

Autoreferat

Przedstawiający dorobek i osiągnięcie naukowe w szczególności określone w art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

dr Paweł Henryk Malinowski

Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk

Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych

ul. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk

pmalinowski@imp.gda.pl

Imię i Nazwisko.

Paweł Henryk Malinowski

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

- 2011** **Doktor**, doktor nauk technicznych, dyscyplina: mechanika, specjalność: dynamika konstrukcji, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, data otrzymania: 2011-04-14
Tytuł rozprawy: „Lokalizacja uszkodzeń konstrukcji przy wykorzystaniu zjawiska interferencji fal sprężystych”
Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Wiesław Ostachowicz
- 2005** **Magister**, dyscyplina: fizyka, specjalność: fizyka komputerowa, Uniwersytet Gdański, data otrzymania: 2005-07-06
Tytuł pracy magisterskiej: „Numeryczne obliczanie poziomów energetycznych podwójnej studni potencjału”

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

Obecne miejsce zatrudnienia:

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

Historia zatrudnienia:

Maj 2011 – obecnie	Adiunkt
Styczeń 2006 – maj 2011	Asystent
Listopad 2005 – grudzień 2005	Specjalista

3. 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 w rozwój dyscypliny naukowej - Mechaniki, wskazuję cykl **11** publikacji powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:

„Ocena poziomu degradacji elementów konstrukcji wykonanych z materiałów izotropowych i anizotropowych – metody kontaktowe i bezkontaktowe”

b) **wykaz wybranego cyklu publikacji**

Wybrany cykl publikacji powiązanych tematycznie składa się z **11** pozycji. Publikacje powstały w wyniku badań w ramach polskich i międzynarodowych projektów. Warto w tym miejscu wyróżnić projekty Iuventus Plus (nr IP2011 033071) i NCN SONATA (nr 2013/11/D/ST8/03355), w których pełniłem funkcję kierownika oraz projekt FP7 ENCOMB (nr 266226), w którym byłem głównym wykonawcą. W skład cyklu wchodzi następujące pozycje:

- **7** artykułów opublikowanych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR),
- **2** rozdziały w monografiach anglojęzycznych opublikowanych za granicą,
- **1** artykułu w czasopiśmie (*Materiaux & Techniques*), które jest zamieszczone w bazie *Web of Science*,
- **1** artykułu, który jest zamieszczony w wydawnictwie pokonferencyjnym *Proceedings of SPIE* występującym w bazie *Web of Science*. Konferencja *SPIE Smart Structures/NDE* należy do czołowych w mojej tematyce badań.

Cykl **11** publikacji przedstawiony jest poniżej.

- [1] **P. Malinowski**, T. Wandowski, W. Ostachowicz: *The use of electromechanical impedance conductance signatures for detection of weak adhesive bonds of carbon fibre–reinforced polymer*. Structural Health Monitoring 14 (4): 332-344, 2015.
(Impact Factor 2015: 3,193) mój udział: 65%
- [2] **P.H. Malinowski**, T. Wandowski, W.M. Ostachowicz: *Study on electromechanical impedance characteristics of part of structures made of CFRP*. Proceeding of SPIE 9805, 98051R, 2016.
(Web of Science) mój udział: 75%
- [3] T. Wandowski, **P. Malinowski**, Ł. Skarbek, W. 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, 230 (2): 331-336, 2016
(Impact Factor 2015: 0,730) mój udział: 40%
- [4] T. Wandowski, **P. H. Malinowski**, W. M. Ostachowicz: *Delamination detection in CFRP panels using EMI method with temperature compensation*. Composite Structures, 151: 99-107, 2016.
(Impact Factor 2015: 3,853) mój udział: 45%
- [5] T. Wandowski, **P. H. Malinowski**, W. M. Ostachowicz: *Temperature and damage influence on electromechanical impedance method used for CFRP panels*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1045389X16657423, first published on July 12, 2016 as doi:10.1177/1045389X16657423, 2016.
(Impact Factor 2015: 1,975) mój udział: 50%
- [6] W. M. Ostachowicz, T. Wandowski, **P. H. Malinowski**: *Structural health monitoring methods for composite materials - rozdział w monografii (strony 22-39):* Ginu Rajan, B. Gangadhara Prusty: *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using*

Fiber Optic Methods. CRC Press, 492 Pages, Taylor and Francis Group, ISBN 9781498733175, 2016.

mój udział: 45%

- [7] J. Moll, T. Wandowski, **P. Malinowski**, M. Radzieński, S. Opoka, W. Ostachowicz: *Experimental analysis and prediction of antisymmetric wave motion in a tapered anisotropic waveguide*. The Journal of the Acoustical Society of America, 138 (1): 299-306, 2015.

(Impact Factor 2015: 1,572) mój udział: 30%

- [8] W. Ostachowicz, **P. Malinowski**, T. Wandowski: *Damage Localisation Using Elastic Waves Propagation Methods. Experimental Techniques*. [In]: Ostachowicz W., Güemes A. (ed.): *New Trends in Structural Health Monitoring*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, Springer, ISBN 978-3-7091-1389-9, 2013.

mój udział: 45%

- [9] T. Wandowski, **P. H. Malinowski**, W. M. Ostachowicz: *Circular sensing networks for guided waves based structural health monitoring*. Mechanical Systems and Signal Processing, 66-67: 248-267, 2016.

(Impact Factor 2015: 2,771) mój udział: 45%

- [10] B. Park, H. Sohn, **P. Malinowski**, W. Ostachowicz: *Delamination localization in wind turbine blades based on adaptive time-of-flight analysis of noncontact laser ultrasonic signals*. Nondestructive Testing and Evaluation, doi: 10.1080/10589759.2015.1130828, 1-20, 2016.

(Impact Factor 2015: 0,566) mój udział: 50%

- [11] F. Touchard, L. Berthe, **P. Malinowski**, S. Opoka, M. Boustie, L. Chocinski-Arnault, W. Ostachowicz: *Comparison of damage behaviour of different plant fibre composites under laser impact loading*. Materiaux & Techniques, 103, 108 (2015).

(Web of Science) mój udział: 30%

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

Oświadczenia współautorów publikacji zostały dołączone do wniosku.

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

Wstęp

Awaria samolotu, śmigłowca, turbiny wiatrowej, rurociągu, mostu i innych obiektów inżynierskich pociąga za sobą ogromne straty finansowe i nierzadko ofiary ludzkie. Wytwórcy i operatorzy tychże obiektów szukają technologii podwyższających poziom bezpieczeństwa konstrukcji. Eksploatacja obiektów inżynierskich związana jest z regularną kontrolą ich stanu technicznego. Kontrola taka wymaga zaplanowanego wyłączenia obiektu z użytkowania i oddanie go w ręce diagnostów. Obecnie stosuje się przynajmniej kilka sprawdzonych,

nieniszczących metod wykrywania uszkodzeń (z ang. NDT – Nondestructive testing)¹. Nadal jedną z podstawowych metod jest inspekcja wizyjna. Równolegle z rozwojem metod NDT obserwuje się zainteresowanie metodami tzw. monitorowania stanu technicznego (z ang. SHM – Structural Health Monitoring)². Idea metod monitorowania stanu polega na stałym zintegrowaniu czujników z badanym obiektem. Informacja zebrana przez czujniki jest przetwarzana przez dedykowane algorytmy numeryczne. W wyniku tego procesu użytkownik obiektu otrzymuje informację diagnostyczną. Ważnym podkreślenia jest fakt, iż taki system SHM może funkcjonować podczas eksploatacji obiektu jak i podczas przeglądu okresowego. Systemy SHM tworzy się w oparciu o różnorodne typy czujników, zarówno pasywne jak i aktywne. Przykładem tych pierwszych są czujniki światłowodowe, np. typu FBG które pozwalają określić odkształcenia, czy też temperaturę obiektu³. Przykładem czujników aktywnych są przetworniki piezoelektryczne^{4,5} pozwalające na pobudzenie konstrukcji jak też i rejestrację odpowiedzi.

