

Autoreferat

Przedstawiający dorobek i osiągnięcie naukowe w szczególności
określone w art. 16 ust.2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r.
o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule
w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

dr inż. Magdalena Mieloszyk

email: mmieloszyk@imp.gda.pl

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

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.	5
Wstęp	5
Szczegółowy opis metodyki badań oraz dyskusja	11
Podsumowanie części I i II	34
Podsumowanie własnych oryginalnych osiągnięć	35
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych (artystycznych).	37

1. Imię i Nazwisko.

Magdalena Mieloszyk

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 konstrukcji.**

Tytuł rozprawy doktorskiej: „*Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji z wykorzystaniem czujników światłowodowych typu FBG*”

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

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

2006 **stopień magistra inżyniera, kierunek: Mechanika i budowa maszyn, specjalność: Inżynieria Materiałów Konstrukcyjnych**

Tytuł pracy magisterskiej: „*Mikrostruktura i niektóre właściwości warstw borowanych dyfuzyjnie na stali*”

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny,

Promotor pracy: dr hab. inż. Waldemar Serbiński

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 01.05.2011 – teraz: **adiunkt** – Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych IMP PAN Gdańsk

01.11.2006 – 30.04.2011: **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 naukowego doktora, stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej, wskazuję cykl 8 publikacji powiązanych tematycznie pod zbiorczym tytułem:

Metody oceny stopnia degradacji fizyko–chemicznej i mechanicznej elementów konstrukcyjnych pracujących w warunkach zmiennej wilgotności lub temperatury – metody kontaktowe i bezkontaktowe

b) wykaz wybranego cyklu publikacji

Wybrany cykl publikacji powiązanych tematycznie składa się z 8 pozycji. W skład cyklu wchodzi:

- 5 artykułów opublikowanych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR) – poz. [H1 - H5];
- 1 artykuł opublikowany w czasopiśmie ASME (*The American Society of Mechanical Engineers*). Jest to nowe czasopismo, którego tematyka dotyczy zagadnień monitorowania stanu technicznego konstrukcji i metod badań nieniszczących. Pierwszy numer czasopisma ukazał się w lutym 2018 r., a pierwsze artykuły zostały zaakceptowane do publikacji we wrześniu 2017 r. – poz. [H6];
- 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 – poz. [H7];
- 1 artykuł w wydawnictwie pokonferencyjnym *The e-Journal of Nondestructive Testing – ISSN 1435-4934*. Artykuł dotyczy bardzo ważnej konferencji *European Workshop on Structural Health Monitoring* dotyczącej zagadnień monitorowania stanu technicznego (organizowana co dwa lata w Europie) – poz. [H8].

Cykl 8 publikacji przedstawiony jest poniżej:

- [H1] **Mieloszyk Magdalena (90%)**, Ostachowicz Wiesław: *An application of Structural Health Monitoring system based on FBG sensors to offshore wind turbine support structure model*, Marine Structures, Vol. 51, pp. 65–86, 2017 (IF: 2.491 – 2017 r.).
- [H2] **Mieloszyk Magdalena (90%)**, Ostachowicz Wiesław: *Moisture contamination detection in adhesive bond using embedded FBG sensors*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 84 (Part: A), pp. 1–14, 2017 (IF: 4.370 – 2017 r.).
- [H3] Veronica Bonilla Mora, **Mieloszyk Magdalena (70%)**, Ostachowicz Wiesław: *Model of moisture absorption by adhesive joint*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 99C, pp. 534–549, 2018 (IF: 4.370 – 2017 r.).
- [H4] **Mieloszyk Magdalena (70%)**, Majewska Katarzyna, Ostachowicz Wiesław: *Localisation of embedded water drop in glass composite using THz spectroscopy*, Smart Structures and Systems, Vol. 21(6), pp. 751–759, 2018 (IF: 2.231– 2017 r.).

- [H5] **Mieloszyk Magdalena (70%)**, Majewska Katarzyna, Ostachowicz Wiesław: *THz spectroscopy application for detection and localisation of water inclusion in glass composite*, Composite Structures, Vol. 192, pp. 537–544, 2018 (IF: 4.101 – 2017 r.).
- [H6] **Magdalena Mieloszyk (70%)**, Katarzyna Majewska, Wiesław Ostachowicz: *Glass fibre composite elements with embedded fibre Bragg grating sensors inspected by THz spectroscopy*, e-journal of Nondestructive Testing, ISSN 1435–4934, 2016.
- [H7] Rohan Soman, Katarzyna Majewska, **Magdalena Mieloszyk (30%)**, Wiesław Ostachowicz: *Damage Assessment in Composite Beam Using Infrared Thermography, Optical Sensors, and Terahertz Technique*, ASME J Nondestructive Evaluation 1(3), 031001 (19 pages) Paper No: NDE-17-1079; doi: 10.1115/1.4039359, 2018.
- [H8] Maciej Radzieński, **Magdalena Mieloszyk (40%)**, Ehsan Kabiri Rahani, Tribikram Kundu, Wiesław Ostachowicz: *Heat induced damage detection in composite materials by terahertz radiation*, Proc. SPIE 9438 on: Health Monitoring of Structural and Biological Systems, San Diego, California, USA, 2015 (**Web of Sciences**).

Ponieważ przeprowadzone przeze mnie badania mają charakter interdyscyplinarny, na cykl publikacji powiązanych tematycznie składają się prace, których jestem współautorką. Ze względu na szeroki zakres prowadzonych badań i ich charakter wszystkie prace powstały w kilkusobowych zespołach badawczych. We wszystkich artykułach z listy JCR jestem autorem korespondencyjnym odpowiedzialnym za przeprowadzenie badań i przygotowanie tekstu i rysunków zawartych w artykułach oraz odpowiedzi na pytania recenzentów. Mój udział merytoryczny w tworzeniu każdej z prac był znaczący. Zajmowałam 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, przygotowaniem założeń do modeli analitycznych i numerycznych, opracowaniem i interpretacją wyników badań, przygotowaniem tekstu i rysunków zawartych w artykułach.

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 dotyczy badań zjawisk fizycznych związanych z propagacją fal elektromagnetycznych (o długościach 0,03-3 mm i 1510-1590 nm) oraz ich zastosowaniu do stworzenia metod do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji wykonanych z materiałów o własnościach izotropowych oraz ortotropowych pracujących w warunkach podwyższonej wilgotności lub temperatury. Wybrane długości fal elektromagnetycznych odnoszą się do dwóch rodzajów metod diagnostycznych: metod bazujących na czujnikach światłowodowych typu FBG (metoda kontaktowa) i spektroskopii THz (metoda bezkontaktowa).

Badania przeprowadzono na modelu konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej wykonanej ze stopu aluminium (o własnościach izotropowych) oraz na elementach wykonanych z kompozytów (o własnościach ortotropowych) składających się z lepiszcza w formie żywicy epoksydowej oraz materiału wzmacniającego (powszechnie zwanego zbrojeniem) w postaci włókien szklanych. Wykorzystane zbrojenie występowało w formie tkanin szytych jednokierunkowo oraz tkanin plecionych dwukierunkowo. W dalszej części dokumentu o ile nie zaznaczono inaczej zamiast „kompozytów składających się z lepiszcza w formie żywicy epoksydowej oraz materiału wzmacniającego w postaci włókien szklanych” będzie „kompozyt włóknisty”.

Stworzenie metod określenia stopnia degradacji elementów konstrukcji pracujących w różnych warunkach środowiskowych (wilgoć, podwyższona temperatura) i pod różnym obciążeniem jest istotne ze względu na spadek wytrzymałości mechanicznej konstrukcji związanej z pojawieniem się i rozwojem uszkodzenia. W związku z tym istotne jest zapewnienie bezpieczeństwa użytkowania konstrukcji, gdyż niewykryte uszkodzenie może doprowadzić do zniszczenia konstrukcji, co może również skutkować zanieczyszczeniem środowiska. Spowodowało to rozwijanie metod badań nieniszczących (z ang. *Non Destructive Testing*, NDT) służących do okresowej diagnostyki konstrukcji, np. po wytworzeniu albo po określonym czasie eksploatacji oraz metod monitorowania stanu technicznego konstrukcji (z ang. *Structural Health Monitoring*, SHM) pozwalających na diagnostykę konstrukcji w sposób ciągły, podczas jej pracy.

Metody NDT i SHM służą do oceny stanu technicznego konstrukcji, w którym wyróżnia się następujące poziomy diagnostyczne:

1. detekcja – wykrywanie uszkodzeń,
2. lokalizacja – określenie położenia uszkodzenia,
3. identyfikacja – klasyfikacja typu/ rodzaju uszkodzenia i/lub określenie jego wielkości,
4. prognozowanie – określenie czasu dalszej bezpiecznej pracy konstrukcji.

Środowisko o dużej wilgotności (np. morskie) ma silne właściwości korozyjne – powoduje powstawanie korozji w elementach metalowych. Dodatkowo układy czujników elektrycznych (np. tensometrów, akcelerometrów) pracujące w tym środowisku muszą być dobrze odizolowane od wilgoci. Ze względów bezpieczeństwa często wymagane jest, aby w układach znajdujących się w silnie zawilgoconym środowisku (np. na wodzie, pod wodą) nie było prądu elektrycznego. Spowodowało to rozwój czujników wykorzystujących światłowody do przesyłania sygnałów oraz pomiarów tworząc czujniki różnych typów, np. na bazie siatek Bragga (z ang. *fibre Bragg grating*, FBG).

Rzeczywiste konstrukcje (np. morskie, lotnicze) są nadal wykonywane ze stopów metali (własności izotropowe), jednakże coraz częściej w rozwiązaniach konstrukcyjnych metale są zastępowane przez materiały kompozytowe (własności ortotropowe, anizotropowe).

Kompozyty włókniste są wykorzystywane w wielu konstrukcjach różnych typów: morskich (jachty, kadłuby łodzi, łopaty turbin wiatrowych, itp.), lotniczych (samoloty, fragmenty skrzydeł, itp.) czy inżynierii lądowej (mosty, itp.), gdzie istotna jest ich wytrzymałość. Stosunek wytrzymałości mechanicznej kompozytów włóknistych do masy jest bardzo wysoki, jednakże pojawienie się jakiegokolwiek uszkodzenia (np. pęknięcia osnowy, rozdzielenie na granicy włókno/osnowa, delaminacja) powoduje zauważalne zmniejszenie właściwości mechanicznych elementów wykonanych z tych materiałów.

Kompozyty włókniste składają się z dwóch głównych komponentów: wzmocnienia w postaci włókien (np. szklanych, węglowych) oraz osnowy (np. żywicy epoksydowej). Z obu tych składników żywica jest bardziej narażona na negatywny wpływ środowiska zewnętrznego – wilgoci, temperatury. Wilgoć powoduje uplastycznienie polimerowej osnowy, wpływa negatywnie na wytrzymałość

połączenia żywica / włókno, będąc przyczyną powstawania uszkodzeń w postaci delaminacji czy pęknięć.

Jednym z problemów odnoszących się do elementów wykonanych z kompozytów włóknistych jest określenie zakresu temperatur, w których elementy te mogą się znajdować i pracować. Kiedy temperatura pracy elementu wykonanego z kompozytu włóknistego o osnowie polimerowego jest zbliżona do jej temperatury mięknienia, spada sztywność osnowy i zaczyna ona uplastyczniać. Występuje również degradacja połączenia włókno / osnowa. Przy jednoczesnym naprężeniu rozciągającym możliwe jest zniszczenie integralności materiału poprzez wyciągnięcie włókien wzmocnienia z osnowy.

Absorpcja wilgoci jest jedną z najważniejszych przyczyn spadku właściwości mechanicznych polimerów i kompozytów włóknistych z osnową polimerową ze względu na powodowanie fizycznych zmian w strukturze materiału na poziomie mikroskopowym. Jedną z cech polimerów (np. żywicy epoksydowej stosowanej w materiałach kompozytowych) jest tendencja do absorbowania wilgoci z otoczenia. Źródła wilgoci w materiałach kompozytowych można podzielić ze względu na ich lokalizację na wewnętrzne i zewnętrzne. Pierwsza grupa dotyczy błędów w produkcji i wprowadzenia wilgoci do materiału podczas jego wytwarzania. Druga grupa związana jest z eksploatacją elementu, wpływem środowiska zewnętrznego albo awarią. W przypadku błędów w procesie produkcyjnym wprowadzona do materiału woda jest otoczona przez materiał osnowy (np. żywicę epoksydową) i zamknięta (uwięziona) wewnątrz struktury elementu. Wilgoć taką trudno usunąć ze struktury materiału. Może ona negatywnie wpływać na trwałość całego elementu będąc źródłem różnego rodzaju uszkodzeń, jak delaminacja czy pęknięcie. Natomiast w przypadku wilgoci wprowadzanej do materiału podczas jego eksploatacji najistotniejsze są procesy dyfuzyjne, które określają charakterystykę procesu zawilgacania. Ze względu na duże właściwości absorpcyjne elementów wykonanych z materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej elementy te są chronione przed wilgocią eksploatacyjną przez stosowanie odpowiednich pokryć i / lub warstw ochronnych.

Wilgoć wpływa na takie właściwości polimerów jak: stabilność wymiarowa, właściwości mechaniczne, chemiczne i termofizyczne. Niezależnie od zastosowanej kombinacji żywicy i utwardzacza zwiększenie stężenia wody w materiale o 1% powoduje, obniżenie temperatury zeszklenia o ok. 10°C czy zmniejszenie o ok. 15% wytrzymałości na rozciąganie. Wprowadzenie wilgoci do materiałów polimerowych powoduje: uplastycznienie, pojawienie się mikropęknięć, zmianę rozkładu naprężeń wewnątrz elementu na skutek zwiększenia objętości wywołane przez absorpcję wilgoci.

Analogiczne procesy zachodzą w połączeniach klejowych pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytów włóknistych z polimerową warstwą adhezyjną, szczególnie zawierającą żywicę epoksydową. Kiedy taki materiał znajduje się w wilgotnym środowisku, absorbuje wilgoć, która silnie wpływa na termo–mechaniczne właściwości materiału powodując znaczący spadek wytrzymałości elementu z połączeniem klejowym. Warto wspomnieć, że elementy strukturalne z połączeniami klejowymi składają się z elementów o różnych właściwościach mechanicznych (np. współczynnikach rozszerzalności cieplnej, wrażliwość na wilgoć). Różna czułość kompozytu włóknistego i materiału adhezyjnego na wpływ wilgoci może w połączeniu klejowym powodować analogiczne problemy jakie występują w kompozytach włóknistych o osnowie polimerowej, w których właściwości materiałowe włókien i osnowy różnią się od siebie. Wprowadzenie wilgoci do warstwy adhezyjnej może spowodować, prowadzące do zniszczenia, rozdzielanie połączenia pomiędzy warstwą adhezyjną a elementami łączonymi. Dodatkowo wilgoć zaabsorbowana do warstwy adhezyjnej połączenia klejowego może dyfundować również w głąb elementów łączonych wpływając na ich trwałość. W przypadku materiału kompozytowego wilgoć dyfundująca przez granicę

warstwa adhezyjna – element łączony może wnikać w materiał i wpływać na granicę włókno – osnowa powodując spadek integralności mechanicznej całego elementu.

Elementy konstrukcyjne pracujące w różnych warunkach środowiskowych (szczególnie o podwyższonej wilgotności albo temperaturze) są narażone na procesy degradacji. Przez pojęcie degradacji w niniejszej pracy rozumie się powstawanie uszkodzeń: pęknięcie, delaminację / rozwarstwienia, uszkodzenia termiczne a także zanieczyszczenia (wilgoć) wprowadzone do materiału podczas jego wytwarzania lub eksploatacji mogące prowadzić do zmian fizyko–chemicznych w materiale. Zastosowanie nowych materiałów konstrukcyjnych związane jest z rozwojem metod diagnostycznych (metody NDT i SHM), które pozwalają na analizy struktur wewnętrznych tych złożonych struktur.

Osiągnięcie naukowe, jak już wspomniano, obejmuje badania zjawisk związanych z propagacją fal elektromagnetycznych wykorzystywanych do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji. Ze względu na zakresy długości fal oraz związane z nimi zjawiska i wykorzystujące je metody diagnostyczne w ramach osiągnięcia wyróżniono dwie części.

Pierwsza część dotyczy zjawisk związanych z propagacją fali optycznej (o długości z zakresu 1510–1590 nm) w światłowodzie z wykonanymi w nim czujnikami światłowodowymi typu FBG. Metoda identyfikacji uszkodzeń wykorzystująca to zjawisko opiera się na analizie zmian długości fali Bragga odbitych od czujników. Zmiany te są powiązane z lokalnymi zmianami temperatury i / lub odkształcenia ośrodka i mogą być wykorzystane do detekcji, lokalizacji oraz określenia wielkości uszkodzenia. Zjawisko to może być również wykorzystane do określenia stopnia zawilgocenia elementów kompozytowych. Ze względu na to, że czujniki podczas pomiarów są przyklejone do powierzchni elementu albo wbudowane w strukturę materiału, metody wykorzystujące te czujniki nazywane są metodami kontaktowymi.

Druga część dotyczy zjawisk związanych z propagacją fal elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości 0,1-10 THz (o długości z zakresu 0,03-3 mm) w materiałach nieprzewodzących. Metoda identyfikacji uszkodzeń wykorzystująca to zjawisko opiera się na zmianach amplitudy i czasu propagacji fali związanej ze zmianą parametrów materiałowych: współczynnik absorpcji, współczynnik refrakcji oraz rozproszenie fali, np. na nieciągłości w materiale. Zjawisko to wykorzystuje się w spektroskopii THz. Metoda ta może być wykorzystana do detekcji, lokalizacji, określenia wielkości i rodzaju uszkodzenia również wtrącenia w postaci zanieczyszczenia lub wbudowanego światłowodu optycznego. Ze względu na budowę spektrometru THz używanego w badaniach eksperymentalnych oraz sposób pomiaru jest to metoda bezkontaktowa.

Pierwsze badania dotyczące zastosowania czujników światłowodowych typu FBG (przyklejonych na powierzchni elementów) do diagnostyki konstrukcji prowadziłam w związku z pracami dotyczącymi mojej rozprawy doktorskiej. W swojej rozprawie doktorskiej analizowałam możliwość zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do detekcji uszkodzeń w konstrukcjach lotniczych. Badania prowadzono na skrzydle o zmiennej geometrii z elementami wykonawczymi ze stopu z pamięcią kształtu. Analizowano efektywność zaproponowanych rozwiązań pod kątem detekcji i lokalizacji uszkodzeń (pierwszy i drugi poziom diagnostyki). Czujniki światłowodowe typu FBG przyklejone na powierzchni poszycia skrzydła wykorzystano do pomiaru zmian odkształceń poszycia spowodowanych przez aktywację siłowników z elementami wykonawczymi ze stopu z pamięcią kształtu oraz detekcji uszkodzeń: zmniejszenia momentu skręcającego siłownika oraz poszycia (dodatkowa masa symulująca lokalne oblodzenie). Badania dotyczące diagnostyki skrzydła o zmiennej geometrii prowadzono w ramach projektu MNiSW R10 006 03 we współpracy z Politechniką Rzeszowską.

Po rozprawie doktorskiej rozpoczęłam badania dotyczące wykorzystania czujników światłowodowych typu FBG do oceny stanu technicznego konstrukcji morskich: statków (Dar Młodzieży i Horyzont II), modelu konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej. Możliwość zastosowania wymuszeń środowiskowych (wiatr, falowanie) do metod eksploatacyjnej analizy modalnej spowodowało konieczność stworzenia nowych algorytmów analizy danych. Spośród wielu metod eksploatacyjnej analizy modalnej wybrano metodę dekompozycji w dziedzinie częstotliwości (z ang. *Frequency Domain Decomposition*, FDD). Zazwyczaj w tych metodach wykorzystuje się przyspieszenia mierzone przy pomocy akcelerometrów. Ze względu na zalety czujników światłowodowych (odporność na korozyjne działanie środowiska, sygnał optyczny w układzie pomiarowym) oraz doświadczenie z badań przeprowadzonych na statkach, postanowiono zastosować te czujniki do analizy stanu technicznego modelu konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej. Konstrukcje tego typu podczas eksploatacji znajdują się pod wodą, w związku z tym układy pomiarowe odporne na korozyjne działania wody morskiej i bez sygnału elektrycznego w układzie są bardzo istotne. Czujniki światłowodowe typu FBG są wykorzystywane do pomiarów zmian odkształceń i temperatury. W związku z tym konieczne było stworzenie algorytmów pozwalających na wykorzystywanie zmian odkształcenia w metodzie FDD.

Prace badawcze prowadzone po obronie rozprawy doktorskiej dotyczyły zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do pomiarów zmian odkształceń konstrukcji (konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej) i porównaniu uzyskanych wyników (zmian odkształceń) z wartościami uzyskanymi z modelu numerycznego, w celu określenia dokładności pomiarowej. W odróżnieniu od prac wykonanych w ramach pracy doktorskiej, pomiary realizowano na sztywnej konstrukcji (niewielkie zmiany odkształceń związane z wymuszeniem konstrukcji). Warto podkreślić, że w przypadku rozwiązań systemów monitorowania stanu technicznego konieczne jest każdorazowe zaproponowanie nowego rozwiązania uzależnionego od charakterystyk geometrycznych, obciążeniowych i środowiskowych konstrukcji. W związku z powyższym system monitorowania stanu technicznego konstrukcji odpowiedni dla konstrukcji lotniczej (skrzydło małego samolotu) nie mógł zostać wykorzystany w analizowanym przypadku.

