozmiarów) w elementach konstrukcji. Metoda ta może być również wykorzystana do oceny zawilgocenia elementów kompozytowych.

W swojej rozprawie doktorskiej przedstawiłem wyniki badań związane z wykorzystaniem metody propagacji fal sprężystych do lokalizacji uszkodzeń. Badania dotyczyły metody pomiarów punktowych (ang. *point-wise*) wykonanych wyłącznie z wykorzystaniem przetworników piezoelektrycznych. Przetworniki te były wykorzystywane zarówno do generacji jak i rejestracji fal sprężystych. Przetworniki piezoelektryczne tworzyły sieci o określonych topologiach. Celem rozprawy było badanie sieci o różnych topologiach pod kątem ich efektywności do detekcji i lokalizacji uszkodzeń (pierwszy i drugi poziom diagnostyki). Badania prowadzono w jednorodnych panelach o własnościach izotropowych wykonanych ze stopu aluminium (jednolity materiał, stała grubość, brak usztywnień, brak połączeń mechanicznych, brak nieciągłości materiałowych – oprócz symulowanych uszkodzeń). Podejście wykorzystujące sieć przetworników do generacji i rejestracji fal sprężystych, metoda odbić falowych (z ang. *pulse-echo*) oraz algorytm lokalizacji uszkodzeń tworzą zestawienie, które pozwala na realizację idei systemu SHM. Sieć przetworników zintegrowana na stałe z obiektem pozwala na monitorowanie jego stanu technicznego w sposób ciągły. Badania wykazały, że opracowany algorytm pozwalał na określenie lokalizacji uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych w formie prostych jednorodnych paneli. Tym samym udowodniono, że jest możliwa realizacja implementacji systemu SHM dla takiego elementu konstrukcyjnego.

Dalsza kontynuacja badań (po obronie rozprawy doktorskiej) pokazała, że w panelach z usztywnieniami, na skutek dużej ilości odbić fal sprężystych od usztywnień, opracowany algorytm lokalizacji uszkodzeń nie funkcjonował prawidłowo. Źródłem problemów była propagacja dwóch podstawowych modów fal sprężystych (mod symetryczny S0 i antysymetryczny A0) propagujących się z różnymi prędkościami, a także ich liczne odbicia od usztywnień oraz zjawisko konwersji modów. Wymienione zjawiska powodują, że sygnały są bardzo złożone (duża liczba paczek falowych reprezentujących odbicia) i w konsekwencji trudne w interpretacji. Trudno jest zidentyfikować poszczególne paczki falowe w sygnałach (ich pochodzenie oraz rodzaj modu).

Rzeczywiste konstrukcje, jak na przykład konstrukcje lotnicze wykonywane są nadal ze stopów aluminium (własności izotropowe). Jednakże coraz częściej i powszechniej wykorzystywane są materiały kompozytowe. Materiały kompozytowe posiadają własności ortotropowe, co powoduje, że własności materiałowe są zależne od kierunku. Fakt ten jest związany z tym, że również prędkość propagacji fal zależy od kierunku propagacji. Stanowi to kolejne utrudnienie dla metod lokalizacji uszkodzeń wykorzystujących metodę odbić falowych i pomiarów punktowych. Ponadto materiały kompozytowe charakteryzują się dużym tłumieniem. Fale sprężyste mogą propagować się na znacznie mniejsze odległości niż ma to miejsce w przypadku elementów wykonanych ze stopów aluminium.

Ponadto niektóre konstrukcje, np. lotnicze, to w głównej mierze konstrukcje cienkościenne o zmiennej grubości, z usztywnieniami oraz połączeniami nitowanymi, śrubowymi oraz klejowymi. Niekiedy występują w nich połączenia różnych materiałów. Stopień skomplikowania strukturalnego tego typu konstrukcji był powodem problemów z zastosowaniem algorytmu wykorzystanego w pracy doktorskiej. Moje badania pokazały, że nawet w przypadku prostych (stała grubość, brak usztywnień) paneli kompozytowych (połączenie żywicy epoksydowej ze zbrojeniem włóknistym) występowały problemy z prawidłowym funkcjonowaniem algorytmu lokalizacji uszkodzeń. Problem ten stanowił dla mnie inspirację do znalezienia innej metody oceny stanu technicznego mającej zastosowanie do rzeczywistych konstrukcji.

W pracach badawczych stanowiących zakres pierwszej części osiągnięcia naukowego wykorzystałem metodę wibrometrii laserowej do bezkontaktowych pomiarów punktowych (z ang. *point-wise*) oraz pomiarów pełnego pola propagacji fal sprężystych.

Prace badawcze rozpocząłem od zastosowania wibrometrii laserowej do pomiarów punktowych w celu prototypowania oraz określania efektywności sieci czujników. W odróżnieniu od prac wykonanych w ramach pracy doktorskiej, pomiary realizowano w oparciu o skanujący wibrometr laserowy stosowany do rejestracji fal sprężystych zamiast czujników piezoelektrycznych. Pomiary realizowane były dla kilku/kilkudziesięciu wybranych punktów na konstrukcji symulujących odczyty w czujnikach piezoelektrycznych. W tym podejściu wykorzystywany był tylko jeden przetwornik piezoelektryczny, którego zadaniem była generacja fal sprężystych. Ideą jest aby docelowo opracowana efektywna konfiguracja punktów pomiarowych została zastąpiona przez sieć przetworników piezoelektrycznych umożliwiających ciągłe monitorowanie stanu technicznego konstrukcji (detekcja, lokalizacja oraz ocena wielkości uszkodzeń). Należy jednak pamiętać, że aktualnie podejście, wraz z opracowanym algorytmem lokalizacji uszkodzeń jest przydatne tylko w przypadku monitorowania prostych elementów konstrukcji bądź fragmentów konstrukcji (bez nieciągłości strukturalnych i materiałowych). Stąd też dalsze prace badawcze związane były z metodą pomiarów pełnego pola fal sprężystych oraz metodą przetwarzania sygnałów pomiarowych mających na celu ocenę stanu technicznego elementów konstrukcji a w szczególności z określeniem stopnia degradacji elementów konstrukcji wykonanych zarówno z materiałów o własnościach izotropowych jak i ortotropowych.

Głównym zastosowaniem wibrometrii laserowej wykorzystywanej w ramach osiągnięcia naukowego były pomiary pełnego pola fal sprężystych oraz ich wykorzystanie do oceny stanu technicznego skomplikowanych konstrukcji. Szczególną uwagę zwrócono na problem oceny stopnia degradacji elementów tych konstrukcji. Badania dotyczyły nie tylko detekcji i lokalizacji uszkodzeń ale również oszacowania ich kształtów oraz oceny wielkości.

W metodzie pełnego pola, fale sprężyste generowane są w jednym punkcie konstrukcji z wykorzystaniem przetwornika piezoelektrycznego. Rejestracja fal odbywa się bezkontaktowo na siatce punktów pomiarowych rozmieszczonych na powierzchni konstrukcji. Metoda ta pozwala na zobrazowanie w formie animacji zjawiska rozchodzenia się fal sprężystych. W porównaniu do metody pomiarów punktowych, w tej metodzie otrzymuje się znacznie większe ilości sygnałów a więc i więcej informacji o zjawisku propagacji fal i ich interakcji z badanym obiektem. Ilości sygnałów dochodzą do kilkudziesięciu tysięcy.

Badania rozpocząłem od analiz interakcji fal z nieciągłościami występującymi w konstrukcjach. Analizowałem wpływ nieciągłości strukturalnych (zmiany grubości, usztywnienia, połączenia mechaniczne) jak i uszkodzeń (symulowane pęknięcie, delaminacja) na propagację rozchodzenia się fal sprężystych. Uwagę skupiłem również na zjawisku konwersji modów S_0/A_0 fal sprężystych. W tym przypadku wykorzystałem zarówno wyniki badań numerycznych (metoda elementów spektralnych) jak i eksperymentalnych (metoda pełnego pola). Metoda pełnego pola jest niezastąpiona w zastosowaniu do obrazowania oraz analizy zjawiska propagacji fal sprężystych w skomplikowanych strukturalnie konstrukcjach.

Kolejnym krokiem w badaniach, było wykorzystanie interakcji fal sprężystych z nieciągłościami do detekcji, lokalizacji oraz oceny wielkości uszkodzeń. Zamierzonym i osiągniętym celem był trzeci z poziomów diagnostyki (ocena wielkości uszkodzenia). Interakcje fal sprężystych mogą być tym samym wykorzystane do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Przeprowadzone przeze mnie badania eksperymentalne dla metody pełnego pola rozpocząłem od aluminiowych elementów konstrukcji o własnościach izotropowych. Pierwszym obiektem był

prosty element konstrukcyjny w formie panelu z wprowadzonymi nieciągłościami (otwory, nacięcie). Przeprowadziłem badania wpływu degradacji stanu technicznego połączeń mechanicznych (luzowanie śrub) na propagację fal.

Moje późniejsze prace dotyczyły badań prowadzonych dla metody pełnego pola w odniesieniu do konstrukcji wykonanych z materiałów kompozytowych. Przeprowadzone badania dotyczyły elementów kompozytowych z wprowadzonymi nieciągłościami o postaci delaminacji symulowanych poprzez umieszczenie w materiale przekładek teflonowych oraz w przypadku bardziej realistycznym – przez rozwarstwienie mechaniczne.

Pierwsze prace badawcze przeprowadzono dla prostych jednorodnych paneli (bez usztywnień) wykonanych z kompozytów włóknistych o włóknach ciągłych. Laminaty kompozytowe wykonane były na bazie lepiszcza w formie żywicy epoksydowej oraz materiału wzmacniającego (powszechnie zwanego zbrojeniem) w formie włókien węglowych oraz szklanych. Wykorzystane zbrojenie występowało w formie tkanin szytych jednokierunkowych/dwukierunkowych oraz tkanin plecionych dwukierunkowych. Kolejny krok stanowiły badania dotyczące płyty z laminatu o zmiennej grubości.

Następnie, w celu zbliżenia się do rzeczywistych kompozytowych konstrukcji lotniczych, badania przeprowadzono na wytworzonym modelu takiej konstrukcji. Badania dotyczyły płyty kompozytowej wykonanej z laminatów szklano-epoksydowych z rdzeniem komórkowym o strukturze plastra miodu (element przekładowy). Wypełniacz komórkowy oraz usztywnienia stosowane są powszechnie w konstrukcjach lotniczych. Ostateczny krok obejmował badania eksperymentalne dla kompozytu strukturalnego w formie fragmentu rzeczywistej konstrukcji lotniczej. Było to element wykonany z klejonych laminatów węglowo-epoksydowych z uformowanymi usztywnieniami.

Oprócz badań dotyczących samych form interakcji fal z nieciągłościami (odbicia, konwersja modów), przeprowadzone zostały badania związane z zastosowaniem tych interakcji do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji. W tym celu wykorzystane zostały mapy RMS (z ang. *Root Mean Square*) rozkładu energii fal oraz ulepszony algorytm map ważonych WRMS (z ang. *Weighted Root Mean Square*). Utworzone mapy rozkładu energii to tzw. mapy uszkodzeń, które pozwalają na detekcję, lokalizację oraz ocenę kształtu i wielkości uszkodzenia. Pozwala to w efekcie na określenie stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Metoda pomiarów pełnego pola fal sprężystych (wykorzystująca wibrometr laserowy) i jego interpretacji pomimo ogromnych możliwości identyfikacji uszkodzeń ma jedną istotną wadę – nie może być wykorzystana do ciągłych pomiarów (SHM), realizowanych podczas eksploatacji konstrukcji (np. samolotu w czasie lotu). Metoda ta polega na realizacji badań nieniszczących (z ang. *Non Destructive Testing*, NDT) i może być zastosowana okresowo. Wspomniana wada metody skłoniła mnie do zainteresowania się metodą impedancji E/M, która bazuje na zjawisku powstawania sprężystych fal stojących oraz wykorzystaniu tego zjawiska do oceny stanu technicznego konstrukcji a w szczególności oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Metoda ta, i jej skuteczne zastosowanie stanowiły drugą część mojego osiągnięcia. Metoda ta pozwala na detekcję uszkodzeń oraz wykrycie rozrostu uszkodzenia (nie umożliwia dokładnego określenia lokalizacji uszkodzenia) ale może być za to wykorzystana do ciągłego monitorowania stanu technicznego, co stanowi jej ogromną zaletę.

We wspomnianej powyżej metodzie wykorzystywany jest jeden przetwornik piezoelektryczny, który stanowi zarówno element aktywny generujący fale jak i zarazem element sensoryczny – czujnik. Dokładny opis metody zawarty został w dalszej części niniejszego dokumentu.

Badania rozpocząłem od przypadku jednorodnej belki wykonanej ze stopu aluminium z nacięciami symulującymi uszkodzenia o różnych rozmiarach. W kolejnym kroku, badania zostały przeprowadzone dla płyt wykonanych z kompozytu węglowo-epoksydowego z rozwarstwieniami o różnych rozmiarach. Oprócz zastosowania tej metody do wykrywania uszkodzeń mechanicznych oraz

oceny ich wielkości, metodę wykorzystałem do oceny stopnia zawilgocenia materiałów kompozytowych. Jest to istotny problem, gdyż zawilgocenie może być źródłem degradacji mechanicznej (zamarzanie) jak i chemicznej materiałów kompozytowych.

Przeprowadzone przez mnie badania dotyczyły również szczegółowej analizy wpływu temperatury na wyniki pomiarów oraz opracowania metody kompensacji tego wpływu (usuwanie przesunięcia pików rezonansowych w dziedzinie częstotliwości). W dalszym etapie badań metodę kompensacji wpływu temperatury usprawniono (poprzez usuwanie także zmian amplitud), poprawiając tym samym skuteczność detekcji uszkodzeń oraz oceny ich wielkości.

Uwagę skupiłem również nad możliwością zastąpienia laboratoryjnego analizatora impedancji przez scalony analizator impedancji AD5933. Rozwiązanie takie ma liczne zalety (małe rozmiary i masa układu, koszt, prostota integracji z mikrokontrolerami), które powodują, że wspomniane rozwiązanie może znaleźć zastosowanie w systemach ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji (SHM).

Podsumowując, metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach punktowych (z ang. *point-wise*) z wykorzystaniem wibrometrii laserowej może być wykorzystywana do prototypowania sieci czujników stosowanych w systemach ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Z kolei, metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach pełnego pola oferuje natomiast o wiele większe możliwości. Metoda ta pozwala na prowadzenia szczegółowych analiz propagacji fal sprężystych oraz ich interakcji z uszkodzeniami w skomplikowanych konstrukcjach. Metoda pozwala na detekcję uszkodzeń, ich lokalizację oraz ocenę ich wielkości a także kształtu (ocena stopnia degradacji elementów konstrukcji). Metoda ta może być stosowana do okresowego badania stanu technicznego konstrukcji.

Metoda impedancji elektromechanicznej może być natomiast wykorzystywana w sposób ciągły, do detekcji uszkodzeń i oceny ich wzrostu. Po wykryciu degradacji elementu konstrukcji przez metodę impedancji elektromechanicznej metoda propagacji fal oparta na pomiarach pełnego pola może być wykorzystana do określenia dokładnej lokalizacji (uszkodzenia) oraz stopnia degradacji (wielkość uszkodzenia). W przypadku gdy położenie oraz stopień degradacji nie wpływa jeszcze na bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji, może ona być w dalszym ciągu eksploatowana. W tym przypadku metoda impedancji elektromechanicznej może być wykorzystywana do ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji pod kątem wzrostu stopnia tej degradacji.

Dzięki takiemu połączeniu metod propagacji fal sprężystych opartej na pomiarach pełnego pola oraz metody impedancji elektromechanicznej otrzymuje się bardzo efektywne narzędzie diagnostyczne umożliwiające określenie stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Sformułowana teza:

Możliwe jest opracowanie efektywnych metod oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji z wykorzystaniem stojących i propagujących się fal sprężystych.

Szczegółowy opis metodyki badań oraz dyskusja

I. Metoda propagacji fal sprężystych

Pierwsza z metod oceny stanu technicznego wykorzystuje zjawisko propagacji fal sprężystych. W ramach badań dotyczących osiągnięcia naukowego wykorzystałem bezkontaktowe pomiary propagacji fal sprężystych z użyciem skanującego wibrometru laserowego 3D Polytec PSV-400. Fale sprężyste były generowane za pośrednictwem przetworników piezoelektrycznych w kształcie dysków o średnicy 10 mm oraz grubości 0,5 mm produkowanych przez firmę Noliac z materiału piezoelektrycznego NCE51.

Wibrometr laserowy służy do pomiarów drgań elementu konstrukcji z wykorzystaniem zjawiska Dopplera. Parametrem bezpośrednio mierzonym jest prędkość drgań, jednak wibrometr pozwala również na przedstawienie wyników pomiarów w formie przemieszczeń. System PSV-400 wyposażony jest w trzy głowice pomiarowe umożliwiające (po czasochłonnym przygotowaniu i kalibracji) pomiary wzdlużnych i poprzecznych składowych prędkości drgań.

Na Rys. 1 przedstawiono widok stanowiska pomiarowego do badań propagacji fal sprężystych. Na stanowisku widoczne są trzy głowice skanujące, moduł sterująco-rejestrujący wibrometru zawierający kontrolery głowic i komputer PC, wzmacniacz sygnałów (widoczny obok monitora) oraz przykładowy obiekt mierzony w postaci poziomego stabilizatora śmigłowca PZL W-3 Sokół wykonanego z kompozytu strukturalnego.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystywane były pomiary realizowane za pomocą jednej głowicy pomiarowej, rejestrowane wzdluż wiązki laserowej. W ten sposób otrzymano przybliżenie pomiarów poprzecznych składowych prędkości (przemieszczeń). Pozwoliło to na pominięcie żmudnego i czasochłonnego procesu kalibracji trzech głowic pomiarowych.