Stopy aluminium i kompozyty coraz szerzej wykorzystywane są w przemyśle. Przykładem tego są producenci statków powietrznych, np. firmy Boeing i Airbus. Firmy lotnicze coraz częściej wprowadzają do produkcji materiały typu CFRP (*carbon fibre reinforced polymer*), GFRP (*glass fibre reinforced polymer*), GLARE (*glass laminate aluminium reinforced epoxy*). Dla przykładu można w tym miejscu przywołać następujące typy samolotów: Airbus A380, Airbus XWB350, Boeing 787 Dreamliner. Materiały kompozytowe typu GFRP są powszechnie stosowane w energetyce wiatrowej do budowy łopat turbin wiatrowych, czy też w przemyśle jachtowym.

Omawiane osiągnięcie naukowe dotyczy wykrywania degradacji elementów konstrukcji.

W omawianym cyklu publikacji pojęcie degradacji dotyczy delaminacji w materiałach kompozytowych, osłabionego połączenia klejowego materiałów kompozytowych, modyfikacji powierzchni tychże materiałów, jak również uszkodzeń w próbkach ze stopów aluminium. W ramach moich prac badawczych rozwijałem metodę impedancji elektromechanicznej⁶, wibrometrię laserową w zastosowaniu do rejestracji fal sprężystych pobudzonych przez przetwornik piezoelektryczny⁷ lub źródło laserowe⁸, jak również metodę spektroskopii terahercowej. Metoda impedancji elektromechanicznej (z ang. EMI – *electromechanical impedance*) oparta jest na pomiarze własności elektrycznych

¹G. Tober, D. Schiller, NDT in aerospace - state of art, Proceeding of 15th World Conference on Non-Destructive Testing, <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn904/idn904.htm>, 2000.

²C.R. Farrar, K. Worden, An introduction to structural health monitoring. Philosophical Transactions of Royal Society A, 365(1851): 303–315, 2007.

³E. Udd (Editor), W.B. Spillman, Jr., Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists, Wiley 2011.

⁴W. Heywang, K. Lubitz, W. Wersling, Piezoelectricity, Springer-Verlag 2008.

⁵V. Giurgiutiu, Structural Health Monitoring with piezoelectric wafer active sensors. Academic Press, Elsevier Inc, 2008.

⁶S. Na S, H.K. Lee, A multi-sensing electromechanical impedance method for non-destructive evaluation of metallic structures. Smart Materials and Structures 22: 09501, 2013.

⁷W.J. Staszewski, B.C. Lee, L. Mallet, F. Scarpa, Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing Smart Mater. Struct. 13 251-260, 2003.

⁸P. Liu, H. Sohn, S. Yang, T. Kundu, Fatigue crack localization using noncontact laser ultrasonics and state space attractors, the Journal of the Acoustical Society of America, 890-898, 2015.

przetworników piezoelektrycznych zamocowanych na badanym obiekcie. Zmiany impedancji i admitancji przetwornika w funkcji częstotliwości (widma) umożliwiają uzyskanie informacji o stanie technicznym obiektu. Wiąże się to ze zjawiskiem piezoelektrycznym, które polega na tym, że zmiany własności mechanicznych badanego obiektu mają wpływ na własności elektryczne zamocowanego do obiektu przetwornika. Metoda oparta na zjawisku propagacji fal sprężystych wykorzystuje fakt, że degradacje materiału, które pojawiają się na drodze propagującej się fali wywołują jej zaburzenie. Metody przeze mnie badane są rozwijane przez ośrodki naukowe na świecie w zastosowaniu do wykrywania uszkodzeń obiektów inżynierskich. Zagadnienie diagnostyki obiektów lądowych, morskich i powietrznych jest istotne z punktu widzenia ich użytkowników ponieważ ma na celu zapewnienie bezpiecznej pracy.

Teza

Możliwe jest opracowanie efektywnych metod oceny degradacji fizyko–chemicznej elementów konstrukcji wytworzonych z materiałów o własnościach izotropowych i anizotropowych.

Omówienie wyników

W prowadzonych badaniach naukowych zajmowałem się degradacją połączeń klejowych kompozytów. Badania prowadziłem metodą impedancji elektromechanicznej. Zaproponowałem analizę zakresu wysokich częstotliwości, powyżej 3 MHz. W tym zakresie występuje częstotliwość rezonansu związanego z grubością wykorzystanego przetwornika piezoelektrycznego. Zakres ten wykorzystywany był wcześniej przez innych badaczy do wykrywania uszkodzeń w metalowych elementach konstrukcji⁹. Jednakże po raz pierwszy zaproponowałem jego zastosowanie do oceny połączeń klejowych kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami węglowymi (CFRP). Próbkę poddane badaniom składały się z dwóch płytek. Pierwsza 6-warstwowa płytka została zanieczyszczona, druga 10-warstwowa była niezmodyfikowana. Płytki były połączone klejem Cytec, FM300K.05. W pracy [1] razem ze współautorami rozważaliśmy trzy przypadki modyfikacji złącza klejowego. Pierwszy zestaw czterech próbek (RE1–RE4) zawierał zanieczyszczenie środkiem antyadhezyjnym (rozdzielaczem) typu *Frekote*. Drugi zestaw czterech próbek zanieczyszczony był wodą (MO1–MO4). Zanieczyszczenie oraz klejenie próbek zostało wykonane przez koordynatora projektu FP7 ENCOMB. Każda z czterech próbek w danym zestawie charakteryzowała się różnym poziomem zanieczyszczenia. W przypadku próbek RE1–RE4 poziom zanieczyszczenia został określony przez atomową zawartość krzemu na powierzchni klejonej płytki. Zawartość krzemu została zmierzona poprzez spektroskopię fotoelektronów w zakresie promieniowania X (ang. *X-ray Photoelectron Spectroscopy* – XPS). Natomiast zawilgocenie próbek oszacowano po wzroście masy po uprzednim przechowaniu

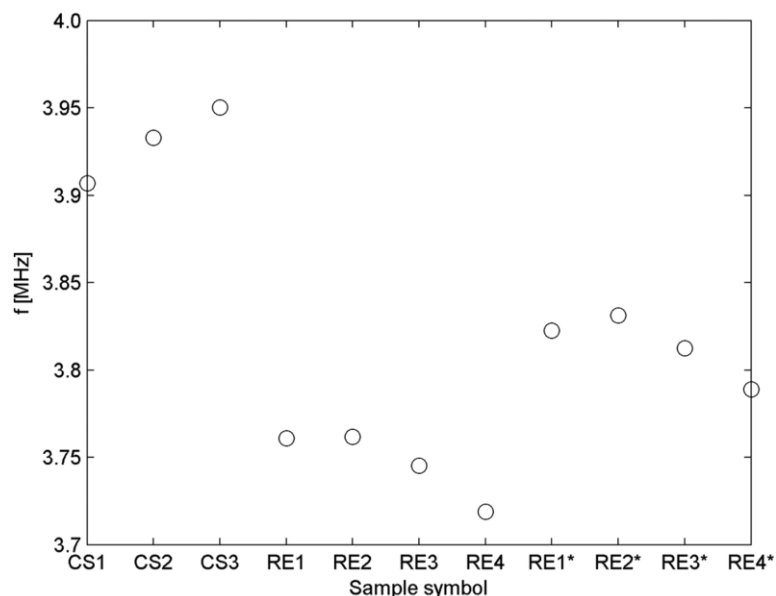
⁹S. Park, C.-B. Yun, Y. Roh, *et al.*, Health monitoring of steel structures using impedance of thickness modes at PZT patches, *Journal of Smart Structures and Systems* 1(4): 339–353, 2005.