Kolejnym etapem było wbudowywanie czujników światłowodowych typu FBG w strukturę materiału: warstwy adhezyjnej połączenia klejowego pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytów włóknistych oraz strukturą elementów wykonanych z kompozytów włóknistych. Zaobserwowano zupełnie inne zachowanie się czujników wbudowanych niż czujników przyklejonych na powierzchni elementu. Spowodowało to konieczność stworzenia nowych algorytmów służących do wyznaczania wartości odkształcenia i temperatury w oparciu o zmierzone wartości długości fali Bragga.

Ponadto w wielu konstrukcjach rzeczywistych występują połączenia śrubowe lub klejowe. Problemy występujące w elementach wykonanych materiałów kompozytowych (np., wrażliwość na występowanie wilgoci) spowodowały, że algorytmy wykorzystywane w mojej pracy doktorskiej nie były przydatne. Problem ten stanowił dla mnie inspirację do znalezienia innej metody oceny stanu technicznego mającej zastosowanie do rzeczywistych konstrukcji.

W ramach projektu PBS KOMPNDT analizowałam możliwość wykorzystania czujników światłowodowych typu FBG wbudowanych w materiał połączenia klejowego do określenia stopnia jego zawilgocenia. Pozytywne wyniki analiz pozwoliły mi na stworzenie metody pozwalającej na określenie stopnia zawilgocenia w dowolnej chwili czasowej. Wyniki przeprowadzonych przeze mnie analiz eksperymentalnych zostały następnie wykorzystane do sformułowania założeń niezbędnych do stworzenia modeli numerycznych pozwalających na wyznaczenie zależności zmian odkształceń od stopnia zawilgocenia połączenia klejowego. Modele te powstały w ramach pracy magisterskiej pani

mgr. inż. Veronica Bonilla Mora, której byłam promotorem. Pani mgr. inż. Veronica Bonilla Mora (z Università degli Studi dell'Aquila, Włochy) studiowała na studiach (II) stopnia (magisterskich) w ramach programu *Erasmus Mundus Double Master's Degree Programme in Mathematical Modelling in Engineering: Theory, Numerics, Applications* na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej. Powstałe w ramach pracy magisterskiej modele zostały przeze mnie przeanalizowane pod kątem przydatności w diagnostyce (ocena stopnia zawilgocenia) połączeń klejowych.

Głównym zastosowaniem metod powstałych w oparciu o analizy zjawisk związanych z propagacją fali optycznej w światłowodzie z czujnikami światłowodowymi typu FBG, wykorzystywanej w ramach osiągnięcia naukowego, było powiązanie zmian długości fali Bragga z odkształceniami związanymi z wystąpieniem uszkodzenia. W przypadku analiz modelu fizycznego rzeczywistej konstrukcji morskiej przy wymuszeniach zbliżonych do rzeczywistych badania były skoncentrowane na detekcji i lokalizacji pęknięcia obwodowego. Natomiast w połączeniu klejowym pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytów włóknistych analizowano zmianę odkształcenia związaną ze zwiększeniem / zmniejszeniem objętości materiału na skutek zmiany stopnia zawilgocenia materiału. W pierwszym przypadku przeprowadziłam badania dotyczące wpływu uszkodzenia na zmiany charakterystyk amplitudowo–częstotliwościowych konstrukcji związanych z wymuszeniem środowiskowym. Szczególną uwagę zwrócono na problem lokalizacji uszkodzenia sztywnej konstrukcji. W drugim przypadku badania dotyczyły nie tylko detekcji i lokalizacji uszkodzenia, ale również oszacowania jego wielkości, a także stworzenia metody pozwalającej na określenie stopnia zawilgocenia materiału w dowolnie wybranej chwili czasowej.

Metody bazujące na czujnikach światłowodowych typu FBG, pomimo ogromnych możliwości detekcji, lokalizacji i określenia wielkości uszkodzeń, związanych z ciągłymi pomiarami (SHM), realizowanymi podczas eksploatacji konstrukcji (np. oddziaływań falowania na posadowioną konstrukcję morską) mają jedną istotną wadę. Metody te pozwalają na określenie zmian zachodzących w konstrukcji, ale nie mogą być wykorzystane do określenia stanu bazowego (np. związanego z błędami podczas wytwarzania) oraz oceny wewnętrznej struktury materiału. Wspomniana wada tych metod skłoniła mnie do rozszerzenia obszaru moich zainteresowań badawczych o nowoczesną metodę badań nieniszczących – spektroskopię THz. Metoda ta bazuje na zjawisku propagacji w materiale fali elektromagnetycznej o częstotliwości z zakresu terahercowego (0,1–10 THz) i analizie jej interakcji z ośrodkami przez które przechodzi. Zjawisko to można wykorzystać do oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji. Dokładny opis metody zawarty został w dalszej części niniejszego dokumentu.

Metoda spektroskopii THz, i jej skuteczne zastosowanie do detekcji, lokalizacji (położenie uszkodzenia wewnątrz struktury materiału) i określenia wielkości uszkodzenia (mechanicznego, termicznego czy zanieczyszczenia) stanowiły drugą część mojego osiągnięcia. Początkowo badałam możliwość wykorzystania spektroskopii THz do detekcji, lokalizacji, określenia wielkości delaminacji i wtrąceń w postaci wbudowanych światłowodów z czujnikami typu FBG. Następnie analizowałam przypadek uszkodzenia termicznego i jego wpływ na strukturę materiału pozwalający na jego wykrycie i określenie stopnia degradacji. W kolejnym kroku analizowałam powierzchniowe uszkodzenie termiczne i jego wpływ na wewnętrzną strukturę materiału. Oprócz zastosowania tej metody do wykrywania uszkodzeń mechanicznych i termicznych oraz oceny ich wielkości, metodę wykorzystywałam do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości zanieczyszczenia (lokalnego zawilgocenia) w kompozycie włóknistym. Zawilgocenie to zostało wprowadzone do struktury materiału podczas jego wytwarzania. Jest to istotny problem, gdyż zawilgocenie może być źródłem degradacji mechanicznej jak i chemicznej materiałów kompozytowych.

Podsumowując, metoda bazująca na czujnikach światłowodowych typu FBG pozwala na ocenę stanu technicznego podwodnych elementów konstrukcyjnych oraz wyznaczenie stopnia zawilgocenia połączenia klejowego w konstrukcji. Natomiast, metoda spektroskopii THz pozwala na detekcję, lokalizację (również po grubości), określenie wielkości uszkodzenia w elementach wykonanych z materiałów kompozytowych. Metoda ta może być stosowana do okresowego badania stanu technicznego konstrukcji.

Dzięki takiemu połączeniu metod bazujących na propagacji fal elektromagnetycznych (optycznej i w zakresie THz) otrzymuje się bardzo efektywne narzędzie diagnostyczne umożliwiające określenie stopnia degradacji elementów konstrukcji.

Sformułowana teza:

Możliwe jest opracowanie efektywnych metod oceny stopnia degradacji fizyko–chemicznej i mechanicznej elementów konstrukcyjnych pracujących w warunkach zmiennej wilgotności lub temperatury na podstawie analizy zjawisk związanych z propagacją fal elektromagnetycznych

Szczegółowy opis metodyki badań oraz dyskusja

I. Metoda propagacji fal elektromagnetycznych (w zakresie długości fal 1510–1590 nm)

Głównym celem badań było zastosowanie propagacji fal elektromagnetycznych (w zakresie długości fal 1510–1590 nm) w światłowodzie jednomodowym z naciętymi siatkami dyfrakcyjnymi Bragga do detekcji i lokalizacji uszkodzenia (pęknięcia obwodowego jednego ze stężeń) modelu fizycznego konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej (tripod) przy wymuszeniu falowym oraz określenia stopnia zawilgocenia połączenia klejowego pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytu włóknistego. Takie połączenie klejowe może wystąpić w łopacie morskiej turbiny wiatrowej czy łodzi, gdzie wpływ zewnętrznej wilgoci na konstrukcję jest istotny. Takie podejście pozwoliło na stworzenie metod oceny stanu technicznego konstrukcji morskiej, do której jest utrudniony dostęp ze względu na miejsce posadowienia i eksploatowanej w silnie korozyjnym środowisku (morze). Stworzono również metodę pozwalającą na określenie stopnia zawilgocenia połączenia klejowego dla wybranej chwili czasowej.

Światłowody włókniste są to bardzo cienkie włókna dielektryczne, najczęściej wykonywane ze szkła kwarcowego, które są powszechnie wykorzystywane w telekomunikacji do przesyłania sygnałów optycznych na duże odległości. Światłowody jednomodowe są stosowane do wytwarzania czujników optycznych, które ze względu na swoje parametry materiałowe i geometryczne charakteryzują się: wysoką czułością, odpornością na działanie pola elektromagnetycznego i nieelektrycznym sygnałem wyjściowym (możliwość stosowania w miejscach niedostępnych dla czujników elektrycznych), brakiem konieczności kalibracji, wysoką odpornością na korozyjny wpływ środowiska (odporność na działanie wody morskiej) i substancji chemicznie agresywnych, niewielka masa i wymiary geometryczne (możliwość wbudowania w materiał obiektu bez znaczącej ingerencji w jego strukturę). Wadami czujników optycznych ograniczającymi zakres ich zastosowania są: kruchość i wrażliwość na kąt zagięcia światłowodu (w zginanym włóknie transmisja fali optycznej może zaniknąć).

Czujniki światłowodowe typu FBG są w rzeczywistości filtrami widmowymi wykorzystującymi zasadę odbicia Bragga. W rdzeniu światłowodu tworzona jest siatka dyfrakcyjna Bragga, od której odbija się pewna część fali optycznej o określonej długości fali (zwana falą Bragga), której zmiany mierzone są przez układ optyczny i rejestrowane przez odpowiednie urządzenie (interrogator).

Typowe widmo optyczne odbite od czujnika zawiera jedno główne maksimum odpowiadające długości fali Bragga charakterystycznej dla danego czujnika typu FBG. Czujniki światłowodowe typu FBG wykazują liniową zależność pomiędzy mierzoną zmianą długości fali Bragga a odkształceniem wzdłużnym, które występuje na elemencie konstrukcyjnym w miejscu zamocowania czujnika. Analogiczna zależność obserwowana jest dla zmian temperatury, przy czym czułość czujników na wpływ zmian temperatury jest ok. 10–15 razy większa niż na zmianę odkształcenia. W związku z tym w przypadku pomiarów odkształcenia wymagana jest kompensacja wpływu temperatury.

Użyteczność czujników światłowodowych typu FBG polega również na możliwości utworzenia wzdłuż światłowodu wielu siatek dyfrakcyjnych (czujników) o różnych stałych siatek dyfrakcyjnych. Dzięki takiemu zabiegowi każdy odbity sygnał ma jednoznacznie określoną długość fali i może być w prosty sposób identyfikowany. W ten sposób otrzymuje się na wyjściu multipleks czujników wielokrotnych przy użyciu tylko pojedynczego włókna.

Występowanie w czujniku światłowodowym typu FBG niejednorodnego pola odkształceń powoduje zniekształcenia widma. Zniekształcenie widma spowodowane niedopasowaniem długości czujnika (siatki dyfrakcyjnej) do wielkości odkształcenia. W tym przypadku obciążenie rozciągające oddziałuje jedynie na część siatki dyfrakcyjnej. W związku z tym, że na czujniku istnieje niejednorodne pole odkształceń, w widmie odbitym od czujnika nie można wyznaczyć głównego maksimum. Z tego powodu trudno jest wyodrębnić długość fali Bragga charakterystyczną dla czujnika, to znaczy taką, której zmiana byłaby związana z odkształceniem czujnika. Widmo tego typu można zaobserwować dla czujników światłowodowych typu FBG wbudowanych w strukturę materiału elementu konstrukcyjnego znajdującego się pod obciążeniem. Zniekształcenie widma wywołane jest przez ściskanie światłowodu w kierunku poprzecznym. Proces ten powoduje zmianę kształtu przekroju poprzecznego włókna z kołowego na elipsoidalny. W związku z tym faktem pojawiają się dwa mody polaryzacyjne. Efekt ten można zaobserwować również na czujnikach światłowodowych typu FBG wbudowanych w kompozytowe elementy konstrukcyjne nie znajdujące się pod obciążeniem. W tym przypadku wywołują go naprężenia resztkowe w materiale kompozytowym.

Badania w ramach osiągnięcia podzielono na dwie części. Pierwsza dotyczy modelu fizycznego konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej, a druga połączenia klejowego pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytów włóknistych.

Model konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej

Celem badań było określenie możliwości zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do diagnostyki (detekcja i lokalizacja) uszkodzeń konstrukcji wsporczej znajdującej się pod wodą przy wymuszeniu środowiskowym (wiatr, falowanie). Stworzenie systemu monitorowania konstrukcji posadowionych w trudnodostępnych miejscach pozwala na zwiększenie ich bezpieczeństwa.

Podczas badań eksperymentalnych analizowano możliwość detekcji i lokalizacji uszkodzenia (symulowanego pęknięcia obwodowego jednego ze stężeń) na jednej z nóg modelu fizycznego konstrukcji wsporczej (typu tripod) morskiej turbiny wiatrowej. Analizowana struktura miała wysokość 2 m i została wykonana ze spawanych elementów ze stopu aluminium (o właściwościach izotropowych). Na jednym ze stężeń zaprojektowano połączenie śrubowe z kołnierzem, które pozwalało na powtarzalne wprowadzanie uszkodzenia (pęknięcia obwodowego) poprzez odkręcanie i usuwanie śrub. Zaletą takiego rozwiązania była możliwość analizowania zachowania się konstrukcji przy różnych warunkach brzegowych. Natomiast wadą było lokalne zwiększenie sztywności konstrukcji [H1].

Na konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej zamontowano układ pomiarowy składający się z czujników światłowodowych typu FBG. Ze względu na charakterystykę geometryczną konstrukcji można w niej wydzielić trzy podobne fragmenty zawierające jedno stężenie górne, jedno stężenie dolne oraz jeden cylinder służący do zamocowania konstrukcji do podłoża. Fragment konstrukcji z dodatkowym połączeniem śrubowym oznaczono numerem '1' (Rys. 1). W związku z tym, podczas badań na potrzeby analiz, czujniki podzielono na cztery grupy: trzy związane ze stronami konstrukcji (S1, S2, S3) i jeden zawierający wszystkie czujniki do pomiaru odkształcenia (CC) – schemat Rys. 1 [H1].



Rys. 1. Schemat konstrukcji z zaznaczonymi miejscami zamontowania czujników. Zdjęcia konstrukcji zamontowanej na obrotnicy w basenie modelowym [H1]

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla kompletnego modelu konstrukcji turbiny wiatrowej umieszczonej w basenie modelowym. Konstrukcja znajdowała się na środku basenu i była przykręcona do platformy obrotowej, która pozwalała na zmianę ustawienia obiektu względem kierunku sztucznych fal wywoływanych (wymuszanych) przez generator fal zainstalowany po jednej stronie basenu. Konstrukcja wsporcza wraz z układem czujników znajdowała się pod powierzchnią wody. Sprawdzone w ten sposób przydatność czujników tego typu do zastosowań morskich. Podczas badań na konstrukcję działały siły związane z wymuszeniem przez sztuczne, nieregularne fale o różnych parametrach. Dodatkowo, w dwóch przypadkach, analizowano jednoczesny wpływ falowania i obracającego się z różną prędkością kątową wirnika symulującego oddziaływanie wiatru wiejącego z różną siłą. Nowością tych badań jest zastosowanie, do pomiarów zmian odkształceń konstrukcji, czujników światłowodowych typu FBG znajdujących się pod powierzchnią wody i nieosłoniętych przed bezpośrednim działaniem wilgoci. Badania przeprowadzono podczas realizacji projektu PBS AQUILO w basenie modelowym w Centrum Techniki Okrętowej S.A. w Gdańsku [H1].

Wartości zmian odkształceń konstrukcji wyznaczone na podstawie zmian długości fali Bragga w czujnikach światłowodowych typu FBG związanych z oddziaływaniem wymuszenia falowego wykorzystano jako dane wejściowe do wybranej metody eksploatacyjnej analizy modalnej – metody dekompozycji w dziedzinie częstotliwości (z ang. *Frequency Domain Decomposition*, FDD). Metoda ta jest stosowana do określenia charakterystyk modalnych dużych konstrukcji (np. mostów, budynków), podczas oddziaływania na nie szerokopasmowych, stochastycznych wymuszeń środowiskowych (wiatr, falowanie, itp.). Ze względu na to, że w eksploatacyjnej analizie modalnej stosowane są rzeczywiste wymuszenia, pozwala ona na uzyskanie rzeczywistych charakterystyk konstrukcji. Dzięki

temu metody te są bardzo użyteczne w systemach SHM oraz detekcji uszkodzeń w dużych konstrukcjach.

Metodę FDD zastosowano do określenia charakterystyk amplitudowo–częstotliwościowych konstrukcji, które posłużyły do detekcji i lokalizacji uszkodzenia – pęknięcia obwodowego. Ze względu na wielkość basenu oraz jego charakterystyki geometryczne można było przyjąć, że powstałe w ten sposób wymuszenie ma charakter szerokopasmowego, stochastycznego wymuszenia i spełnia warunek stosowalności metody FDD [H1].

Nowością jest zastosowanie czujników światłowodowych typu FBG do pomiarów zmian odkształceń konstrukcji pod wodą oraz zastosowanie wyznaczonych wartości odkształceń do wyznaczenia charakterystyk amplitudowo–częstotliwościowych konstrukcji, na którą oddziaływało falowanie i obracający się z różną prędkością kątową wirnik symulujący oddziaływanie wiatru wiejącego z różną siłą.

Przeprowadzone badania eksperymentalne można podzielić na dwie główne części: wyznaczanie zmian odkształceń konstrukcji oraz eksploatacyjna analiza modalna. W obu przypadkach analizowano wpływ wprowadzonego uszkodzenia (symulowane pęknięcie obwodowe) na uzyskane wyniki oraz możliwości jego detekcji i lokalizacji [H1].

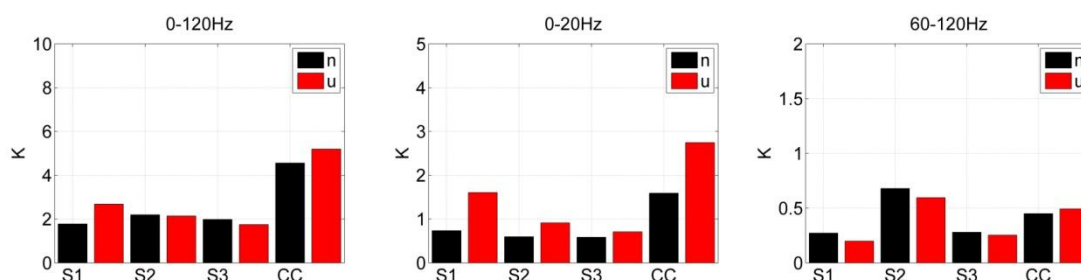
Podczas przeprowadzonych analiz dotyczących zmian odkształceń konstrukcji skoncentrowano się na różnicach amplitud i kształtu wyznaczonych sygnałów związanych z wprowadzeniem uszkodzenia. Analizy pozwoliły na stwierdzenie, że powstały model fizyczny nie jest idealnie symetryczny, nie tylko z powodu dodatkowego połączenia śrubowego (symulowanego uszkodzenia). Mimo to dla obu przypadków wymuszeń (falowanie oraz falowanie i obracający się wirnik) wpływ uszkodzenia (symulowanego pęknięcia obwodowego) jest najbardziej widoczny (zmiany amplitud drgań) dla czujników zebranych w zbiorze 'S1', czyli dla fragmentu konstrukcji z uszkodzeniem. Stwierdzono, że wykorzystanie zmian odkształceń do detekcji uszkodzenia tego typu jest możliwe tylko w przypadku porównania dwóch różnych stanów konstrukcji dla tego samego rodzaju wymuszenia o jednakowych parametrach. Takie przypadki są w rzeczywistych konstrukcjach trudne do uzyskania, w związku z tym zaproponowano bardziej zaawansowaną analizę uzyskanych danych [H1].

Podczas przeprowadzonych analiz dotyczących charakterystyk amplitudowo–częstotliwościowych konstrukcji również skoncentrowano się na zmianach związanych z wprowadzeniem uszkodzenia. W oparciu o uzyskane eksperymentalne charakterystyki amplitudowo–częstotliwościowe oraz informacje dotyczące częstotliwości drgań własnych konstrukcji przymocowanej do podłoża z analiz modelu numerycznego (metoda elementów skończonych, MES) analizowany zakres częstotliwości podzielono na trzy przedziały: cały zakres częstotliwości (0–120Hz), zakres wymuszenia (0–20Hz) oraz zakres częstotliwości drgań własnych (60-120 Hz) [H1].

Wyznaczając zakres wymuszenia do dalszych analiz porównano zakresy dla dwóch rodzajów wymuszeń: falowanie i falowanie z jednocześnie obracającym się wirnikiem. Stwierdzono, że w pierwszym przypadku (ze względu na parametry fali) częstotliwości wymuszenia znajdują się w zakresie 0–2Hz. Natomiast dla wymuszeń złożonych (falowanie i obracający się wirnik) zakres ten musi być rozszerzony do wspomnianego zakresu 0–20Hz. W celu łatwiejszego porównania uzyskanych wyników do porównania wartości zaproponowanych wskaźników uszkodzenia wybrano szerszy zakres częstotliwości. Jednakże w każdym przypadku przeprowadzono analizę wpływu zwiększenia zakresu częstotliwości na wartości wskaźników uszkodzenia. Porównano wartości wskaźników uszkodzeń dla pięciu wybranych podzakresów zakresu 0–20Hz dla wymuszenia

falowaniem. Stwierdzono, że zmiany wartości wskaźników uszkodzeń są nieznaczne, a uzyskane trendy zbliżone i pozwalają na poprawne wskazanie uszkodzenia [H1].