Rys. 1. Stanowisko do badań propagacji fal sprężystych z wykorzystaniem wibrometrii laserowej

Wykorzystany system PSV-400 jest wibrometrem skanującym, więc umożliwia realizację pomiarów na siatce zdefiniowanych w oprogramowaniu sterującym punktów pomiarowych. Pozycjonowanie wiązki laserowej w obrębie siatki punktów pomiarowych realizowane jest za pośrednictwem systemu optycznego zwierciadeł znajdującego się w głowicy pomiarowej. System pozwala na pomiary drgań (fale stojące) jak i propagacji fal. W ramach badań związanych

z osiągnięciem naukowym wykorzystując wibrometr laserowy prowadziłem pomiary propagacji fal sprężystych.

W przypadku pomiarów dotyczących propagacji fal sprężystych system umożliwia wykonanie punktowych pomiarów propagacji fal sprężystych (sygnały w pojedynczych punktach) a także wykonanie pomiarów pełnego pola fal sprężystych (gęsta sieć punktów pomiarowych pokrywająca powierzchnię konstrukcji, na której odbywają się pomiary).

Pomiary punktowe fal sprężystych

Głównym celem badań było zastosowanie bezkontaktowych pomiarów punktowych propagacji fal sprężystych z wykorzystaniem wibrometrii laserowej w celu prototypowania i oceny efektywności sieci czujników piezoelektrycznych wykorzystywanych w badaniach degradacji elementów konstrukcji. Pomiary propagacji fal sprężystych w punktach symulują rejestrację fal sprężystych realizowaną przez przetworniki piezoelektryczne. Takie podejście jest przydatne na etapie prototypowania sieci czujników (brak potrzeby przygotowania powierzchni, klejenia przetworników oraz ich demontażu w celu zmiany położenia). Wystarczy prosta zmiana położenia punktów pomiarowych w oprogramowaniu wibrometru.

Badania zapoczątkowane po obronie doktoratu dotyczyły wykorzystania metody wibrometrii laserowej do pomiarów punktowych fal sprężystych w celu prototypowania sieci czujników dla zastosowania w detekcji i lokalizacji uszkodzeń. Prototypowanie obejmuje dobór: liczby czujników, sposobu ich rozmieszczenia, odstępów pomiędzy czujnikami dla danej konstrukcji. W odróżnieniu od metody pomiarowej wykorzystanej w badaniach związanych z rozprawą doktorską, gdzie wykorzystywano przetworniki piezoelektryczne zarówno do generacji jak i rejestracji fal, w metodzie wykorzystywanej w ramach osiągnięcia naukowego przetwornik piezoelektryczny stosowany był wyłącznie do generacji fal sprężystych. Rejestracja fal sprężystych w wybranych punktach konstrukcji, symulujących przetworniki piezoelektryczne, realizowana była w oparciu o pomiary bezkontaktowe z wykorzystaniem wibrometru laserowego. Takie postępowanie stanowi zupełnie inne rozwiązanie pomiarowe. Jego zaletą jest prostota symulacji sieci czujników piezoelektrycznych o różnych topologiach za pomocą odpowiedniego rozmieszczenia punktów pomiarowych dla wibrometru laserowego. Umożliwia to znaczące skrócenie czasu związanego z procesem prototypowania sieci przetworników.

W pozycji [H1] opublikowano pierwsze wyniki pomiarów punktowych propagacji fal sprężystych z wykorzystaniem wibrometru laserowego. Wyłącznie w tym jednym przypadku wykonano pomiar 3D z wykorzystaniem trzech głowic pomiarowych wibrometru laserowego. W przypadku pomiarów 3D otrzymano przebiegi przemieszczeń poprzecznych oraz wzdłużnych w dwóch kierunkach (x i y). Jak już wcześniej wspomniano reszta pomiarów dotyczyła wykorzystania tylko jednej głowicy wibrometru, ze względu na pracochłonną i czasochłonną kalibrację trzech głowic pomiarowych.

W pracy [H1] opublikowano również wyniki badań efektywności lokalizacji uszkodzeń przez sieci czujników symulowane z pomocą punktów pomiarowych dla wibrometru laserowego. Było to głównym celem przeprowadzonych badań, których wyniki opublikowano w tej pracy. Motywacją był fakt, że wciąż mała część prac dotyczyła badań związanych z opracowaniem sposobów rozmieszczenia przetworników piezoelektrycznych dla metody odbić falowych (z ang. *pulse-echo*). Duża część wyników prac badawczych opublikowanych w literaturze przedmiotu dotyczyła metody układów fazowych (z ang. *phased array*).

Nowością było wykorzystanie bezkontaktowych pomiarów punktowych fal sprężystych w celu oceny efektywności lokalizacji uszkodzeń z wykorzystaniem metody odbić falowych (z ang. *pulse-echo*) przez zaproponowane układy punktów pomiarowych.

Punkty pomiarowe tworzyły matryce kwadratowe 3x3 (symulacja 9 czujników) oraz 5x5 (25 czujników). Badałem wpływ różnych rozstawów punktów pomiarowych na wyniki lokalizacji

uszkodzenia. Zaprezentowane podejście pozwoliło ocenić efektywność sieci przetworników bez jej fizycznej realizacji. Po określeniu efektywnej konfiguracji rozmieszczenia punktów pomiarowych, można w taki sam sposób rozmieścić przetworniki piezoelektryczne na badanej konstrukcji.

W artykule [H2] opublikowano również wyniki pomiarów punktowych propagacji fal sprężystych z wykorzystaniem wibrometru laserowego. Badania te zrealizowano w ramach kierowanego przeze mnie projektu naukowego MNiSW IUVENTUS Plus IP2011 058971, pt.: „Nieinwazyjne metody monitorowania stanu technicznego konstrukcji”. Punkty pomiarowe symulowano dla trzech sieci przetworników rozmieszczonych na okręgach o średnicach 10, 20 oraz 30 mm (12 punktów pomiarowych) oraz jednej sieci, w której punkty pomiarowe umieszczono na trzech współśrodkowych okręgach o średnicach 10, 20 i 30 mm (łącznie 36 punktów pomiarowych). Celem badań było określenie efektywności lokalizacji uszkodzeń przez poszczególne symulowane sieci przetworników.

Do oceny efektywności wykorzystano charakterystyki kątowe wzmocnienia odbić falowych utworzone dla badanych sieci w panelu wytworzonym ze stopu aluminium, w którym znajdowało się uszkodzenie symulujące degradację analizowanego elementu konstrukcji. Charakterystyki kierunkowe ilustrują rozkład wartości wskaźnika uszkodzeń (wzmocnienie odbić falowych) w zależności od kąta. Największe wartości wskaźnika uszkodzeń powinny być osiągane dla jak największego zakresu zmian kąta, na którym występuje uszkodzenie. Takie postępowanie pozwala na osiągnięcie precyzyjnego wskazania lokalizacji uszkodzenia.

Wadą podejścia wykorzystującego wibrometr laserowy do pomiarów w punktach reprezentujących czujniki piezoelektryczne jest to, że w fizycznej realizacji sieci przetworników piezoelektrycznych fale sprężyste odbijają się pomiędzy przetwornikami. Powoduje to, że początkowa część sygnału zawierającego te odbicia nie jest wykorzystywana w algorytmie lokalizacji uszkodzeń opartym na metodzie odbić falowych, [H2]. W efekcie tego powstaje martwe pole (strefa gdzie uszkodzenia nie zostaną wykryte) obejmujące obszar pokryty przez konfigurację przetworników. Z tego powodu wybrane konfiguracje sieci punktów pomiarowych zastąpiono sieciami przetworników piezoelektrycznych i przebadano je eksperymentalnie w celu określenia ich efektywności w lokalizacji uszkodzenia.

Im większy odstęp między czujnikami (np. większa średnica okręgu) tym precyzyjniej wskazana zostaje lokalizacja miejsca degradacji/uszkodzenia elementu konstrukcji (wąskie wskazanie kątowe wzmocnienia na charakterystykach kierunkowych) ale też istnieje większa martwa strefa. Ponadto stwierdziłem, że konfiguracja w postaci okręgu daje lepsze rezultaty lokalizacji uszkodzeń niż konfiguracja w postaci okręgu wypełnionego wewnątrz przetwornikami ponieważ w tej pierwszej występuje mniej odbić fal od poszczególnych przetworników.

Na potrzeby badań kod algorytmu lokalizacji uszkodzeń z wykorzystaniem metody odbić falowych, który dotychczas był zaprogramowany w środowisku MATLAB, został przeze mnie zaprogramowany w języku C++. Dzięki temu nie jest konieczne wykorzystywanie specjalistycznego oprogramowania środowiska MATLAB w systemach lokalizacji uszkodzeń.

Oryginalną część stanowi wykorzystanie wibrometrii laserowej i pomiarów punktowych fal sprężystych do prototypowania konfiguracji sieci pomiarowych i oceny jest skuteczności w lokalizacji uszkodzeń dla metody odbić falowych (z ang. *pulse echo*).

Jak już wspomniano we wstępie, docelowym zamierzeniem jest aby opracowana efektywna konfiguracja punktów pomiarowych została zastąpiona przez sieć przetworników piezoelektrycznych umożliwiających ciągle monitorowanie stanu technicznego konstrukcji obejmującego w szczególności ocenę stopnia degradacji fizycznej elementów konstrukcji. Jednakże wyniki badań przeprowadzonych dotychczas pokazały, że do chwili obecnej podejście wykorzystujące pomiary punktowe i metodę odbić falowych, może być wykorzystane do efektywnego monitorowania jednorodnych elementów

konstrukcji, bez nieciągłości strukturalnych i materiałowych (np. jednorodne fragmenty konstrukcji zlokalizowane pomiędzy usztywnieniami).

Stąd wynikają dalsze prace badawcze, dotyczące metody pełnego pola fal sprężystych wykorzystanej do monitorowania skomplikowanych konstrukcji, której zastosowanie wchodzi w skład osiągnięcia naukowego. Dalsze badania związane były głównie z metodą pomiarów pełnego pola fal sprężystych. Na tej właśnie metodzie skupiłem głównie swą uwagę jeżeli chodzi o zastosowanie zjawiska propagacji fal zastosowanego do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Pomiary pełnego pola fal sprężystych

Główną częścią mojego osiągnięcia naukowego były badania i analizy wyników związane z pomiarami pełnego pola fal sprężystych. Głównym celem badań było wykorzystanie metod analizy pełnego pola fal sprężystych w celu określenia interakcji modów fal sprężystych z nieciągłościami występującymi w skomplikowanych konstrukcjach rzeczywistych. Wykorzystanie efektów interakcji fal sprężystych z nieciągłościami (odbicia, konwersja modów) pozwala na detekcję, lokalizację oraz ocenę rozmiaru uszkodzeń w metalowych i kompozytowych konstrukcjach (np. lotniczych). Dzięki temu możliwa jest ocena stopnia degradacji elementów konstrukcji.

W przypadku pomiarów pełnego pola fal sprężystych tworzona jest gęsta siatka punktów pomiarowych, pokrywająca powierzchnię badanego obiektu. Gęstość siatki pomiarowej musi być odpowiednio dopasowana do długości mierzonej fali. W punktach pomiarowych rejestrowane są sygnały za pomocą wibrometru laserowego. W efekcie otrzymuje się zestaw sygnałów czasowych, który można przedstawić w formie macierzy trójwymiarowej. W macierzy tej, dwa wymiary związane są z przestrzenią, natomiast trzeci wymiar związany jest z czasem. Na podstawie wspomnianej macierzy sygnałów pomiarowych można utworzyć animację czasową obrazującą propagację fal w badanym obiekcie. Sygnały zawarte w macierzy mogą zostać również poddane procesowi przetwarzania w celu identyfikacji nieciągłości występujących w obiekcie.

W elementach konstrukcji ograniczonych dwoma równoległymi płaszczyznami propagują się fale sprężyste zwane falami prowadzonymi (z ang. *guided waves*). Fale te są pewnym przybliżeniem fal Lamba, które mogą propagować się w elementach ograniczonych dwiema płaszczyznami, dla których tylko jeden wymiar jest ograniczony (grubość). Są to elementy czysto teoretyczne, ponieważ w rzeczywistych obiektach wszystkie wymiary są ograniczone (np. panele, płyty). Fale sprężyste, które propagują się w rzeczywistych elementach są przybliżeniem fal Lamba i dla rozróżnienia tego faktu nazywane są falami prowadzonymi. Dla uproszczenia fale prowadzone będą nazywane w tym dokumencie falami sprężystymi.

Fale sprężyste propagujące się w elementach konstrukcji występują jako mody (formy): symetryczne (S) oraz antysymetryczne (A). Mody podstawowe oznaczane są odpowiednio S0 oraz A0. Dla modów wyższych rzędów dodawane są kolejne cyfry. Liczba modów propagujących się w elemencie konstrukcji zależy od iloczynu częstotliwości wymuszenia i grubości elementu.

Dla badanych przypadków mody podstawowe A0 oraz S0 można rozróżnić na podstawie prędkości propagacji oraz długości fali. Mod symetryczny S0 propaguje się z większą prędkością niż mod A0 i ma on większą długość fali.

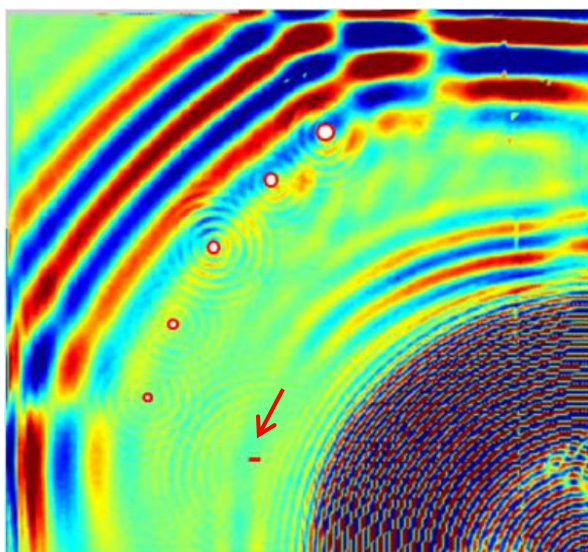
W przypadku występowania nieciągłości następuje interakcja fal sprężystych z nieciągłością (odbicie fal, konwersja modów). Zjawiska odbicia i konwersji modów mogą być wykorzystane do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Badania, których wyniki stanowią część osiągnięcia naukowego dotyczącą wykorzystania metody pełnego pola fal sprężystych, rozpocząłem od określenia form interakcji modu S0 z nieciągłościami w konstrukcjach metalowych. Badania te wykonano w ramach kierowanego przeze mnie projektu NCN

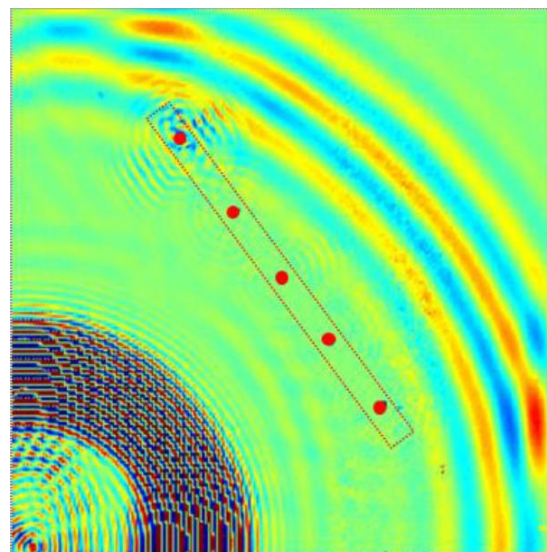
SONATA pt. "Badania zjawiska konwersji modów fal sprężystych w elementach cienkościennych z nieciągłościami", nr 2014/13/D/ST8/03167. Projekt ten jest zorientowany na badanie zjawiska konwersji modów fal sprężystych.

Badania rozpoczęto od pomiarów pełnego pola fal sprężystych z wykorzystaniem wibrometru laserowego dla przypadku prostego panelu ze stopu aluminium bez usztywnień. W panelu zostały wprowadzone nieciągłości w formie otworów przelotowych o średnicach 2; 3; 3,5; 4 oraz 5 mm symulujących uszkodzenia. Wyniki tych badań opublikowano w pozycji [H3]. Na podstawie pomiarów pełnego pola fal sprężystych utworzono animację obrazującą rozchodzenie się fal sprężystych w badanym obiekcie. Następnie analizowano wyniki dla wybranych obrazów (klatek czasowych) pochodzących z animacji. Na bazie wspomnianej analizy dla wszystkich przypadków średnic otworów zaobserwowałem wyraźnie zjawisko konwersji modu S_0/A_0 . Występowanie tego zjawiska widoczne jest na Rys. 2, gdzie otwory zaznaczono symbolicznie okręgami. W tym przypadku mod S_0 konwertuje się do modu A_0 , co zidentyfikować można na podstawie różnicy w długości fali modu padającego (S_0) oraz modu (A_0) powstałego w wyniku konwersji.

Na podstawie analizy wyników badań wykryto także zjawisko konwersji modu S_0/A_0 w miejscu występowania rysy o długości ok. 3mm, znajdującej się na odwrotnej powierzchni niż mierzona. Widać to wyraźnie na Rys. 2, gdzie położenie nacięcia wskazuje strzałka. Nie stwierdzono odbicia modu A_0 od tej nieciągłości. Jedyną formą interakcji fal z rysą była konwersja modu S_0 .



Rys. 2. Występowanie konwersji modów S_0/A_0 dla otworów oraz dla rysy



Rys. 3. Zjawisko konwersji modu S_0/A_0 dla usztywnienia mocowanego połączeniem śrubowym

Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej było zaobserwowanie zjawiska konwersji modu S_0/A_0 dla rysy o długości 3mm znajdującej się po przeciwnej stronie panelu niż mierzona. Wskazuje to na możliwość wykrywania wad znajdujących się we wnętrzu konstrukcji cienkościennej poprzez obserwację zjawiska konwersji modu S_0/A_0 .

Pomiary pełnego pola fal wykonano również dla panelu z płaskownikiem zamocowanym za pośrednictwem połączenia śrubowego, które może też symulować połączenie nitowane. W celu symulacji zmian stanu technicznego połączenia nitowanego, śruby dokręcono różnym momentem siły. Śruby o różnym stopniu dokręcenia symulują różny poziom degradacji stanu technicznego połączenia.