próbek w komorach klimatycznych¹⁰. Trzeci zestaw (CS1–CS3) zawierał próbki sklepane w temperaturze poniżej temperatury przewidzianej przez producenta kleju. Próbka referencyjna (REF) przygotowana była do badań w temperaturze 180°C natomiast próbki CS1, CS2, CS3 odpowiednio w temperaturach 170, 160 i 150°C. Nadmierne obniżenie temperatury może skutkować niepełną polimeryzacją kleju, a co z tym się wiąże może powstać złącze o pogorszonych własnościach¹¹. Zaproponowałem ocenę połączenia klejowego na podstawie wskaźnika RMS (z ang. *root mean square*) oraz śledzenia zmian położenia maksimum konduktancji. Dla rozważanych przypadków maksimum to znajduje się w okolicach 4 MHz. Zaobserwowałem wzrost częstotliwości odpowiadającej maksimum konduktancji wraz ze spadkiem temperatury w której próbka była sklejana (Rys. 1). Natomiast wzrost zanieczyszczenia środkiem antyadhezyjnym jest skorelowany ze spadkiem tej częstotliwości (Rys. 1). W przypadku wskaźnika RMS obserwujemy jego spadek zarówno przy spadku temperatury, w której próbka była sklejana wskaźnika jak też i wzrostu poziomu zanieczyszczenia środkiem antyadhezyjnym. W przypadku zanieczyszczenia próbki wodą wyniki nie są tak jednoznaczne i nie zaobserwowałem wzrostu wartości wskaźnika RMS wraz ze wzrostem zawartości wilgoci. Badania przedstawione w pracy [1] realizowane były w ramach projektu FP7 ENCOMB, w którym uczestniczyli badacze z Uniwersytetu w Patras (Grecja). Partnerzy z Grecji przeprowadzili próby niszczące mające na celu oszacowanie odporności na pękanie złącza klejowego¹². Na potrzeby tych badań wyznaczono krytyczną prędkość uwalniania energii (G_{IC}). Porównałem wyniki otrzymane metodą impedancji elektromechanicznej z wartościami parametru G_{IC} . Zaobserwowałem korelację spadku wartości RMS i położenia maksimum konduktancji dla próbek (RE2-RE4) wraz ze spadkiem wartości G_{IC} . Badania niszczące nie wykazały wyraźnego spadku jakości połączenia klejowego spowodowanego obecnością wilgoci. W przypadku badanej przeze mnie metody impedancji elektromechanicznej również nie zauważyłem korelacji wartości wskaźnika RMS wraz ze wzrostem zanieczyszczenia wilgocią. Ponadto w pracy [1] zaproponowałem dwuwymiarową analizę na płaszczyźnie wyznaczonej przez wskaźnik RMS i wartość częstotliwości f , która określa maksimum krzywej konduktancji.

¹⁰D.N. Markatos, K.I. Tserpes, E. Rau, *et al.*, Degradation of mode-I fracture toughness of CFRP bonded joints due to moisture and release agent and moisture pre-bond contamination. *Journal of Adhesion* 90: 156–173, 2014.

¹¹K.I. Tserpes, D.N. Markatos, E. Rau, *et al.*, A detailed experimental study of the effects of pre-bond contamination with a hydraulic fluid, thermal degradation, and poor curing on fracture toughness of composite-bonded joints, *Journal of Adhesion Science and Technology* 28 (18): 1865-1880, 2014.

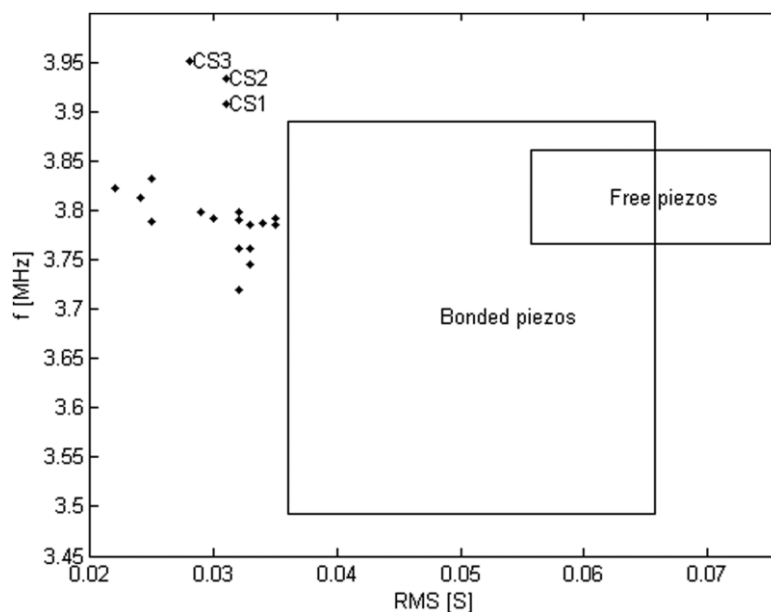
¹²D.N. Markatos, K.I. Tserpes, E. Rau, *et al.*, Degradation of mode-I fracture toughness of CFRP bonded joints due to moisture and release agent and moisture pre-bond contamination. *Journal of Adhesion* 90: 156–173, 2014.



Rys. 1. Zmiany położenia maksimum konduktancji dla próbek o obniżonej temperaturze klejenia (CS1–CS3) oraz zanieczyszczonych środkiem antyadhezyjnym (RE1–RE4, RE1*–RE4*). Gwiazdką oznaczono wyniki dla próbek zmierzonych ponownie po 18 miesiącach, [1].

Przeprowadzone badania wyraźnie wskazują na trafność doboru wskaźników numerycznych służących do oceny stanu połączenia klejowego w przypadku zestawów próbek RE1–RE4 i CS1–CS3.

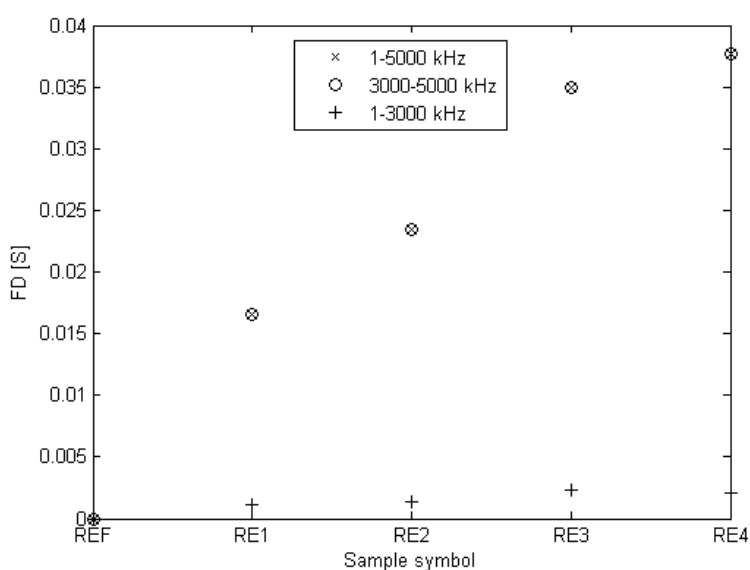
Omówione do tej pory wyniki badań dotyczyły rozważań na temat próbek klejonych i ich widm impedancji elektromechanicznej. Badania te były uzupełnione w pracy [1] o analizę impedancji elektromechanicznej dla dziesięciu swobodnych przetworników piezoelektrycznych oraz dziesięciu różnorodnych próbek z przyklejonym przetwornikiem piezoelektrycznym. Należy zaznaczyć, że badania swobodnych przetworników przeprowadzono w różnych warunkach termicznych wykorzystując do tego celu komorę o kontrolowanej temperaturze. Natomiast zestaw różnorodnych próbek zawierał próbki wykonane z stopu aluminium, kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknami szklanymi lub węglowymi. Siedem z tych próbek nie było sklejonnych. Trzy próbki były sklezione ale bez wprowadzanych zanieczyszczeń. Celem badań było określenie możliwości rozróżnienia przy pomocy metody impedancji elektromechanicznej zestawu próbek o zmodyfikowanym złączu klejowym (środek antyadhezyjny, wilgoć, obniżona temperatura klejenia) od pozostałych przypadków. Możliwa była detekcja próbek o zmodyfikowanym złączu klejowym. Wskaźnik RMS wyraźnie pozwolił rozróżnić tę grupę wyników od pozostałych (Rys. 2).



Rys. 2. Położenie maksimum konduktancji i wskaźnik RMS dla rozważanych próbek ze zmodyfikowanym złączem klejowym (punkty pomiarowe), innych próbek (bonded piezos) i swobodnych czujników (free piezos). Wskaźnik RMS pozwolił od rozróżnić wyniki dla próbek klejonych od pozostałych, [1].