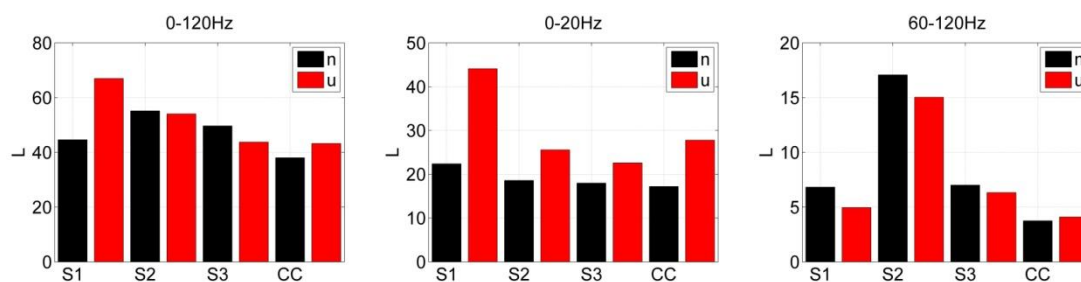
Zaproponowano dwa rodzaje wskaźników (bez i z normalizacją) służących do detekcji i / lub lokalizacji uszkodzenia. Oba bazowały na zmianach energii odkształcenia związanej z obciążaniem konstrukcji. W każdym rodzaju wskaźników zaproponowano wskaźnik bezwzględny (wyznaczany dla każdego przypadku osobno) i względny (wyznaczany jako różnica procentowa pomiędzy dwoma bezwzględnymi wskaźnikami uzyskanymi dla konstrukcji nieuszkodzonej i z uszkodzeniem). Dla każdego analizowanego przypadku wyznaczono również wartość odcięcia, powyżej której wskaźnik wskazywał na pojawienie się uszkodzenia. Podczas analiz wyznaczono zakresy częstotliwości, dla których zaproponowane wskaźniki pozwalały na detekcję i lokalizację uszkodzenia. Lokalizację rozumiano jako określenie fragmentu konstrukcji (zbiorów: S1, S2, S3), na którym znajduje się uszkodzenie [H1]. Oryginalną częścią jest podział analizowanego zakresu częstotliwości na trzy podzakresy i odrębne analizowanie wpływu uszkodzenia. Pozwoliło to na stworzenie wskaźników uszkodzenia służących do jego poprawnej detekcji i lokalizacji nawet w przypadku wymuszeń o niewielkiej energii (fala o parametrach: amplituda międzyszczytowa $H=0,16$ m i okres $T=1,4$ s) i dla konstrukcji o dużej sztywności.



Rys. 2. Wartości wskaźnika bezwzględnego bez normalizacji (K) dla przykładu z wymuszeniem falą nieregularną o zmiennych parametrach [H1]

W przypadku wymuszenia falowaniem, stwierdzono, że wskaźnik bezwzględny bez normalizacji (K) wyznaczony dla dwóch zakresów częstotliwości (0–120Hz, 0–20Hz) pozwala na detekcję i lokalizację uszkodzenia. Jednakże zakres wymuszenia (0–20Hz) pozwala na bardziej jednoznaczną lokalizację uszkodzenia. Przykładowe wartości wskaźnika K dla wymuszenia falą nieregularną o zmiennych parametrach przedstawiono na Rys. 2. W przypadku jednoczesnego wymuszenia falowaniem i obracającym się wirnikiem do detekcji i lokalizacji uszkodzenia najlepszy jest zakres częstotliwości drgań własnych konstrukcji (60–120Hz). Natomiast wskaźnik względny pozwalał na detekcję i lokalizację uszkodzenia dla zakresu częstotliwości 0–20Hz dla obu analizowanych typów wymuszeń [H1].

Oryginalną część wyników stanowią znormalizowane wskaźniki uszkodzenia zaproponowane w celu zmniejszenia wpływu środowiska zewnętrznego. Normalizacja opierała się na całkowitej energii odkształcenia zdefiniowanej jako energia zaabsorbowana przez konstrukcję podczas jej obciążania. Pozwoliło to na zmniejszenie wpływu ilości czujników w każdej z grup oraz wartości parametrów wymuszeń na uzyskane wartości wskaźników. Wskaźniki te wyznaczono w sposób analogiczny do nieznormalizowanych wskaźników uszkodzenia. Przykładowe wartości wskaźnika L dla wymuszenia falą nieregularną o zmiennych parametrach przedstawiono na Rys. 3.



Rys. 3. Wartości wskaźnika bezwzględnie znormalizowanego (L) dla przykładu z wymuszeniem falą nieregularną o zmiennych parametrach [H1]

Zależność pomiędzy zakresami częstotliwości pozwalającymi na detekcję i lokalizację uszkodzenia a rodzajem wymuszenia dla obu wskaźników bezwzględnych (nieznormalizowanego (K) i znormalizowanego (L)) jest taka sama. Różnice polegają na uzyskanych wartościach wskaźnika znormalizowanego (L) niezależnych od ilości czujników w analizowanej grupie oraz pozwalające na detekcję i lokalizację uszkodzenia bez konieczności znajomości stanu referencyjnego poprzez porównanie wartości wskaźnika dla wszystkich zbiorów czujników (S1, S2, S3, CC) dla danego pomiaru z uwzględnieniem wartości odcięcia. Wyznaczono również wskaźnik względny znormalizowany, który można wykorzystać do detekcji i lokalizacji uszkodzenia. W tym celu, w przypadku wymuszenia falowego można wykorzystać dwa zakresy częstotliwości (0–20Hz, 0–120Hz), natomiast dla jednoczesnego wymuszenia falą i obracającym się wirnikiem można wykorzystać jedynie zakres częstotliwości 60–120Hz [H1].

Nowością tego podejścia jest stworzenie znormalizowanego wskaźnika pozwalającego na monitorowanie stanu technicznego morskiej konstrukcji wsporczej podczas jej eksploatacji. Jest to niezwykle istotne dla konstrukcji, do których dostęp jest utrudniony ze względu na warunki posadowienia (dno morskie, wysokie góry). W związku z tym zmniejszenie liczby przeglądów eksploatacyjnych przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa pracy jest istotne. Istotną zaletą przedstawionych wskaźników uszkodzenia (szczególnie znormalizowanych) jest możliwość ich automatycznego wyznaczania oraz zaimplementowania do zainstalowanego na trudnodostępnym fragmencie konstrukcji bezobsługowego systemu SHM.

Badania eksperymentalne przeprowadzone w basenie modelowym udowodniły użyteczność czujników światłowodowych typu FBG do tworzenia systemu SHM zainstalowanego na stałe na podwodnych elementach konstrukcji. Badania przeprowadzono w ramach projektu PBS AQUILO w basenie modelowym w Centrum Techniki Okrętowej S.A. w Gdańsku przy współpracy z firmą BALTEX GROUP (BALTEX Energia i Górnictwo Morskie Gdynia).

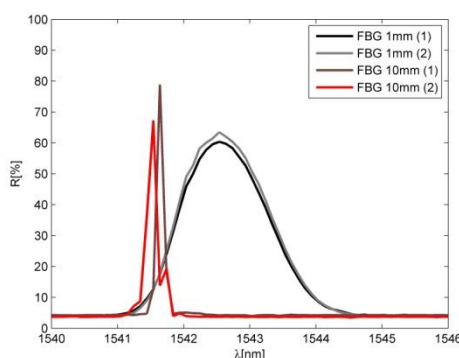
Wpływ zawilgocenia na połączenie klejowe

Celem badań było stworzenie metody pozwalającej na detekcję, lokalizację i określenie wielkości (stopnia) zawilgocenia połączenia klejowego pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytów włóknistych o zbrojeniu szklanym i o osnowie polimerowej. Zaproponowana metoda bazuje na zmianach odkształcenia czujnika światłowodowego typu FBG wbudowanego w materiał połączenia klejowego związanych ze zmianą objętości materiału na skutek dyfuzji wody.

Właściwości geometryczne i fizyczne czujników światłowodowych typu FBG pozwalają nie tylko na ich mocowanie na powierzchni badanych elementów, ale również na wbudowywanie ich w strukturę materiału, np. kompozytowego. W ramach osiągnięcia naukowego przeprowadzono

próbę wbudowania czujników światłowodowych w warstwę adhezyjną połączenia klejowego [H2]. Połączenie klejowe jest to połączenie mechaniczne, w którym wykorzystuje się adhezyjne właściwości substancji klejowych – lepiszcza (warstwy adhezyjnej). Łączenie odbywa się w wyniku oddziaływania sił adhezji właściwej, adhezji mechanicznej i sił spójności kleju, czyli kohezji.

Analizowano zmiany kształtów widm odbitych od czujników światłowodowych typu FBG oraz zmiany odkształcenia wyznaczonego w oparciu o pomiary długości fali Bragga podczas procesu polimeryzacji warstwy adhezyjnej połączenia klejowego. W celu określenia wpływu procesu polimeryzacji na czujniki oraz ich zdolności do poprawnego pomiaru porównano kształty widm odbitych od czujników optycznych przed i po zakończeniu procesu polimeryzacji – Rys. 4. Kształty widm odbitych od czujników światłowodowych typu FBG silnie zależały od długości bazy pomiarowej: 10 mm i 1 mm. Zaobserwowano wpływ na poziom szumu oraz czułość tych dwóch rodzajów czujników podczas pomiarów zmian stopnia zawilgocenia materiału. Zaobserwowano także nieznaczny spadek wartości amplitud czujników po procesie polimeryzacji. Dla czujników o długości bazy pomiarowej 10 mm zaobserwowano zmniejszenie wartości długości fali Bragga związanej z wystąpieniem ściskania. W widmie widoczne jest również dodatkowe maksimum, jednakże nie jest ono większe niż 20% reflektancji czujnika FBG. Powodem wystąpienia dodatkowego maksimum w widmie czujnika jest prawdopodobnie wystąpienie odkształceń poprzecznych będących efektem odkształceń resztkowych powstałych podczas procesu polimeryzacji [H2]. Nowością tego postępowania jest wbudowanie czujnika światłowodowego typu FBG w materiał połączenia klejowego oraz obserwowanie zmian w widmach odbitych od czujników, określenie momentu zakończenia procesu polimeryzacji na podstawie zmierzonych długości fal Bragga i wyznaczenie wartości odkształceń powstałych podczas procesu polimeryzacji na podstawie zmierzonych długości fali Bragga.



Rys. 4. Kształty widm odbitych od czujników o różnych długościach baz pomiarowych (1mm i 10 mm): (1) przed, (2) po zakończeniu procesu polimeryzacji [H2]

Czujniki światłowodowe typu FBG charakteryzują się 10–15 krotnie większą czułością na zmiany temperatury niż odkształcenia. Z tego powodu podczas pomiarów zmian odkształcenia konieczna jest kompensacja wpływu temperatury. Ze względu na to, że czujniki zostały wbudowane w materiał konieczne było eksperymentalne wyznaczenie zależności pomiędzy zmianą temperatury próbki, a związaną z nią zmianą długości fali Bragga. Stwierdzono, że w analizowanym zakresie temperatur (20–60°C) zmiany te są liniowe i wyznaczono empiryczny współczynnik. Uzyskana zależność posłużyła do kompensacji termicznej czujników [H2]. Nowością tego postępowania jest wyznaczenie wartości współczynnika wpływu temperatury na czujnik światłowodowy typu FBG, wbudowanego w warstwę adhezyjną połączenia klejowego, pozwalający na kompensację wpływu temperatury i wyznaczenie rzeczywistego odkształcenia.

Proces absorpcji wilgoci powoduje zwiększenie objętości materiału i związane z nim zmiany rozkładów odkształceń wewnętrznych w materiale. Do pomiaru zmian odkształceń zaproponowano czujniki światłowodowe typu FBG wbudowane w strukturę materiału. Analizowano możliwość wykorzystania czujników do wykrywania wilgoci w warstwie adhezyjnej oraz określenia stopnia zawilgocenia (do 3% stężenia wilgoci) połączenia klejowego pomiędzy dwoma elementami wytworzonymi z kompozytu włóknistego. Podczas badań eksperymentalnych rozważano wpływ długości bazy pomiarowej (1mm i 10 mm) oraz różne położenia czujników w warstwie adhezyjnej [H2].

Badania przeprowadzono na próbkach o jednakowej geometrii, a różniących się grubością warstwy kleju, ułożeniem i ilością czujników wbudowanych w warstwę adhezyjną połączenia klejowego. Każda próbka składała się z dwóch ośmiowarstwowych elementów o strukturze laminatu wykonanego z kompozytu włóknistego o zbrojeniu włóknem szklanym oraz warstwy adhezyjnej – kleju stosowanego do łączenia i / lub naprawiania elementów lotniczych. Podczas badań eksperymentalnych (trwających 14 dni) próbki znajdowały się w pojemnikach, z wodą demineralizowaną, umieszczonych w komorze termicznej w stałej temperaturze $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. W celu określenia ilości wilgoci w materiale, próbki były okresowo ważone przy pomocy wagi laboratoryjnej. Przed rozpoczęciem badań próbki były suszone przez 48h w temperaturze 60°C . W związku z tym początkową ilość wilgoci w materiale założono na poziomie 0% (w rzeczywistości nie powinna ona przekraczać 0,1%) [H2].

Przed przystąpieniem do analizy stopnia zawilgocenia materiału adhezyjnego wyznaczono eksperymentalnie zależność ilości wilgoci od czasu w elementach łączonych połączenia klejowego, wykonanych z materiału kompozytowego włóknistego o zbrojeniu włóknem szklanym. Podczas tych badań elementy znajdowały się w analogicznych warunkach, w jakich potem przebywały gotowe połączenia klejowe oraz były okresowo ważone przy pomocy wagi laboratoryjnej. Na podstawie badań eksperymentalnych stwierdzono, że maksymalna ilość wilgoci jaka może być zaabsorbowana przez materiał kompozytowy podczas 14 dni przebywania w wodzie wynosi 1%. Uzyskana charakterystyka absorpcji wody w czasie w materiale kompozytowym pozwoliła na eliminowanie wpływu wilgoci na materiał kompozytowy podczas określania ilości wilgoci w warstwie adhezyjnej połączenia klejowego. Ze względu na charakterystykę materiału kompozytowego stwierdzono, że w połączeniu klejowym warstwa adhezyjna absorbuje większą ilość wody, a w związku z tym jej monitorowanie jest bardziej istotne ze względu na trwałość połączenia klejowego [H2].

Wyznaczoną eksperymentalnie zawartość wilgoci w warstwie adhezyjnej w połączeniu klejowym porównano z wartościami dla modelu Langmuira procesu absorpcji wilgoci uzyskując bardzo dobrą zgodność. Model ten zakłada, że woda dyfunduje w głąb materiału, ale podczas tego procesu część cząsteczek wody jest absorbowana przez mikrostrukturę żywicy epoksydowej [H2].

Stworzono analityczny model odkształcenia warstwy adhezyjnej połączenia klejowego. Z uwagi na właściwości materiału założono, że warstwa adhezyjna jest izotropowa. Ze względu na charakterystykę geometryczną połączenia klejowego założono, że rozkład odkształceń w warstwie adhezyjnej może być opisany przy pomocy płaskiego stanu odkształceń. Założono również, że odkształcenie ścinające nie ma istotnego wpływu podczas procesu dyfuzji i w związku z tym można wyznaczać wyłącznie odkształcenia normalne. Ponieważ czujniki światłowodowe typu FBG mierzą jedynie odkształcenia osiowe (w kierunku osi czujnika), a są usytuowane równolegle / prostopadle do osi x próbki oraz znajdują się w połowie warstwy adhezyjnej to mierzą jedynie odkształcenia normalne. Przeprowadzone analizy teoretyczne potwierdzają, że czujniki FBG ułożone prostopadle do grubości warstwy adhezyjnej są użyteczne do pomiaru odkształceń związanych z absorpcją wilgoci przez materiał, w który są wbudowane [H2]. Nowością tego postępowania jest teoretyczne

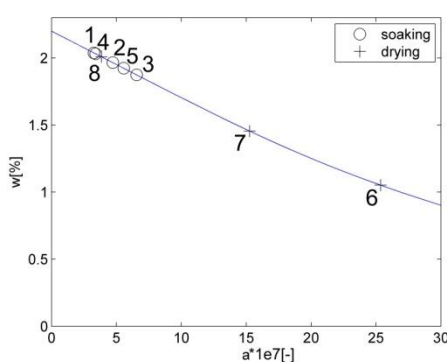
potwierdzenie użyteczności czujników światłowodowych typu FBG do określenia zmian odkształcenia związanych z występowaniem wilgoci w materiale połączenia klejowego.

Analizowane próbki znajdowały się w stałej temperaturze i w środowisku o stałej wilgotności oraz nie były obciążone przez siły zewnętrzne. Wpływ grawitacji oraz ciśnienia słupa wody był zanedbywalnie mały i stały podczas całego eksperymentu. W związku z powyższym całkowita wartość zmiany odkształcenia zależała jedynie od zmiany koncentracji wilgoci (zdefiniowanej jako masa zaabsorbowanej wody na jednostkę masy polimeru). Na podstawie przyjętego założenia stwierdzono, że zmiana odkształcenia jest liniowo zależna od ilości wody zaabsorbowanej przez materiał warstwy adhezyjnej i dla materiału adhezyjnego można wyznaczyć izotropowy, liniowy współczynnik rozszerzalności polimeru pod wpływem wilgoci [H2].

Taka zależność jest obserwowana dla wielu materiałów polimerowych. Zakładając, że zmiany ilości wilgoci w materiale są na poziomie kilku procent to liniowy współczynnik rozszerzalności polimerów pod wpływem wilgoci ma wartości w zakresie 0,2–0,5. Na podstawie wyznaczonej eksperymentalnie zawartości wody w materiale wyznaczono teoretyczne wartości odkształceń, które następnie porównano z wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie [H2].

Na podstawie zmierzonych długości fal Bragga, uwzględniając wpływ temperatury, wyznaczono wartości odkształceń związanych ze zwiększeniem objętości materiału adhezyjnego w połączeniu klejowym, wywołanego przez obecność wilgoci. Następnie wyznaczono zależności pomiędzy ilością wilgoci w materiale a zmierzonym odkształceniem. Stwierdzono, że do wyznaczania stopnia zawilgocenia można wykorzystać czujniki światłowodowe typu FBG o długości bazy pomiarowej 10 mm [H2]. Nowością tego postępowania jest eksperymentalne potwierdzenie teoretycznych zależności odkształcenia od stopnia zawilgocenia połączenia klejowego dla niewielkiej ilości wilgoci (do 2–3% stężenia wilgoci).

Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych i modelowych stworzono współczynnik pozwalający na określenie stopnia zawilgocenia materiału w dowolnej chwili czasowej. W tym celu podzielono uzyskaną teoretyczną zależność odkształcenia od czasu na jednogodzinne odcinki, z których każdy aproksymowano przy pomocy funkcji liniowej. Stworzono w ten sposób zależność pomiędzy ilością wilgoci w materiale a współczynnikami kierunkowymi funkcji liniowych (Rys. 5) [H2].



Rys. 5. Zależność stopnia zawilgocenia od wartości współczynników kierunkowych prostych z naniesionymi na wykres wartościami dla ośmiu rozpatrywanych przypadków suszenia i namaczania [H2]

Sprawdzono przydatność stworzonego wskaźnika dla ośmiu przypadków namaczania i suszenia. Dla każdego przypadku poprawnie określono stopień zawilgocenia. Stwierdzono, że wykorzystując zależność pomiędzy odkształceniem a koncentracją wilgoci w warstwie adhezyjnej można określić stopień zawilgocenia warstwy adhezyjnej w dowolnej chwili czasowej [H2]. Oryginalnym rozwiązaniem w tym przypadku jest stworzenie wskaźnika pozwalającego na określenie

stopnia zawilgocenia połączenia klejowego w dowolnej chwili czasowej na podstawie zmian odkształcenia zmierzonych przez czujnik światłowodowy typu FBG wbudowany w materiał warstwy adhezyjnej.

Przeprowadzono analizy eksperymentalne i numeryczne dotyczące wykorzystania czujników światłowodach typu FBG, wbudowanych w warstwę adhezyjną połączenia klejowego pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytu włóknistego, do określenia stopnia zawilgocenia połączenia klejowego. Wyznaczono eksperymentalnie i teoretycznie zależności pomiędzy ilością wilgoci w materiale a wartością odkształcenia [H2].

Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej jest zaobserwowanie zjawiska zmiany wartości długości fali Bragga wbudowanego czujnika światłowodowego typu FBG i powiązaniu go ze zmianą odkształcenia zależną od stopnia zawilgocenia połączenia klejowego dla niewielkich ilości wilgoci (w zakresie do 3% stężenia wilgoci).

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych stworzono modele numeryczne połączenia klejowego metodą elementów skończonych (MES) wykorzystując w tym celu komercyjny program ABAQUS®. Analizy numeryczne składały się z dwóch głównych części: analizy termicznej, analizy higro–mechanicznej (analiza dyfuzji masowej, analiza mechaniczna) [H3].