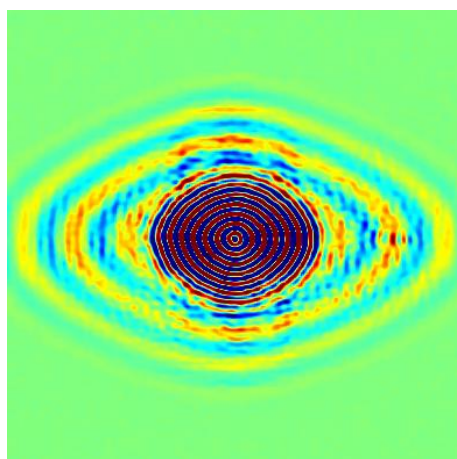
Zjawisko konwersji modu S0/A0 zaobserwowano dla wszystkich wartości momentów dokręcenia śrub. W przypadku śruby o największym momencie dokręcenia, przylegające do panelu usztywnienie powoduje formowanie płaskiego frontu propagacji fal (śruba w lewym górnym rogu Rys. 3). Front fal powstaje na skutek konwersji modu S0 na A0, na skutek interakcji z usztywnieniem. Ponadto nowopowstały mod A0 zaczyna propagować się również w usztywnieniu. W przypadku śrub dokręconych z użyciem mniejszego momentu (front falowy modu A0, powstałego na skutek konwersji, ma charakter kołowy, związany z występowaniem śruby w otworze (druga i trzecia od lewej śruba na Rys. 3). Ponadto, nie stwierdzono propagacji modu A0 w usztywnieniu. Zaobserwowano też, że amplituda nowopowstałego modu A0 (na skutek zjawiska konwersji) zależy od stopnia dokręcenia śrub (amplituda rośnie wraz ze stopniem dokręcenia śrub mocujących usztywnienie).

W przypadku panelu bez usztywnia, gdy w otworze występuje zakręcona śruba oraz w przypadku jej usunięcia (pozostaje otwór) również zaobserwowano konwersję modu S0/A0. Jednak po usunięciu śruby amplituda nowopowstałego modu A0 jest znacznie mniejsza [H3].

W literaturze raportującej wyniki badań numerycznych innych autorów nie zaobserwowano konwersji modów dla przypadku nieciągłości symetrycznie umieszczonych względem grubości elementu (np. otwór przelotowy). W przypadku badań, które prowadziłem zjawisko konwersji modów występowało dla otworu przelotowego nawet z sfazowanymi krawędziami (usuwania pozostałości materiału po wyjścia narzędzia skrawającego w postaci wiertła). Zjawisko to jest spowodowane tym, że w rzeczywistości bardzo trudno jest wprowadzić idealnie symetryczną nieciągłość dla bardzo czułej metody propagacji fal sprężystych.

Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej było zaobserwowanie, że amplituda modu A0 powstałego na skutek interakcji modu S0 ze śrubami łączącymi usztywnienie z panelem zależy od stopnia dokręcenia śrub. Dla śrub zakręconych największym momentem formuje się front falowy związany z przylegającym usztywnieniem a nowopowstały mod A0 zaczyna propagować się w usztywnieniu. Obserwacja tych efektów pozwala na ocenę stanu technicznego połączeń śrubowych/nitowanych.

W kolejnym kroku, badania skupiłem na elementach kompozytowych. W elementach kompozytowych własności materiału zależą od kierunku. Związane jest to z orientacją włókien zbrojenia.



Rys. 4. Propagacja modu S0 i A0 w kompozycie szklano-epoksydowym o orientacji warstw zbrojenia: $[0/0/0/0/0]^0$ – wynik badań eksperymentalnych z wykorzystaniem wibrometrii laserowej

Laminaty kompozytowe cechują się własnościami ortotropowymi, w wyniku czego prędkość propagacji fal sprężystych zależy od kierunku propagacji. W efekcie tego również kształt frontu

falowego zależy od orientacji włókien zbrojenia. Dla porównania w materiałach izotropowych, front falowy jest kołowy, gdyż własności materiałowe nie zależą od kierunku.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdziłem, że dla materiałów kompozytowych kształt frontu falowego dla modu S0 bardziej zależy od orientacji włókien zbrojenia niż dla modu A0, co widoczne jest wyraźnie na Rys. 4. W rozważanym przypadku mod S0 propaguje się z większą prędkością niż mod A0 a jego front falowy ma kształt elipsy (próbki stanowi laminat o orientacji zbrojenia $[0/0/0/0/0]^\circ$). Poza tym na Rys. 4 ewidentnie widoczna jest różnica długości fal (mod A0 ma mniejszą długość fali niż mod S0) – wyniki te pochodzą z pracy [H3].

Na podstawie analizy wyników symulacji propagacji fal sprężystych (badania numeryczne zjawiska propagacji fal) w panelach kompozytowych z symulowaną nieciągłością w formie delaminacji przedstawionych w pracy [H3] stwierdziłem, że delaminacja jest źródłem odbicia modu A0 oraz konwersji modu S0 do postaci A0. Wspomniane formy interakcji fal mogą być wykorzystane do wykrywania tego typu uszkodzeń w elementach kompozytowych. Dla częstotliwości pobudzenia wynoszącej 150 kHz stwierdziłem także propagację wyższego modu antysymetrycznego – A1.

Symulacje propagacji fal zostały wykonane na bazie metody elementów spektralnych przez Pawła Kudelę. Badania numeryczne były zrealizowane i sfinansowane w ramach koordynowanego przeze mnie projektu NCN SONATA Nr 2014/13/D/ST8/03167.

Kolejne badania prowadzone były dla panelu wytworzonego z kompozytu szklano-epoksydowego o zmiennej grubości. Jest to krok w kierunku badań konstrukcji bardziej skomplikowanych geometrycznie i strukturalnie. Badania eksperymentalne, których wyniki przedstawiono w pracy [H4] dotyczyły analizy propagacji fal w elemencie dwuwymiarowym w formie wielowarstwowego panelu kompozytowego (własności ortotropowe) o zmiennej grubości. Panel kompozytowy został podzielony na sekcje o różnych grubościach. W badaniach tych skupiono uwagę na wpływie nieciągłości (w formie zmiennej grubości próbki) na rozchodzenie się fal. Wyniki badań stanowią element nowości oraz znaczący wkład w dyscyplinę mechaniki. Dostępne dotychczas prace dotyczyły jedno i dwuwymiarowych elementów o zmiennej grubości i własnościach izotropowych (elementy metalowe), brak było natomiast takich prac dotyczących elementów o własnościach ortotropowych.

Badania te wykonałem będąc głównym wykonawcą projektu NCBiR KOMPNDT pt.: „Nieinwazyjne metody oceny degradacji fizyko-chemicznej i mechanicznej elementów konstrukcji kompozytowych”, PBS1/B6/8/2012 związanym z opracowaniem metod wykrywania degradacji materiałów kompozytowych. Celem badań była analiza zmian liczby falowej oraz długości fali na skutek propagacji fal w panelu o sekcjach posiadających różną grubość.

Pomiary fal zebrane wzdłuż linii przebiegającej wzdłuż sekcji panelu o zmiennych grubościach zostały przetransformowane do dziedzin - liczba falowa-przestrzeń, z wykorzystaniem krótko-przestrzennej transformacji Fouriera ($2D\ SSFT$, z ang. *Short Space Fourier Transform*). Efektem tego postępowania był przebieg zmian liczby falowej w funkcji długości panelu obrazujący zmiany liczby falowej związane ze zmianą grubości materiału. Zmiana liczby falowej wiąże się ze zmianą długości fali, co objawia się w formie zmiany czułości wykrywania uszkodzeń wraz ze zmianą grubości.

W przypadku gdy wymiary uszkodzenia będą za małe w stosunku do długości fali, fakt ten będzie skutkował nie wykryciem uszkodzenia. Na wykresie przedstawiającym przebieg zmian liczby falowej w funkcji częstotliwości (dla pomiarów wzdłuż kierunku zmian grubości) widać rozmycie liczby falowej. Jest to spowodowane zmianami grubości próbki. Widoczne jest także występowanie dwóch liczb falowych (mody A0 i S0). Wyniki badań mogą znaleźć zastosowanie przy opracowywaniu algorytmów lokalizacji uszkodzeń bazujących na metodzie odbić falowych.

Dla wyników pomiarów pełnego pola w dziedzinie czasu (animacja propagacji fal), można również zaobserwować zmiany długości fali zachodzące na skutek zmian grubości panelu. Po transformacji tych wyników do dziedzin: *liczba falowa x – liczba falowa y – częstotliwość (kx-ky-f)* z wykorzystaniem transformaty Fouriera 3D, bardziej widoczne są zmiany liczby falowej w kierunku propagacji gdzie zmienia się grubość panelu. W panelu ortotropowym o zmiennej grubości, prędkość propagacji zależy od kierunku propagacji (wpływ własności materiałowych) ale też dodatkowo prędkość propagacji ulega zmianie wraz ze zmianą grubości materiału.

Transformacja wyników pomiarów z dziedziny czasu do dziedziny liczba falowa-częstotliwości jest przydatna w analizach propagacji fal (dostarcza informacji o liczbie propagujących się modów). Wspomniana transformacja może również być wykorzystywana do filtracji i separacji modów (usunięcie propagacji wybranego modu, usunięcie kierunku propagacji).

Wyniki w postaci animacji propagacji fal sprężystych oraz animacji dla wielowymiarowej transformaty Fouriera zostały dołączone jako dodatek do artykułu (pliki mogą zostać pobrane ze strony internetowej gdzie dostępny jest artykuł).

Należy podkreślić, że badania propagacji fal sprężystych w dwuwymiarowych elementach kompozytowych o zmiennej grubości są oryginalne i stanowią nowy wkład w dziedzinę badań nad propagacją fal sprężystych w zastosowaniu do oceny stanu technicznego elementów konstrukcji.

Kolejne badania, których wyniki opublikowano w pracy [H5] dotyczyły również panelu kompozytowego jednak o stałej grubości. W badaniach tych skupiono uwagę na możliwości wykrywania delaminacji o różnych rozmiarach. Symulacje propagacji fal sprężystych, których wyniki przedstawiono w pracy [H3] pokazały, że delaminacja jest źródłem interakcji fal sprężystych. Interakcje te mogą być wykorzystane do wykrywania tego typu uszkodzeń.

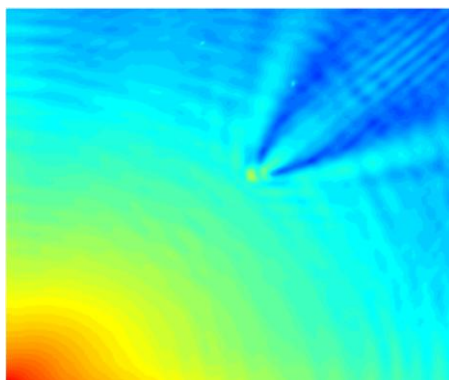
W pracy [H5] przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań interakcji fal z delaminacją, zbliżonych do przedstawionych już badań numerycznych zawartych w pracy [H3]. Pomiary propagacji fal sprężystych zostały wykonane w panelu z delaminacją z wykorzystaniem wibrometru laserowego. Badania prowadzono dla próbek o grubości 3,5 mm z delaminacją symulowaną przez przekładkę teflonową o wymiarach 10 x 10 mm, 15 x 15 mm oraz 20 x 20 mm. Delaminacja położona była dwie warstwy od spodu próbki (pomiar realizowano na górnej powierzchni próbki). Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły występowanie zjawisk odbicia modu A0 od delaminacji oraz konwersji modu S0/A0 na skutek interakcji fal z delaminacją (stwierdzonych wcześniej na bazie wyników badań numerycznych). Dowodzi to, że metoda pełnego pola fal sprężystych oparta na pomiarach z wykorzystaniem wibrometru laserowego stanowi bardzo użyteczne narzędzie pozwalające na analizę propagacji fal sprężystych w elementach konstrukcji z uszkodzeniami.

Wspomniane formy interakcji fal z delaminacją zostały następnie wykorzystane do jej wykrycia. W tym celu początkowo zaproponowano metodę przetwarzania sygnałów, której zadaniem było tworzenie map RMS energii propagujących się fal sprężystych. Mapę energii RMS można utworzyć w oparciu o wskaźnik wyznaczony na bazie formuły (zaproponowanej i wstępnie zweryfikowanej w pracy [H3]):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s_k^2}, \quad (1)$$

gdzie: s_k - sygnał dyskretny zarejestrowany w danym punkcie konstrukcji (k -ta próbka), N - liczba próbek sygnału. Mapy RMS ilustrują rozkład oraz koncentrację energii związane z propagacją fal i ich interakcjami z nieciągłościami występującymi w konstrukcji.

W pracy [H5] przedstawiono mapę RMS energii utworzoną dla przypadku najmniejszej z analizowanych delaminacji (10 mm x 10 mm) wprowadzonej w panelu kompozytowym o stałej grubości. Bez problemu widoczne jest położenie delaminacji (koncentracja energii) oraz punktu generacji fal sprężystych (Rys. 5).

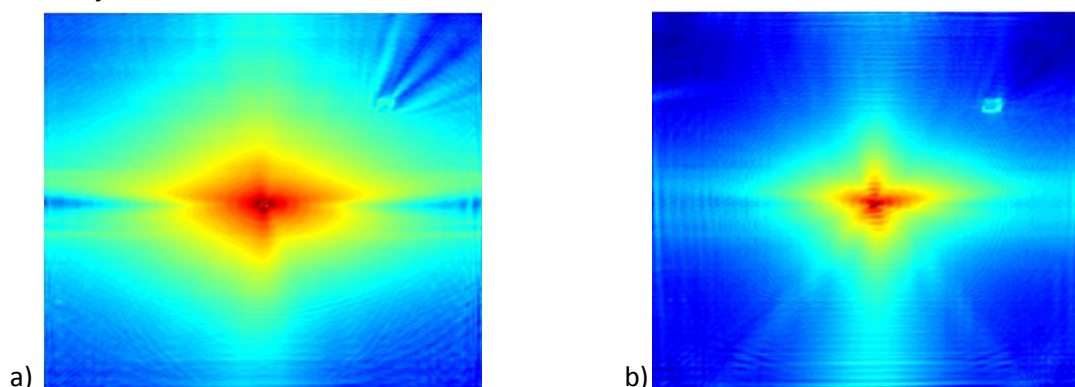


Rys. 5. Mapa RMS energii fal dla płyty kompozytowej z przekładką teflonową o wymiarach 10 mm x 10 mm

Należy podkreślić, że otrzymane wyniki lokalizacji uszkodzeń zostały zweryfikowane przez współautorów z wykorzystaniem metody badań ultradźwiękowych. W tym celu utworzono skany typu B i C obrazujące położenie i rozmiar uszkodzenia [H5].

Podjęcie wykorzystujące mapę RMS zweryfikowałem także dla próbki kompozytowej o zmiennej grubości. Wcześniej opisane zostały wyniki badań samego zjawiska propagacji fal sprężystych w próbce bez uszkodzeń (praca [H4]). Obecnie będą przedstawione wyników lokalizacji uszkodzeń w tej próbce.

W pracy [H5] przedstawiono mapy RMS energii dla kompozytowego panelu o zmiennej grubości z wprowadzoną delaminacją w postaci przekładki teflonowej. W pracy zawarto wyniki eksperymentalne w formie mapy RMS, energii fal dla częstotliwości 100 kHz (Rys. 6a) oraz 150 kHz (Rys. 6b). Mapy wyraźnie wskazują punkt generacji fal sprężystych (w środku panelu). Poza tym w obu przypadkach widoczna jest lokalizacja delaminacji (prawy górny róg panelu - Rys. 6). W przypadku wyższej częstotliwości widać znacznie większe tłumienie generowanych fal, mimo tego lokalizacja delaminacji jest widoczna nawet wyraźniej niż dla niższej częstotliwości (mapa pokazuje mniejszy obszar koncentracji energii związanej z generacją fal). Mapa energii w tym przypadku wskazuje również kształt oraz rozmiar uszkodzenia



Rys. 6. Mapy RMS energii fal sprężystych dla panelu o zmiennej grubości z wkładką teflonową dla częstotliwości: a) 100 kHz, b) 150 kHz

Dalsze badania, których wyniki opublikowano w pracy [H3], stanowiły kolejny krok w kierunku jeszcze bardziej skomplikowanych konstrukcji jakimi są kompozytowe konstrukcje wykorzystywane np. w lotnictwie. Badania te dotyczyły modelu konstrukcji rzeczywistej w formie kompozytu strukturalnego.

W pracy [H3] przedstawiono wyniki lokalizacji delaminacji symulowanej przez przekładkę teflonową (20 mm x 20 mm). Model konstrukcji składał się z laminatu nośnego oraz zamykającego (wykonanych z kompozytu szklano-epoksydowego) a także wypełniacza komórkowego ze stopu aluminium. Przekładka teflonowa umieszczona była pomiędzy wypełniaczem a warstwą laminatu. Dla pomiarów pełnego pola fal sprężystych o częstotliwości 50 kHz utworzono mapę uszkodzeń wskazującą wyraźnie miejsce generacji fal sprężystych oraz położenie delaminacji.

Kolejne badania dotyczyły lokalizacji uszkodzeń we fragmencie rzeczywistej kompozytowej konstrukcji lotniczej widocznej na Rys. 7. W pracy [H3] przedstawiono mapy energii RMS dla propagacji fal sprężystych w panelu klejonym z usztywnieniami wykonanymi z laminatu węglowo-epoksydowego. W panelu wprowadzono uszkodzenia/nieciągłości w formie okrągłych przekładek teflonowych o różnych średnicach (symulujące różne poziomy degradacji elementu), przecięcia oraz dodatkowej masy (plastelina).