Zaobserwowałem również wpływ czasu na otrzymane wyniki. Krzywe impedancji dla próbek RE1–RE4 zmierzone były dwukrotnie w odstępie 18 miesięcy. Pomiar po 18 miesiącach oznaczono przez RE1*–RE4*. Zaobserwowano spadek wartości wskaźnika RMS dla całego zestawu próbek oraz wzrost wartości częstotliwości odpowiadający maksimum krzywej konduktancji. Należy podkreślić, że zachowany został charakter zmian tej częstotliwości w zależności od stopnia zanieczyszczenia złącza klejowego (Rys. 1). Co najważniejsze, wyniki otrzymane po raz pierwszy (RE1–RE4) jak i po 18 miesiącach (RE1*–RE4*) umożliwiają rozróżnienie tego zestawu próbek od przypadków odniesienia (swobodne przetworniki, próbki bez zmodyfikowanego złącza). W dotychczasowych rozważaniach [1] analizowałem widma konduktancji (część rzeczywista admitancji). Badania te rozszerzyłem uwzględniając susceptancję (część urojona admitancji) oraz pełne krzywe admitancji, [2]. Należy podkreślić, że uwzględnienie pełnych krzywych admitancji stanowi nowatorskie rozwiązanie na tle podobnych osiągnięć opisanych w literaturze światowej. W pracach, z którymi się spotkałem badacze ograniczają się do odrębnej analizy modułu admitancji, jej części rzeczywistej lub urojonej. Admitancję analizowałem na płaszczyźnie zespolonej, w przypadku gdy oś x określała wartość konduktancji, natomiast oś y wartość susceptancji. W pracy [2] wykorzystałem do porównania krzywych konduktancji i susceptancji wskaźnik RMSD, znany z literatury dotyczącej metody impedancji elektromechanicznej. Ponadto, zaproponowałem sposób porównywania krzywych admitancji na podstawie odległości Fréchéta. Wielkość ta określa liczbowy wskaźnik podobieństwa dwóch krzywych. Do tej pory wskaźnik ten nie był wykorzystywany w badaniach metody impedancji elektromechanicznej. Opisaną powyżej metodę analizy przetestowałem na krzywych admitancji otrzymanych dla próbek klejonych zanieczyszczonych środkiem antyadhezyjnym (RE1–RE4). Analizowałem jedynie kształt krzywych uwzględniając w obliczeniach krzywe unormowane. Podczas badań wstępnych stwierdziłem, że porównanie jedynie kształtu krzywych (krzywe unormowane) za pomocą odległości Fréchéta nie koreluje się z zawartością zanieczyszczenia w złączu

klejonym. W związku z powyższym, w pracy [2] pokazałem, że uwzględnienie nieunormowanych pełnych krzywych admitancji, prowadzi do interesujących wyników. Wartość odległości Frécheta wzrasta wraz z rosnącym stopniem zanieczyszczeniem środkiem antyadhezyjnym w złączu klejowym (Rys. 3) natomiast wzrost ten odpowiada spadkowi współczynnika G_{IC} . Do tej pory skupiłem się na badaniach w zakresie wysokich częstotliwości (powyżej 3 MHz). W rozważaniach w pracy [2] uwzględniliśmy ze współautorami również analizę niższego pasma (od 1 kHz do 3 MHz) oraz całego pasma (od 1 kHz do 5 MHz). Na przykładzie zestawu próbek RE1–RE4 pokazałem, że nie ma potrzeby analizy całego pasma od 1 kHz do 5 MHz, ponieważ wpływ połączenia klejowego ujawnia się w zakresie od 3 do 5 MHz (Rys. 3).



Rys. 3. Wartość odległości Frécheta (FD) wykreślona dla próbki referencyjnej (REF) i próbek z zanieczyszczeniem środkiem antyadhezyjnym w złączu klejowym. Obserwujemy wzrost FD wraz ze wzrostem zanieczyszczenia, [2].

Stan powierzchni materiału przed klejeniem ma związek z jakością połączenia klejowego. Nieodpowiednio przygotowana powierzchnia może prowadzić do osłabienia połączenia. W związku z tym poszukuje się skutecznych metod oceny stanu powierzchni kompozytu przed procesem klejenia. Zaproponowałem podjęcie badań wykorzystujących metodę impedancji elektromechanicznej. W pracy [2] opisałem badania zestawu próbek wytworzonych z kompozytu węglowego, poddanych działaniu podwyższonej temperatury (190, 200 i 210°C). Zaobserwowałem, że wskaźnik RMSD zarówno dla konduktancji jak i susceptancji nie wzrasta wraz ze wzrostem wartości temperatury. Podobna obserwacja dotyczy odległości Frécheta. Wszystkie wspomniane wskaźniki badałem w trzech zakresach częstotliwości (1 kHz–3 MHz, 1 kHz–5 MHz i 3–5 MHz). W pracy [3] podjąłem z kolegami badania wykrywania wilgoci w materiale kompozytowym wzmocnianym włóknami węglowymi. Nadmierny poziom wilgoci może prowadzić do zmiany własności mechanicznych samego materiału jak również do modyfikacji połączenia klejowego łączonych elementów. W ramach badań zamocowaliśmy na powierzchni próbki przetwornik piezoelektryczny a następnie zabezpieczyliśmy przetwornik silikonem sanitarnym. Próbkę została zanurzona w wodzie, po czym badaliśmy zmiany rezystancji przetwornika piezoelektrycznego wraz z wysychaniem próbki. Do śledzenia zmian posłużył względny wskaźnik zmiany rezystancji DI oraz wartość

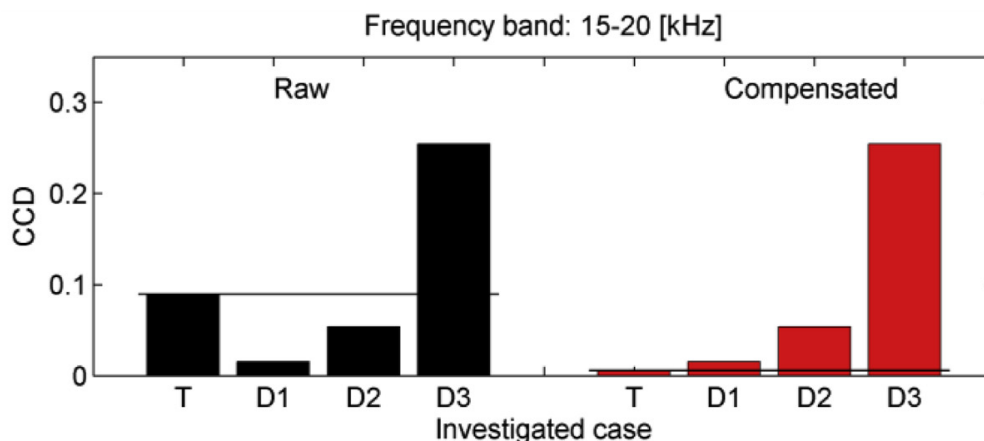
i położenie maksimum krzywej rezystancji w zakresie 280–290 kHz. Okazało się, że zawartość wilgoci w materiale kompozytowym obniża wartość obserwowanego maksimum rezystancji oraz przesunęła to maksimum do zakresu niższych częstotliwości. W Tab. 1 zebrano zarejestrowane wartości dla 5 etapów badań.

Tab. 1. Wartość częstotliwości i amplitudy rezystancji dla przypadku referencyjnego i próbki schnącej po zawilgoceniu w zanurzeniu, [3].