Podczas analiz założono, że materiał warstwy adhezyjnej jest materiałem izotropowym. Parametry konieczne do stworzenia modelu numerycznego przyjęto w oparciu o dane: producenta (gęstość, przewodność termiczna), literaturowe (ciepło właściwe) oraz wyznaczone eksperymentalnie (współczynnik higroskopijnego pęcznienia). Ze względu na niewielkie wartości odkształcenia ($<1.5 \cdot 10^{-4}$ m/m) założono, że materiał znajduje się w zakresie odkształceń sprężystych. Założono także, że w warstwie adhezyjnej wbudowane są dwa czujniki światłowodowe typu FBG: jeden w osi próbki, a drugi bliżej jej krawędzi. Ze względu na to, że wymiary (objętość) czujników światłowodowych typu FBG są niewielkie w odniesieniu do grubości warstwy adhezyjnej parametry materiałowe szkła kwarcowego nie były brane pod uwagę podczas tworzenia modelu [H3].

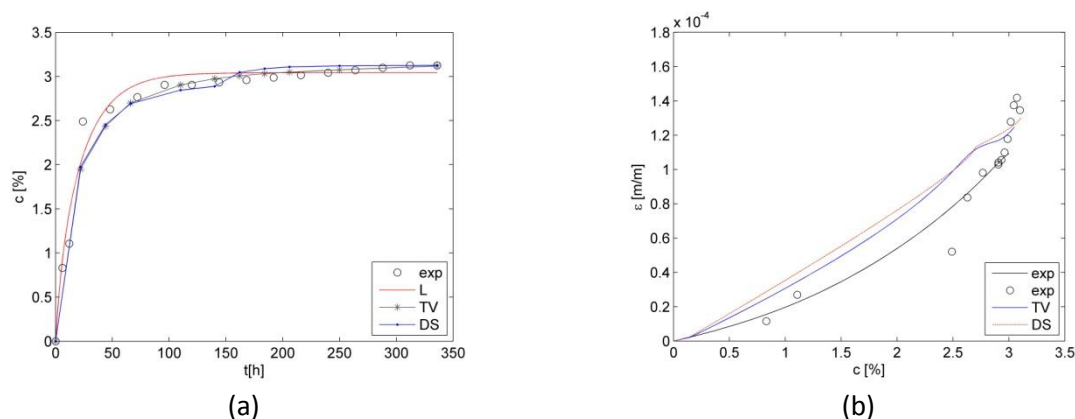
Ze względu na to, że elementy łączone połączenia klejowego wykonane z materiałów kompozytowych biorą aktywny udział w procesie wymiany ciepła, interakcje pomiędzy nimi a warstwą adhezyjną były istotne podczas analizy mechanicznej. W związku z tym ich charakterystyki termiczno–mechaniczne uwzględniono podczas tworzenia trójwymiarowego modelu analizowanej próbki. Ze względu na symetrię (geometryczną i obciążeniową) występującą dla analizowanego zagadnienia, w celu uproszczenia modelu i zmniejszenia czasu obliczeń, zamodelowano tylko jedną czwartą próbki. Całkowitą grubość warstwy adhezyjnej podzielono na trzy elementy skończone o stałej grubości. Zgodnie z warunkami eksperymentu założono, że czujniki światłowodowe typu FBG są wbudowane w środkową warstwę elementów skończonych. W miejscach, gdzie znajdowały się czujniki stworzono zbiory elementów. Analizy prowadzono dla dwóch globalnych wielkości elementów skończonych: 0,5 mm i 1 mm [H3]. Nowością tego postępowania jest stworzenie modelu uwzględniającego charakterystyki materiałowe i geometryczne warstwy adhezyjnej pozwalającego na wyznaczenie rozkładu odkształceń i temperatury podczas analizowanych procesów termicznych i dyfuzyjnych zachodzących w połączeniu klejowym z wbudowanym układem czujników światłowodowych typu FBG.

Podczas analiz termicznych symulowano procesy nagrzewania próbki (w powietrzu albo w wodzie) do temperatury 60°C. Uzyskano dobrą zgodność wyników analiz numerycznych i eksperymentalnych dla analizowanego przypadku [H3].

Podczas tworzenia modeli dotyczących procesu dyfuzji wody w głąb materiału założono, że: temperatura procesu jest stała i wynosi 60°C, próbka w pojemniku z wodą jest umieszczona równolegle do podłoża i jest pokryta warstwą wody o maksymalnej grubości 5 mm. Na podstawie

wyników analiz eksperymentalnych, które pokazały, że warstwa adhezyjna połączenia klejowego absorbuje zdecydowanie więcej wilgoci niż elementy łączone wykonane z materiału kompozytowego, analizy numeryczne były skoncentrowane na wpływie wilgoci na rozkłady odkształceń w warstwie adhezyjnej. Podczas analiz procesów dyfuzji masowej uwzględniono również dyfuzję wody przez elementy kompozytowe. Przeprowadzone symulacje obejmowały analizy związane z dyfuzją wody w głąb warstwy adhezyjnej w czasie 336 h (2 tygodni) [H3].

Podczas analizy procesu dyfuzji niespełniających warunków klasycznej teorii dyfuzji Ficka wykorzystano dwa modele: model wykorzystujący warunki brzegowe zmienne w czasie oraz model dwustopniowy. Uzyskane wyniki rozkładu koncentracji wilgoci były następnie wykorzystywane do określenia higro-mechanicznego zachowania się próbki. Uzyskane wartości numeryczne [H3], dla miejsc, gdzie były wbudowane czujniki, porównano z wartościami z badań eksperymentalnych [H2] i rozwiązania analitycznego opartego na modelu Langmuira [H2]. Stwierdzono, że oba zaproponowane modele numeryczne dokładniej odwzorowują krzywą eksperymentalną niż zaproponowany wcześniej model analityczny [H3] (Rys. 6(a)). Nowością tego postępowania jest zaproponowane podejście do modelowania zmian odkształceń w warstwie adhezyjnej związanych z wpływem dyfundującej wody.



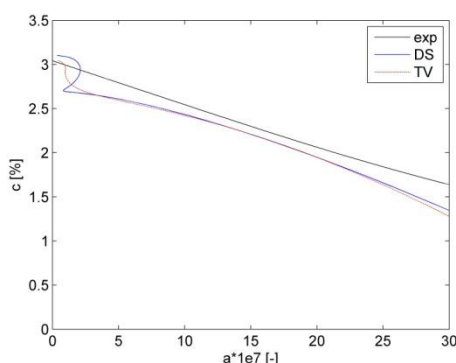
Rys. 6. Porównanie wartości (a) średniego stężenia wilgoci [%], (b) odkształceń związanych z procesami dyfuzyjnymi w warstwie adhezyjnej; exp – eksperyment, L – model Langmuira, TV – model wykorzystujący warunki brzegowe zmienne w czasie, DS – model dwustopniowy [H3]

Przestrzenny rozkład stężenia wilgoci uzyskany z analiz dyfuzji wprowadzono (jako dane wejściowe) do analizy mechanicznej. Pozwoliło to na wyznaczenie rozkładu odkształceń mechanicznych w warstwie adhezyjnej połączenia klejowego oraz określenie stopnia deformacji połączenia klejowego spowodowanego przez absorpcję wilgoci. Podczas analiz mechanicznych uwzględniono wpływ masy górnego kompozytowego elementu łączonego (leżącego na warstwie adhezyjnej) oraz interakcję pomiędzy kompozytowymi elementami łączonymi a warstwą adhezyjną. Została ona zdefiniowana jako interakcja kontaktowa z tarcieniem o wysokim współczynniku (0,9). Analizowano również wpływ dodatkowej siły zewnętrznej, czyli ciśnienia słupa wody (o wysokości 5 mm) działającego na powierzchnię próbki, na wartości odkształceń w warstwie adhezyjnej [H3]. Nowością tego postępowania jest stworzenie modeli numerycznych procesu namaczania połączenia klejowego pozwalającego na określanie zmian odkształcenia w dowolnym miejscu połączenia i uwzględnienie w przeprowadzonych analizach numerycznych wpływu elementów łączonych i oddziaływania ciśnienia słupa wody.

Z analiz eksperymentalnych i numerycznych uzyskano zależności między wartościami odkształcenia a stężeniem wilgoci w warstwie adhezyjnej związanej z dyfuzją wody w miejscach, gdzie w próbkę wbudowano czujniki światłowodowe typu FBG. Zależności te porównano ze sobą –

Rys. 6(b). Zaobserwowano, że wartości odkształceń wyznaczone numerycznie są wyższe niż eksperymentalne. Największa różnica wynosi 35% i występuje dla modelu dwustopniowego przy stężeniu wilgoci w warstwie adhezyjnej równym 1,6% [H3]. Nowością tego postępowania jest stworzenie modeli numerycznych procesu namaczania połączenia klejowego pozwalającego na określanie zmian odkształcenia w dowolnym miejscu połączenia. Powstałe modele pozwalają na optymalizację ułożenia wbudowanych czujników światłowodowych do określenia stopnia zawilgocenia.

Analogicznie jak w przypadku wartości analitycznych i eksperymentalnych, uzyskane wartości numeryczne wykorzystano do stworzenia współczynnika pozwalającego na określenie stopnia zawilgocenia materiału w dowolnej chwili czasowej. W tym celu podzielono uzyskaną z obliczeń numerycznych zależność odkształcenia od czasu na jednogodzinne odcinki, z których każdy aproksymowano przy pomocy funkcji liniowej. Stworzono w ten sposób zależność pomiędzy ilością wilgoci w materiale a współczynnikami kierunkowymi funkcji liniowych. W celu sprawdzenia przydatności modeli numerycznych do określenia stopnia zawilgocenia połączenia klejowego porównano wyniki uzyskane z analiz numerycznych i eksperymentalnych (Rys. 7). Zaobserwowano, że uzyskane różnice, pomiędzy wartościami wyznaczonymi eksperymentalnie i numerycznie są w zakresie 3–9% niezależnie od wybranego modelu numerycznego. Najlepsze odwzorowanie krzywej eksperymentalnej uzyskano dla stężenia wilgoci w zakresie 1,9–2,4% [H3].



Rys. 7. Zależność stopnia zawilgocenia od wartości współczynników kierunkowych prostych dla różnych stopni zawilgocenia; exp – eksperyment, TV – model wykorzystujący warunki brzegowe zmienne w czasie, DS – model dwustopniowy [H3]

Istotnym osiągnięciem mojej pracy badawczej jest stworzenie modelu numerycznego i zaadaptowanie go do własnej metody służącej do określenia stopnia zawilgocenia dowolnego połączenia klejowego. Znając charakterystyki materiałowe elementów składowych połączenia możliwe jest określenie jego stopnia zawilgocenia bez konieczności przeprowadzania badań eksperymentalnych dla każdego połączenia osobno.

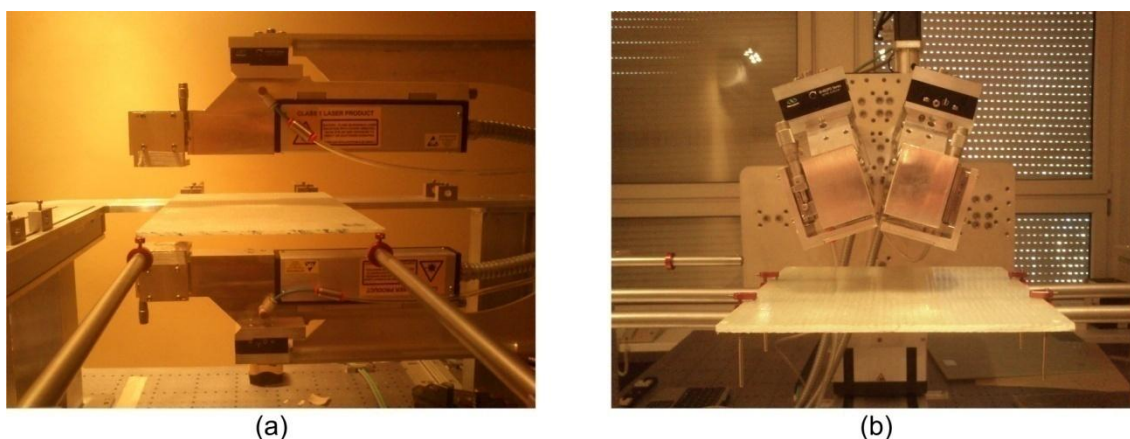
Podsumowując część I, na podstawie przeprowadzonych analiz analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych stwierdzono, że do monitorowania stanu technicznego (diagnostyki) konstrukcji wykonanych z materiałów izotropowych posadowionych w trudnodostępnych obszarach (na morzu, pod wodą) oraz materiałów ortotropowych i ich połączeń klejowych można wykorzystać zjawiska zachodzące w czujnikach światłowodowych typu FBG związane z propagacją fali elektromagnetycznej o długości 1510–1590 nm.

II. Metoda propagacji fal elektromagnetycznych (w zakresie długości fal 0,3–3 mm)

Celem przeprowadzonych badań eksperymentalnych było określenie możliwości opracowania metody wykorzystującej zjawiska związane z propagacją fali elektromagnetycznej (w zakresie

długości fal 0,3–3 mm) w materiale ortotropowym (kompozycie włóknistym o wzmocnieniu włóknem szklanym) do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości / stopnia uszkodzenia: mechanicznego (delaminacji), termicznego materiału oraz światłowodów wbudowanych w strukturę materiału i wtrącenia w postaci kropli wody.

W celu zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcji istotne jest stosowanie różnych metod badań nieniszczących pozwalających na diagnostykę elementów konstrukcji. Jedną z nich jest spektroskopia THz, której zasada działania opiera się na analizie interakcji fali elektromagnetycznej o częstotliwości z zakresu 0,1–10 THz (w zakresie długości fali 0,3–3 mm) z badanym materiałem. W dalszej części pracy fala elektromagnetyczna o wyżej wymienionych częstotliwościach będzie określana jako fala THz. Metoda ta może być stosowana do badania jedynie materiałów nieprzewodzących, np. kompozyt włóknisty o zbrojeniu włóknem szklanym i osnowie polimerowej. Pozwala ona na detekcję i lokalizację nieciągłości, które wpływają na: współczynnik refrakcji, współczynnik absorpcji, rozproszenie fali na powierzchni elementu albo wtrąceniu wewnątrz materiału. Moc generowana przez wiązkę promieniowania THz jest bardzo niska ($<1 \mu\text{W}$), więc ryzyko zniszczenia delikatnych materiałów jest bardzo ograniczone.



Rys. 8. Spektrometr THz z głowicami ustawionymi w układzie: (a) przejścia, (b) odbicia

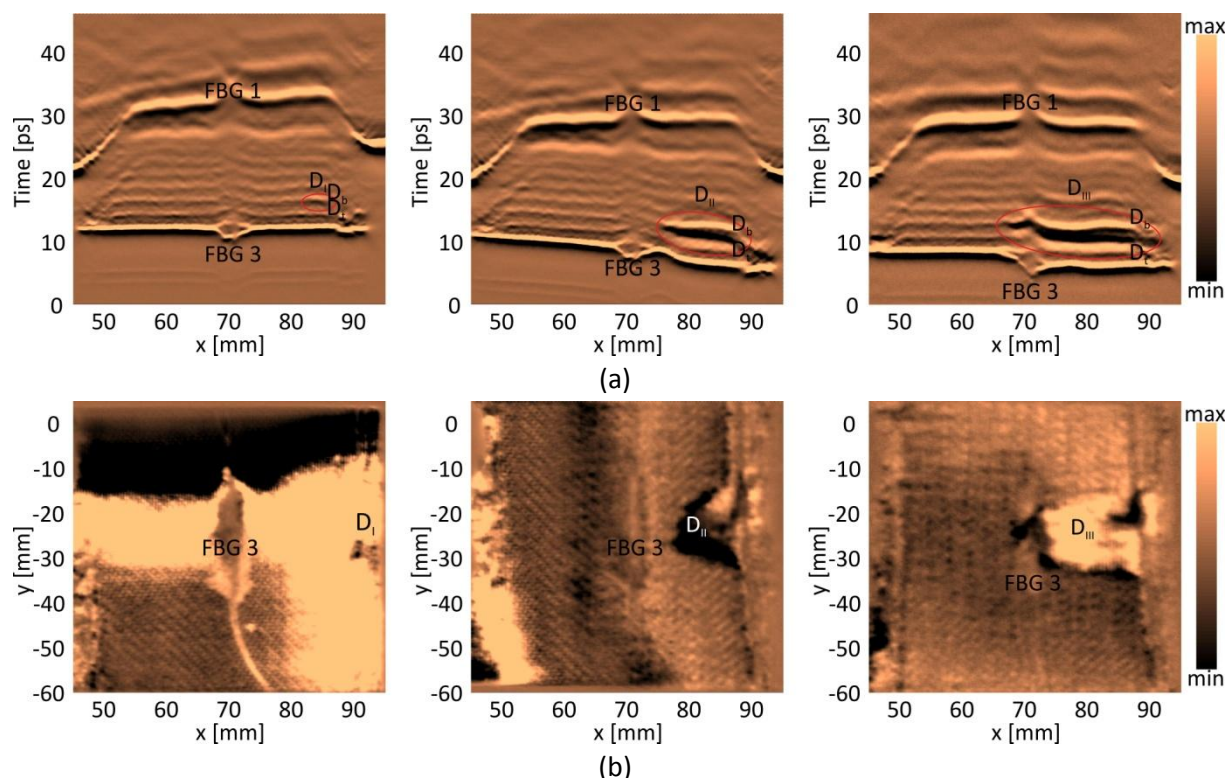
Podczas badań wykorzystano spektrometr impulsowy, w którym impuls femto-sekundowego lasera doprowadzany jest przez światłowod do głowicy sondy. W sondzie znajdują się: emiter i detektor promieniowania terahercowego. Głowice spektrometru można ustawić na dwa sposoby i pomiary przeprowadzać w stanie przejścia albo odbicia (Rys. 8). W pierwszej metodzie obie głowice znajdują się na przeciwko sobie po obu stronach próbki a mierzona fala THz musi przejść przez całą grubość badanego elementu. W drugiej metodzie obie głowice są umieszczone po tej samej stronie próbki i mierzona jest fala THz obita od granic ośrodków (powietrze / powierzchnia próbki, warstw laminatu, materiał rodzimy / wtrącenie, etc.). Metoda transmisji pozwala na określenie zmian zachodzących w materiale związanym, np. z jego degradacją lub wtrąceniem bez możliwości lokalizacji nieciągłości po grubości elementu. Natomiast metoda odbicia pozwala na wyznaczenie położenia każdej z granic ośrodków po grubości analizowanej próbki, i w związku z tym umożliwia lokalizację i określenie wielkości lokalnej nieciągłości.

Wyniki badań z wykorzystaniem spektroskopii THz są najczęściej przedstawiane w postaci wykresów zmian amplitud sygnałów w czasie lub charakterystyk amplitudowo–częstotliwościowych oraz map określanых jako skany typu B albo C (z ang. *B-scan*, *C-scan*). Są to metody obrazowania powszechnie stosowane w technikach badań nieniszczących stosowanych w medycynie (np. optyczna tomografia koherencyjna) i technice (np. defektoskopia ultradźwiękowa). Wykres zmian amplitud

sygnałów w czasie zawiera informacje o materiałach (granicach materiałów), przez które przechodzi fala THz. W przypadku metody odbicia jest on sumą wszystkich impulsów odbitych od każdej granicy ośrodka. Impulsy docierają do odbiornika z opóźnieniem czasowym zależnym od współczynników refrakcji ośrodków, przez które propaguje fala THz. Na ostateczny kształt zmierzzonego sygnału wpływają również współczynniki absorpcji, które zmieniają amplitudy maksimów sygnału. Skan typu B prezentuje mapę amplitud sygnałów na płaszczyźnie wyznaczonej przez wymiar w przestrzeni i czas. Pozwala on na analizę przekroju poprzecznego badanego elementu i lokalizację nieciągłości (wtrąceń, uszkodzeń, itp.) po grubości materiału. Skan typu C, w najprostszej formie, przedstawia mapę zmian amplitud sygnału w wybranej chwili czasowej pokazaną na płaszczyźnie wyznaczonej przez dwa wymiary w przestrzeni.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na próbkach wykonanych z materiału o cechach ortotropowych (kompozytu włóknistego o wzmocnieniu z włókien szklanych i osnowie polimerowej). Wszystkie analizowane próbki wykonano metodą infuzji przy współpracy firmy Cree Yacht w Rekowie Górnym (województwo pomorskie). Ze względu na proces wytwarzania powierzchnie próbki znacznie różniły się chropowatością: jedna z nich była gładka, a druga chropowata. Badania prowadzono dla dwóch ustawień głowic spektrometru THz: w opcjach transmisji i odbicia.

Analizowanym uszkodzeniem mechanicznym była delaminacja w prostokątnej ośmiowarstwowej próbce (laminacie) z przyklejonymi na powierzchni czterema czujnikami światłowodowymi typu FBG. Uszkodzenie znajdowało się w obszarze pomiędzy parą czujników. Analizowano możliwość detekcji, lokalizacji i określenia wielkości uszkodzenia. Rozważano trzy wielkości delaminacji ($D_I = 8$ mm, $D_{II} = 20$ mm, $D_{III} = 28$ mm) rozumiane jako długość uszkodzenia.