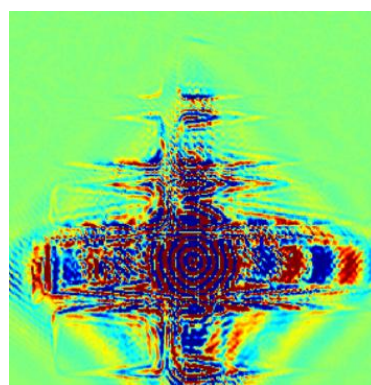
Mapa energii RMS przedstawia wyraźnie miejsce generacji fal sprężystych oraz położenie usztywnień. Na mapie dostrzec można również lokalizację największej delaminacji o średnicy 30 mm oraz dodatkowej masy (wyraźnie pochłaniającej energię fal). Mapa nie wskazała miejsca lokalizacji delaminacji o średnicy 20mm połączonej z przecięciem usztywnienia o długości 30 mm (w tym samym miejscu) oraz delaminacji o średnicy 10 mm.

W pracy [H5] przedstawiono wybrany obraz pochodzący z animacji propagacji fal sprężystych w tym samym panelu (Rys. 7), dla którego przedstawiono wyżej wyniki badań. Widoczna jest wyraźnie propagacja modu S_0 i A_0 oraz konwersja modu S_0/A_0' (A_0' mod nowo powstały po konwersji) na skutek interakcji fal z usztywnieniami. W efekcie tego obraz pełnego pola propagacji fal jest bardzo skomplikowany (Rys. 8).

Wadą map energii RMS jest wskazywanie obszaru o silnej koncentracji energii związanego z miejscem generacji fal sprężystych. Taki obszar występuje zawsze w miejscu, w którym umieszczony jest przetwornik piezoelektryczny generujący fale sprężyste. Oprócz tego mapa energii RMS, zwana także mapą uszkodzeń, wskazuje obszary zmian energii związane z występowaniem nieciągłości/uszkodzeń.



Rys. 7. Fragment konstrukcji lotniczej usztywnieniami wykonany z laminatu węglowo-epoksydowego



Rys. 8. Propagacja fal sprężystych we fragmencie kompozytowej konstrukcji lotniczej

Niekiedy jednak koncentracja energii wokół przetwornika piezoelektrycznego osiąga poziom znacznie większy niż poziom koncentracji energii w miejscu uszkodzenia. Nie pozwala to na wykrycie

uszkodzenia. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie algorytmu tworzenia mapy prezentującej rozkład ważonej energii RMS fal sprężystych. Algorytm ten został zaprezentowany w pracy [H5].

Mapę ważonych wartości WRMS energii fal w danym punkcie konstrukcji, można wyznaczyć w oparciu o formułę:

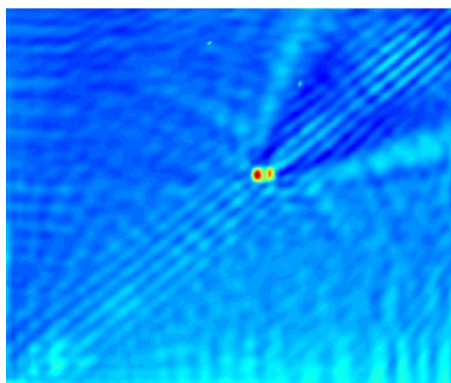
$$WRMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N w_k s_k^2}, \quad (2)$$

gdzie: k - oznacza numer próbki a współczynnik w_k zdefiniowany jest następująco: $w_k = k^m$ $m > 0$.

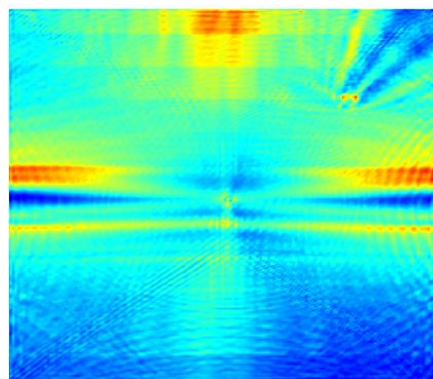
W przypadku $w_k = k^0$ otrzymuje się klasyczną wartość RMS energii sygnału. Dla przypadku $w_k = k^1$ otrzymuje się liniowy wzrost amplitudy sygnału względem wzrostu czasu. Wykorzystując formułę $w_k = k^2$ otrzymuje się wzrost amplitudy sygnału względem czasu opisany funkcją kwadratową. Opisana wyżej procedura jest wykorzystywana przy tworzeniu mapy ważonej energii WRMS fal sprężystych. Takie postępowanie umożliwia w bardzo prosty sposób realizację kompensacji tłumienia fal sprężystych. Opisany powyżej algorytm nie został opracowany przeze mnie, został on opracowany wcześniej, w Zespole, w którym pracuję. Dotychczas wykorzystany był jedynie dla przypadków jednorodnych płyt (bez usztywnień). Ja, zaproponowałem wykorzystanie tego algorytmu dla skomplikowanych konstrukcji co było moim oryginalnym wkładem.

Nowością było wykorzystanie tego podejścia do bardziej skomplikowanych elementów konstrukcji jak płyty kompozytowe o zmiennej grubości, kompozyty strukturalne z wypełniaczem komórkowym oraz fragmenty rzeczywistych konstrukcji lotniczych (klejone panele kompozytowe z usztywnieniami).

W pracy [H5] przedstawiono wynik przeprowadzonych badań nad zastosowaniem zaproponowanego podejścia. Moje badania dotyczyły przede wszystkim doboru odpowiedniej wartości współczynnika wagi, tak aby efektywnie zmniejszyć wpływ wskazania miejsca generacji fal sprężystych. W wyniku badań ustaliłem wartość współczynnika wagi $w_k = k^{1,8}$. Wstępne badania przeprowadzono dla prostego panelu wykonanego z kompozytu węglowo-epoksydowego. W porównaniu do klasycznej mapy uszkodzeń opartej na energii RMS fal (Rys. 5), nowy algorytm bardziej wyraźnie wskazuje lokalizację oraz kształt i przybliżone rozmiary delaminacji symulowanej przekładką teflonową (Rys. 9). Otrzymane wyniki lokalizacji uszkodzeń z wykorzystaniem mapy WRMS zostały zweryfikowane przez współautorów z wykorzystaniem metody badań ultradźwiękowych. W tym celu utworzono skany typu B i C obrazujące położenie i rozmiar uszkodzenia [H5].



Rys. 9. Mapa WRMS energii fal dla płyty kompozytowej z przekładką teflonową o wymiarach 10 mm x 10 mm

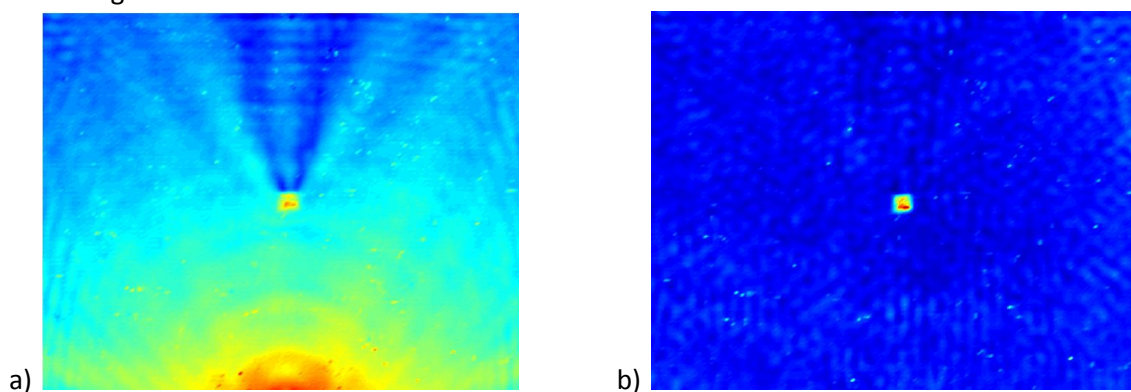


Rys. 10. Mapa WRMS energii fal sprężystych dla panelu o zmiennej grubości z wkładką teflonową

Kolejny przykład zastosowania zaproponowanego algorytmu przedstawiony w pracy [H5], to panel z kompozytu szklano-epoksydowego o zmiennej grubości. Dla częstotliwości fal 100 kHz mapa WRMS wskazuje poszczególne segmenty o zmiennej grubości (panel składa się z 12 segmentów o różnych grubościach) oraz położenie delaminacji (Rys. 10 - prawy górny róg). Nadmienić należy, że przy zastosowaniu klasycznej mapy RMS segmenty nie były widoczne (Rys. 6a). Dla częstotliwości fal 150 kHz mapa energii WRMS nie wskazuje segmentów panelu ale za to bardzo wyraźnie położenie, kształt oraz rozmiary delaminacji.

W kolejnym kroku badań wykorzystano kompozyt strukturalny w formie płyty o poszyciu wykonanym z laminatu szklano-epoksydowego oraz aluminiowego wypełniacza komórkowego (z ang. *honeycomb*) powszechnie stosowanego w konstrukcjach rzeczywistych. W tym przypadku poprawa wyników poprzez zastosowanie mapy WRMS, wykorzystanej zamiast klasycznej RMS, była zaskakująca. Na Rys. 11 zestawiono mapę energii RMS oraz mapę energii WRMS fal sprężystych dla przypadku płyty wytworzonej z kompozytu strukturalnego z delaminacją. Wyniki te zaczerpnięto z pracy [H5]. Dla przypadku mapy energii RMS Rys. 11a) widoczna jest koncentracja energii związana z generacją fal oraz występowaniem delaminacji (w środku płyty). Miejsce koncentracji energii fal związane z generacją fal zostało całkowicie usunięte z mapy WRMS energii (Rys. 11b).

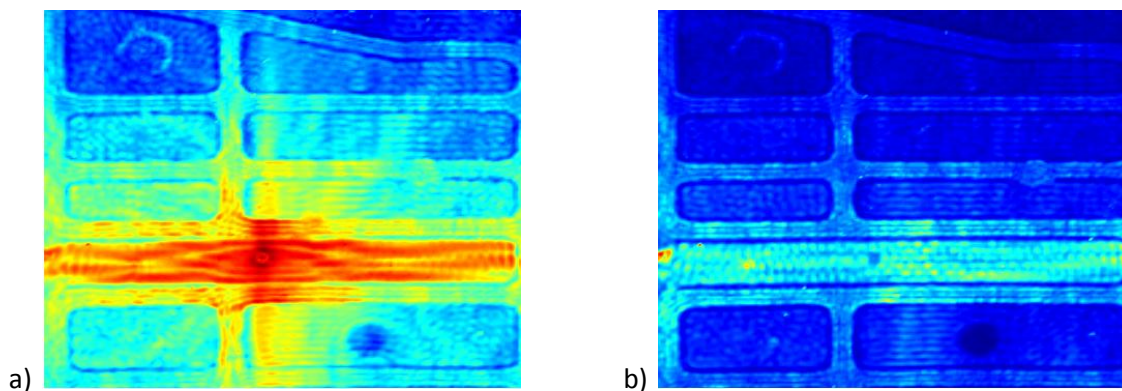
Mapa WRMS (Rys. 11b) bardzo wyraźnie wskazuje lokalizację, kształt oraz rozmiar delaminacji symulowanej identycznie jak w poprzednich przykładach. Ponadto „w tle” dostrzec można koncentrację energii (bardzo słabą) związaną z poszczególnymi komórkami wypełniacza aluminiowego.



Rys. 11. Mapy energii fal sprężystych dla kompozytu strukturalnego z wypełniaczem komórkowym, mapa:
a) RMS, b) WRMS

Zachęcony otrzymanymi bardzo dobrymi wynikami identyfikacji uszkodzenia (detekcja, lokalizacja oraz ocena rozmiaru/kształtu) dla kompozytu strukturalnego, który stanowi model rzeczywistej konstrukcji lotniczej, postanowiłem poddać weryfikacji algorytm tworzenia map uszkodzeń oparty na mapach ważonych energii WRMS dla przykładu rzeczywistej konstrukcji lotniczej.

Badania, których wyniki opublikowano w pracy [H5], przeprowadzono dla klejonego panelu wytworzonego z kompozytu węglowo-epoksydowego z usztywnieniami. Wyniki tych badań opublikowano w pracy [H5]. Klasyczna mapa RMS energii wskazała wyraźnie miejsce generacji fal sprężystych oraz położenie usztywnień (Rys. 12a). Na mapie można również było dostrzec lokalizację największej delaminacji o średnicy 30 mm oraz dodatkowej masy (wyraźnie pochłaniającej energię fal). Natomiast mapa WRMS energii wskazała dodatkowo miejsce lokalizacji delaminacji o średnicy 20mm połączonej z przecięciem usztywnienia o długości 30 mm (w tym samym miejscu) - Rys. 12b). Dokładny opis uszkodzeń oraz ich położenia zamieszczono w tekście artykułu [H5]. Dodatkowe wskazanie dotyczące delaminacji o średnicy 10 mm jest bardzo słabe. Wyniki wskazują na bardzo dużą efektywność algorytmu identyfikacji uszkodzeń opartego na mapach ważonych WRMS.



Rys. 12. Mapy energii fal sprężystych dla fragmentu konstrukcji lotniczej z usztywnieniami wykonanej z laminatu węglowo-epoksydowego, mapa: a) RMS, b) WRMS

Wymienione dotychczas prace zawierały wyniki lokalizacji oraz określenia rozmiaru i kształtów delaminacji symulowanych poprzez wprowadzenie przekładki (taśmy) teflonowej. Takie podejście umożliwia wprowadzenie uszkodzenia o dokładnie określonym kształcie, rozmiarach oraz położeniu w płaszczyźnie jak i względem grubości. Opisana metoda symulacji rzeczywistego uszkodzenia jest bardzo przydatna na etapie prowadzenia badań oraz testowania algorytmów. Istotną jej wadą jest wprowadzenie dodatkowego materiału co powoduje dodatkową interakcję fal z uszkodzeniem symulowanym w taki sposób. Dlatego w kolejnym kroku zaproponowałem wykorzystanie rozwarstwienia wprowadzonego poprzez mechaniczną separację warstw za pomocą dłuta.

W pracy [H6] opublikowano wyniki lokalizacji oraz oceny rozmiaru i kształtu takiego rozwarstwienia/delaminacji w próbce z kompozytu węglowo-epoksydowego (na bazie preimpregnatów) o wymiarach 100 mm x 100 mm. Na podstawie pomiarów pełnego pola fal sprężystych utworzono mapę RMS energii fal sprężystych dla częstotliwości 100 kHz. Na utworzonej mapie wyraźnie widoczna jest koncentracja energii fal sprężystych w miejscu gdzie występuje rozwarstwienie. Mapa pozwala także na ocenę przybliżonej wielkości i kształtu rozwarstwienia.

Natomiast w pracy [H7] opublikowano wyniki lokalizacji oraz określenia rozmiaru i kształtu mechanicznego rozwarstwienia/delaminacji w próbce z kompozytu węglowo-epoksydowego (na bazie preimpregnatów) o znacznie większych wymiarach, wynoszących: 600 mm x 200 mm. Pomiarów wykonano tym razem dla częstotliwości generowanych fal, wynoszącej 300 kHz. Dla tak wysokiej częstotliwości na mapie RMS energii obszar objęty rozwarstwieniem wskazywany jest jako obszar o mniejszej energii. Dla tej częstotliwości zachodzi bardzo silne tłumienie fal sprężystych. Pomimo tego obszar uszkodzony jest wyraźnie wskazany na mapie RMS energii stanowiącej mapę uszkodzeń.

Należy podkreślić, że wyniki opublikowane w pracy [H7] pozwalają nie tylko na określenie lokalizacji rozwarstwienia ale również na ocenę jego kształtu oraz przybliżonych rozmiarów. Z tego powodu wyniki te zostały wykorzystane w badaniach nad zastosowaniem metody impedancji E/M w celu dostarczenia informacji o wielkości uszkodzenia.

Delaminacja/rozwarstwienie mechaniczne badanego laminatu może być wykryta poprzez analizę rozkładu energii fal na utworzonych mapach RMS. Dla niższych częstotliwości fal (do 100 kHz) rozwarstwienie powoduje koncentrację energii w miejscu uszkodzenia. Natomiast dla częstotliwości wyższych (300 kHz) zaobserwować można silne tłumienie fal w obszarze rozwarstwienia. Mapy energii pozwalają określić lokalizację, kształt oraz rozmiar delaminacji.

Podsumowując, przeprowadzone badania oraz porównanie ich z innymi metodami dostępnymi w literaturze wskazują, że metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach pełnego pola jest aktualnie najlepszą na świecie bezkontaktową metodą okresowej oceny stanu technicznego

konstrukcji metalowych jak i kompozytowych. Metoda ta pozwala na detekcję, lokalizację oraz określenie rozmiarów i kształtu uszkodzenia.

Podejścia tego nie można natomiast wykorzystać do ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji SHM (np. samolotu w czasie lotu). Jednak w tym podejściu obiekt może być na stałe wyposażony w przetwornik generujący fale a odczyt z wykorzystaniem wibrometru laserowego może odbywać się okresowo. Takie postępowanie zwalnia z konieczności każdorazowego przygotowywania obiektu do badań przez co w literaturze metoda ta czasami klasyfikowana jest jako metoda SHM. Jednak według mnie nie jest to prawdziwa metoda SHM a raczej bardziej efektywna metoda NDT zwana ENDT (z ang. *Extended Non Destructive Testing*). Ponadto opisana wyżej metoda nie pozwala na bezpośrednie monitorowanie stanu technicznego elementów niedostępnych dla wiązki wibrometru laserowego.

Z tego powodu pojawiło się moje zainteresowanie metodą impedancji elektromechanicznej. W poprzedniej metodzie wykorzystywane było zjawisko propagacji fal sprężystych, natomiast w metodzie impedancji elektromechanicznej wykorzystywane jest zjawisko powstawania sprężystych fal stojących. Metoda ta umożliwia detekcję uszkodzenia oraz wykrywanie procesu wzrostu uszkodzenia ale nie pozwala na określenie dokładnej lokalizacji uszkodzenia. Natomiast w przeciwieństwie do poprzedniej metody, może być wykorzystywana do ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji.