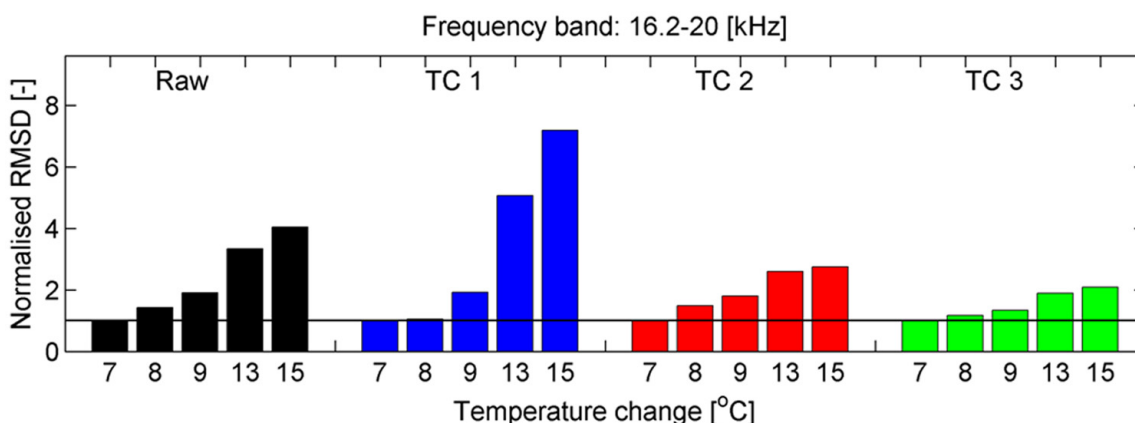
Przypadek	Częstotliwość maksimum [kHz]	Amplituda maksimum [MΩ]
referencyjny	284,7	134,1
13 dni namaczania	283,0	126,1
1 dzień suszenia	283,2	125,7
2 dni suszenia	283,8	131,1
7 dni suszenia	284,0	131,2

Oprócz wpływu wilgoci na widma impedancji elektromechanicznej badałem także możliwość wykrywania uszkodzenia w zmiennych warunkach termicznych. Wspólnie z współautorami analizowałem kompozyt węglowy z uszkodzeniem w postaci sztucznie wprowadzonej delaminacji, [4]. Skuteczność wprowadzenia delaminacji potwierdziłem poprzez pomiar propagujących się fal sprężystych wykonany metodą wibrometrii laserowej. W artykule [4] rozważaliśmy wpływ temperatury na widma rezystancji dla metody impedancji elektromechanicznej. Zaproponowaliśmy badanie dwóch wskaźników uszkodzenia (RMSD i CCD) i wpływu zmian temperatury oraz obecności uszkodzenia na ich wartości. Wskaźnik RMSD jest bardziej czuły na zmiany temperatury. Jest to związane z jego czułością na poziome i pionowe zmiany w badanych widmach. Zaobserwowaliśmy, że zmiana temperatury powoduje przesunięcia poziome obserwowanych widm. Jednakże wspomniane przesunięcia nie są stałe w całym paśmie. W związku z powyższym zaproponowaliśmy kompensację wpływu temperatury przez podział badanego pasma częstotliwości na mniejsze podzakresy. W pracy [4] po raz pierwszy ten sposób kompensacji został wykorzystany w celu detekcji uszkodzeń, gdyż inni autorzy skupiali się jedynie na zagadnieniu kompensacji wpływu temperatury¹³. Kompensacja została wykonana przez minimalizację wartości wskaźnika CCD. Zastosowanie wspomnianej kompensacji poprawia czułość metody impedancji elektromechanicznej na uszkodzenie. W rozważanym przypadku wyróżnić można też podzakresy częstotliwości, w których obserwuje się wzrost wskaźnika CCD wraz ze wzrostem wprowadzonego uszkodzenia (delaminacji). Przykładowy wynik przedstawia Rys. 4, który ilustruje wpływ kompensacji temperaturowej na wartość wskaźnika uszkodzenia dla trzech poziomów uszkodzenia (D1–D3). W przypadku braku kompensacji uszkodzenia D1 i D2 pozostają niewykryte, ponieważ wartość wskaźnika uszkodzenia (CCD) dla próbki nieuszkodzonej w innej temperaturze przewyższa wartość wskaźnika CCD dla stanów uszkodzonych. Zjawisko to jest spowodowane różnicą temperatur (12,5°C) w jakich został dokonany pomiar referencyjny i pomiar dla przypadków z uszkodzeniami.

¹³F.G. Baptista, D.E. Budoya, V.A.D. de Almeida, J.A.C. Ulson, An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring, Sensors 14: 1208–1227, 2014.

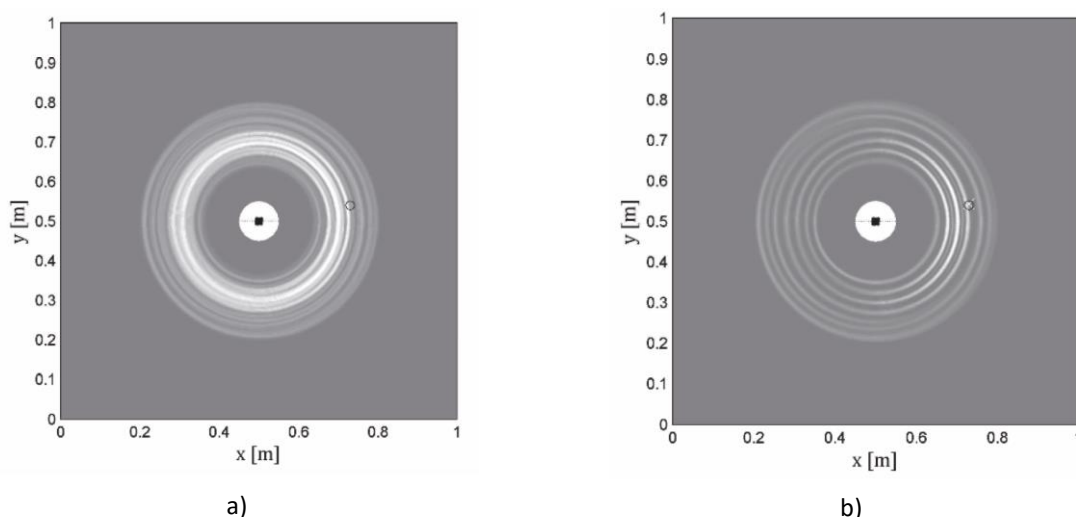


Rys. 4. Wpływ kompensacji temperaturowej na wartość wskaźnika uszkodzenia dla trzech poziomów uszkodzenia (D1–D3). W przypadku braku kompensacji temperaturowej uszkodzenia D1 i D2 pozostają niewykryte, ponieważ wartość wskaźnika CCD dla widma zarejestrowanego w innej temperaturze (T) przewyższa wartość dla stanów uszkodzonych, [4].



Rys. 5. Wyniki kompensacji temperaturowej: Raw – brak kompensacji, TC 1 – kompensacja wykorzystując wskaźnik CC, TC 2 – kompensacja wykorzystując wskaźnik RMS, TC 3 – kompensacja wykorzystując wskaźniki CC i RMS, [5].

Należy podkreślić, że praca [4] dotyczyła kompensacji wpływu temperatury na poziome przesunięcia widm rezystancji elektromechanicznej. Badania kontynuowaliśmy, i w pracy [5] zaproponowałem kompensację pionowych zmian widm przez zastosowanie normalizacji wskaźnikiem RMS. W badaniach przeanalizowaliśmy i porównaliśmy wpływ kompensacji temperaturowej z zastosowaniem wskaźnika korelacji wzajemnej (CC) do eliminacji przesunięcia poziomego, parametru RMS do eliminacji przesunięcia w pionie i łącznego wykorzystania wskaźnika CC i RMS. Ostatecznie skompensowane widma porównywaliśmy za pomocą wskaźnika RMSD w celu wykrycia obecności uszkodzenia. Zaproponowane przeze mnie trójetapowe podejście do wykrywania uszkodzeń (CC, RMS i RMSD) poprawia otrzymane wyniki przez efektywną kompensację wpływu temperatury. Skuteczność zaproponowanego rozwiązania zilustrowano na przykładzie (Rys. 5). W przypadku braku normalizacji różnica w temperaturze pomiaru wynosząca 15°C powoduje ponad czterokrotny wzrost wskaźnika RMSD w stosunku do pomiaru dla różnicy temperatur wynoszącej 7°C (Raw). Zastosowanie kompensacji wskaźnikiem CC poprawia wynik jedynie dla różnicy temperatur wynoszącej 8°C (wyniki TC 1). Wykorzystanie wskaźnika RMS obniża różnice dla pozostałych przypadków (wyniki TC 2). Natomiast łączne zastosowanie kompensacji wskaźnikami CC i RMS w znaczący sposób wpływa na wyniki (wyniki TC 3). W tym ostatnim przypadku obserwujemy najskuteczniejszą kompensację.