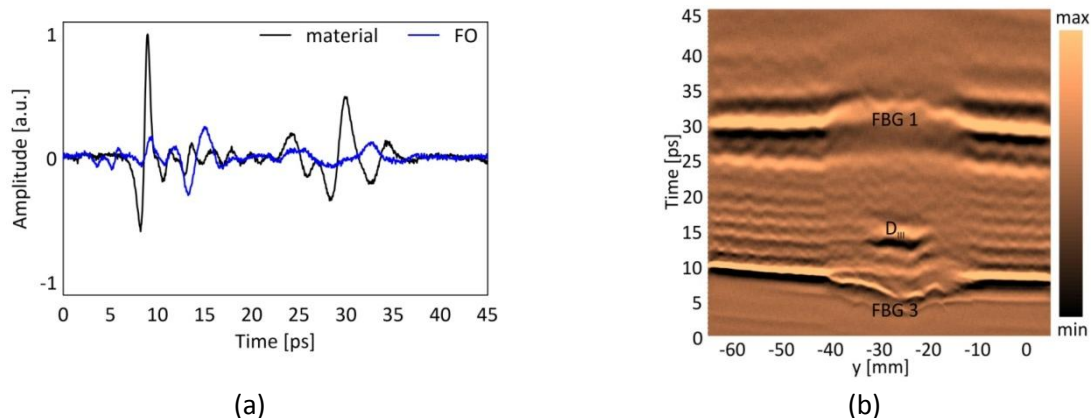
Rys. 9. Skany typu (a) B, (b) C próbki z delaminacją; D_I , D_{II} – odbicia od górnej, dolnej powierzchni [H7]

Przetwarzanie (filtrowanie, normalizacja) zmierzonych przez spektrometr THz sygnałów zawierających interakcję fal elektromagnetycznych ze strukturą materiału pozwoliło na określenie budowy wewnętrznej laminatu: ilość, grubość warstw, itp. oraz detekcję, lokalizację i określenie

wielkości (długości, kształtu i zajmowanej powierzchni) delaminacji. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci map (skany typu B i C) pokazujących zmiany uszkodzenia wraz z jego rozwojem – Rys. 9. Skany typu C wykonano dla płaszczyzny dolnej powierzchni delaminacji. Przed wykonaniem mapy odfiltrowano z sygnału wpływ chropowatości powierzchni próbki, jej krzywizny i lokalnej zmiany grubości wywołanej uszkodzeniem. Zauważono, że próbka w miejscu z delaminacją jest widocznie grubsza niż w miejscu nieuszkodzonym. Dla wszystkich etapów rozwoju delaminacji (D_I , D_{II} i D_{III}) widoczne są odbicia od górnej i dolnej powierzchni delaminacji, czyli granic ośrodków materiał / powietrze oraz powietrze / materiał. Na skanach typu B widoczny jest również wpływ światłowódów przyklejonych na powierzchni próbki na propagację fali elektromagnetycznej – jej rozproszenie [H7].

Zastosowana metoda pozwoliła na określenie położenia delaminacji po grubości próbki. Stwierdzono, że uszkodzenie znajduje się pomiędzy drugą i trzecią warstwą próbki (laminatu) licząc od jej powierzchni. Zaobserwowano również wpływ kleju, którym przyklejone są czujniki na sztywność analizowanej próbki – lokalne usztywnienie w miejscu, gdzie znajdują się czujniki. Określono również powierzchnię uszkodzenia dla każdego etapu delaminacji [H7]. Nowością tego postępowania jest analiza wielkości delaminacji znajdującej się w obszarze pomiędzy dwoma czujnikami światłowodowymi typu FBG z wykorzystaniem spektroskopii THz. Uzyskane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi dla dwóch metod diagnostycznych: bazującej na zmianie położenia osi obojętnej wyznaczonej w oparciu o wartości odkształceń zmierzonych przez czujniki światłowódów typu FBG oraz techniki wibrotermografii w podczerwieni. Wyniki uzyskane metoda spektroskopii THz pozwoliły na wyjaśnienie obserwowanych zjawisk, np. większą powierzchnię delaminacji D_{II} niż D_{III} wyznaczoną przy pomocy techniki wibrotermografii, a związanej z lokalnym usztywnieniem spowodowanym przez obecność kleju [H7].

Na podstawie wielu analiz stwierdzono, że fala THz jest rozpraszana na powierzchni okrągłego światłowodu znajdującego się na powierzchni elementu. Powoduje to silne stłumienie sygnału docierającego do detektora, a w związku z tym trudności z analizą fragmentów próbek znajdujących się pod powierzchnią światłowodu. Mimo, iż światłowód jest wykonany z materiału nieprzewodzącego – szkła kwarcowego z polimerową osłoną.



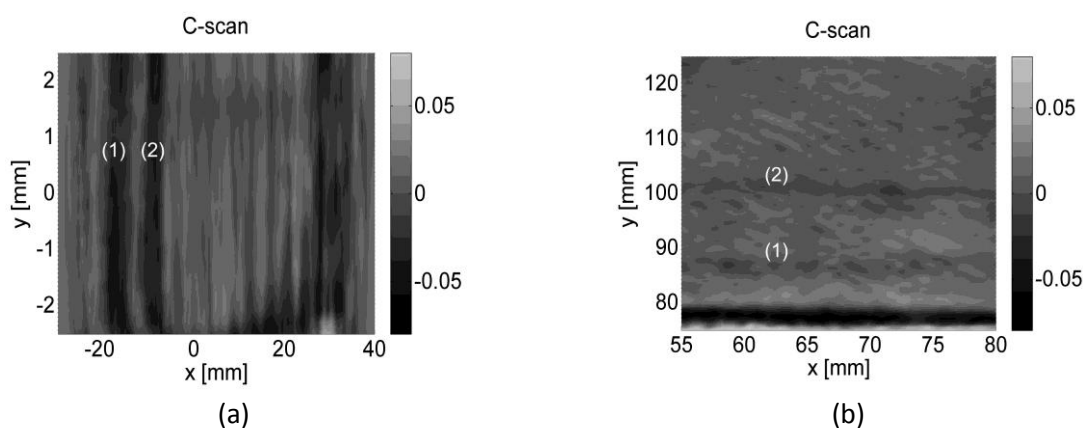
Rys. 10. Delaminacja D_{III} (a) porównanie sygnałów dla materiału i światłowodu, (b) skan typu B dla płaszczyzny równoległej do czujników światłowodowych typu FBG [H7]

Przykładem takiego wpływu światłowodu jest porównanie sygnałów zmierzonych na próbce (wykonanej z kompozytu włóknistego o zbrojeniu włóknem szklanym) w miejscu bez / i z czujnikiem światłowodowym typu FBG przyklejonym na powierzchni – Rys. 10 [H7]. Zjawisko to jest bardzo dobrze widoczne na fragmencie mapy wykonanej w miejscu zamocowania czujników światłowódowych typu FBG w płaszczyźnie do nich równoległej (Rys. 10). Porównując sygnały

zmierzone dla materiału bez / i z czujnikiem stwierdzono, że rozproszenie fali na światłowodzie powoduje, że tylko 63% energii fali THz (w porównaniu do miejsca bez czujnika) jest propagowana dalej w głąb materiału [H7]. Nowością tego postępowania jest określenie wpływu światłowodu znajdującego się na powierzchni próbki na falę THz propagującą w głąb materiału.

Analizowano możliwość detekcji i lokalizacji uszkodzenia (delaminacji) znajdującej się pomiędzy dwoma przyklejonymi światłowodowymi. Stwierdzono, że mimo rozproszenia fali THz można określić położenie uszkodzenia (między drugą a trzecią warstwą) oraz jej szerokość dla wybranego przekroju poprzecznego próbki [H7]. Nowością tego postępowania jest określenie możliwości detekcji i lokalizacji uszkodzenia znajdującego się pod światłowodem przyklejonym na powierzchni próbki.

Przeprowadzono badania dotyczące możliwości wykorzystania spektroskopii THz do detekcji, lokalizacji i określenia położenia światłowodów wbudowanych w materiał kompozytu włóknistego o zbrojeniu z włókien szklanych. Podczas badań eksperymentalnych porównywano zachowanie się fali THz podczas interakcji ze światłowodem leżącym na powierzchni próbki oraz wbudowanym w jego strukturę. Dla światłowodu umieszczonego na metalowej powierzchni przeprowadzono analizę geometryczną propagacji fali THz (rozproszenia) podczas interakcji z okrągłym światłowodem i stwierdzono jaka część promieniowania THz odbitego od niego dociera do odbiornika [H6].



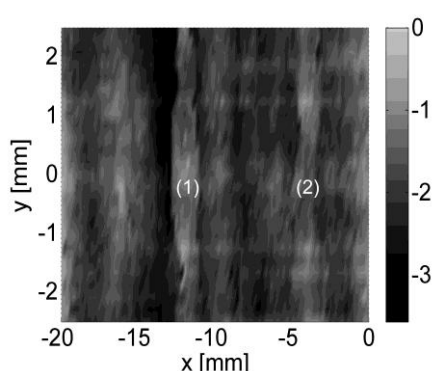
Rys. 11. Skany typu C pokazujące światłowody wbudowane i leżące: (a) równoległe (b) prostopadłe do osi y spektrometru THz [H6]

Ze względów materiałowych i geometrycznych istnieje duże podobieństwo pomiędzy wiązkami włókien w tkaninie z włókien szklanych używanej do tworzenia laminatów a światłowodem. W przypadku światłowodów wbudowanych do kompozytu główna różnica pomiędzy nimi dotyczy materiału osnowy czyli żywicy. Tkanina tworząca warstwę laminatu jest nią nasączona równomiernie, natomiast światłowód jest nią otoczony. Stwierdzono, że mimo widocznych podobieństw materiałowych wpływ geometrii światłowodu powodujący rozproszenie fali THz jest na tyle duży, że możliwe jest wykorzystanie tego zjawiska do detekcji i lokalizacji światłowodów wbudowanych w materiał kompozytu o wzmocnieniu włóknami szklanymi [H4], [H6]. Nowością tego postępowania jest wykorzystanie fali THz do detekcji i lokalizacji światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy.

Parametry materiałowe, dla fali elektromagnetycznej w zakresie THz, światłowodu i włókien szklanych w tkaninie użytej do stworzenia laminatu są do siebie zbliżone. Wbudowane światłowody mają lokalny wpływ na kształt sąsiednich warstw tkaniny powodując ich deformację związaną z wprowadzeniem do struktury materiału dodatkowego obiektu. Stwierdzono, że okrągły kształt światłowodu powoduje rozproszenie fali THz, co pozwala na jego detekcję i lokalizację.

Zaobserwowano również, że wpływ światłowodu jest widoczny na warstwach laminatu powyżej niego, zgodnie z sekwencją budowania laminatu podczas procesu wytwarzania [H6]. Nowością tego postępowania jest analizowanie struktury materiału kompozytowego z wbudowanymi światłowodami i określenie przy pomocy fali THz wpływu sposobu wytwarzania na budowę wewnętrzną elementu w najbliższym sąsiedztwie światłowodów.

Rozważano dwa ułożenia wbudowanych do kompozytu światłowodów względem osi spektrometru THz: równoległe albo prostopadłe do osi y spektrometru. Stwierdzono, że w obu przypadkach można określić położenie światłowodów, ale ze względu na budowę spektrometru THz detekcja i lokalizacja światłowodów leżących prostopadłe do osi y jest utrudniona (Rys. 11). Stwierdzono, że można określić średnicę światłowodu z dokładnością w zakresie od 0.14–5% [H6]. Nowością tego postępowania jest analizowanie wpływu ułożenia światłowodów względem osi spektrometru na możliwość ich detekcji i lokalizacji.



Rys. 12. Mapa powstała z wykorzystaniem rozplotu dwóch funkcji pokazująca położenie światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy [H6]

Podjęto próbę stworzenia szybkiej metody detekcji i lokalizacji światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy o zbrojeniu szklanym w oparciu o rozplot dwóch funkcji. Stworzona metoda pozwoliła na detekcję i lokalizację światłowodów równoległych do osi y spektrometru THz. Na Rys. 12 przedstawiono mapę pokazującą położenie światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy [H6]. Nowością tego postępowania jest zastosowanie rozplotu do detekcji i lokalizacji światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy o zbrojeniu włóknem szklanym.

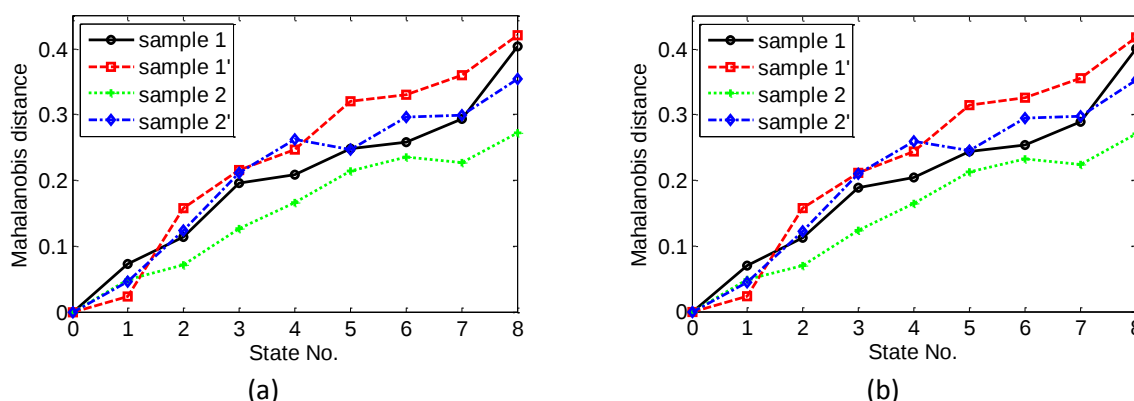
Metoda wytwarzania próbek spowodowała, że na powierzchni widoczny jest charakterystyczny wzór odpowiadający geometrii materiału użytego do rozprowadzania żywicy podczas procesu infuzji. W celu zminimalizowania wpływu wzoru i chropowatości powierzchni stworzono filtr, którego użycie pozwala na bardziej dokładne określenie położenia i średnicy wbudowanego światłowodu [H4]. Nowością tego postępowania jest stworzenie filtra pozwalającego na dokładniejszą detekcję i lokalizację światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy o zbrojeniu włóknem szklanym.

Analizowano również możliwość detekcji i lokalizacji światłowodów wbudowanych w warstwę adhezyjną pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z materiału kompozytowego przy pomocy fali THz dla spektrometru z głowicami ustawionymi w trybie przejścia. Stwierdzono, że rozproszenie fali THz na światłowodzie jest na tyle silne, że istnieje możliwość jego detekcji oraz określenia położenia wzdłuż próbki [H2]. Nowością tego postępowania jest analiza zachowania się fali THz propagującej się przez połączenie klejowe z wbudowanymi światłowodami i z czujnikami FBG pod kątem jego detekcji i lokalizacji.

Większość analiz z wykorzystaniem spektroskopii THz dotyczy mechanicznych uszkodzeń w materiałach (np. pęknięć, delaminacji, pustek). W przeciwieństwie do uszkodzeń mechanicznych uszkodzenia termiczne nie mają wyraźnej granicy pomiędzy fragmentem uszkodzonym a nieuszkodzonym, od której odbijają się fale elektromagnetyczne.

Celem przeprowadzonych badań eksperymentalnych było określenie możliwości zastosowania spektroskopii THz do oceny stopnia degradacji termicznej elementu z kompozytu włóknistego ze zbrojeniem z włókien szklanych przebywającego przez określony czas w podwyższonej temperaturze. Zakres temperatur określono na podstawie literatury oraz informacji od producenta. Kompozyty włókniste ze wzmocnieniem w postaci długich włókien są silnie niejednorodne strukturalnie, tzn. w zależności od wybranego punktu inna jest zawartość procentowa włókien i osnowy. Wpływa to na wyniki pomiarów przy pomocy spektrometru THz. Dodatkowo na dokładność pomiaru wpływają: chropowatość powierzchni oraz lokalne zmiany grubości elementu. W celu zminimalizowania wpływu tych czynników pomiary były prowadzone w wielu punktach (10000), a do określenia stopnia degradacji wykorzystano analizę statystyczną [H8].

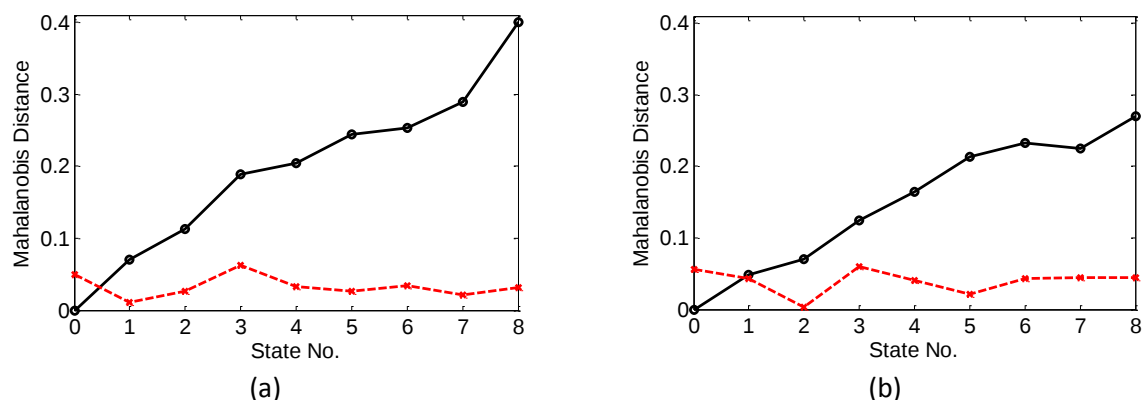
Podczas pomiarów głowice spektrometru THz były ustawione w układzie transmisji. Porównując sygnały zmierzone dla obszaru między głowicami bez / i z próbką wyznaczono współczynniki absorpcji i refrakcji dla materiału nieuszkodzonego. Analogicznie wyznaczano wartości tych parametrów dla materiału po kolejnych etapach nagrzewania. Zmiany tych parametrów wykorzystano do określenia stopnia degradacji materiału [H8]. Nowością tego postępowania jest zastosowanie zjawisk związanych z propagacją fali THz do określenia stopnia degradacji termicznej materiału kompozytowego.



Rys. 13. Porównanie odległości Mahalanobisa wyznaczonych dla: (a) parametrów sygnału zmierzonego, (b) parametrów materiałowych próbki [H8]

Do określenia podobieństw i różnic pomiędzy zbiorami danych zastosowano odległość Mahalanobisa, która jest bezwymiarowa i niezależna od skali zmiennych, a podczas jej obliczania wykorzystywana jest korelacja zbioru danych. Nie zaobserwowano wyraźnej zależności pomiędzy stopniem degradacji termicznej materiału a zmianą współczynnika absorpcji. Zależność taką zaobserwowano natomiast dla współczynnika refrakcji. Ze względu na stałą grubość próbki, oba te parametry są proporcjonalne do czasu i amplitudy maksimum sygnału. Spowodowało to, że odległości Mahalanobisa wyznaczone dla parametrów sygnału i parametrów materiałowych próbki mają zbliżony kształt (Rys. 13). Dla wszystkich etapów wartość odległości Mahalanobisa zależy od czasu wystawienia próbki na działanie podwyższonej temperatury – rośnie wraz z czasem ekspozycji [H8]. Nowością tego postępowania jest zastosowanie odległości Mahalanobisa do stworzenia metody określenia stopnia degradacji termicznej materiału kompozytowego w oparciu o pomiary zmian

parametrów materiałowych (współczynnik absorpcji, współczynnik refrakcji) w zakresie THz fali elektromagnetycznej.

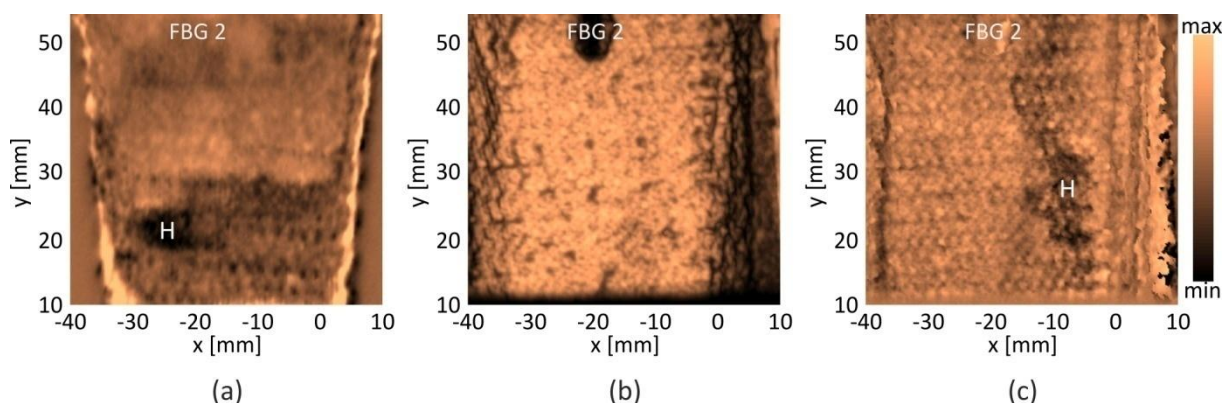


Rys. 14. Odległości Mahalanobisa pomiędzy stanem obecnym a referencyjnym (czarna linia ciągła) oraz dla dwóch różnych zbiorów punktów dla tego samego stanu (czerwona linia przerywana) dla: (a) próbki 1, (b) próbki 2 [H8]

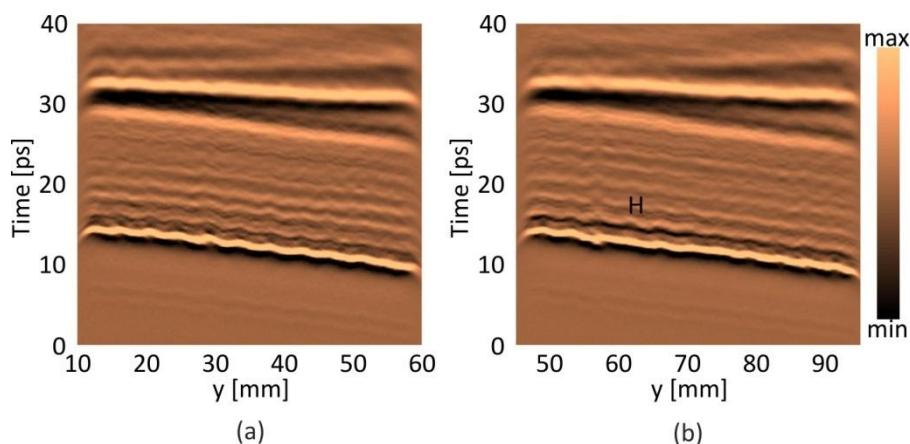
Porównanie odległości Mahalanobisa wyznaczonych pomiędzy stanem obecnym a referencyjnym oraz dla dwóch różnych zbiorów punktów dla tego samego stanu (Rys. 14) pozwoliło na stwierdzenie, że wartość błędu pomiarowego jest niewielka w porównaniu z wartościami odległości Mahalanobisa związanymi z degradacją termiczną i wynosi ok. 0,05. W związku z tym tylko pierwszy poziom degradacji termicznej może nie zostać wykryty w oparciu o zaproponowaną metodę [H8].