II. Metoda impedancji elektromechanicznej E/M

Głównym celem badań przedstawionych w tej części było wykorzystanie metody impedancji elektromechanicznej do oceny stanu technicznego elementów konstrukcji metalowych oraz kompozytowych z uwzględnieniem stopnia ich degradacji. Ocena stanu technicznego obejmuje wykrywanie i ocenę stopnia: uszkodzeń, degradacji własności połączeń mechanicznych oraz zawilgocenia (w materiałach kompozytowych). Przeprowadzone przeze mnie badania obejmują szczegółowe analizy wpływu temperatury na pomiary oraz na wyniki detekcji uszkodzeń. Jako rezultat tych badań opracowany został algorytm kompensacji wpływu temperatury na wyniki pomiarów dla metody impedancji E/M.

W metodzie impedancji elektromechanicznej E/M wykorzystywane jest zjawisko tworzenia się stojących fal sprężystych. Fale stojące powstają na skutek interferencji fal propagujących się w ośrodkach ograniczonych i charakteryzują się występowaniem strzałek i węzłów, które nie przemieszczają się.

W metodzie impedancji elektromechanicznej wykorzystuje się przetwornik piezoelektryczny, którego zadaniem jest zarazem pobudzenie konstrukcji jak i rejestracja jej odpowiedzi. W metodzie impedancji E/M wykonywane są bezpośrednio pomiary parametrów elektrycznych przetwornika piezoelektrycznego sprzężonego z elementem konstrukcyjnym poddanym procesowi diagnostyki. Na skutek wspomnianego sprzężenia elektromechanicznego przetwornika piezoelektrycznego z elementem konstrukcyjnym pomiary charakterystyk elektrycznych przetwornika piezoelektrycznego dostarczają informacji na temat charakterystyk dynamicznych elementu konstrukcyjnego. Powstanie i rozwój uszkodzenia w elemencie konstrukcyjnym wiąże się ze zmianą własności mechanicznych, takich jak zmiany sztywności bądź masy. Zmiany te z kolei wpływają na charakterystyki dynamiczne elementu konstrukcyjnego, przejawiając się jako zmiany częstości oraz postaci drgań własnych. Metoda impedancji elektromechanicznej pozwala na wykrycie tych zmian poprzez pomiar charakterystyk elektrycznych przetwornika piezoelektrycznego.

Charakterystyki parametrów elektrycznych przetwornika piezoelektrycznego rejestrowane są w funkcji częstotliwości. Rejestrowane mogą być takie parametry jak impedancja lub admitancja reprezentowane przez liczby zespolone (analizuje się moduły tych wartości) a także ich części rzeczywiste (odpowiednio rezystancja lub konduktancja) bądź części urojone (odpowiednio reaktancja lub susceptancja).

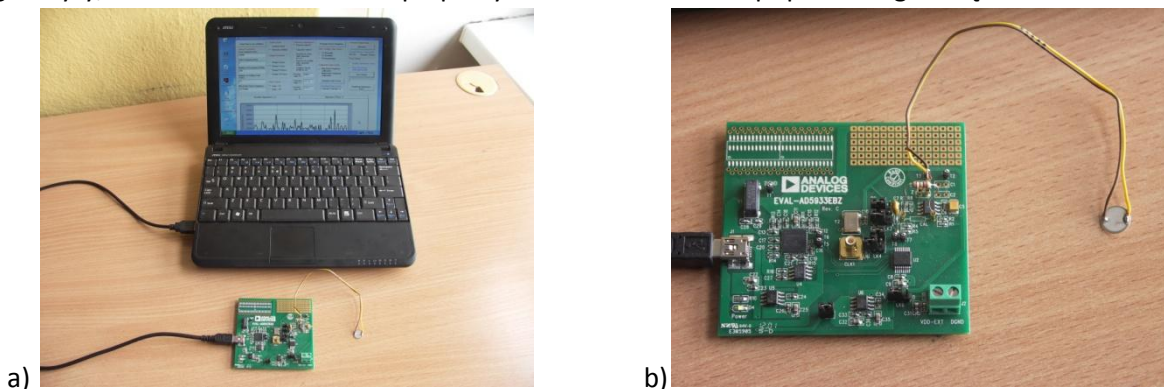
W przeprowadzonych przeze mnie badaniach eksperymentalnych do rejestracji wymienionych parametrów elektrycznych przetwornika piezoelektrycznego wykorzystywałem laboratoryjny analizator impedancji firmy HIOKI IM3570 (Rys. 13). Urządzenie to pozwala na rejestrację parametrów elektrycznych w zakresie częstotliwości od 5 Hz – 5 MHz.

Do rejestracji sygnałów wykorzystywałem również scalony analizator impedancji (w formie układu scalonego AD5933), produkowanego przez firmę Analog Devices. Na Rys. 14 przedstawiono stanowisko pomiarowe składające się z modułu rozwojowego wyposażonego w układ scalony AD5933, komputera przenośnego do rejestracji sygnałów oraz przykładowego, swobodnego (niesprężonego z konstrukcją) przetwornika piezoelektrycznego. Badania, których byłem pomysłodawcą wiązały się z zastosowaniem scalonego analizatora impedancji AD5933 oraz jego kalibracji w celu wykorzystania tego układu w zagadnieniach oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji.



Rys. 13. Laboratoryjny analizator impedancji HIOKI IM3570

Zaletami rozwiązania opartego na układzie AD5933 w porównaniu z klasycznym analizatorem laboratoryjnym HIOKI IM3570 jest niska cena układu (cena układu scalonego to kilka dolarów), małe gabaryty, masa oraz możliwość współpracy z mikrokontrolerem poprzez magistralę I2C.



Rys. 14. Scalony analizator impedancji AD5933: a) widok stanowiska pomiarowego, b) moduł rozwojowy ze scalonym analizatorem impedancji AD5933

Takie rozwiązanie pozwala na eliminację komputera oraz możliwość tworzenia systemów wbudowanych (z ang. *embedded*).

Natomiast wadami tego rozwiązania jest ograniczony zakres częstotliwości, do 100 kHz oraz konieczność przeprowadzenia procesu kalibracji układu. Swoją uwagę w badaniach zwróciłem właśnie na procesie kalibracji a konkretnie jego wpływie na wyniki pomiarów. Problem ten nie został dotychczas poruszony w literaturze dotyczącej monitorowania stanu technicznego konstrukcji.

Proces kalibracji realizowany jest przez dobór odpowiedniej impedancji kalibracyjnej. Producent podaje przykład doboru rezystora kalibracyjnego do pomiarów impedancji elementu o charakterze rezystancyjnym. Moją ideą było zbadanie jak kalibracja na bazie impedancji kalibracyjnej o charakterze rezystancyjnym wpłynie na pomiary impedancji elementu piezoelektrycznego o charakterze pojemnościowym (zmiana reaktancji pojemnościowej z częstotliwością). Producent układu scalonego wskazuje, że w przypadku złego doboru wartości rezystancji kalibracyjnej (wartość różni się znacząco od zakresu mierzonego) otrzymuje się błędne wartości zmierzonej impedancji.

Badania, których wyniki przedstawiłem w pracy [H8] zrealizowano w ramach kierowanego przeze mnie projektu naukowego MNiSW IUVENTUS Plus IP2011 058971, pt.: „Nieinwazyjne metody monitorowania stanu technicznego konstrukcji”. Wyniki badań, które opublikowałem w pracy [H8] wykazały, że wartość rezystancji rezystora kalibracyjnego musi znajdować się w zakresie zmian wartości modułu impedancji dla mierzonego zakresu częstotliwości. Należy podkreślić, że w takim przypadku otrzymuje się zgodność jakościową (kształt przebiegu) dla modułu impedancji zmierzonego za pomocą analizatora scalonego oraz analizatora laboratoryjnego HIOKI. Przebiegi dla obu rozwiązań nie pokrywają się dokładnie, jednak w zastosowaniu do monitorowania stanu technicznego ważne jest aby charakterystyki pozwalały określić częstotliwości pików rezonansowych oraz aby pomiary były stabilne w czasie (nie ulegały zmianom bez zmiany temperatury lub własności konstrukcji). Dokładne wartości parametrów nie są tak istotne jak sam kształt przebiegów (wyraźne piki rezonansowe) oraz zmiany na skutek powstawania i rozwoju uszkodzeń w elementach konstrukcji.

W przypadku gdy wartość rezystancji kalibracyjnej znajdowała się poza zakresem zmian wartości modułu impedancji mierzonej, kształt przebiegów ulegał deformacji a wartości parametrów znacząco odbiegały od właściwych (niektóre piki rezonansowe nie były odzwierciedlone). W zastosowaniach związanych z badaniem i oceną stanu technicznego konstrukcji niewłaściwy kształt przebiegów parametrów elektrycznych przetwornika piezoelektrycznego dyskwalifikuje źle skalibrowany układ pomiarowy.

Po prawidłowej kalibracji zweryfikowano wykorzystanie scalonego analizatora AD5933 do detekcji oraz wykrycia wzrostu wielkości nacięcia. Podczas badań, których wyniki opublikowano w pracy [H8], zwróciłem uwagę na duży wpływ zmiany temperatury na wyniki pomiarów dla metody impedancji E/M wykorzystanej do detekcji uszkodzenia oraz wykrycia wzrostu jego rozmiarów. Badania przeprowadziłem dla przypadku jednorodnej belki ze stopu aluminium, jednostronnie utwardzonej, z wprowadzonym nacięciem symulującym uszkodzenie (np. pęknięcie). Pomiary wykonałem dla trzech przypadków wielkości nacięcia: 1 mm, 3 mm oraz 5 mm. W celu detekcji symulowanych uszkodzeń oraz określenia ich wielkości wykorzystałem wskaźniki RMSD i MAPD. Wartości obu wskaźników wzrastały wraz ze wzrostem wielkości nacięcia.

Podsumowując, scalony analizator impedancji AD5933 może być wykorzystywany do monitorowania stanu technicznego elementów konstrukcji (detekcja i ocena wielkości uszkodzenia) po jego prawidłowej kalibracji. Badania te były oryginalne i stanowiły znaczący wkład w dyscyplinę mechaniki.

Badałem również wpływ temperatury na wyniki pomiarów. Problem ten był już sygnalizowany w literaturze przedmiotu. Zbadałem wpływ zmian temperatury w zakresie od 0,7 do 7,4°C na zmiany wartości wskaźników RMSD i MAPD (sygnałem odniesienia był sygnał w temperaturze referencyjnej a porównywanymi sygnały ze zmianą temperatury). W przypadku zmiany temperatury o 7,4°C wartości wskaźników osiągnięte na skutek zmian temperatury posiadają tak duże wartości, że tylko wskaźnik dla największego nacięcia (o długości 5 mm) osiąga wartość większą niż w przypadku zmiany temperatury (brak nacięć). Wpływ temperatury jest interpretowany przez oba wskaźniki w podobny sposób (tak jak wpływ uszkodzenia).

Konieczne jest więc albo wykorzystanie wskaźników uszkodzeń, które nie są czułe na zmiany temperatur a wyłącznie na zmiany strukturalne spowodowane uszkodzeniem lub opracowanie algorytmu kompensacji wpływu temperatury.

Dalsze prace badawcze, których wyniki opublikowano w pracy [H9], związane były z badaniem zachowania się różnych wskaźników uszkodzeń pod wpływem zmian temperatury i degradacji stanu technicznego dla bardziej skomplikowanego elementu niż jednorodna belka. Badania te zrealizowano w ramach kierowanego przeze mnie projektu naukowego MNiSW IUVENTUS Plus IP2011 058971, pt.: „Nieinwazyjne metody monitorowania stanu technicznego konstrukcji”. W badaniach wykorzystano fragment krawędzi spływu skrzydła samolotu PZL Gawron wykonanego ze stopu aluminium. Element składał się z żeber, usztywnień oraz poszycia połączonych ze sobą w procesie nitowania. W procesie przygotowania próbki do badań połączenie nitowane zastąpiłem połączeniem śrubowym, co dało mi możliwość regulacji stopnia napięcia śrub i symulowania tym samym, degradacji stanu technicznego połączenia poszycia z żebrami. Badałem wpływ temperatury na wskaźniki uszkodzeń znane z literatury (*RMSD*, *Corellation Distance CD*) oraz na nowo zaproponowany wskaźnik (*Cheessboard Distance CB*). Badałem różne zakresy częstotliwości (1-10 kHz, 10-20 kHz oraz 1-20 kHz). Badania wykonałem dla elementu umieszczonego w komorze termicznej. Pomiary wykonałem w temperaturach 30°C i 40°C. Wyniki pokazały, że przesunięcie częstotliwościowe dla danej temperatury nie jest stałe, zależy od częstotliwości. Otrzymane wyniki pokazały również, że zmiana temperatury wpływa najbardziej na zmiany wskaźnika RMSD, natomiast wskaźniki CD oraz CB są mniej czułe na zmiany temperatury. Wskaźniki CD oraz CB pozwoliły zidentyfikować (w wybranych zakresach częstotliwości) wzrost stopnia degradacji stanu technicznego złącza śrubowego, pomimo wpływu temperatury.

W pracy [H9] przedstawiłem również porównania przebiegu części rzeczywistej impedancji dla elementu w postaci jednorodnej belki metalowej, belki kompozytowej oraz fragmentu opisanej konstrukcji lotniczej. Zestawiłem ze sobą wyniki dla zakresu częstotliwości do 20 kHz. W przypadku tej ostatniej konstrukcji, występuje duża liczba sąsiadujących ze sobą pików rezonansowych. Nie występują w niej pojedyncze i wyraźne piki rezonansowe jak dla elementów belkowych, gdzie można łatwo zidentyfikować postacie drgań związanych z tymi pikami.

Kolejny krok wiązał się z badaniami dotyczącymi oceny stanu technicznego materiałów kompozytowych z wykorzystaniem metody impedancji elektromechanicznej. W przekrojowej pracy [H10] przedstawiony został przegląd literatury dotyczącej metod stosowanych do monitorowania stanu technicznego konstrukcji kompozytowych. Z przygotowanego przeze mnie przeglądu literatury, który dotyczył zastosowania metody impedancji E/M do monitorowania stanu technicznego materiałów kompozytowych wynika, że wciąż bardzo mała liczba prac związana jest z tą tematyką. Stąd pojawiło się moje zainteresowanie tematyką impedancji E/M do monitorowania stanu technicznego materiałów kompozytowych.

W pracy [H11] przedstawiłem zaproponowane przeze mnie nowatorskie zastosowanie metody impedancji E/M do oceny stopnia zawilgocenia występującego w laminatach węglowo-epoksydowych. Problem oceny stanu zawilgocenia był badany w ramach realizacji projektu *FP7 ENCOMB Extended Non-Destructive Testing of Composite Bonds (2011-2014)*, w którym brałem udział jako wykonawca. Zawilgocenie oraz zawartość wody może powodować degradację materiału (np. powstawanie rozwarstwień na skutek zamarzania wody na wysokości przelotowej samolotu).

Przeprowadziłem badania procesu zawilgacania lotniczych laminatów węglowych wykonanych z preimpregnatów. Próbki pochodziły z materiału wykorzystywanego do budowy śmigłowca Agusta Westland AW139. Opracowałem sposób izolacji przetwornika piezoelektrycznego od wpływu wody (podczas procesu zawilgacania) za pomocą silikonu. Poziom zawilgocenia oceniany był na podstawie pomiaru masy próbek (zawilgocenie powoduje przyrost masy próbek). W tym celu wykorzystywałem wagę laboratoryjną RADWAG XA 60/220/X o dokładności 0,01 mg (w używanym zakresie do 60 gram). Badania pokazały, że maksymalny poziom zawilgocenia osiągał 2,72 % (przyrost masy). Metodę impedancji E/M wykorzystałem do monitorowania zmian zawilgocenia próbki w procesie suszenia swobodnego. Mierzonym parametrem była część rzeczywista impedancji. Pomiarzy wykonałem wraz ze współautorem. Pomiarzy obejmowały zakres częstotliwości do 550 kHz.

Do porównania zmian w sygnałach zaproponowałem wykorzystanie wskaźnika RMSD. Pomiarzy wykonano w stabilnej temperaturze pokojowej. Pomiarzy przeprowadzono dla próbki suchej, o maksymalnym poziomie zawilgocenia oraz dla przypadków malejącego poziomu zawilgocenia podczas suszenia. Przyjęto jako stan referencyjny pomiarów, pomiar dla próbki suchej.

Po zawilgoceniu zauważyłem przesunięcie charakterystyk częstotliwościowych dla części rzeczywistej impedancji E/M w kierunku na lewo w stosunku do stanu referencyjnego. W czasie suszenia charakterystyki przesunęły się w kierunku charakterystyki referencyjnej (idealnie się nie pokryły, co może świadczyć o resztkowym zawilgoceniu). Indeks RMSD zmniejszał się wraz z obniżaniem stopnia zawilgocenia od maksymalnej wartości osiągniętej dla największego zawilgocenia.

Brak prac w literaturze przedmiotu związanych z określaniem stopnia zawilgocenia na bazie pomiarów dla metody impedancji E/M powoduje, że jest to istotne osiągnięcie w dziedzinie mechaniki.

Moje dalsze badania były związane z określeniem wpływu temperatury na wyniki pomiarów dla metody impedancji E/M nie tylko w elementach metalowych ale i kompozytowych. W pracy [H12] opublikowano wyniki badań wpływu temperatury na pomiary impedancji E/M dla przetworników piezoelektrycznych swobodnych oraz przetworników zamocowanych na próbkach wykonanych: ze stopu aluminium, kompozytu szklano-epoksydowego oraz kompozytu węglowo-epoksydowego. Pomiary wykonano dla zakresu częstotliwości obejmującego rezonans po grubości przetwornika. Wyliczono wartość częstotliwości dla rezonansu po grubości dla przetwornika piezoelektrycznego wykonanego z materiału SONOX P502 a następnie zidentyfikowano ten rezonans na podstawie zarejestrowanych charakterystyk: konduktancji, susceptancji oraz modułu admitancji.

Wyznaczona wartość teoretyczna rezonansu wynosiła $f_t = 4,06$ MHz natomiast wartość zidentyfikowana dla badanych przetworników zawierała się w zakresie od ok. 3,76 MHz do ok. 3,88 MHz. Wyznaczono wartość średnią wynoszącą 3,81 MHz. Pomiary wykonano dla zakresu częstotliwości od 3 MHz do 5 MHz obejmującego wspomniany rezonans. Jako obserwowane parametry wykorzystano wskaźnik RMS dla sygnału konduktancji oraz wartość przesunięcia w częstotliwości dla pików rezonansowych konduktancji.