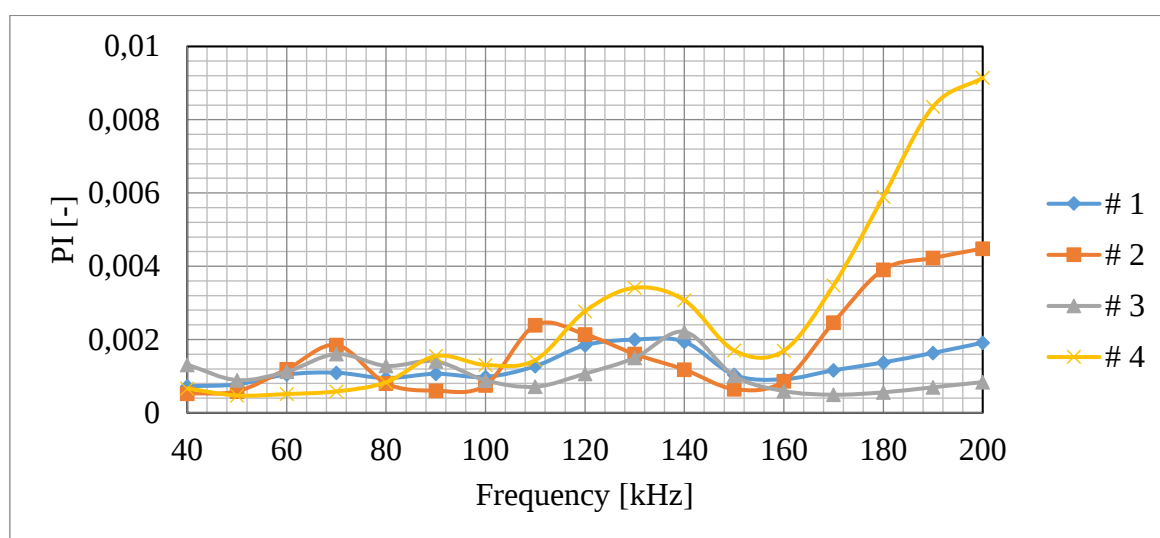


Rys. 6. Porównanie wyniku lokalizacji uszkodzeń dla kwadratowego układu punktów 5x5 o odstępach między punktami wynoszącym 3 mm; a) wynik dla tradycyjnego algorytmu, b) wynik dla algorytmu kształtującego wiązkę (z ang. *beamforming*). Okrąg o współrzędnych ok. (0,7;0,6) wskazuje położenie zasymulowanego uszkodzenia. Wynik na ilustracji b) daje bardziej precyzyjny rezultat, ponieważ duże wartości wskaźnika uszkodzenia są bardziej skupione w obszarze występującego uszkodzenia, [7].

Omówiona technika impedancji elektromechanicznej jest metodą kontaktową. Ponadto ma charakter lokalny. W celu inspekcji większych obszarów korzystne jest zastosowanie zjawiska propagacji fal sprężystych np. w rodzaju fal Lamba. Metoda oparta na zjawisku propagacji fal sprężystych ze względu na sposób pomiaru może mieć charakter zarówno kontaktowy jak i bezkontaktowy. W rozdziale monografii [6] dokonałem przeglądu literatury, który dotyczy wykorzystania metod opartych na zjawisku propagacji fal sprężystych. Omówiłem metody zarówno kontaktowe jak i bezkontaktowe. W ramach prac badawczych opublikowanych w artykule [7] analizowałem zjawisko propagacji fal sprężystych wykorzystując pomiar bezkontaktowy skanującym wibrometrem laserowym. Analizowałem propagowanie się fali o postaci antysymetrycznej w płycie kompozytowej o zmiennej grubości, co stanowiło nowość w literaturze przedmiotu. Płyta wykonana była z kompozytu polimerowego z wzmocnieniami w postaci włókien szklanych. W wyniku badań zaobserwowaliśmy zmianę prędkości fazowej i grupowej fali antysymetrycznej wraz z zmianą grubości. Jest to istotna obserwacja w kontekście wykorzystania wspomnianych wyżej fal do wykrywania degradacji materiału. Wiąże się to z tym, że zmiana propagacji fali na skutek zmiany grubości musi być uwzględniona w algorytmach detekcji uszkodzeń. Ponadto, sama zmiana grubości może być oznaką degradacji materiału (np. ubytek na skutek uderzenia, korozja). Rozwijając metodę wykorzystującą wibrometr laserowy, w publikacji [8] opisałem opracowane przeze mnie nowe algorytmy lokalizacji uszkodzeń dedykowane do sygnałów zebranych przez wibrometr laserowy. Tworząc nowe algorytmy przydało się moje doświadczenie z badań realizowanych w ramach rozprawy doktorskiej. W ramach rozprawy doktorskiej przygotowałem algorytmy numeryczne wykorzystywane do przetwarzania sygnałów zebranych przez układy przetworników piezoelektrycznych. W obecnych badaniach skupiłem się na pomiarze bezkontaktowym z wykorzystaniem wibrometru laserowego. We wspomnianej pracy [8] zbadałem wpływ rozmiarów układów na wyniki lokalizacji uszkodzeń. Zaobserwowałem, że wzrost rozstawu punktów pomiarowych prowadzi do jednoznacznego wskazania położenia uszkodzenia w przypadku układów punktów pomiarowych o kwadratowym

kształcie. Ponadto pokazałem, że stosując algorytm kształtujący wiązkę (z ang. *beamforming*) otrzymuje się dokładniejszy wynik lokalizacji uszkodzenia. Wynik dla tego samego układu pomiarowego został przedstawiony na Rys. 6. Wykorzystano przy tym dwa algorytmy lokalizacji uszkodzeń. Algorytm kształtujący wiązkę daje bardziej jednoznaczny wynik.

Badania nad skupionymi układami punktów pomiarowych kontynuowałem w pracy [9], w której skoncentrowałem się na układach kołowych. Układ był zrealizowany w ten sposób, że w środku układu znajdował się przetwornik piezoelektryczny będący źródłem fal sprężystych a wokół niego zdefiniowano laserowe punkty pomiarowe ukształtowane w układy kołowe. Badałem wpływ rozmiaru tych układów na wyniki lokalizacji uszkodzeń. Zaproponowałem nowy wskaźnik uszkodzeń związany z falą odbitą od krawędzi badanego obiektu. Rys. 7 przedstawia zmiany zaproponowanego wskaźnika uszkodzeń w funkcji częstotliwości wzbudzonej fali sprężystej dla czterech kołowych układów pomiarowych.



Rys. 7. Zmiany nowego wskaźnika uszkodzeń w funkcji częstotliwość wzbudzonej fali sprężystej dla czterech kołowych układów punktów pomiarowych. #1 – 36 punktów; #2 – 12 punktów, średnica 30 mm; #3 – 12 punktów, średnica 20 mm; #4 – 12 punktów, średnica 10 mm, [9].

Pokazaliśmy, że dla częstotliwości 190 i 200 kHz otrzymuje się bardziej dokładne wskazanie kierunku (kąta) położenia uszkodzenia. Ponadto, większa średnica układu również poprawia skuteczność lokalizacji uszkodzenia. Badania metodą wibrometrii laserowej kontynuowałem w Korei Południowej podczas pobytu w KAIST (*Korean Advanced Institute of Science and Technology*). Pobyt w KAIST był sfinansowany przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej jako dodatek (tzw. wyjazd studyjny) do otrzymanego przeze mnie stypendium START. Wyniki mojej współpracy z naukowcami z KAIST opublikowaliśmy w pracy [10]. Stosowałem technikę w pełni bezkontaktową, wykorzystując do tego celu źródło laserowe, zarówno do pobudzenia fal sprężystych w badanym obiekcie jak i również do rejestracji tychże fal. Praca dotyczyła propozycji dwuetapowej inspekcji łopat turbin wiatrowych. W pierwszym etapie obiekt jest badany z małą dokładnością w celu stwierdzenia obecności uszkodzenia (delaminacji). W drugim etapie przeprowadzane jest dokładne badanie w celu wizualizacji delaminacji. Opracowałem metodę i algorytm numeryczny do adaptacyjnego określenia położenia uszkodzenia. Opracowaną technikę przetestowaliśmy na łopacie turbiny wiatrowej o mocy 10 kW. Łopata była wykonana z kompozytu wzmocnianego włóknami szklanymi.