Osiągnięcie polega na stworzeniu metody bazującej na propagacji fali THz pozwalającej na detekcję uszkodzenia termicznego w materiale kompozytowym. Odpowiednia liczba punktów pomiarowych w połączeniu z analizą statystyczną pozwala na identyfikację zmian strukturalnych pojawiających się w niejednorodnym materiale.

Analizowano również możliwość zastosowania propagujących się fal THz do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości uszkodzenia materiału kompozytowego w postaci lokalnego przegrzania. Zaobserwowano, że przegrzanie próbki spowodowało jej wygięcie oraz lokalną zmianę koloru powierzchni. W celu uzyskania informacji na temat lokalnego przegrzania próbki odfiltrowano wpływ jej chropowatości oraz wpływ krzywizny [H7].



Rys. 15. Skany typu C: (a) powierzchnia próbki bez filtrowania, (b) powierzchnia próbki po filtrowaniu, (c) druga warstwa po filtrowaniu; H – nieciągłość (uszkodzenie) spowodowane przegrzaniem [H7]



Rys. 16. Skany typu B próbki – przekrój poprzeczny próbki: (a) lewa strona, (b) prawa strona; H – nieciągłość (uszkodzenie) spowodowane przegrzaniem [H7].

W celu określenia wpływu lokalnego przegrzania stworzono kilka map w postaci skanów typu C i B obrazujących fragment próbki z lokalnym przegrzaniem – Rys. 15, Rys. 16. Mapa (skan typu C) dla powierzchni próbki, powstała bez usunięcia wpływu jej krzywizny, pozwala na określenie położenia lokalnego przypalenia powierzchni w postaci lokalnego minimum – ciemniejszy obszar w miejscu oznaczonym literą 'H' na powierzchni próbki. Porównując skany typu B wykonane dla prawej i lewej strony próbki zaobserwowano, że na mapie wykonanej dla prawej strony próbki pomiędzy pierwszą i drugą warstwą widoczna jest ciemniejsza linia – granica ośrodków. Na mapie (skan typu C) dla chwili czasowej odpowiadającej odległości między pierwszą a drugą warstwą wyraźnie widoczny jest obszar nieciągłości. W celu wykonania takiego obrazu konieczne było filtrowanie sygnału, które pozwoliło na zmniejszenie wpływu krzywizny próbki. Widoczne obszary (granice ośrodków) wskazują na pojawienie się lokalnej nieciągłości, być może delaminacji wywołanej przegrzaniem albo zmianą w strukturze żywicy epoksydowej na granicy warstw laminatu [H7]. Nowością tego postępowania jest zastosowanie fali THz do detekcji i lokalizacji uszkodzenia wewnątrz próbki spowodowanego lokalnym przegrzaniem. Uszkodzenie to było zbyt małe, aby można było je wykryć metodą wibrotermografii, natomiast jego obecność potwierdzono przy pomocy analiz propagacji fal Lamba z wykorzystaniem wibrometru laserowego.

Innym rodzajem uszkodzenia jest wtrącenie w postaci kropli wody, która została wprowadzona do struktury kompozytu włóknistego o zbrojeniu włóknem szklanym podczas procesu wytwarzania. Ten typ uszkodzenia został zaproponowany przez firmę Cree Yacht, która zajmuje się wytwarzaniem konstrukcji (m.in. łodzi) z materiałów kompozytowych o zbrojeniu włóknami i osnowie polimerowej. W rzeczywistości taka ilość wody może zostać wprowadzona do struktury materiału na skutek błędów w procesie produkcyjnym. Wilgoć w dużym stopniu wpływa na termo–mechaniczne właściwości żywicznej osnowy materiału kompozytowego powodując znaczący spadek wytrzymałości elementu. Wilgoć wbudowana w strukturę materiału ma bardzo ograniczoną możliwość opuszczenia materiału, więc jej negatywny wpływ na wytrzymałość elementu może być większy niż w przypadku wody dyfundującej w głąb materiału ze środowiska. W związku z powyższym istotne jest jej wykrywanie, lokalizowanie, określenie wielkości zanieczyszczonego obszaru oraz określenie ilości wilgoci w zanieczyszczonym fragmencie materiału.

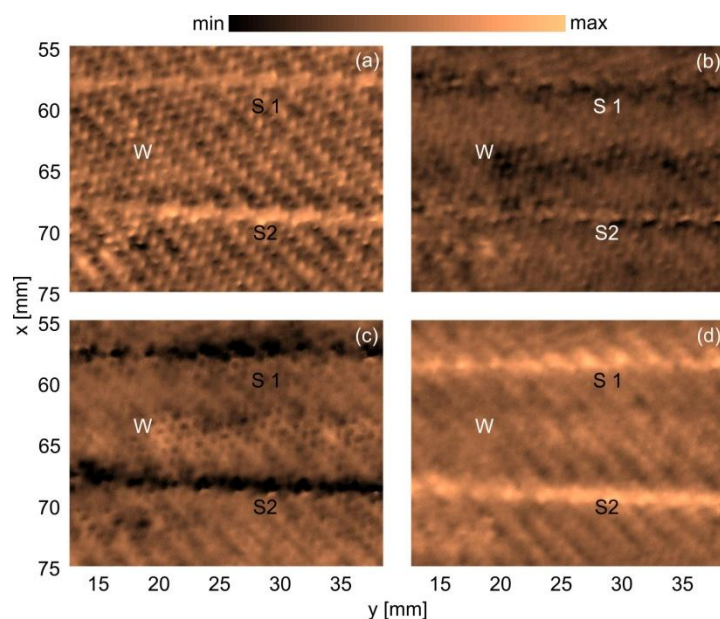
Zdolność fal THz do propagacji przez ciecze polarne (woda) jest w dużym stopniu ograniczona. Woda silnie absorbuje (pochłania) promieniowanie THz, podczas gdy materiały absorbujące wilgoć jak materiały polimerowe (żywica epoksydowa, która jest osnową w wielu materiałach kompozytowych) są zazwyczaj transparentne (przepuszczają fale THz). W związku z tym, metodę spektroskopii THz można wykorzystać do detekcji i lokalizacji nawet niewielkiej ilości wody.

Możliwość zastosowania spektroskopii THz do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości wtrącenia w postaci kropli wody analizowano na czterowarstwowym laminacie wykonanym z kompozytu włóknistego o osnowie z żywicy polimerowej. W jego strukturę (między pierwszą a drugą warstwą, licząc od dolnej strony próbki) wbudowano dwa światłowody z czujnikami światłowodowymi typu FBG. Pomiedzy nimi wprowadzono zanieczyszczenie – wtrącenie w postaci kropli wody (50mm^3 – ok. 0,3% objętości próbki). Takie działania symulowały możliwy błąd podczas wytwarzania elementu z kompozytu włóknistego z wbudowanym systemem czujników optycznych [H4], [H5].

Na podstawie zgrubnej analizy wyników spektroskopii THz założono, że grubość wtrącenia w postaci kropli wody jest zbliżona do odległości pomiędzy warstwą pierwszą a drugą. Zaobserwowano, że podczas procesu wytwarzania próbki warstwy tkaniny ograniczały możliwość przemieszczania się wody z płynącą żywicą. Duże napięcie powierzchniowe wody pozwoliło dodatkowo założyć, że wbudowane wtrącenie ma kształt zbliżony do kuli (kropli). Z drugiej strony obszar zawilgocony może być większy, jeżeli pod uwagę zostanie wzięty obszar z mieszaniną żywicy i wody [H4], [H5]. Nowością tego postępowania jest przeprowadzenie analiz z wykorzystaniem spektroskopii THz pozwalającej na określenie położenia wtrącenia wody w laminacie.

Wyznaczono eksperymentalnie parametry materiałowe kompozytu włóknistego o zbrojeniu z włókna szklanego dla fali elektromagnetycznej w zakresie THz. Porównano parametry materiałowe (współczynnik absorpcji i refrakcji) dla materiału kompozytowego i wody dla wybranej częstotliwości fali elektromagnetycznej (0,5 THz) odpowiadającej maksymalnej amplitudzie w widmie amplitudowo–częstotliwościowym wyznaczonym dla materiału kompozytowego. Wyższy współczynnik absorpcji wody powoduje większe tłumienie fali THz przechodzącej przez obszar zawilgocony niż przez materiał kompozytowy [H4], [H5]. Nowością tego postępowania jest porównanie wyznaczonych eksperymentalnie parametrów materiałowych (współczynnika absorpcji i refrakcji) dla analizowanego materiału kompozytowego i wody.

Ze względu na odległość wtrącenia od powierzchni próbki oraz chropowatość powierzchni pierwsze badania przeprowadzono od gładkiej strony próbki, dla której odległość wtrącenia od powierzchni była mniejsza (jedna warstwa). Przeprowadzona analiza obejmowała porównanie sygnałów w dziedzinie czasu oraz wyznaczonych charakterystyk amplitudowo–częstotliwościowych. Stwierdzono, że różnice te występują lokalnie w postaci zmniejszenia maksimum amplitudy i związane są z odbiciem od drugiej warstwy próbki. Ograniczają się one zatem do fragmentu sygnału pomiędzy dwiema warstwami [H4]. Nowością tego postępowania jest przeprowadzenie analiz dotyczących wpływu wtrącenia wody o niewielkiej objętości (do 50 mm^3) w strukturę kompozytu włóknistego o zbrojeniu szklanym na propagację fali THz w materiale.



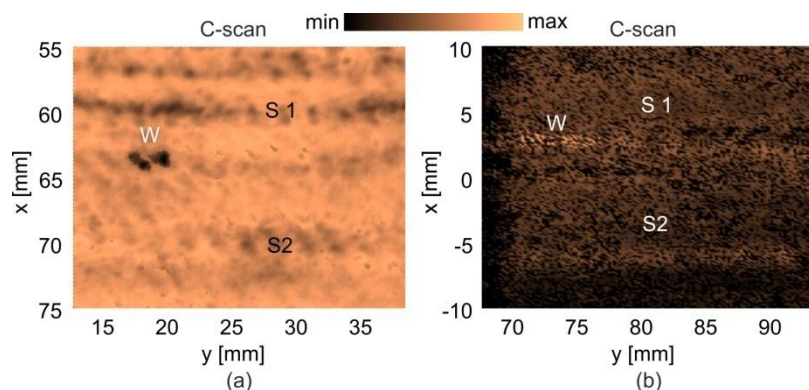
Rys. 17. Sekwencja czterech skanów typu C [H4]

Na podstawie wyników analiz wpływu wody na amplitudy sygnałów w dziedzinie czasu stworzono serię map (skanów typu C) odpowiadających fragmentowi próbki od pierwszej do drugiej warstwy. Do wykonania tych map wykorzystano filtr pozwalający na usunięcie wpływu chropowatości powierzchni i krzywizny próbki. Na Rys. 17 przedstawiono sekwencję czterech map dla wybranych równoodległych chwil czasowych pozwalających na pokazanie możliwości detekcji wtrącenia wody. Na wszystkich skanach typu C widoczne są wyraźnie dwa światłowody (oznaczone symbolami S1 i S2) w postaci dwóch prostych, równoległych jasnych albo ciemnych linii. Wtrącenie wody jest widoczne tylko na dwóch środkowych skanach typu C. Potwierdza to założenie, że ilość wody jest niewielka a jej wpływ lokalny i ograniczony do obszaru dwóch pierwszych warstw laminatu. W związku z tym wtrącenie nie jest widoczne na skanach typu C wykonanych dla chwil czasowych przed i po przejściu fali THz przez obszar zawilgocony [H4]. Nowością tego postępowania jest detekcja i lokalizacja wtrącenia wody o niewielkiej objętości (do 50 mm³) w materiale kompozytu włóknistego o zbrojeniu szklanym przy pomocy spektroskopii THz.

W celu określenia wpływu chropowatości i odległości wtrącenia od powierzchni elementu na możliwość detekcji, lokalizacji i określenia kształtu wtrącenia przeprowadzono analizy dla próbki mierzonej przy pomocy spektrometru THz z obydwu stron. Porównano przebiegi czasowe sygnałów oraz charakterystyki amplitudowo–częstotliwościowe zmierzone dla punktów znajdujących się na powierzchni materiału bez / z wtrąceniem wody [H5].

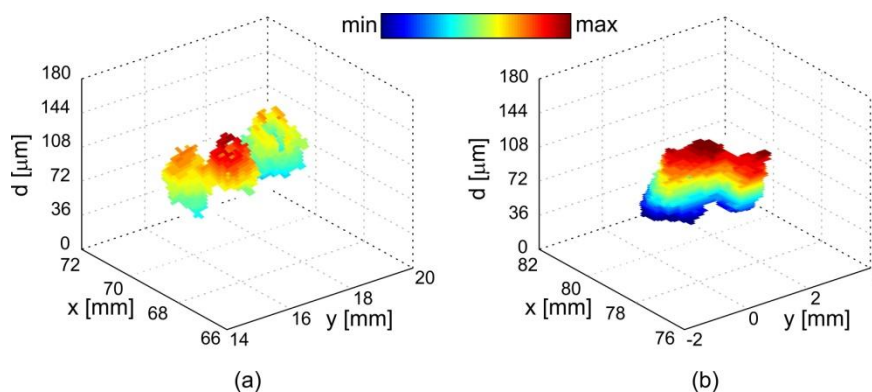
Zaobserwowano, że wtrącenie wody nie stanowi warstwy o jednakowej grubości. Zatem fala THz propaguje w zawilgoconym obszarze przez mieszaninę włókien szklanych, żywicy epoksydowej i wody. Stwierdzono również, że w przypadku pomiaru od chropowatej strony próbki wpływ wody jest widoczny jako zmiana amplitudy. W przypadku strony gładkiej obserwowane jest tłumienie maksimum odbicia od drugiej warstwy laminatu, podczas gdy w drugim przypadku widoczne jest tłumienie minimum na granicy pomiędzy trzecią a czwartą warstwą. W obu przypadkach stwierdzono, że wpływ wilgoci na propagację fal THz przez sąsiadujące warstwy (poprzednie i następne) jest niewielki, niezależnie od odległości pomiędzy wtrąceniem a powierzchnią próbki oraz chropowatości powierzchni próbki [H5]. Nowością tego postępowania jest analiza wpływu chropowatości i odległości od powierzchni elementu na możliwość detekcji wtrącenia w postaci kropli wody w oparciu o analizę fal THz propagujących w materiale.

Na podstawie uzyskanych wykresów sygnałów THz określono maksymalną grubość wtrącenia na 50 μm . Zaobserwowano, że obecność wtrącenia powoduje zmniejszenie amplitudy sygnału o ok. 63–69% w zależności od strony próbki, z której był dokonywany pomiar. Na tej podstawie stwierdzono, że fala THz propagując przez zawilgocony region oddziałuje głównie z materiałem kompozytowym. Wykorzystując prosty model mieszania dwóch składników dla współczynników absorpcji wody i kompozytu wyznaczono stężenie wody w zanieczyszczonym obszarze na ok. 5% [H5]. Nowością tego postępowania jest wyznaczenie wielkości (grubości) wtrącenia w postaci kropli wody oraz stężenia wody w zanieczyszczonym obszarze wykorzystując spektroskopię THz.



Rys. 18. Mapy zanieczyszczeń dla (a) gładkiej, (b) chropowatej powierzchni; W – woda, S1, S2 – światłowody [H5]

W oparciu o różnice w sygnałach stworzono wskaźnik pozwalający na szybkie, zgrubne określenie wielkości (kształtu przekroju poprzecznego) zanieczyszczonego obszaru dla chwili czasowej, dla której zaobserwowano najsilniejszy wpływ obecności wody. Umożliwiło to stworzenie map zanieczyszczeń (Rys. 18) pozwalających na detekcję, lokalizację i określenie wielkości obszaru z wtrąceniem [H5]. Nowością tego postępowania jest stworzenie wskaźnika pozwalającego na detekcję, lokalizację i określenie wielkości wtrącenia w postaci kropli wody na podstawie charakterystyki fal THz propagujących w materiale z zanieczyszczeniem.



Rys. 19. Trójwymiarowy obraz zanieczyszczenia wodą dla: (a) gładkiej, (b) chropowatej powierzchni próbki [H5]

Obiecujące wyniki pionierskich badań zaowocowały ich kontynuacją w celu oceny możliwości zastosowania spektroskopii THz do określenia wielkości wtrącenia wody. W oparciu o różnice w sygnałach w dziedzinie czasu, czyli zmniejszenie amplitudy lokalnego maksimum lub minimum, stworzono metodę filtrowania pozwalającą na wyekstrahowanie kropli wody z otaczającego ją materiału i stworzenie trójwymiarowego obrazu wtrącenia [H4], [H5]. Wyznaczono grubość obszaru

zawilgoconego oraz jego powierzchnię. Na podstawie zmierzonych wartości parametrów materiałowych w zakresie fal THz dla materiału kompozytowego przeliczono zmierzony czas propagacji na odległość jaką przebyła fala w próbce. Ze względu na to, że obecność zanieczyszczenia nie spowodowała zmian w czasie propagacji fali do określenia grubości obszaru zawilgoconego wykorzystano odległości wyznaczone dla materiału kompozytowego. Grubość niejednorodnego wtrącenia wody wyznaczono w zakresie 50–60 μm . Natomiast powierzchnia zanieczyszczonego obszaru od strony gładkiej wynosiła 2 mm x 3 mm, a od strony chropowatej 2 mm x 2 mm. Powstałe różnice mogą być związane z odległością zanieczyszczonego obszaru od powierzchni próbki oraz jej chropowatością, która wpływała na propagację fal THz [H5]. Nowością tego postępowania jest wykorzystanie propagacji fali THz do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości wtrącenia w postaci kropli wody. Osiągnięciem jest także stworzenie metody bazującej na propagacji fali THz służącej do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości wtrącenia w postaci kropli wody.

Podsumowując część II, osiągnięciem jest stworzenie metod bazujących na propagacji fali THz, którą można wykorzystać do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości delaminacji, degradacji termicznej, światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy i wtrącenia w postaci kropli wody.

Podsumowanie części I i II

Podsumowując, osiągnięcie naukowe dotyczy zagadnień związanych z monitorowaniem i oceną stanu technicznego konstrukcji w oparciu o zjawiska związane z propagacją fal elektromagnetycznych: fal optycznych oraz fal THz. W szczególności dotyczą one interakcji fali optycznej propagującej w światłowodzie z siatką Bragga, na której charakterystyki geometryczne i fizyczne wpływa obecność uszkodzenia w konstrukcji. Odnoszą się również do interakcji fali THz z materiałem z uszkodzeniami.

Metody oceny stopnia degradacji konstrukcji bazujące na propagacji fal optycznych w światłowodzie z czujnikami światłowodowymi typu FBG mogą być wykorzystywane do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości uszkodzeń mechanicznych (np. pęknięć) czy chemicznych (np. zawilgocenia) w elementach konstrukcji wykonanych z materiałów izotropowych lub ortotropowych. Zaletą czujników światłowodowych jest nieelektryczny sygnał wejściowy, niski współczynnik tłumienia sygnału w światłowodzie oraz duża odporność na korozyjny wpływ środowiska. Pozwala to na tworzenie systemów oceny stanu technicznego konstrukcji, do których dostęp jest utrudniony ze względu na miejsce posadowienia (np. morze, wysokie góry). Inną ważną cechą czujników światłowodowych są ich wymiary geometryczne pozwalające na wbudowywanie ich w strukturę materiałów elementów konstrukcyjnych, szczególnie wykonanych z kompozytów włóknistych oraz ich połączeń. Dodatkowo niewielka wrażliwość szkła kwarcowego, z którego jest wykonywany światłowód, na wilgoć pozwala na wykorzystanie czujnika typu FBG do określenia stopnia zawilgocenia połączenia klejowego dla wybranej chwili czasowej.

Metody oceny stopnia degradacji konstrukcji bazujące na propagacji fali THz w materiale ortotropowym nieprzewodzącym mogą być wykorzystane do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości uszkodzeń (wtrąceń), które powodują zmiany w propagującej fali poprzez parametry materiałowe (współczynnik absorpcji, współczynnik refrakcji) oraz rozproszenie fali. Ze względu na swoją czułość na zmiany tych parametrów metody spektroskopii THz można wykorzystać do detekcji i lokalizacji światłowodów (z czujnikami typu FBG) wbudowanych w strukturę materiału będących częścią systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji, mimo iż parametry materiałowe

włókien szklanych zbrojenia kompozytu włóknistego i światłowodu wykonanego ze szkła kwarcowego są zbliżone. Metody te są również wykorzystane do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości / stopnia uszkodzenia: mechanicznego (delaminacji), termicznego lub chemicznego (zawilgocenia).

Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że możliwe jest opracowanie efektywnych metod oceny stopnia degradacji elementów konstrukcji pracujących w warunkach podwyższonej wilgotności lub temperatury z wykorzystaniem fal elektromagnetycznych o długościach: 1510–1590 nm (metoda bazująca na czujnikach światłowodowych typu FBG – metoda kontaktowa) i 0,03–3 mm (spektroskopia THz – metoda bezkontaktowa). **Dowiodło to słuszności sformułowanej tezy.**

Uzyskane przez mnie wyniki badań stanowią element nowości oraz znaczący wkład w dyscyplinę mechaniki.

Podsumowanie własnych oryginalnych osiągnięć

Podsumowując, do moich oryginalnych osiągnięć powstałych podczas realizacji badań mogą zaliczyć:

- Zastosowanie czujników światłowodowych typu FBG, znajdujących się pod powierzchnią wody i nieosłoniętych przed bezpośrednim działaniem wilgoci, do pomiarów zmian odkształceń konstrukcji. Wykorzystanie wyznaczonych wartości odkształceń do wyznaczenia charakterystyk amplitudowo–częstotliwościowych konstrukcji, na którą oddziaływało falowanie i obracający się z różną prędkością kątową wirnik symulujący oddziaływanie wiatru wiejącego z różną siłą.
- Stworzenie wskaźników uszkodzenia pozwalających na detekcję i lokalizację pęknięcia obwodowego nawet w przypadku wymuszeń o niewielkiej energii (fala o parametrach: amplituda międzyszczytowa $H=0,16m$ i okres $T=1,4s$) i dla konstrukcji o dużej sztywności.
- Normalizacja odkształcenia konstrukcji opierająca się na całkowitej energii odkształcenia, zdefiniowanej jako energia zaabsorbowana przez konstrukcję podczas jej obciążania, pozwalająca na zmniejszenie wpływu ilości czujników w każdej z grup oraz wartości parametrów wymuszeń na uzyskane wartości wskaźników. Pozwoliło to na stworzenie znormalizowanych wskaźników uszkodzenia niewrażliwych na wpływ środowiska zewnętrznego.
- Stworzenie znormalizowanego wskaźnika, którego wartości można wyznaczać automatycznie, więc można go zaimplementować do monitorowania stanu technicznego trudnodostępnego (np. dno morskie, wysokie góry) elementu konstrukcji, tworząc bezobsługowy system SHM pozwalający na ocenę stanu technicznego konstrukcji podczas jej eksploatacji. W przypadku takich konstrukcji istotne jest zmniejszenie liczby przeglądów eksploatacyjnych przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa pracy.
- Wbudowanie czujników światłowodowych typu FBG w materiał połączenia klejowego oraz obserwowanie zmian w widmach odbitych od czujników podczas procesu polimeryzacji. Określenie momentu zakończenia procesu polimeryzacji oraz wyznaczenie wartości odkształceń powstałych podczas tego na podstawie zmierzonych długości fali Bragga.
- Wyznaczenie wartości współczynnika wpływu temperatury na czujnik światłowodowy typu FBG, wbudowany w warstwę adhezyjną połączenia klejowego, pozwalającego na kompensację wpływu temperatury i wyznaczenie rzeczywistego odkształcenia materiału.
- Stworzenie metody pozwalającej na detekcję, lokalizację i określenie wielkości (stopnia) zawilgocenia połączenia klejowego pomiędzy dwoma elementami wykonanymi z kompozytów włóknistych o zbrojeniu szklanym. Zaproponowana metoda bazuje na

zmianach odkształcenia czujnika światłowodowego typu FBG, wbudowanego w materiał połączenia klejowego, związanych ze zmianą objętości materiału na skutek dyfuzji wody.

- Teoretyczne i eksperymentalne określenie użyteczności czujników światłowodowych typu FBG do określenia zmian odkształcenia związanych z występowaniem niewielkiej ilości wilgoci (do 2–3% stężenia wilgoci) w połączeniu klejowym. Zaobserwowanie zjawiska zmiany wartości długości fali Bragga, czujnika światłowodowego typu FBG wbudowanego w materiał warstwy adhezyjnej, związanej z zawilgoceniem połączenia klejowego.
- Stworzenie modelu numerycznego, uwzględniającego charakterystyki materiałowe i geometryczne warstwy adhezyjnej, pozwalającego na wyznaczenie rozkładu odkształceń i temperatury podczas analizowanych procesów termicznych i dyfuzyjnych zachodzących w połączeniu klejowym z wbudowanym układem czujników światłowodowych typu FBG. Uwzględnienie w przeprowadzonych analizach numerycznych wpływu elementów łączonych i oddziaływania ciśnienia słupa wody. Powstały model pozwala na optymalizację ułożenia wbudowanych czujników światłowodowych do określenia stopnia zawilgocenia.
- Zaadaptowanie modelu numerycznego do własnej metody służącej do określenia stopnia zawilgocenia dowolnego połączenia klejowego, dla którego znane są charakterystyki materiałowe elementów składowych.
- Określenie możliwości detekcji, lokalizacji i określenia wielkości delaminacji w elemencie wykonanym z kompozytu włóknistego, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu czujników światłowodowych typu FBG przyklejonych na powierzchni materiału.
- Określenie wpływu światłowodu znajdującego się na powierzchni próbki na falę THz propagującą w głąb materiału oraz wykorzystanie fali THz do detekcji i lokalizacji światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy, a także określenie wpływu światłowodów na budowę wewnętrzną elementu w najbliższym ich sąsiedztwie.
- Stworzenie filtra zmniejszającego wpływ chropowatości powierzchni próbki i jej krzywizny na detekcję, lokalizację i określenie wielkości uszkodzeń (mechanicznych, termicznych i chemicznych) oraz światłowodów wbudowanych w materiał kompozytowy o zbrojeniu włóknem szklanym.
- Zastosowanie zjawisk związanych z propagacją fali THz do określenia stopnia degradacji termicznej materiału kompozytowego oraz zastosowanie odległości Mahalanobisa do stworzenia metody określenia stopnia degradacji w oparciu o analizę zmian parametrów materiałowych (współczynnik absorpcji, współczynnik refrakcji) w zakresie THz fali elektromagnetycznej.
- Zastosowanie fali THz do detekcji i lokalizacji uszkodzenia wewnątrz próbki spowodowanego lokalnym przegrzaniem. Uszkodzenie to było zbyt małe, aby można było je wykryć metodą wibrotermografii, natomiast jego obecność potwierdzono przy pomocy analiz propagacji fal Lamba z wykorzystaniem wibrometru laserowego.
- Przeprowadzenie analiz z wykorzystaniem spektroskopii THz dotyczących możliwości detekcji, lokalizacji i określenia wielkości wtrącenia wody o niewielkiej objętości (50 mm³) w materiale kompozytowym, w oparciu o różnice parametrów materiałowych (głównie współczynnika absorpcji) analizowanego materiału kompozytowego i wody. Uwzględnienie wpływu chropowatości i odległości od powierzchni elementu. Wyznaczenie wielkości (objętość) wtrącenia w postaci kropli wody oraz stężenia wody w zanieczyszczonym obszarze (5%).
- Stworzenie wskaźnika pozwalającego na detekcję, lokalizację i określenie wielkości wtrącenia w postaci kropli wody w oparciu o charakterystyki fali THz propagujących w materiale z zanieczyszczeniem.

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 modelowaniem nogi platformy wiertniczej (kratownicy) metodą elementów skończonych (MES) w celu określenia jej charakterystyki modalnej oraz czułości na uszkodzenie w postaci pęknięcia [M1, M4, K1]. Prowadziłam również badania związane z propagacją fal sprężystych w materiale izotropowym [M3, M5] i konstrukcji nitowanej [K2]. Od 2008 r. rozpoczęłam badania eksperymentalne związane z czujnikami światłowodowymi typu FBG oraz ich wykorzystaniem do diagnostyki konstrukcji [M4]. Tematykę tę rozwijałam w ramach prac związanych z realizacją mojej rozprawy doktorskiej.

Celem mojej rozprawy doktorskiej było wskazanie możliwości zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do monitorowania stanu technicznego wybranych fragmentów konstrukcji lotniczych. Analizowano efektywność zaproponowanych rozwiązań pod kątem detekcji i lokalizacji uszkodzeń (pierwszy i drugi poziom diagnostyki) [R1].

Pierwszą analizowaną konstrukcją była jednostronnie utwierdzona belka wykonana ze stopu aluminium z układem czujników światłowodowych typu FBG przyklejonym na jej powierzchni. Analizowano przydatność tych czujników do wyznaczenia jej charakterystyk statycznych i dynamicznych oraz możliwości detekcji i lokalizacji uszkodzenia (dodatkowa masa) [K7].

Kolejne badania prowadzono na złożonej konstrukcji – skrzydle o zmiennej geometrii składającym się z sekcji (o własnościach izotropowych wykonanych ze stopu aluminium) mających możliwość obrotu wokół wspólnej osi dzięki siłownikom wytworzonym ze stopu z pamięcią kształtu oraz poszycia z tkaniny wykonanej z włókna szklanego nasyczonego żywicą epoksydową. Stworzono model numeryczny konstrukcji (metoda elementów skończonych), który wykorzystano do wyznaczenia charakterystyk statyczno–dynamicznych konstrukcji [M2, K3, K5]. Analizowano zmiany odkształcenia poszycia w celu wyznaczenia miejsc zamocowania czujników światłowodowych typu FBG. Czujniki te wykorzystano do pomiaru zmian odkształceń poszycia spowodowanych przez aktywację siłowników z elementami wykonawczymi ze stopu z pamięcią kształtu [M2, K5] oraz detekcji uszkodzeń: zmniejszenia momentu skręcającego siłownika oraz poszycia (dodatkowa masa symulująca lokalne oblodzenie) [A1, K5, K6, K8]. Zaproponowano projekt systemu monitorowania stanu technicznego tej konstrukcji i zbadano jego przydatność do detekcji wyżej wymienionych uszkodzeń. Badania dotyczące diagnostyki skrzydła o zmiennej geometrii prowadzono we współpracy z Politechniką Rzeszowską w ramach projektu R10 006 03 MNiSW.

Po obronie doktoratu kontynuowałam badania nad wykorzystaniem czujników światłowodowych typu FBG do diagnostyki skrzydła o zmiennej geometrii. Analizowano efektywność zaproponowanych nowych rozwiązań pod kątem lokalizacji i określenia wielkości uszkodzeń (drugi i trzeci poziom diagnostyki). Stworzono również algorytm pozwalający na lokalizację uszkodzenia poszycia (dodatkowa masa) z dokładnością do sekcji oraz względem osi obrotu skrzydła (na osi, bliżej krawędzi natarcia, bliżej krawędzi spływu). Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych i eksperymentalnych stwierdzono, że założone, w oparciu o założenia projektowe, wartości momentów skręcających w modelu różniły się od wartości w rzeczywistej konstrukcji [C2]. Zmierzone wartości odkształceń poszycia pozwoliły na udoskonalenie modelu numerycznego skrzydła. Pozwoliło to na wyznaczenie rzeczywistych wartości momentów skręcających w poszczególnych siłownikach oraz określenie zmian wartości momentów skręcających w uszkodzonym siłowniku [A2, C2]. Podczas analiz skrzydła wykorzystano sztuczne sieci neuronowe do modelowania odpowiedzi czujników w zależności od stanu technicznego konstrukcji i warunków brzegowych [A2].

Prowadziłam również badania wspólnie z dr Rutą Rimasauskiene (Kaunas University of Technology, Kowno, Litwa), która przebywała w IMP PAN w ramach projektu Marii Skłodowskiej-Curie „Static and Dynamic piezo-driven stream Wise vortex generators for active flow Control” (STA-DY-WI-CO) Marie Curie Action, No. 251309. Badania dotyczyły elementów aktywnych (membran) generatora strugi syntetycznej stosowanej do sterowania przepływem (kontrola oderwania strugi). Zaproponowałam zastosowanie czujników światłowodowych typu FBG do wyznaczenia charakterystyk cieplnych (nagrzewania się) membran wyposażonych w elementy piezoelektryczne podczas drgań rezonansowych. W wyniku tej współpracy powstały dwie publikacje pokonferencyjne [K14], [C6] (*kopia artykułu [C6] znajduje się w załączniku 6*).

Prowadziłam również badania wspólnie z dr Codrut Dan (Politehnica University of Bucharest, Rumunia), który przebywał w IMP PAN w ramach projektu Marii Skłodowskiej-Curie „Innovative Methods of Separated Flow Control in Aeronautics” (IMESCON) Marie Curie Action, No. 264672. Badania dotyczyły określenia czułości przetwornika z makro-kompozytu piezoelektrycznego (z ang. *macro fibre composite, MFC*) na dynamiczne zmiany odkształcenia i możliwości wykorzystania go jako czujnik odkształcenia. Pomiary przeprowadzono na belce wykonanej ze stopu aluminium przy założonym wzbudzeniu. Uzyskiwane wyniki były porównywane z wartościami zmierzonymi przez czujniki światłowodowe typu FBG [K19].

Dzięki współpracy nawiązanej w ramach projektu COST ACTION TD1001 dotyczącego różnych rodzajów czujników optycznych i ich zastosowań prowadziłam również badania wspólnie z Andrei Stancaile (University of Bucharest, Rumunia). Badania dotyczyły stworzenia metody wyeliminowania wpływu zmian temperatury na pomiary impedancji elektromechanicznej. System bazujący na czujnikach światłowodowych typu FBG wykorzystano do wyznaczenia zmian temperatury (w zakresie od 25–50°C), natomiast przetworniki piezoelektryczne zamontowane na powierzchni struktury wraz z analizatorem impedancji służyły do pomiarów parametrów elektrycznych (impedancji elektrycznej i rezystancji przetworników piezoelektrycznych). Analizowane były zmiany amplitud pików i przesunięcia częstotliwości pików związane ze zmianami temperatury belki (jednostronnie utwardzonej oraz obustronnie utwardzonej) wykonanej ze stopu aluminium. Celem tych prac było stworzenie metody do kompensacji termicznej w metodzie impedancji elektromechanicznej. [C7] (*kopia artykułu [C7] znajduje się w załączniku 6*).

Współpraca z dr Rohanem Somanem, który rozpoczął pracę w IMP PAN w ramach projektu Marii Skłodowskiej-Curie „new MAterials and REliability in offshore WIND Turbines technology” (MARE-WINT) dotyczy zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do pomiarów zmian odkształceń konstrukcji ze szczególnym uwzględnieniem zmian położenia osi obojętnej na skutek wpływu uszkodzenia. Metoda śledzenia zmiany położenia osi obojętnej bazująca na filtrze Kalmana została wykorzystana do detekcji uszkodzeń mechanicznych (delaminacja) i termicznych (przegrzanie) [K23]. Współpraca trwa nadal i zaowocowała wspólnymi publikacjami [A6 , A7, C10, K25] (*kopia artykułu [A6] znajduje się w załączniku 6*).

W ramach projektu MNiSW IUVENTUS Plus, którego byłam kierownikiem, kontynuowano badania dotyczące wykorzystania czujników światłowodowych typu FBG do monitorowania stanu technicznego konstrukcji inteligentnych. Prowadzono badania dotyczące wykorzystania tych czujników do monitorowania siłowników z elementami wykonawczymi ze stopu z pamięcią kształtu [K17]. Pozyskane przeze mnie środki finansowe umożliwiające finansowanie badań (kierowany przez mnie projekt badawczy: MNiSW IUVENTUS Plus) pozwoliły na kontynuację badań związanych ze strukturami inteligentnymi. Uzyskane wyniki pozwoliły na rozwój metod wykorzystujących czujniki światłowodowe typu FBG. Rozwój algorytmów w ramach tego projektu oraz uzyskane doświadczenie

pozwoili mi na wykonanie kolejnego kroku w zastosowaniach czujników optycznych i podjęcie próby wbudowania tych czujników w izotropowy materiał połączenia klejowego.

Czujniki światłowodowe typu FBG wykorzystano również do analizy propagacji pęknięcia zmęczeniowego we fragmencie łopaty wirnika śmigłowca Mi-2. Stwierdzono, że w oparciu o charakterystyki amplitudowo–częstotliwościowe, wyznaczone na podstawie pomiarów czujnikami światłowodowymi typu FBG, można określić kolejne etapy rozwoju pęknięcia zmęczeniowego fragmentu konstrukcji lotniczej. Stworzyłam również model numeryczny propagacji pęknięcia zmęczeniowego i przeprowadziłam analizy pozwalające na lokalizację tego uszkodzenia [K18].

Kolejnym krokiem były badania eksperymentalne związane z wbudowywaniem czujników światłowodowych typu FBG w strukturę materiału: połączenia klejowego [H2, K24] lub kompozytu włóknistego o zbrojeniu włóknem szklanym [K27, K29] lub węglowym. Badano możliwość wykorzystania czujników, wbudowanych w materiał warstwy adhezyjnej połączenia klejowego, do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości zawilgocenia. Wyniki badań związanych ze stworzeniem metody służącej do określenia stopnia zawilgocenia połączenia klejowego zostały przedstawione w części dotyczącej osiągnięcia [H2]. Badania prowadzono w ramach projektu PBS KOMPNDT.

Po obronie doktoratu, rozpoczęłam równolegle badania dotyczące wykorzystania czujników światłowodowych typu FBG do oceny stanu technicznego konstrukcji morskich: statków (Horyzont II i Dar Młodzieży) i modelu konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej. W przypadku statków specyfika warunków morskich (falowanie, wiatr oraz instalacja i pomiary na rzeczywistej już eksploatowanej konstrukcji) spowodowały konieczność stworzenia nowych algorytmów uwzględniających wpływ środowiska zewnętrznego. Celem prowadzonych badań było powiązanie zmierzonych wartości odkształceń z rzeczywistą charakterystyką obciążeń konstrukcji powstających podczas manewrów, np. stawianie / zrzucanie żagli, zwrot przez rufę, stawianie na kotwicy, itp. [K12]. Badania na statku szkolnym statku Horyzont II dotyczyły wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych masztu sygnałowego podczas rejsu po Zatoce Gdańskiej [M6, M7, C3, C4].

Badania na żaglowcu Dar Młodzieży przeprowadzono podczas rejsu po Morzu Bałtyckim z Gdyni do Szczecina. Badania dotyczyły wykorzystania czujników światłowodowych typu FBG do wyznaczenia charakterystyk statycznych i dynamicznych fokmasztu. Układ czujników światłowodowych typu FBG zamocowano na fokmaszcie powyżej salingu oraz stalowego sztagu o średnicy 24,5 mm. Fokmaszt ma w miejscu zamocowania czujników średnicę równą 1400 mm. Czujniki zabezpieczono przed szkodliwym wpływem środowiska zewnętrznego (woda morska i wiatr). Celem badania było określenie wielkości odkształceń / naprężeń fokmasztu podczas rejsu statku. Szczególną uwagę poświęcono procesom stawiania i zdejmowania żagli, w celu określenia wpływu ilości i konfiguracji żagli na odkształcenie masztu. Analizowano zmiany odkształceń fokmasztu związane z procesami stawiania żagli. Ze względu na miejsce zamocowania czujników światłowodowych typu FBG (nad salingiem) procesy stawiania marsli na wszystkich masztach oraz foka i grota, nie były widoczne albo były słabo widoczne. Żagle te znajdują się poniżej miejsca zamocowania czujników. Dodatkowo, ze względu na dużą liczbę lin, część masztu poniżej salingu jest dość sztywna. Obserwowany jest za to proces stawiania wszystkich bramów i bombramów. Wymienione powyżej żagle znajdują się powyżej salingu, zatem proces ich stawiania powoduje odkształcanie masztu w miejscu zamocowania czujników. Na sygnałach zarejestrowanych z czujników obserwowany jest proces stawiania wszystkich kliwów. Postawienie forsztaksla, kliwra oraz bomkliwra powoduje wzrost wartości odkształcenia fokmasztu w miejscu zamocowania czujników. Liny od tych żagli zamocowane są poniżej czujników światłowodowych typu FBG. Postawienie jebra powoduje zmniejszenie wielkości zmierzonego odkształcenia na fokmaszcie. Lina od tego żagla jest

zamocowana na fokmaszcie dużo wyżej niż od pozostałych kliwów, zatem postawienie jej powoduje prostowanie się masztu [A3, A4, M7] (*kopia artykułu [A3] znajduje się w załączniku 6*).

Badania przeprowadzone na żaglowcu Dar Młodzieży były pionierskie w skali światowej. Prace związane z diagnostyką statków były prowadzone przy współpracy z Akademią Morską w Gdyni w ramach projektów: projekt kluczowy MONIT i projekt R03 0059 06 MNiSW.