Prace badawcze dotyczące wpływu temperatury kontynuowałem. W pracy [H6] badałem wpływ bardzo małej zmiany temperatury (2°C) na zachowanie się wskaźników uszkodzeń RMSD oraz CCD (wykorzystujący korelację sygnałów). Badania przeprowadziłem dla próbki z kompozytu węglowo-epoksydowego o wymiarach 100 mm x 100 mm. Stwierdziłem dużą podatność wskaźnika RMSD na wpływ nawet tak bardzo małych zmian temperatury. Podobną zależność zauważyłem w badaniach, których wyniki przedstawiono w pracy [H9] (dla elementu ze stopu aluminium). Wskaźnik CCD był znacznie mniej podatny na ten wpływ. Pierwszy ze wskaźników reaguje na wszelkie zmiany w sygnałach, natomiast drugi jest bardziej czuły na wzajemne przesunięcia sygnałów. Dla małych zmian temperatury występowały małe zmiany amplitud, jednak przesunięcie sygnału było niezauważalne. Stąd małe zmiany wskaźnika CCD, który jest bardzo czuły na przesunięcia sygnałów, które występują dopiero dla większych zmian temperatury. Dotychczas przedstawione wyniki badań pokazały, że problem wpływu temperatury na pomiary dla metody impedancji E/M jest bardzo istotny.

W ramach badań, których wyniki opublikowano w pracy [H6], w analizowanej próbce wprowadziłem rozwarstwienia o dwóch różnych rozmiarach. Wartości wskaźników uszkodzeń RMSD oraz CCD wzrastały wraz ze wzrostem analizowanych rozwarstwień. Ponadto opisane dotychczas wyniki badań przedstawione w pracy [H6] pokazały, że metoda impedancji E/M pozwala wykryć rozwarstwienia znajdujące się w pobliżu przetwornika piezoelektrycznego.

Zbadałem także jak zmieniają się wartości wskaźników RMSD oraz CCD dla przypadków dwóch rozwarstwień. Następnie zmiany wartości wskaźników RMSD i CCD dla przypadków rozwarstwień porównałem ze zmianami wartości wskaźników dla przypadku zmiany temperatury (2°C). Okazało się, że w przypadku nawet tak małej zmiany temperatury ma ona znaczący wpływ na wskaźnik RMSD. Wyniki te są zbliżone do wyników otrzymanych dla konstrukcji ze stopu aluminium, przedstawionych w pracy [H9]. Wskazuje to na konieczność bezwzględnej kompensacji temperatury w przypadku wykorzystywania indeksu RMSD do wykrywania zmian stanu technicznego konstrukcji.

W pracy [H6] opublikowano również wyniki badań, których celem było określenie wartości przesunięć dla wybranych pików rezonansowych w dziedzinie częstotliwości pod wpływem zmian temperatury. Wartość przesunięcia pików dla danej zmiany temperatury nie jest stała, wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości. Inspiracją dla tych badań były wyniki opublikowane w pracy autorstwa *Baptista et al.*¹ W pracy tej zaproponowano algorytm kompensacji temperatury dla elementu wykonanego ze stopu aluminium jednak algorytm ten nie został wykorzystany w połączeniu z detekcją uszkodzeń. Elementem nowości w pracy [H6] było wykorzystanie algorytmu kompensacji temperatury dla elementu kompozytowego (własności ortotropowe) oraz jego weryfikacja dla procesu detekcji uszkodzeń oraz wykrycia wzrostu ich rozmiarów, co stanowi znaczący wkład w dyscyplinę mechaniki.

Badania dotyczyły próbki (płyta) o większych wymiarach (600 mm x 200 mm) wykonanej również z kompozytu węglowo-epoksydowego (na bazie preimpregnatów stosowanych w przemyśle lotniczym). W próbce wprowadziłem rozwarstwienia o różnych rozmiarach. Głównym celem badań było określenie zasięgu i czułości metody. Wyniki wcześniejszych badań (dla małej próbki 100 mm x 100 mm) pokazały, że możliwe jest wykrywanie rozwarstwień położonych w pobliżu przetwornika piezoelektrycznego oraz wykrycie wzrostu ich rozmiarów. Natomiast wyniki kolejnych badań, przeprowadzonych dla próbki wymiarach 600 mm x 200 mm pokazały, że możliwe jest także wykrycie rozwarstwienia oddalonego od przetwornika piezoelektrycznego oraz wykrycie jego wzrostu. Wyniki

¹ Baptista FG, Budoya DE, de Almeida VAD, Ulson JAC. An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. *Sensors* 2014;14:1208–27.

badan opublikowane w tej pracy pokazały, że w pewnych pasmach częstotliwości wartość wskaźnika CCD wzrasta wraz ze wzrostem rozmiarów rozwarstwienia.

Generalnie badany zakres częstotliwości powinien być jak najszerszy i zawierać jak największą liczbę pików rezonansowych.² Ponieważ wartości przesunięć częstotliwościowych pików rezonansowych dla danej zmiany temperatury wzrastają wraz ze wzrostem częstotliwości, zaproponowałem podział całego analizowanego zakresu częstotliwości na węższe pasma. Podział na węższe pasma częstotliwościowe pozwala przeprowadzić prawidłowo proces kompensacji wpływu temperatury.

Badania wpływu temperatury rozpocząłem od pomiarów wykonanych w temperaturze referencyjnej 23,5°C oraz w temperaturach 6,7; 7,7; 9,3; 13 i 14,5°C. Uwzględniłem znacznie większą zmianę temperatury niż poprzednio, wynoszącą maksymalnie 14,5°C. Stwierdziłem fakt przesuwania się charakterystyk - części rzeczywistej impedancji E/M pod wpływem zmian temperatury (przesunięcie w lewo wraz ze wzrostem temperatury).

Zaproponowałem wykorzystanie wskaźnika wykorzystującego korelację sygnałów (CCD) do oceny wpływu zmian temperatury. Wskaźnik osiąga wartość bliską zero dla sygnałów skorelowanych oraz bliską jedności dla sygnałów nieskorelowanych, wyraża się go jako $CCD=1-CD$. Wskaźnik CCD wykorzystuje wskaźnik korelacji CD (z ang. *correlation distance*), który osiąga wartość w pobliżu jedności dla sygnałów skorelowanych i w pobliżu zera dla sygnałów nieskorelowanych.

Zaproponowałem również algorytm kompensacji temperatury opracowany na bazie wskaźnika CCD. Zadaniem algorytmu jest przesuwanie sygnału dla wpływu temperatury względem sygnału zarejestrowanego w temperaturze referencyjnej aż do osiągnięcia najmniejszej wartości współczynnika CCD. Oznacza to, że sygnały po przesunięciu pokrywają się. Algorytm dostarcza także informacji o wartości koniecznego przesunięcia w celu osiągnięcia pokrywania się sygnałów. W opisany powyżej sposób można utworzyć bazę wartości przesunięć dla zakresu temperatur eksploatacyjnych elementu konstrukcji. Na podstawie znanych zmian temperatury podczas procesu diagnostyki konstrukcji konieczne jest prawidłowe przesunięcie zarejestrowanego sygnału (następuje kompensacja wpływu temperatury) zanim sygnał zostanie wykorzystany do detekcji uszkodzenia.

W kolejnym kroku przeprowadzono badania weryfikacyjne mające na celu sprawdzenie możliwości wykrywania uszkodzeń z uwzględnieniem wpływu temperatury. Wyniki pokazały, że wykorzystanie algorytmu kompensacji wpływu temperatury poprawia znacząco wykrywalność uszkodzeń (rozwarstwień). Do wykrywania uszkodzeń również wykorzystywano wskaźnik CCD. Powodowało to, że uszkodzenia o mniejszych rozmiarach nie były wykrywane gdy wystąpiły zmiany temperatury i nie były one kompensowane. Powodem tego były wysokie wartości wskaźnika CCD dla zmian temperatury, większe niż dla uszkodzenia. Algorytm detekcji uszkodzeń nie ma możliwości klasyfikacji źródła zmian wskaźnika (temperatura/uszkodzenie). Konieczne więc było usunięcie wpływu temperatury poprzez zastosowanie wspomnianego wcześniej algorytmu kompensacji wpływu temperatury w celu umożliwienia efektywnych procesów detekcji uszkodzeń oraz oceny ich wielkości.

Stwierdziłem ponadto, że czułość algorytmu detekcji na wprowadzone rozwarstwienia zależy od zakresu badanych częstotliwości. Z tego powodu analizie muszą być poddane wszystkie pasma na jakie został podzielony cały analizowany zakres częstotliwości

W pracy [H6] przedstawiono również wyniki detekcji rozwarstwienia oraz oceny jego rozmiarów w próbce z kompozytu węglowo-epoksydowego o wymiarach 500 mm x 200 mm. W tym przypadku rozwarstwienie położone było w innym miejscu niż w poprzednio analizowanej próbce.

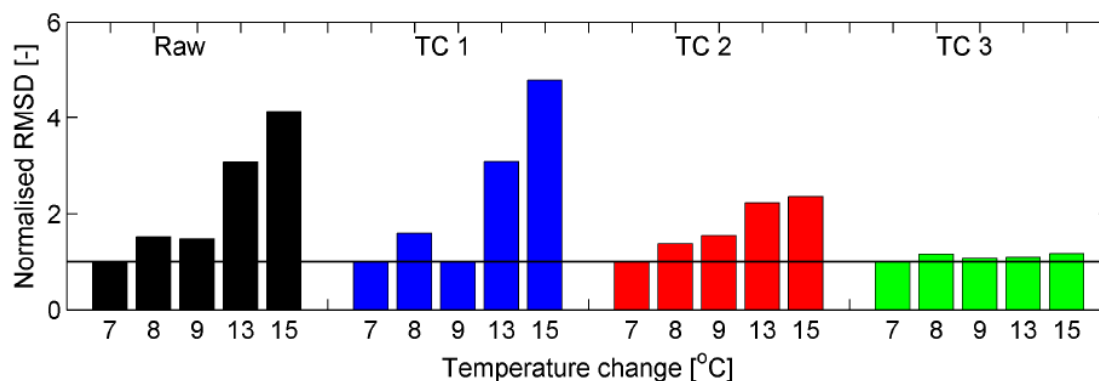
² Giurgiutiu V, Structural Health Monitoring with piezoelectric wafer active sensors. Elsevier, pp. 747, 2008.

Badano trzy przypadki wielkości rozwarstwienia. Uwzględniono również wpływ zmian temperatury. Dla analizowanego położenia rozwarstwienia, algorytm pozwolił na jego detekcję oraz ocenę jego rozmiarów dla wszystkich analizowanych pasm częstotliwości. Wartość wskaźnika CCD wzrastała wraz ze wzrostem rozmiarów rozwarstwienia.

Zaproponowany algorytm kompensacji temperatury usuwał wyłącznie poziome przesunięcia częstotliwościowe sygnałów. W pracy [H7] zaproponowano wykorzystanie ulepszanego algorytmu kompensacji wpływu temperatury usuwającego zarówno przesunięcia częstotliwościowe jak i zmiany amplitud w sygnałach. Do kompensacji temperaturowej wykorzystano wskaźnik CD oparty na korelacji sygnałów, który nazwano w artykule CC (z ang. *cross correlation*). Wskaźnik ten bywa w literaturze przedmiotu oznaczany zamiennie jako CC lub CD. Należy podkreślić, że wykorzystanie tych wskaźników zamiast wskaźnika CCD (zdefiniowanego $CCD=1-CD$) prowadzi do tego samego efektu. Zamiast dążyć do minimalizacji wskaźnika (CCD) dąży się do maksymalizacji wskaźnika CD lub CC.

W celu dalszej kompensacji temperaturowej (pozostały różnice wartości amplitud sygnałów – pionowe przesunięcie sygnałów) wartości sygnału skompensowanego wstępnie, dzielone są w kolejnym kroku przez wartość RMS próbek sygnału. W ten sposób usuwa się w znaczącym stopniu różnice amplitud sygnałów. Proces detekcji uszkodzeń w tym wypadku odbywa się w oparciu o wskaźnik RMSD. Stąd wynika konieczność dopasowania amplitud (RMSD jest czuły na wszelkie zmiany sygnałów). Ulepszony algorytm kompensacji znacząco poprawił wyniki detekcji rozwarstwień oraz oceny ich wielkości. Zaproponowane podejście jest nowatorskie.

Na Rys. 15 przedstawiono przykładowe wyniki wpływu kompensacji temperatury na wartości wskaźnika RMSD dla pasma częstotliwości od 8,6 do 12,4 kHz. Na osi odciętych umieszczono wartość zmiany temperatury w zakresie od 7 do 15°C. Na osi rzędnych umieszczono wartości wskaźnika RMSD liczonego dla sygnału w temperaturze referencyjnej i sygnału po zmianie temperatury wskazanej na osi odciętych. W przypadku braku kompensacji (grupa wartości oznaczona Raw) widać, że wartości wskaźnika rosną ze wzrostem temperatury.



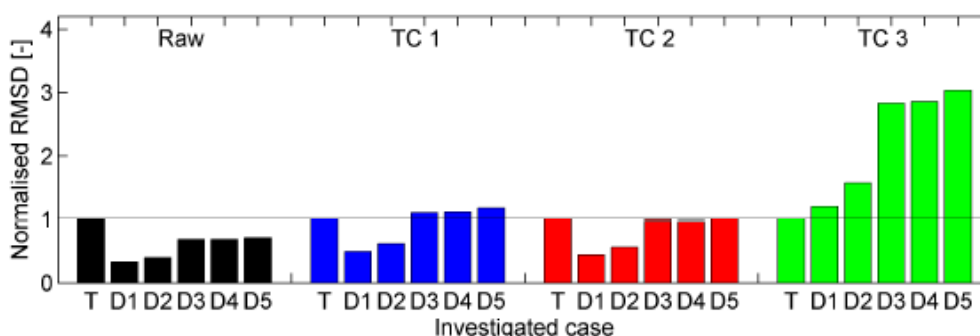
Rys. 15. Wpływ kompensacji temperatury na wskaźnik RMSD

Samo przesuwanie sygnałów (TC1) nic nie poprawia, ponieważ do oceny efektów wykorzystywany jest indeks RMSD (czuły na przesunięcia częstotliwościowe jak i zmiany amplitud). Podzielenie przez wartość RMS próbek sygnałów przynosi lepsze efekty (TC2). Jednak dopiero zastosowanie obu metod pozwala na prawidłowe usunięcie wpływu temperatury (TC3). Bez kompensacji temperatury, indeks uszkodzeń wzrastał by na skutek tych zmian, mimo braku uszkodzenia. Powodowało by to fałszywe alarmy w systemie diagnostycznym.

W pracy [H7] przeprowadziłem jeszcze bardziej szczegółowe badania wpływu temperatur na wyniki pomiarów impedancji E/M w próbkach wytworzonych z kompozytu węglowo-epoksydowego.

Wykazałem, że dla każdego z pików rezonansowych, w badanym zakresie częstotliwości, jego przesunięcie w dziedzinie częstotliwości spowodowane zmianą temperatury można opisać za pomocą funkcji liniowej. Kąt nachylenia prostej zależy od wartości częstotliwości pików (jest tym większy im częstotliwość obserwowanego pików jest wyższa). Na podstawie wyników badań potwierdziłem rezultaty otrzymane w pracy [H6]. Przesunięcie częstotliwościowe nie jest stałe dla danej temperatury i wzrasta ono wraz ze wzrostem zakresu analizowanych częstotliwości, kompensacja sygnałów musi więc odbywać się w wąskich zakresach częstotliwości. Sygnał zarejestrowany dla szerokiego pasma częstotliwości (np. 20 kHz) nie zostanie prawidłowo skompensowany, pozostaną pewne niedopasowania. Badania wykazały także, że należy dążyć do jak najszybszego prowadzenia pomiarów, w ten sposób aby w czasie prowadzenia pomiaru występowały jak najmniejsze zmiany temperatury. Takie podejście pozwoli na prawidłową kompensację wpływu temperatury.

Dalsza część badań, których wyniki przedstawiono w pracy [H7] dotyczy detekcji uszkodzeń oraz oceny ich rozmiarów. Na Rys. 16 zilustrowano wpływ kompensacji temperatury na wskaźnik RMSD dla różnych przypadków uszkodzenia. Badania dotyczyły próbki kompozytowej o wymiarach 600 mm x 200 mm (wykorzystanej również w pracy [H6]). Przykładowe wyniki dotyczą pasma częstotliwości od 8,6 do 12,4 kHz (uzyskano w tym przypadku najlepsze wyniki). Na osi odciętych przedstawiono przypadki: T (zmiana temperatury o 19°C, próbka bez uszkodzenia) oraz D1-D5 (delaminacja/rozwarstwienia o coraz większym rozmiarze). W przypadku braku kompensacji (Raw) dla zmiany temperatury (T) wartość indeksu RMSD jest największa (do tej wartości znormalizowano resztę wyników D1-D5).



Rys. 16. Wpływ kompensacji temperatury na wskaźnik RMSD dla różnych przypadków uszkodzenia

Wpływ uszkodzeń jest mniejszy niż temperatury. Kompensacja wpływu temperatury TC1 i TC2 trochę polepsza sytuację. Dla TC1 delaminacja o rozmiarze D3-D5 powoduje większy wzrost indeksu RMSD niż zmiana temperatury. Zastosowanie kompensacji TC3 pozwala na wykrycie delaminacji D1-D5 (wartości RMSD wyższe dla delaminacji niż dla wpływu temperatury). Opisane rezultaty wskazują, że kompensacja temperatury w metodzie impedancji E/M jest konieczna. Jej stosowanie poprawia wyniki detekcji uszkodzeń.

Wyniki badań pokazały ponadto, że możliwe jest wykrycie wzrostu rozmiarów rozwarstwienia poprzez wykorzystanie metody impedancji elektromechanicznej. Badania pokazały, że w pewnych pasmach częstotliwości wartość wskaźnika RMSD wzrasta wraz ze wzrostem rozmiarów rozwarstwienia. Generalnie jednak czułość algorytmu na rozwarstwienie zależy od zakresu częstotliwości.