Uszkodzenie zasymulowano przez umieszczenie na etapie produkcji, pomiędzy warstwami laminatu, wstawki teflonowej. Z powodzeniem zlokalizowano uszkodzenia o średnicy 10 i 15 mm z dokładnością odpowiednio 5,1 i 7,7 mm. Należy podkreślić, że ponieważ badano obiekt kompozytowy, konieczne było zbadanie zależności prędkości propagacji fali od kierunku jej rozchodzenia się. Było to potrzebne, ponieważ prędkość fali jest parametrem w opracowanych algorytmach lokalizacji uszkodzeń. Wyznaczenie prędkości fali zostało zrealizowane również w pełni bezkontaktowy sposób.

W zakresie badań bezkontaktowych zajmowałem się również metodami spektroskopowymi. W pracy [16] analizowałem eko-kompozyt wzmacniany włóknami drewnianymi osadzonymi w osnowie z materiału ABS (kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy). Wzmocnienie było w postaci krótkich włókien, losowo rozmieszczonych w próbce. Próbka wykonana z tego materiału została uszkodzona przez źródło laserowe o dużym natężeniu. Wspomniane powyżej uszkodzenia wykonano w laboratorium we Francji. W ramach współpracy polsko-francuskiej (projekt PICS ECAULT) brałem udział w badaniach dotyczący wywołania uszkodzeń realizowanych w laboratorium PIMM, CNRS-ENSAM Paristech w Paryżu. W Polsce, moja rola w badaniach skoncentrowana była na analizie wprowadzonych uszkodzeń. W tym celu wykorzystywałem spektrometr terahercowy pracujący w dziedzinie czasu (TeraView TPS Spectra 3000+). O obecności uszkodzenia świadczy spadek energii sygnału (impulsu terahercowego) odbitego od uszkodzonych obszarów. Wspomnianą powyżej technikę terahercową z powodzeniem zastosowaliśmy także w pracy [7] do szacowania grubości badanej próbki (o zmiennej grubości) wykonanej z kompozytu szklanego. Zmiana grubości może być oznaką degradacji materiału (np. ubytek na skutek uderzenia, korozja). Badania te stanowiły uzupełnienie badań nad propagacją fal sprężystych w obiekcie kompozytowym o zmiennej grubości.

Omówione wyniki badań dowodzą poprawność sformułowanej tezy.

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

- 1) Rozwój metody impedancji elektromechanicznej w zakresie częstotliwości megahercowych do oceny połączeń klejowych kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami węglowymi.
- 2) Propozycja metody oceny stopnia zanieczyszczenia połączenia klejowego przez śledzenie zmian położenia maksimum konduktancji.
- 3) Zaproponowanie dwuwymiarowej analizy na płaszczyźnie wyznaczonej przez wskaźnik RMS i wartość częstotliwości.
- 4) Wykorzystanie krzywych admitancji na płaszczyźnie zespolonej do oceny połączeń klejowych.
- 5) Opracowanie metody wykorzystania odległości Frécheta do porównywania krzywych admitancji.
- 6) Przeprowadzenie badań prowadzących do wniosku, że wpływ połączenia klejowego ujawnia się w zakresie od 3 do 5 MHz dla zestawu próbek RE1–RE4.

- 7) Zbadanie wpływu podwyższonej temperatury, której poddany był kompozyt węglowy na krzywe impedancji elektromechanicznej.
- 8) Opracowanie kompensacji pionowych zmian widm wywołanych temperaturą przez zastosowanie normalizacji wskaźnikiem RMS.
- 9) Opracowanie trójetapowego przetwarzania sygnałów, które poprawia otrzymane wyniki wykrywania uszkodzenia przez efektywną kompensację wpływu temperatury.
- 10) Poprawa dokładności lokalizacji uszkodzeń w metodzie wibrometrii laserowej stosując algorytm kształtujący wiązkę (z ang. *beamforming*).
- 11) Opracowanie metody i algorytmu numerycznego do adaptacyjnego określenia położenia uszkodzenia w łopacie turbiny wiatrowej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.

Wszystkie odnośniki odwołują się do publikacji zebranych w wykazie opublikowanych prac naukowych.

5.1. Osiągnięcia przed uzyskaniem stopnia doktora:

- 5.1.1. Badania realizowane przeze mnie w ramach rozprawy doktorskiej dotyczyły problemu lokalizacji uszkodzeń z wykorzystaniem zjawiska interferencji fal sprężystych. Badałem układy fazowe (z ang. *phased array*). Przeprowadziłem analizy jedno i dwuwymiarowych układów czujników i ich charakterystyki generacji i rejestracji fal. Sformułowałem równania niezbędne do zaprogramowania algorytmów lokalizacji uszkodzeń, zaprezentowałem skuteczność opracowanej metody na modelach numerycznych oraz dla próbek rzeczywistych. Badałem nowatorski układ w kształcie gwiazdy składający się z 4 liniowych układów czujników ze wspólnym czujnikiem środkowym. W ramach badań wprowadziłem autorski hybrydowy układ czujników składający się ze skupionych układów rozmieszczonych w wierzchołkach trójkąta równobocznego. Układ ten pozwala na detekcję uszkodzeń wewnątrz obszaru trójkąta jak i na zewnątrz. Wyniki tych prac zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR [Ad1, Ad2, Ad3, Ad8] oraz w publikacjach pokonferencyjnych konferencji międzynarodowych [Ed1, Ed4, Ed5, Ed8, Ed11, Ed12, Ed19, Ed21].
- 5.1.2. Przed otrzymaniem stopnia doktora badałem również tradycyjne układy czujników o różnych formach geometrycznych. Wyróżnić tu można układ zegarowy składający się z czujnika środkowego i dwunastu czujników rozmieszczonych wokół niego na równym promieniu jak godziny na tarczy zegara. Badania tego typu układu zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR [Ad4, Ad5, Ad6]. Ponadto, układ ten wraz z urządzeniem służącym do generacji i rejestracji fal sprężystych jest objęty ochroną patentową [C1]. Inne typy badanych układów to te o kształcie liniowym, krzyża i kwadratowym. Wyniki tej pracy zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR [Ad7].
- 5.1.3. W ramach współpracy z dr. Krzysztofem Draganem z Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych zaproponowałem sposób monitorowania stanu łopat wirnika głównego śmigłowca. Wspólna praca ostatecznie zaprezentowana na międzynarodowej konferencji i opublikowana w materiałach pokonferencyjnych [Ed20].