W badaniach tych wykorzystano również metodę pełnego pola fal sprężystych oraz mapy RMS energii fal w celu ilustracji lokalizacji, kształtu oraz wielkości jednego z przypadków rozwarstwienia.

W pracy tej przedstawiono również wyniki detekcji i oceny wielkości delaminacji dla próbek o wymiarach 500 mm x 200 mm (wykorzystanej również w pracy [H6]). Wykorzystanie ulepszonych algorytmu kompensacji temperatury pozwoliło na wykrycie trzech rozmiarów rozwarstwienia oraz rozróżnienie ich wielkości dla wszystkich analizowanych pasm częstotliwości. Indeks RMSD wzrastał wraz ze wzrostem rozmiarów rozwarstwienia.

Istotnym osiągnięciem jest opracowanie efektywnego algorytmu kompensacji wpływu temperatury poprawiającego wyniki detekcji uszkodzeń oraz oceny ich rozmiaru.

Ze względu na duże tłumienie sygnałów w próbkach wytworzonych z kompozytów a w szczególności kompozytów węglowo-epoksydowych w badaniach, których wyniki opublikowano w pracy [H7], zdecydowałem się ograniczyć pasmo pomiarowe do częstotliwości 20 kHz. Dla częstotliwości powyżej tej granicy tłumienie materiałowe powodowało silną redukcję amplitudy pików oraz ich rozciągnięcie. Jednak dla wybranego zakresu częstotliwości, na wyniki pomiarów silnie wpływają warunki brzegowe. Dlatego bardzo często w metodzie impedancji E/M wykorzystuje się wysokie częstotliwości, rzędu setek kiloherców aby uniknąć tego wpływu. Jednak w przypadku stosowania wysokich częstotliwości metoda działa lokalnie, wykrywając wyłącznie uszkodzenia znajdujące się bardzo blisko przetwornika. Tym samym dla wyższych częstotliwości metoda jest bardziej czuła (uszkodzenia o mniejszych rozmiarach mogą być wykryte) jednak jej zasięg jest redukowany. W przypadku niskich częstotliwości (jak w przeprowadzonych badaniach) zasięg metody jest znacznie większy ale na wyniki pomiarów wpływ mają warunki brzegowe. Jest to kompromis pomiędzy zasięgiem metody i jej czułością.

Podczas planowania i prowadzenia badań wstępnych skupiłem więc uwagę na sposobie ustalenia położenia próbki podczas pomiarów (warunki brzegowe). W przypadku konstrukcji rzeczywistej element konstrukcyjny stanowi jej część i jest z nią połączony. Natomiast w badaniach należy zasymulować takie warunki pracy dla próbki.

Badania rozpocząłem więc od próbki utwierdzonej w imadle symulując w ten sposób połączenie jej z konstrukcją. Jednak podczas pomiarów warunki brzegowe ulegały zmianie powodując zmiany w rejestrowanych sygnałach (zmiany zachodziły przy wprowadzaniu rozwarstwień – próbka poruszyła się w imadle powodując dodatkowe zmiany w sygnałach spowodowane zmianą warunków mocowania). Kolejne testy pokazały, że do celów badawczych najlepsze okazało się swobodne podparcie. Pozwalało ono na powtarzalność wyników pomiarów dla próbki referencyjnej (nieuszkodzona), którą montowano/demontowano na stanowisku. Zmiany w sygnałach pojawiały się dopiero na skutek zmian temperatury oraz wprowadzonych uszkodzeń.

Ponadto w badaniach wykonano kolejny krok w kierunku zbliżenia się do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. W tym celu pomiary wykonano w laboratorium jak i w warunkach zewnętrznych.

Podsumowując, metoda impedancji elektromechanicznej stanowi efektywne narzędzie do detekcji uszkodzeń, oceny ich wielkości, wykrywania ich rozwoju a także oceny zawilgocenia (w materiałach kompozytowych). Metoda ta nie umożliwia jednak dokładnej lokalizacji uszkodzeń. W zamian za to, jak już wspomniano, może być wykorzystana do ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji (z ang. *Structural Health Monitoring*, SHM).

Podsumowanie

Podsumowując, osiągnięcie naukowe, dotyczy zagadnień monitorowania i oceny stanu technicznego konstrukcji z wykorzystaniem fal sprężystych a w szczególności zjawiska propagacji tych fal oraz zjawiska powstawania sprężystych fal stojących.

Metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach punktowych z wykorzystaniem wibrometrii laserowej może być wykorzystywana do prototypowania sieci czujników stosowanych w systemach ciągłego monitorowania SHM. W tym przypadku chodzi o systemy, które są oparte na pomiarach przy wykorzystaniu przetworników piezoelektrycznych oraz metody odbić falowych. Systemy takie pozwalają na razie na monitorowanie prostych elementów konstrukcji (metalowe i kompozytowe) jak płyty, panele bez znacznej komplikacji geometrycznej (np. bez usztywnień).

W przypadku bardziej skomplikowanych konstrukcji (jak np. panele lotnicze) przydatna jest metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach pełnego pola. Metoda ta pozwala na okresowe badanie stanu technicznego konstrukcji z możliwością detekcji, lokalizacji oraz oceny kształtu i wielkości występujących uszkodzeń. Pozwala to na określenie stopnia degradacji elementów konstrukcji. Metoda ta była wykorzystywana do detekcji i lokalizacji ubytków materiału (otwory) oraz nacięć w materiałach o własnościach izotropowych. Ponadto metoda ta była wykorzystywana do detekcji, lokalizacji oraz oceny wielkości i kształtu dodatkowej masy, przecięcia oraz delaminacji/rozwarstwień w materiałach o własnościach ortotropowych. Metodę zastosowano również do oceny stanu technicznego połączeń śrubowych.

Uzupełnieniem tej metody, jest metoda impedancji E/M, która co prawda nie pozwala na dokładne określenie lokalizacji uszkodzenia, za to może być wykorzystywana w sposób ciągły do monitorowania niedostępnych dla pomiarów wibrometrycznych elementów konstrukcji. Metoda impedancji elektromechanicznej może być wykorzystywana w sposób ciągły, do realizacji detekcji uszkodzeń i oceny ich wzrostu. Metoda ta była wykorzystywana do wykrywania i oceny rozmiaru: nacięć (elementy ze stopu aluminium o własnościach izotropowych) i rozwarstwień (elementy kompozytowe o własnościach ortotropowych). Ponadto metodę impedancji E/M wykorzystano do oceny zmian stanu technicznego połączeń śrubowych oraz oceny stopnia zawilgocenia w elementach kompozytowych. W przeprowadzonych badaniach szczególną uwagę zwrócono na problem wpływu temperatury na wyniki pomiarów dla tej metody oraz sposoby jego kompensacji.

Po wykryciu degradacji elementu konstrukcji przez metodę impedancji elektromechanicznej metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach pełnego pola może być wykorzystana do określenia dokładnej lokalizacji (uszkodzenia) oraz stopnia degradacji (wielkość uszkodzenia). Wyniki takiego połączenia metod przedstawiono w pracach [H6],[H7]. W przypadku gdy położenie oraz stopień degradacji nie wpływa jeszcze na bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji, może ona być w dalszym ciągu eksploatowana. W tym przypadku metoda impedancji elektromechanicznej może być wykorzystywana do ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji pod kątem wzrostu stopnia tej degradacji. Metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach pełnego pola jak i metoda impedancji elektromechanicznej mogą być wykorzystywane w połączeniu jako metody uzupełniające się, stanowiąc kompleksowe narzędzie diagnostyczne dla konstrukcji.

Metoda propagacji fal sprężystych oparta na pomiarach pełnego pola jak i metoda impedancji elektromechanicznej były wykorzystane do oceny stanu technicznego szerokiego spektrum elementów konstrukcji: jednorodne belki oraz panele ze stopu aluminium, panele ze stopu aluminium z połączeniami śrubowymi i usztywnieniami, fragment krawędzi spływu skrzydła samolotu z usztywnieniami i połączeniami śrubowymi, jednorodne panele kompozytowe, panele kompozytowe o zmiennej grubości, model kompozytu strukturalnego (połączenie różnych materiałów:

aluminiowego wypełniacza komórkowego i laminatu kompozytowego) oraz rzeczywistej kompozytowej konstrukcji lotniczej w postaci panelu z klejonymi usztywnieniami.

Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że możliwe jest opracowanie efektywnych metod oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji z wykorzystaniem stojących i propagujących się fal sprężystych. **Dowiodło to słuszności sformułowanej tezy.**

Podsumowanie moich oryginalnych osiągnięć

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

- Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej było wykorzystanie metody pomiarów punktowych z wykorzystaniem wibrometrii laserowej do prototypowania i oceny efektywności sieci czujników piezoelektrycznych przeznaczonych dla metody odbić falowych (z ang. *pulse-echo*) w zastosowaniu do oceny stanu technicznego elementów konstrukcji.
- Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej było również zaobserwowanie występowania zjawiska konwersji modu S0/A0 dla rysy o długości min. 3mm znajdującej się po przeciwnej stronie panelu niż mierzona. Wskazuje to na duży potencjał wykrywania wad znajdujących się we wnętrzu konstrukcji cienkościennej (np. poszycie skrzydła lub kadłuba samolotu) poprzez obserwację zjawiska konwersji modu S0/A0.
- Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej było także zaobserwowanie, że amplituda modu A0 powstałego na skutek interakcji modu S0 ze śrubami łączącymi usztywnienie z panelem zależy od stopnia dokręcenia śrub. Dla śrub dokręconych największym momentem formuje się front falowy związany z przylegającym usztywnieniem a nowopowstały mod A0 zaczyna propagować się w usztywnieniu. Obserwacja tych efektów pozwala na ocenę stopnia degradacji połączeń śrubowych/nitowanych.
- Rozwarstwienie mechaniczne laminatu może być wykryte po przez analizę rozkładu energii fal na utworzonych mapach. Dla niskich częstotliwości (100 kHz) zaobserwować można koncentrację energii fal w obszarze rozwarstwienia. Natomiast dla wyższych częstotliwości (powyżej 300 kHz) zaobserwować można silne tłumienie fal w obszarze rozwarstwienia.
- Nowością było wykorzystanie metody pełnego pola fal sprężystych do oceny stanu technicznego skomplikowanych elementów konstrukcji jak płyty kompozytowe o zmiennej grubości, kompozyty strukturalne z wypełniaczem komórkowym, fragmenty rzeczywistych konstrukcji lotniczych (klejony panel kompozytowy z usztywnieniami). W szczególności zastosowanie map uszkodzeń na bazie map rozkładu energii fal (konwencjonalnych RMS, jak i ważonych WRMS).
- Dobór odpowiedniej wagi dla map ważonych WRMS pozwala na znaczącą poprawę oceny stopnia uszkodzeń (lokalizacja oraz określenie rozmiaru i kształtu) – usuwany jest wpływ konsekracji energii fal związany z ich pobudzaniem).

- Mapy uszkodzeń oparte na mapach energii RMS fal sprężystych (mapy RMS konwencjonalne i ważone) pozwalają na określenie lokalizacji, kształtu i wielkości uszkodzenia (stopień degradacji elementu konstrukcji).
- Scalony analizator impedancji AD5933 może być wykorzystywany do monitorowania stanu technicznego konstrukcji z wykorzystaniem metody impedancji E/M, po jego prawidłowej kalibracji z wykorzystaniem rezystora kalibracyjnego. Pozwala to na eliminację dużego i ciężkiego laboratoryjnego analizatora impedancji w pomiarach do 100 kHz.
- Nowością i istotnym osiągnięciem było zaproponowanie wykorzystania metody impedancji E/M do określania stopnia zawilgocenia w materiałach kompozytowych.
- Elementem nowości było zastosowanie metody bezkontaktowych pomiarów pełnego pola fal sprężystych jako metody pomocniczej do określenia położenia, kształtu i wielkości uszkodzenia co wykorzystano dla badań związanych z metodą impedancji E/M.
- Istotnym osiągnięciem są wyniki szczegółowych analiz wpływu temperatury na wyniki pomiarów dla metody impedancji E/M w odniesieniu do materiałów kompozytowych.
- Istotnym osiągnięciem jest opracowanie efektywnego algorytmu kompensacji wpływu temperatury poprawiającego wyniki detekcji uszkodzeń oraz oceny ich wielkości.
- Nowością stanowiły badania związane z detekcją uszkodzeń w materiałach kompozytowych z wykorzystaniem kompensacji wpływu temperatury, prowadzone w warunkach laboratoryjnych jak i rzeczywistych (zewnętrznych).
- Algorytm oceny stanu technicznego konstrukcji w oparciu o metodę impedancji E/M pozwala na detekcję uszkodzeń, określenie ich stopnia jak i wykrycie wzrostu rozmiarów uszkodzenia.

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

W nawiasach kwadratowych podano odniesienia do publikacji zamieszczonych w „Wykazie opublikowanych prac naukowych lub twórczych” – załącznik 3a.

Przed obroną doktoratu, moje pierwsze prace badawcze związane były z układami fazowymi przetworników piezoelektrycznych (z ang. *phased arrays*) stosowanych do lokalizacji uszkodzeń w panelach izotropowych (np. stop aluminium). Układy fazowe przetworników działają na zasadzie analogicznej do radaru. Występuje tu analogia do układów (szyków) antenowych. Ich zadaniem jest skupianie frontu falowego fal sprężystych w wybranym kierunku. Jako efekt tych badań powstały publikacje [Ad2, Ad3]. W ramach tych badań opracowano nowe konfiguracje dwuwymiarowych układów fazowych oraz algorytm przetwarzania sygnałów dla tych konfiguracji [Ed5, Ed6].

W ramach realizacji swojej rozprawy doktorskiej zajmowałem się tematyką związaną zastosowaniem sieci przetworników piezoelektrycznych oraz metody odbić falowych stosowanych do lokalizacji uszkodzeń w jednorodnych panelach izotropowych (np. stop aluminium). W badaniach tych wykorzystywałem pomiary punktowe propagacji fal sprężystych (z ang. *point-wise*). W podejściu

tym fal sprężyste generowane są i rejestrowane w wybranych punktach badanego elementu konstrukcji. Izotropia materiału jest powodem rozchodzenia się fal ze stałą prędkością, niezależnie od kierunku propagacji. Wspomniane przetworniki tworzyły sieci o określonych topologiach. Celem rozprawy było badanie sieci przetworników o różnych topologiach na efektywność lokalizacji uszkodzeń. Badania dotyczyły skupionych [Ad6, Ad7, Ed7] oraz rozproszonych konfiguracji przetworników [Ed16, Ed23]. Na podstawie tych badań opracowana została matryca przetworników oraz system generacji i rejestracji fal sprężystych będące przedmiotem patentu [C1].

Zajmowałem się również zagadnieniem filtracji sygnałów w celu poprawy dokładności wskazań lokalizacji uszkodzeń. Badałem algorytmy filtracji oparte na filtrach cyfrowych, analizie czasowo-częstotliwościowej, opartej na spektrogramach a także na ciągłej i dyskretnej transformacie falkowej [Ed25].

Brałem również udział w badaniach zleconych przez firmę *Boeing Research and Technology Europe S.L.* W ramach tego zlecenia prowadziłem badania eksperymentalne zachowania się fal sprężystych generowanych i rejestrowanych przez przetworniki piezoelektryczne typu MFC (z ang. *Macro Fiber Composites*) w układach rozet.

Prowadziłem również badania związane z możliwością wykrywania i monitorowania rozwoju pęknięć zmęczeniowych w łopatach wirników śmigłowców. Badania te prowadziłem w ramach udziału w realizacji projektu MNiSW Nr N504 „Opracowanie koncepcji systemu monitorowania stanu technicznego łopat wirników nośnych śmigłowców z wykorzystaniem metod NDT i SHM”. Projekt ten był realizowany wspólnie z Instytutem Technicznym Wojsk Lotniczych ITWL. Badania prowadzono z wykorzystaniem matryc przetworników piezoelektrycznych oraz czujników odkształceń typu FBG. Brałem udział w badaniach zmęczeniowych dla fragmentów łopat śmigłowców Mi-2 oraz Mi-8, podczas których rejestrowano zmiany w propagacji fal sprężystych oraz zmiany odkształceń. W wyniku przeprowadzonych badań powstały prace [Ed21, Epd25] .

Po obronie doktoratu prowadziłem dalej badania związane z wykorzystaniem sieci przetworników piezoelektrycznych oraz metody odbić falowych do lokalizacji uszkodzeń. W ramach realizacji projektu *PROFAL - System monitorowania stanu technicznego konstrukcji metodą analiz propagacji fal* Lambda WND-POIG.01.03.01-22-078/09, Zespół badawczy, w którym pracuję nawiązał współpracę z Zespołem badawczym prof. Tadeusza Łuby (Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych). W efekcie tej współpracy został opracowany wbudowany system (z ang. *embedded*) do przetwarzania i wizualizacji wyników lokalizacji uszkodzeń w oparciu o układ FPGA (z ang. *Field Programmable Gate Arrays*) oraz system SoPC (*System on Programmable Chip*). Część elektroniczna została opracowana przez Zespół prof. Tadeusza Łuby. Moim zadaniem było określenie wymogów funkcjonalnych i technicznych systemu (format danych, wybór interfejsu komunikacyjnego, sposobu prezentacji wyników) oraz opracowanie algorytmu lokalizacji uszkodzeń. Prowadziłem również testy systemu na bazie zgromadzonych przeze mnie danych pomiarowych pochodzących z badań prowadzonych w ramach realizacji pracy doktorskiej. W efekcie tych badań powstały prace [Apd3, Epd16] – artykuł do czasopisma JCR (kopia artykułu znajduje się w załączniku 6) i artykuł pokonferencyjny.