5.2. Osiągnięcia po uzyskaniu stopnia doktora:

- 5.2.1. Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem tematykę badań dotyczącą układów czujników piezoelektrycznych. We współpracy z zespołem prof. Tadeusza Łuby z Politechniki Warszawskiej opracowaliśmy system do wizualizacji wyników detekcji uszkodzeń. Wyniki naszej współpracy zostały przedstawione na międzynarodowych konferencjach [Epd20, Epd21, Epd48] oraz w artykule w czasopiśmie z listy JCR [Apd3].
- 5.2.2. Pełniłem funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim Pana Rohana Soman. Wspólnie realizowaliśmy badania w ramach projektu FP7 MARE-WINT (*new MAterials and REliability in offshore WIND Turbines technology*, Marie Curie Action, Grant agreement No. 309395). Nasza praca skupiała się na monitorowaniu wież turbin wiatrowych poprzez śledzenie położenia osi obojętnej. Otrzymane wyniki były szeroko rozpowszechniane na międzynarodowych konferencjach naukowych [Epd32, Epd38, Epd43, Epd46, Epd54]. Najciekawsze wyniki badań opublikowaliśmy w dwóch recenzowanych czasopismach [Apd4 – **Lista JCR**, Epd51 – **Lista B MNISW**] oraz w rozdziale monografii wydanej przez wydawnictwo Springer [Mpd2].
- 5.2.3. Uczestnicząc w projekcie FP7 STA-DY-WI-CO (*STAtic and DYnamic piezo-driven stream Wise vortex generators for active flow Control*, Marie Curie Action, Grant agreement No. 251309) współpracowałem z dr Rutą Rimašauskiene w tematyce piezoelektrycznych generatorów na potrzeby membran generujących syntetyczne strugi (z ang. synthetic jet). W wyniku tej współpracy powstało stanowisko badawcze do badania membran. Wspólnie opublikowaliśmy cztery artykuły w materiałach pokonferencyjnych [Epd2, Epd4, Epd7, Epd29] oraz jeden artykuł w renomowanym czasopiśmie z listy JCR [Apd2].
- 5.2.4. Moje prace badawcze dotyczyły również czujników światłowodowych typu FBG. Brałem udział w instalacji systemu czujników na żaglowcu „Dar Młodzieży” oraz statku „Horyzont II” (statek naukowo-badawczy Akademii Morskiej w Gdyni). Uczestniczyłem w badaniach modelu nogi platformy wiertniczej. Wyniki moich badań dotyczących czujników światłowodowych typu FBG zostały opublikowane w wydawnictwach pokonferencyjnych [Epd1, Epd18, Epd30] oraz w czasopiśmie z listy JCR [Apd1].
- 5.2.5. Zajmowałem i nadal zajmuję się tematyką zapewnienia jakości połączeń klejowych kompozytów węglowych. Badania te realizowane były w ramach projektu FP7 ENCOMB (*Extended Non-Destructive Testing for Composite Bonds*, grant agreement no. 266226) a obecnie kontynuowane są w ramach projektu H2020 ComBoNDT (*Quality assurance concepts for adhesive bonding of aircraft composite structures by advanced NDT*, grant agreement no. 636494). W ramach wspomnianych projektów badawczych opracowywałem metody ocen powierzchni przed klejeniem, jak i samego połączenia klejowego wykorzystując technikę wibrometrii laserowej, aktywną termografię i impedancję elektromechaniczną. Zaobserwowałem zmiany w rozchodzeniu się fal sprężystych dla próbek o zmodyfikowanej powierzchni jak również o zmodyfikowanym połączeniu klejowym. Natomiast technikę fluorescencji

indukowanej laserowo stosowałem w kontekście oceny stanu powierzchni kompozytów CFRP. Analizowałem z zespołem wpływ stanu powierzchni na natężenie i charakterystyki czasowe fluorescencji. Stwierdziliśmy, że im wyższa temperatura, której poddano działanie materiał kompozytowy tym większa wartość natężenia fluorescencji. Natomiast wpływ zanieczyszczenia powierzchni płynem hydraulicznym przejawia się w czasowych charakterystykach fluorescencji (zmiana czasu zaniku i czasu trwania). Wyniki tych pracy zostały szeroko publikowane [Epd11, Epd12, Epd14, Epd19, Epd22, Epd23, Epd25, Epd26, Epd35, Epd47].

- 5.2.6. Zajmowałem się badaniem spektroskopii terahercowej w kontekście oceny stanu materiałów kompozytowych. Wykrywałem uszkodzenia [Epd39] w kompozycie szklanym oraz badałem stan jakości połączenia klejowego przetwornik piezoelektryczny–konstrukcja [Epd42]. Współpracując z dr Norbertem Pałą z Wojskowej Akademii Technicznej zaproponowaliśmy zastosowanie spektroskopii terahercowej do wykrywania wilgoci na powierzchni jak i między elementami wykonanymi z kompozytu wzmacnianego włóknami szklanymi. Rezultat naszej współpracy został opublikowany w pracy [Epd44].
- 5.2.7. Biorąc udział projekcie FP7 IMECSON (*Innovative MEthods of Separated flow CONtrol in aeronautics*, Marie Curie Action, Grant agreement No. 264672) współpracowałem z mgr Codrutem Danem w tematyce pomiaru odkształceń za pomocą czujników piezoelektrycznych typu MFC. Przeprowadziliśmy stosowne badania i zaproponowaliśmy sposób kalibracji takiego czujnika na potrzeby rejestracji odkształceń. Wyniki naszych badań zostały opisane w pracy [Epd28].
- 5.2.8. Delaminacje są tylko jednym z typów uszkodzeń mogących występować w materiałach kompozytowych. Badałem kompozyt węglowy z zasymulowanym pęknięciem o dwóch długościach (5 i 10 mm). Zaproponowałem trójparametryczną analizę uwzględniającą wskaźniki CC i RMSD oraz zmianę częstotliwości najsilniejszego rezonansu w zakresie do 1 MHz. Takie podejście umożliwiło rozróżnienie przypadku dwóch długości pęknięcia i pomiaru referencyjnego. Wyniki tych badań zostały opublikowane w pracy [Ep50]. Badania te zostały wykonane w ramach projektu który prowadziłem: *IuventusPlus MNISW pt. „Przetworniki piezoelektryczne w badaniach nieniszczących” (2012–2013)*.
- 5.2.9. Zdobyte do tej pory doświadczenie w dziedzinie metody impedancji elektromechanicznej i czujników światłowodowych FBG pozwoliło na przygotowanie wniosku o projekt badawczy. Jestem jednym z wykonawców projektu, który został zaakceptowany do finansowania: ERA–NET MARTEC II *„Reliable and autonomous monitoring system for maritime structures”* RAMMS. Projekt obejmuje Niemiecko–Polską współpracę naukową a tematem projektu jest opracowanie autonomicznego systemu monitorowania stanu technicznego kompozytowych konstrukcji morskich.
- 5.2.10. Po otrzymaniu stopnia doktora byłem koordynatorem dwóch projektów badawczych: w ramach programu Iuventus Plus MNISW pt. *„Przetworniki piezoelektryczne w badaniach nieniszczących” (2012–2013)*. Natomiast w latach 2014–2017 realizuję

projekt Narodowego Centrum Nauki w ramach programu SONATA pt.: „Wpływ czynników zewnętrznych na impedancję elektromechaniczną”.

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

Nazwa osiągnięcia	Wartość wskaźnika przed obroną doktoratu	Wartość wskaźnika po obronie doktoratu	Sumaryczna wartość wskaźnika
Publikacje z listy Journal Citation Reports	8	11 (w tym 7 z wybranego cyklu publikacji)	19
Publikacje z listy B MNISW	0	2	2
Monografie	0	1	1
Rozdziały w monografiach	1 j. polski	3 (w tym 2 z wybranego cyklu publikacji) j. angielski	4
Inne prace naukowe	32	56 (w tym 2 z wybranego cyklu publikacji)	88
Wygłoszenie referatów na konferencjach (wszystkie w języku angielskim)	7	14	21
Aktywny udział w konferencjach	0 – prowadzenie sesji 24 – referaty	3 – prowadzenie sesji 43 – referaty	3 – prowadzenie sesji 67 – referaty
Sumaryczny Impact Factor IF	10,948	26,526	37,474
Projekty badawcze międzynarodowe	6 (w tym: 2 – FP6)	7 (w tym: 1 – H2020, 4 – FP7)	13
Projekty badawcze krajowe	8	6 (w tym: 2 jako kierownik)	14
Patenty	1	1	2
Wzory użytkowe	0	1	1
Recenzje artykułów do czasopism	8	42	50

5.4. Informacje o cytowaniach publikacji

Nazwa bazy	Liczba cytowań	Indeks Hirsha
Web of Science (WoS) (ResearcherID: A-4719-2013)	202	7
Scopus	261	7
Google Scholar	410	8

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

Punkt	Nazwa pozycji	Wartość
I B	Publikacje i inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	11
II A	Publikacje z listy Journal Citation Reports	12
II B	Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	Brak
II C	Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe	2
II D	Wzory użytkowe, które uzyskały ochronę	1
II E	Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazie JCR	92
II F	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	41
II G	Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	37,474
II H	Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)	202
II I	Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	7
II J	Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	27
II K	Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną	5
II L	Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	21
III A	Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	10
III B	Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych (bez referatów wymienionych w pkt II L)	70
III C	Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	2
III D	Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione w pkt II K	6
III E	Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	11
III F	Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami, innymi niż wymienione w pkt II J	Brak
III G	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	Brak
III H	Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	2
III I	Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki	2
III J	Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji	3
III K	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	1
III L	Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	3
III M	Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	1
III N	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	2
III O	Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	Brak
III P	Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	50
III Q	Inne osiągnięcia, nie wymienione w pkt III A – III P	5

Malinowski