Prace badawcze związane z lokalizacją uszkodzeń, w których wykorzystywano metodę odbić falowych, kontynuowałem i, w wyniku tego powstała wspólna praca Zespołem prof. Tadeusza Łuby, [Epd36]. W pracy tej przedstawiono innowacyjne podejście polegające na wykorzystaniu tabletu lub telefonu komórkowego (*Smartphone*) z systemem operacyjnym ANDROID do przetwarzania sygnałów

i prezentacji wyników lokalizacji uszkodzeń. Ponadto we wspomnianej wyżej pracy przedstawiono opracowany przeze mnie algorytm lokalizacji uszkodzeń wykorzystujący sieci przetworników piezoelektrycznych oraz metodę odbić falowych. Nowo opracowany algorytm pozwala na wykrywanie uszkodzeń w prostych panelach o własnościach ortotropowych (np. kompozyty włókniste). W materiale o własnościach ortotropowych prędkość rozchodzenia się fali zależy od kierunku propagacji. Przyjąłem, że daną wejściową do algorytmu będzie charakterystyka kątowa prędkości wykorzystywanego modu falowego. Algorytm zweryfikowano na bazie wyników numerycznych z symulacji propagacji fal. W tym przypadku algorytm funkcjonował poprawnie, jednak w przypadku danych eksperymentalnych nawet dla prostych paneli kompozytowych występowały pewne problemy z określeniem właściwej lokalizacji uszkodzenia. Powodem tego była propagacja oraz odbicia dwóch modów fal (mod symetryczny i antysymetryczny), propagujących się z różnymi prędkościami. Pomimo tego, że można dobrać zakres częstotliwości, przy których dominuje wielkością amplitudy jeden mod, to odbicia drugiego modu o znikomej amplitudzie są nadal widoczne i stanowią źródło problemów w lokalizacji uszkodzeń.

Takie same problemy napotkano gdy testowano algorytm odbić falowych dla paneli wytworzonych ze stopu aluminium z usztywnieniami. Wielokrotne odbicia oraz konwersja modów nie pozwalają na wykorzystanie opracowanego algorytmu dla konstrukcji rzeczywistych (zmiany grubości materiału, usztywnienia, połączenia mechaniczne, różne materiały). Stąd też wynika zastosowanie metody pełnego pola propagacji fal sprężystych z wykorzystaniem wibrometrii laserowej, co stanowiło część przedstawionego istotnego osiągnięcia naukowego.

W ramach udziału w projekcie nr 0595/T02/2007/02, pt. „Demonstrator Zaawansowanych Technologii Lotniczych – latająca platforma badawcza” prowadziłem badania eksperymentalne dotyczące zastosowania materiałów z pamięcią kształtu aktywowanych termicznie oraz materiałów piezoelektrycznych do kontroli charakterystyk dynamicznych konstrukcji poprzez zmianę sztywności oraz sterowanie ich kształtem (*morphing*) modelu skrzydła.

Ponadto zajmowałem się zagadnieniami wykrywania uszkodzeń z wykorzystaniem metod badań nieniszczących (NDT) opartych na termografii aktywnej. W badaniach tych wykorzystywano pobudzenie w formie impulsu (błysk reflektora halogenowego) oraz pobudzenie ciągłe-modulowane, z wykorzystaniem wzbudnika ultradźwiękowego. Celem badań było wykrywanie delaminacji we włóknistych materiałach kompozytowych. Wyniki badań opublikowano w pracach [Epd6, Epd14].

Zajmowałem się także zagadnieniem badania charakterystyk statycznych i dynamicznych przetworników piezoelektrycznych oraz membran wyposażonych w elementy piezoelektryczne. Badania dotyczyły pomiaru i identyfikacji: charakterystyk przemieszczeń w funkcji częstotliwości, częstości rezonansowych, postaci drgań oraz charakterystyk cieplnych (nagrzewania się) podczas drgań rezonansowych. Praktycznym zastosowaniem tych membran były elementy aktywne *synthetic-jet* stosowane do sterowania przepływem (kontrola oderwania strugi). Badania prowadziłem we współpracy z dr Rutą Rimasauskiene (Kaunas University of Technology, Kowno, Litwa) w ramach projektu Marie Curie: „*Static and Dynamic piezo-driven stream wise vortex generators for active flow Control*” (STA-DY-WI-CO) Marie Curie Action, No. 251309. W wyniku tej współpracy powstała jedna publikacja do czasopisma JCR [Apd2] (kopia artykułu znajduje się w załączniku 6) oraz publikacje pokonferencyjne [Epd2, Epd3, Epd24].

W kolejnym kroku przeprowadziłem badania mające na celu porównanie wyników pomiarów dla metody impedancji E/M, z wynikami pomiarów charakterystyk dynamicznych konstrukcji

z wykorzystaniem metody wibrometrii laserowej (mierzone funkcję odpowiedzi częstotliwościowej FRF z ang. *Frequency Response Function*).

Pomiary, których wyniki opublikowano w pracy [Epd8] wykonano dla jednorodnego elementu konstrukcyjnego w postaci belki ze stopu aluminium. W badaniach stwierdzono, że łatwiej jest analizować rezonanse konstrukcji wykorzystując przebiegi rezystancji dla metody impedancji E/M (brak trendu charakterystycznego trendu związanego z pojemnością przetwornika piezoelektrycznego). Porównano przebieg rezystancji dla przetwornika piezoelektrycznego z funkcją FRF otrzymaną w wyniku pomiarów drgań z wykorzystaniem metody wibrometrii laserowej (pomiar poprzecznej prędkości drgań). Wyniki dla obu metod były zgodne. Największe amplitudy pików rezonansowych związane były z parzystymi postaciami drgań giętych. Dla nieparzystych postaci drgań giętych amplitudy pików rezonansowych były prawie nie zauważalne w przebiegach rezystancji i miały bardzo małe wartości dla funkcji FRF dla metody wibrometrii. Badano także połączenie równoległe dwóch przetworników. Przetworniki można tak połączyć aby były pobudzone w fazie lub przeciw fazie. W tym drugim przypadku piki rezonansowe związane z postaciami drgań giętych nie były widoczne na charakterystyce rezystancji (nie były pobudzone). Pozostały tylko piki rezonansowe związane z postaciami drgań skrętnych. W celu ich identyfikacji wykorzystano pomiary z wykorzystaniem wibrometru laserowego. W przypadku pobudzenia obu przetworników w fazie sytuacja jest odwrotna (widoczne są piki rezonansowe związane z postaciami drgań giętych a niewidoczne, te związane z postaciami drgań skrętnych). Dzięki takiemu podejściu można wykorzystać wybrany typ postaci drgań wykorzystywanych w metodzie impedancji E/M (giętne lub skrętne). Takie badania nie były dotychczas realizowane, stanowią oryginalną część.

W pracy [Epd15] dokonano analogicznego porównania, jednak zamiast przebiegu rezystancji wykorzystano przebieg modułu admitancji (odwrotność impedancji), po usunięciu charakterystycznego trendu. Trend ten związany jest z pojemnością elektryczną przetwornika piezoelektrycznego. W tym przypadku otrzymano również zgodność charakterystyk aż do częstotliwości 10 kHz. Dla wyższych częstotliwości zauważano rozbieżności powstałe prawdopodobnie na skutek zmian w zamocowaniu wywołanych podczas wykonywania kolejnych pomiarów.

Istotnym zastosowaniem metody impedancji E/M była samo-diagnostyka przetwornika piezoelektrycznego a w szczególności ocena jakości połączenia przetwornika z elementem konstrukcyjnym. Badania związane z tą tematyką prowadziłem wspólnie z dr Jochenem Mollem (Uniwersytet Goethego we Frankfurcie nad Menem, Niemcy). Wyniki tych badań zostały opublikowane w pozycji [Epd29] (kopia tej pracy znajduje się w załączniku 6). W procesie monitorowania stanu technicznego konstrukcji z wykorzystaniem metody impedancji E/M bardzo ważne jest aby przetwornik piezoelektryczny był prawidłowo sprzężony z konstrukcją. Sprzężenie realizowane jest za pośrednictwem połączenia klejowego. Niewłaściwie wykonane połączenie klejowe nie zapewni prawidłowego sprzężenia elektromechanicznego (transferu odkształceń z przetwornika do konstrukcji). Może być także przyczyną odklejenia się przetwornika od konstrukcji. Problem ten badany był w literaturze, jednak prace badawcze dotyczyły wykorzystania części urojonej impedancji lub admitancji. Ponadto, dotychczas badano obszar rezonansów przetwornika. W swoich badaniach wykorzystałem również obszar rezonansów konstrukcji. Nowością jest zaproponowana przez mnie możliwość wykorzystania zarówno części rzeczywistych impedancji/admitancji (rezystancji/konduktancji) jak i ich części urojonych (reaktancji/susceptancji) w celu monitorowania stopnia sprzężenia przetwornika piezoelektrycznego z konstrukcją.

W obszarze rezonansów konstrukcji, amplitudy pików rezonansowych widocznych na charakterystykach dla części rzeczywistych oraz maksimów/minimów (wokół przejścia przez wartość

zerową) dla urojonych części impedancji maleją wraz ze wzrostem niedoklejenia przetwornika. Przy czym, rezonanse konstrukcji trudniej jest określić dla części urojonych charakterystyk.

W obszarze rezonansów przetwornika (są wciąż widoczne po montażu przetwornika na konstrukcji) sytuacja jest odwrotna, tzn. wraz ze wzrostem niedoklejenia wzrastają amplitudy pików rezonansowych przetwornika. Jednak zarówno część rzeczywista jak i urojona może być wykorzystywana do monitorowania stopnia sprzężenia przetwornika z konstrukcją. Poza tym, do celów diagnostycznych (sprzężenia przetwornika z konstrukcją) może być wykorzystany zarówno obszar rezonansów przetwornika jak i rezonansów konstrukcji.

Elementem nowości było również zastosowanie metody spektroskopii terahercowej THz jako metody pomocniczej do oceny jakości wykonania połączenia klejowego przetwornika (pustki w kleju, niedoklejenie, nierówna grubość warstwy – brak równoległości) z konstrukcją w celu weryfikacji wyników dla metody impedancji E/M.

Skany typu B oraz C wykonane dla metody spektroskopii z wykorzystaniem fal elektromagnetycznych w zakresie terahercowym pozwalają ocenić jakość wykonania połączenia klejowego przetwornika z konstrukcją. Metoda może być wykorzystana do cienkościennych elementów konstrukcji wykonanych z materiałów nieprzewodzących elektrycznie. Było to powodem wykorzystano w badaniach próbki z kompozytu szklano-epoksydowego.

Należy podkreślić, że oprócz tej tematyki wraz z dr Jochenem Moem prowadziliśmy wspólnie badania związane z zastosowaniem metody spektroskopii terahercowej do określania grubości elementów **[H4]** (część pracy nie związana z istotnym osiągnięciem naukowym).

Zajmowałem się również badaniami związanymi z zastosowaniem techniki spektroskopii w zakresie terahercowym do badania degradacji fizykochemicznej w materiałach kompozytowych wzmacnianych włóknami szklanymi. Badania te prowadziłem w ramach uczestnictwa w realizacji projektu pt. „Nieinwazyjne metody oceny degradacji fizyko – chemicznej i mechanicznej elementów konstrukcji kompozytowych” (KOMPNDT) Projekt Badań Stosowanych NCBiR PBS1/B6/8/2012. W ramach tych badań powstały publikacje **[Epd30, Epd31]**, w których technika spektroskopii THz została wykorzystana do wykrywania i lokalizacji rozwarstwienia. Badania związane z zastosowaniem metody spektroskopii THz prowadziłem również we współpracy z dr Norbertem Pałą (Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie). Badania obejmowały w szczególności problematykę wykrywania zawilgocenia w kompozytach na bazie włókien szklanych, efektem badań jest publikacja **[Epd33]**.

Ponadto, w ramach zakończonego projektu EC FP7, ENCOMB *Extended Non-Destructive Testing for Composite Bonds*, EC Grant FP7–2010, No. 266226 oraz biegnącego projektu H2020 “*Quality assurance concepts for adhesive bonding of aircraft composite structures by advanced NDT (ComBoNDT)*” H2020-MG-2014_TwoStages, Topic: MG-1.1-2014 RIA prowadziłem badania związane z wykrywaniem degradacji lotniczego materiału kompozytowego węglowo-epoksydowego (HEXPPLY M21 TORRAY T700, materiał ten jest wykorzystywany m.in. w budowie samolotów AIRBUS A350). Zajmowałem się także opracowaniem metod detekcji degradacji połączeń klejowych materiałów kompozytowych na skutek:

- oddziaływania substancji agresywnych (np. SKYDROL – płyn hydrauliczny wykorzystywany w instalacjach hydrauliki siłowej samolotów pasażerskich),
- zanieczyszczenia powierzchni elementów klejonych substancją rozdzielającą (FREKOTE),
- degradacji termicznej.

Scenariusze badań stosowanych w ramach tych projektów zostały opracowane na podstawie rzeczywistych przypadków występujących w konstrukcjach samolotów pasażerskich (wycieki

agresywnych płynów, uderzenia pioruna, kontakt z gazami wylotowymi o wysokich temperaturach). Scenariusze zostały zdefiniowane przez Instytut Fraunhofera IFAM oraz firmę AIRBUS. We wspomnianych powyżej badaniach wykorzystywano metodę propagacji fal sprężystych, metodę impedancji E/M oraz metodę fluorescencji wzbudzonej laserem (z ang. *Laser Induced Fluorescence*, LIF). Ostatnią z wyżej opisanych metod wykorzystywano we współpracy z dr Miroslawem Sawczakiem z Instytutu Maszyn Przepływowych PAN. W wyniku tych badań powstały liczne publikacje [**Epd9, Epd10, Epd17, Epd18, Epd20, Epd21, Epd22, Epd37, Epd39**].

Zajmowałem się również badaniami związanymi z wykorzystaniem optycznych czujników odkształceń typu FBG do monitorowania stanu technicznego konstrukcji morskich. Badania te prowadzono w ramach realizacji projektu MNiSW nr R03 0059 06, pt. „Ocena bezpieczeństwa dużych konstrukcji morskich przy wykorzystaniu światłowodowych czujników typu FBG”. Brałem udział w pracach pilotażowych (przygotowawczych) a także w zasadniczych badaniach modelu nogi platformy wiertniczej (model w skali nogi platformy Baltic Beta LOTOS). Badania obejmowały pomiary charakterystyk dynamicznych modelu oraz ich zmian na skutek rozwoju uszkodzeń (uplastycznienie, symulowane pęknięcie). Uczestniczyłem również w przygotowaniu i montażu sieci czujników odkształceń FBG oraz akcelerometrów na statku HORYZONT 2 oraz akcelerometrów na żaglowcu DAR MŁODZIEŻY. Badania te miały na celu monitorowanie stanu technicznego krytycznych fragmentów konstrukcji (jak np. maszt żaglowy). Pomiary odkształceń oraz przyspieszeń realizowane były podczas rejsów a więc występowania rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych (manewry, sztorm, silny wiatr). Wyniki badań zostały opublikowane w pracach [**Apd1, Ed27, Ed28, Epd1, Epd13**]. Kopia pracy opublikowanej w czasopiśmie JCR [**Apd1**] znajduje się w załączniku 6.

Tą powyższą tematyką jestem nadal zainteresowany i w wyniku tego został złożony projekt ERA-NET MARTEC II „*Reliable and autonomous monitoring system for maritime structures*” RAMMS. Program RAMMS, został ostatnio zaakceptowany do finansowania (podczas tworzenia tego dokumentu). Projekt obejmuje Niemiecko–Polską współpracę naukową a tematem projektu jest opracowanie autonomicznego systemu monitorowania stanu technicznego kompozytowych konstrukcji morskich z wykorzystaniem metody impedancji E/M oraz pomiarów odkształceń z wykorzystaniem czujników typu FBG.

W chwili obecnej nadal zajmuje się problemami wykrywania degradacji fizykochemicznej w materiałach kompozytowych z wykorzystaniem metody spektroskopii terahercowej. Należy podkreślić, że wymienione powyżej badania są aktualne, unikatowe i będą kontynuowane.

Na kolejnych stronach zamieściłem tabele zawierające zestawienia moich osiągnięć naukowych.

Tabela 1. Posumowanie ważniejszych osiągnięć z podziałem na okres przed i po doktoracie

Nazwa osiągnięcia	Wartość wskaźnika przed obroną doktoratu	Wartość wskaźnika po obronie doktoratu	Sumaryczna wartość wskaźnika
Publikacje z listy Journal Citation Reports (JCR)	8	9 <u>W tym:</u> 6 – w osiągnięciu naukowym	17
Monografie	0	1 <u>W tym:</u> 1 – j. polski	1
Rozdziały w monografii	1 <u>W tym:</u> 1 – j. polski	2 <u>W tym:</u> 2 – j. angielski 2 – w osiągnięciu naukowym	3
Inne prace naukowe	33 <u>W tym:</u> 3 – j. polski 30 – j. angielski 17 – w bazie Web of Sciences	43 <u>W tym:</u> 43 – j. angielski 17 – w bazie Web of Sciences 4 – w osiągnięciu naukowym	76
Wygłoszenie referatów na konferencjach	14 <u>W tym:</u> 3 – j. polski 11 – j. angielski	11 <u>W tym:</u> 11 – j. angielski	25
Aktywny udział w konferencjach	18 <u>W tym:</u> 19 – j. angielski	33 <u>W tym:</u> 33 – j. angielski	51
Sumaryczny Impact Factor IF	10,948	23,069	34,017
Projekty badawcze międzynarodowe	5	4 <u>W tym:</u> 1-H2020	9
Projekty badawcze krajowe	8	7 <u>W tym:</u> <u>2 jako kierownik</u>	15
Patenty	1	1	2
Recenzje do czasopism	2	24	26

Tabela 2. Posumowanie wszystkich osiągnięć

Osiągnięcie	Wartość
Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	17
Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	BRAK
Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe	2
Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach	BRAK
Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie, o której mowa w pkt II A	80
Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	40
Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	34,017
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): wszystkich/bez samocytowań	201/154
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	7
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	24
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną	3
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	25
Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	10
Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	51
Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	2
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione w pkt II K	4
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	8
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
Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	BRAK
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	2
Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki	1
Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji	2
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	BRAK
Saże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	1
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	1
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	1
Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	BRAK
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	26
Inne osiągnięcia, nie wymienione w pkt III A – III P	2

Podpis