Kolejną konstrukcją morską była konstrukcja wsporcza morskiej turbiny wiatrowej – tripod. Na konstrukcji tej zostały zamontowane dwa układy czujników światłowodowych typu FBG, które składały się z rozet oraz czujników jednoosiowych. Zastosowanie czujników światłowodowych typu FBG pozwoliło na analizowanie zmian odkształceń również podczas procesów, np. mocowania konstrukcji [C5]. Analizowano zmiany odkształcenia konstrukcji przykręconej do stołu antywibracyjnego oraz swobodnie podwieszanej [A5]. Analizowano możliwość zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do eksploatacyjnej analizy modalnej. Eksploatacyjna analiza modalna może być wykorzystywana do określania parametrów modalnych konstrukcji, dla których nie można zmierzyć wartości wymuszenia. Algorytmy wykorzystywane w tym przypadku opierają się na założeniu, że wymuszenie ma charakter stochastyczny. Warunek ten jest zazwyczaj spełniony dla konstrukcji inżynierii lądowej (budynki, mosty, wieże) lub morskiej (konstrukcje typu *offshore*). W takim przypadku wymuszenie pochodzi od naturalnych, działających na nie sił, jak wiatr czy ruch drogowy. Warto również podkreślić, że duże konstrukcje bardzo trudno jest pobudzić do drgań wykorzystując wzbudniki stosowane w klasycznej analizie modalnej. Ze względu na to, że w eksploatacyjnej analizie modalnej wykorzystywane są odpowiedzi konstrukcji podczas jej eksploatacji, można w ten sposób uzyskać jej rzeczywiste operacyjne charakterystyki modalne. W związku z tym metoda ta jest bardzo przydatna przy monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji oraz detekcji i lokalizacji uszkodzeń w dużych konstrukcjach.

Spośród wszystkich metod eksploatacyjnej analizy modalnej dla konstrukcji wsporczej morskiej turbiny wiatrowej wybrana została metoda dekompozycji w dziedzinie częstotliwości (z ang. *Frequency Domain Decomposition, FDD*). Jest to metoda stosowana m.in. przy analizie dużych konstrukcji lądowych (mosty, budynki). Metoda ta pozwala na określenie częstotliwości i postaci drgań własnych konstrukcji przy wykorzystaniu wymuszenia eksploatacyjnego (wiatr, ruch drogowy). Metodę tę zastosowano do określenia częstotliwości drgań własnych konstrukcji przykręconej do stołu antywibracyjnego podczas próby z wieloma wymuszeniami impulsowymi (powtarzane uderzenie młotkiem w wybranych punktach oznaczonych na konstrukcji) [K22] oraz wyznaczenia parametrów wymuszenia w postaci fali regularnej podczas badań w basenie modelowym [C8]. Wartości częstotliwości drgań własnych porównano z wartościami uzyskanymi z modelu numerycznego MES [A5]. Analizowano wpływ uszkodzenia na charakterystykę amplitudowo–częstotliwościową konstrukcji koncentrując się na pojawianiu się nowych częstotliwości drgań własnych związanych ze zmianą geometrii i sztywności na skutek uszkodzenia: pęknięcie obwodowe [A5, A8] oraz brak podparcia jednej z nóg konstrukcji [A8]. Badania wykonywano we współpracy z Centrum Techniki Okrętowej SA w Gdańsku i BALTEX GROUP (BALTEX Energia i Górnictwo Morskie Gdynia Poland) w ramach projektu PBS AQUILO.

Ostatnio uczestniczę również w badaniach eksperymentalnych dotyczących zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do detekcji i lokalizacji miejsc uderzeń w płytach kompozytowych wykonanych z laminatów szklano–epoksydowych z rdzeniem komórkowym o strukturze plastra miodu (element przekładkowy). Wypełniacz komórkowy jest powszechnie stosowany w konstrukcjach lotniczych. Prowadzone analizy dotyczą porównania zaproponowanych układów czujników pod kątem ich stosowności do detekcji wymuszeń impulsowych wywołanych przez spadającą kulkę [K28], uderzenie impulsowe młotkiem modalnym o różnych zakończeniach

[K32] oraz fali sinusoidalnej wzbudzonej przy pomocy źródła akustycznego [K28]. Podczas badań analizowany jest również wpływ charakterystyk geometrycznych i sztywnościowych konstrukcji na jej odpowiedź na wymuszenie.

Kontynuowałam również badania związane z propagacją fal sprężystych w materiale izotropowym. Uczestniczyłam w badaniach dotyczących pomiarów propagacji fal sprężystych z wykorzystaniem wibrometru laserowego [K9]. Zastosowałam sztuczną sieć neuronową do określenia wielkości i położenia (kąta względem krawędzi próbki) pęknięcia w płycie w oparciu o wyniki symulacji dotyczącej propagacji fal Lamba w płycie [K16]. Stanowiłam część zespołu badawczego, który w 2015 r. otrzymał prestiżową nagrodę Unii Europejskiej – First Place of the Dragon–STAR Innovation Award (Structural Health Monitoring of Infrastructural Facilities via 3D Laser Scanning Vibrometer) dotyczącą współpracy członków Unii Europejskiej z Chińską Republiką Ludową w zakresie innowacji w nauce i technologii. Laureatami byli naukowcy z trzech instytucji naukowych IMP PAN (Polska), Hohai University (Chiny), The Hong Kong Polytechnic University (Chiny).

Po obronie rozprawy doktorskiej obszar moich zainteresowań badawczych rozszerzył się o kolejne metody badań nieniszczących: termografia w podczerwieni i spektroskopia THz.

Badania eksperymentalne z wykorzystaniem termografii w podczerwieni dotyczyły zarówno materiałów izotropowych (metali) jak i ortotropowych (materiałów kompozytowych). Badania prowadzono metodą wibrotermografii oraz termografii impulsowej z wymuszeniem w postaci lamp halogenowych. Analizy były prowadzone na próbkach z jedną lub kilkoma delaminacjami [K13, K23], rozklejeniem przy usztywnieniu, wbudowaną taśmą Teflonową, zanieczyszczeniami (woda, olej, kurz) [K31] oraz różnymi konfiguracjami światłowodów [C9, K26] wbudowanych w materiał kompozytowy o zbrojeniu włóknem szklanym. Metodę termografii stosowano do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości uszkodzeń i wtrąceń.

Analizy z wykorzystaniem spektroskopii THz prowadzono na próbkach wykonanych z materiału kompozytowego wzmacnianego włóknem szklanym, materiałach polimerowych, laminatów szklano–epoksydowych z rdzeniem komórkowym o strukturze plastra miodu (element przekładkowy) oraz tkaninach stosowanych do tworzenia materiałów kompozytowych. Duża część wyników, prowadzonych przeze mnie analiz dotyczących spektroskopii THz materiałów kompozytowych, została przeze mnie wybrana jako część osiągnięcia i jest opisana w innej części dokumentu. Dodatkowe prace dotyczyły analizy możliwości wykrywania zanieczyszczeń (olej, kurz) wbudowanych w strukturę materiału [K27, K29, K33]. Analizowano parametry materiałowe dla fali elektromagnetycznej w zakresie THz materiałów polimerowych. W laminatach szklano–epoksydowych z rdzeniem komórkowym o strukturze plastra miodu (element przekładkowy) analizowano możliwość zastosowania techniki THz do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości wtrącenia w postaci taśmy Teflonowej [K29, K30]. Badałam również możliwość detekcji i lokalizacji wody w komórkach wypełnienia pokrytych cienką warstwą lepiscza z żywicy epoksydowej [K30]. Porównywano również charakterystyki propagacji fali THz przez tkaninę z włókien szklanych i materiał kompozytowy o osnowie polimerowej wykonany z tej tkaniny. Badałam również złożone struktury z wypełnieniem w postaci struktury piankowej (stosowanej w budownictwie albo konstrukcjach morskich) z wbudowanymi układami czujników optycznych lub piezoelektrycznych. Rozpoczęłam również prace nad symulacjami numerycznymi propagacji fali THz w różnych ośrodkach (powietrze, materiał kompozytowy) wykorzystując metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD) [K33]. W symulacjach korzystam z parametrów materiałowych dla fali THz wyznaczanych eksperymentalnie przeze mnie w laboratorium IMP PAN.

Tematyką zastosowania metod diagnostycznych opartych na czujnikach światłowodowych typu FBG, spektroskopii THz i termografii w podczerwieni jestem nadal zainteresowana. W chwili

obecnej nadal zajmuje się problemami wykrywania i określenia wielkości degradacji fizyko-chemicznej w materiałach kompozytowych z wykorzystaniem metody spektroskopii terahercowej. Należy podkreślić, że wymienione powyżej badania są aktualne, unikatowe i będą kontynuowane. W związku z tym uczestniczę w projektach związanych z tą tematyką oraz składam (samodzielnie albo jako część zespołu) nowe projekty.

Obecnie pracuję w ramach projektu ERA-NET MARTEC II „*Reliable and autonomous monitoring system for maritime structures*” RAMMS obejmującego Niemiecko-Polską współpracę naukową, a którego tematem jest opracowanie autonomicznego systemu monitorowania stanu technicznego kompozytowych konstrukcji morskich z wykorzystaniem metody impedancji elektromechanicznej oraz pomiarów odkształceń z wykorzystaniem czujników typu FBG. Uczestniczę wraz z firmą Cree Yacht w badaniach dotyczących zastosowania czujników światłowodowych typu FBG do monitorowania stanu technicznego szybkiej łodzi patrolowej. W ramach projektu analizowane były możliwości zatapiania czujników w złożoną strukturę kadłuba łodzi. Stworzony został panel testowy o budowie identycznej jak kadłub łodzi z wbudowanymi czujnikami. W oparciu o analizy tego panelu zaprojektowano układ czujników, który został wbudowany w kadłub łodzi. W chwili obecnej sprawdzono jego działanie oraz odpowiedzi na wymuszenia impulsowe. W najbliższym kwartale (lipiec–wrzesień) planowane są badania na Zatoce Gdańskiej podczas normalnej eksploatacji łodzi. Wyniki badań zostaną przedstawione w listopadzie 2018 r. na międzynarodowej konferencji the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring (APWSHM–2018) w Hong Kongu (Chiny).

Zajmuje się również jednoczesnym wpływem wilgoci i temperatury na zjawiska jakie zachodzą w elementach z kompozytów włóknistych o zbrojeniu szklanym i węglowym. Analizy prowadzone są z wykorzystaniem stworzonych przeze mnie metod dotyczących zastosowań czujników światłowodowych typu FBG oraz spektroskopii THz do detekcji, lokalizacji i określenia wielkości powstałych uszkodzeń. Prowadzone są również analizy związane z wykorzystaniem termografii w podczerwieni do diagnostyki badanych elementów. Badania są prowadzone w ramach projektu „Wpływ jednoczesnego oddziaływania temperatury i wilgotności na struktury anizotropowe: od teorii do badań doświadczalnych” Projekt NCN – OPUS nr 12 – No: 2016/23/B/ST8/03088.

Uczestniczyłam również w badaniach dotyczących monitorowania podzespołów turbogeneratora domowej mikrośiłowni kogeneracyjnej ORC (z ang. *Organic Rankine Cycle*) z wykorzystaniem czujników światłowodowych typu FBG, spektroskopii terahercowej i termografii w podczerwieni. Stwierdzono, że możliwe jest wykorzystanie czujników światłowodowych typu FBG do detekcji i lokalizacji wycieków płynu niskowrzącego przez nieszczelność na połączeniu elementów korpusu turbogeneratora. Badania prowadzono przy współpracy z Zakładem Dynamiki i Diagnostyki Turbin IMP PAN w laboratorium Mikrośiłowni kogeneracyjnej „ORC” IMP PAN. Wyniki badań zostaną zaprezentowane w listopadzie 2018 r. na międzynarodowej konferencji the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring (APWSHM–2018) w Hong Kongu (Chiny).

Pozytywne wyniki badań dotyczących monitorowania podzespołów turbogeneratora i nawiązana współpraca międzyzakładowa zaowocowała uczestnictwem w projekcie aplikacyjnym NCBiR nr POIR.04.01.04–00–0014/17 „Uniwersalny Turbogazowy Układ Mikrokogeneracyjny” (VoltAeris). W rozpoczętym 01.06.2018 r. projekcie, dotyczącym wytworzenia unikalnego w skali światowej układu mikrokogeneracyjnego, będę prowadziła prace dotyczące zastosowania metod opartych na czujnikach światłowodowych typu FBG do określenia wielkości naprężeń termicznych elementów kotła, który nagrzewał się będzie do temperatury ponad 800°C. Należy podkreślić, że wymienione powyżej badania są unikatowe w skali światowej.

Uczestniczę również w projekcie H2020 „*Turbomachinery optimisation enabling flexible back-up power for the European energy transition*” (Turboreflex) no. 764545. Celem projektu jest wprowadzenie ulepszeń technologicznych w elektrowniach, aby zwiększyć trwałość elementów przy jednoczesnym zmniejszeniu negatywnego oddziaływania na środowisko. W projekcie biorą udział najwięksi europejscy producenci, renomowani partnerzy naukowcy i użytkownicy końcowi. Badania grupy IMP PAN dotyczą analiz strukturalnych materiałów stosowanych w turbinach gazowych, pod kątem wytrzymałości zmęczeniowej materiału w ramach niskocyklowych obciążeń. Badane będą próbki drukowane ze stopów metali mogących pracować pod wysokim ciśnieniem i w wysokich temperaturach.

Na kolejnych stronach zamieściłam tabele zawierające zestawienia moich osiągnięć naukowych.

Tabela 1. Podsumowanie 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)	1	12 <u>W tym:</u> 5 – w osiągnięciu naukowym	13
Monografie	0	1 <u>W tym:</u> 1 – j. polski	1
Rozdziały w monografii	5 <u>W tym:</u> 3 – j. polski	1 <u>W tym:</u> 1 – j. angielski	6
Inne prace naukowe	8 <u>W tym:</u> 8 – j. angielski 4 – w bazie Web of Sciences	39 <u>W tym:</u> 38 – j. angielski 9 – w bazie Web of Sciences 3 – w osiągnięciu naukowym	47
Wygłoszenie referatów na konferencjach	4 <u>W tym:</u> 4 – j. angielski	15 <u>W tym:</u> 15 – j. angielski	19
Aktywny udział w konferencjach	8 <u>W tym:</u> 8 – j. angielski	37 <u>W tym:</u> 37 – j. angielski	45
Sumaryczny Impact Factor IF	2,052	34,561	36,613
Projekty badawcze międzynarodowe	1	7 <u>W tym:</u> 2 – H2020	8
Projekty badawcze krajowe	6	9 <u>W tym:</u> <u>1 jako kierownik</u>	15
Recenzje do czasopism	2	50	52

Tabela 2. Podsumowanie ważniejszych publikacji z uwzględnieniem punktacji MNiSW i udziału własnego

Lp	Dane bibliograficzne publikacji	liczba punktów wg MNiSW * udział własny
[H1]	Mieloszyk Magdalena , Ostachowicz Wiesław: <i>An application of Structural Health Monitoring system based on FBG sensors to offshore wind turbine support structure model</i> . Marine Structures, Vol. 51, pp. 65–86, 2017. (IF: 2.491 – 2017 r.)	0,9*45=40,5
[H2]	Mieloszyk Magdalena , Ostachowicz Wiesław: <i>Moisture contamination detection in adhesive bond using embedded FBG sensors</i> . Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 84, Part: A, pp. 1–14, 2017. (IF: 4.370 – 2017 r.)	0,9*45=40,5
[H3]	Veronica Bonilla Mora, Mieloszyk Magdalena , Ostachowicz Wiesław: <i>Model of moisture absorption by adhesive joint</i> , Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 99C, pp. 534–549, 2018. (IF: 4.370 – 2017 r.)	0,7*45=31,5
[H4]	Mieloszyk Magdalena , Majewska Katarzyna, Ostachowicz Wiesław: <i>Localisation of embedded water drop in glass composite using THz spectroscopy</i> , Smart Structures and Systems, vol. 21(6), 751-759, 2018. (IF: 2.231– 2017 r.)	0,7*30=21
[H5]	Mieloszyk Magdalena , Majewska Katarzyna, Ostachowicz Wiesław: <i>THz spectroscopy application for detection and localisation of water inclusion in glass composite</i> , Composite Structures, vol. 192, pp. 537-544, 2018. (IF: 4.101 – 2017 r.)	0,7*35=24,5
[H6]	Magdalena Mieloszyk , Katarzyna Majewska, Wiesław Ostachowicz: <i>Glass fibre composite elements with embedded fibre Bragg grating sensors inspected by THz spectroscopy</i> , e-journal of NDT, ISSN 1435-4934, 2016.	0,7*0=0
[H7]	Rohan Soman, Katarzyna Majewska, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz: <i>Damage Assessment in Composite Beam Using Infrared Thermography, Optical Sensors, and Terahertz Technique</i> , ASME J Nondestructive Evaluation Vol. 1(3), 031001 (19 pages) Paper No: NDE-17-1079; doi: 10.1115/1.4039359, 2018.	0,3*0=0
[H8]	Maciej Radzieński, Magdalena Mieloszyk , Ehsan Kabiri Rahani, Tribikram Kundu, Wiesław Ostachowicz: <i>Heat induced damage detection in composite materials by terahertz radiation</i> , Proc. SPIE 9438 on: Health Monitoring of Structural and Biological Systems, 2015, San Diego, California, USA, 2015. (Web of Sciences)	0,4*15=6
[A1]	Magdalena Mieloszyk , Marek Krawczuk, Arkadiusz Żak, Wiesław Ostachowicz: <i>An adaptive wing for a small-aircraft application with a configuration of fibre Bragg grating sensors</i> . Smart Materials and Structures, Vol. 19, 085009 (12pp), 2010. (IF: 2,096– 2010 r.)	0,4*32=12,8
[A2]	Magdalena Mieloszyk , Łukasz Skarbek, Marek Krawczuk, Wiesław Ostachowicz, Arkadiusz Żak: <i>Application of fibre Bragg grating sensors for structural health monitoring of an adaptive wing</i> , Smart Materials and Structures Vol. 20, 125014(12pp), 2011.(IF: 2,089 – 2011 r.)	0,4*35=14
[A3]	Katarzyna Majewska, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz, Artur Król: <i>Experimental method of strain/stress measurements on tall sailing ships using Fibre Bragg Grating sensors</i> , Applied Ocean Research, Vol. 47, pp. 270–283, 2013. (IF: 1,262– 2013 r.)	0,35*25=8,75
[A4]	Artur Król, Katarzyna Majewska, Magdalena Mieloszyk , Lech Murawski, Wiesław Ostachowicz, Adam Weintrit: <i>Fibre Bragg Grating sensor grids for</i>	0,25*20=5

Lp	Dane bibliograficzne publikacji	liczba punktów wg MNiSW * udział własny
	<i>Structural Health Monitoring of the foremast of STS Dar Młodzieży</i> , Proc. the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 227(8), pp. 1665–1680, 2013. (IF: 0,589– 2013 r.)	
[A5]	Szymon Opoka, Rohan Soman, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz: <i>Damage detection and localization method based on a frequency spectrum change in a scaled tripod model with strain rosettes</i> , Marine Structures, Vol. 49, 163-179, 2016. (IF: 2,052– 2016 r.)	0,2*45=9
[A6]	Soman Rohan, Majewska Katarzyna, Mieloszyk Magdalena , Malinowski Paweł, Ostachowicz Wiesław: <i>Application of Kalman Filter based Neutral Axis tracking for damage detection in composites structures</i> , Composite Structures, Vol. 184, pp. 66-77, 2018. (IF: 4.101 – 2017 r.)	0,2*35=7
[A7]	Rohan Soman, Pawel Malinowski, Katarzyna Majewska, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz: <i>Kalman filter based neutral axis tracking in composites under varying temperature conditions</i> , Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 110, pp. 485-498, 2018.	0,2*45=9
[A8]	Rohan Soman, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz: <i>A two-step damage assessment method based on frequency spectrum change in a scaled wind turbine tripod with strain rosettes</i> , Marine Structures, Vol. 61, 419–433, 2018. (IF: 2.491 – 2017 r.)	0,3*45=13,5
[M6]	Lech Murawski, Szymon Opoka, Katarzyna Majewska, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz, Adam Weintrit: <i>Investigations of Marine Safety Improvements by Structural Health Monitoring Systems</i> , [in] Miscellaneous Problems in Maritime Navigation, Transport and Shipping. CRC Press, Balkema Book, pp. 83–89, ISBN 978–0–415–69118–5. CRC PRESS-TAYLOR & FRANCIS GROUP, 6000 BROKEN SOUND PARKWAY NW, STE 300, BOCA RATON, FL 33487-2742 USA, (Book Chapter), 2011. (Web of Sciences)	0,2*10=2
[C1]	Katarzyna Majewska, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz: <i>Application of FBGs Grids for Damage Detection and Localisation</i> , Applied Mechanics and Materials, Vol. 70, pp. 375-380, 2011. (Web of Sciences)	0,4*10=4
[C2]	Magdalena Mieloszyk , Marek Krawczuk, Łukasz Skarbek, Wiesław Ostachowicz: <i>An application of neural network for Structural Health Monitoring of an adaptive wing with an array of FBG sensors</i> , IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 305, 012066 doi:10.1088/1742-6596/305/1/012066. (Web of Sciences)	0,6*10=6
[C4]	Lech Murawski, Wiesław Ostachowicz, Szymon Opoka, Magdalena Mieloszyk , Katarzyna Majewska: <i>Practical application of monitoring system based on optical sensors for marine constructions</i> , Key Engineering Materials Vol. 518, pp 261-270, 2012.	0,2*8=1,6
[C6]	Ruta Rimasauskiene, Marius Rimasauskas, Magdalena Mieloszyk , Tomasz Wandowski, Paweł Malinowski, Wiesław Ostachowicz: <i>Experimental investigation of thermal characteristics of synthetic jet generator's diaphragm with piezoelectric actuator</i> , journal AIP conference Proceedings, 1600, 94, 2014. (Web of Sciences)	0,2*15=3
[C7]	Andrei Stancalie, Dan Sporea, Paweł Malinowski, Magdalena Mieloszyk , Szymon Opoka, Tomasz Wandowski, Wiesław Ostachowicz: <i>Influence of support conditions and temperature on the EMI characteristics</i> , Journal of Physics: Conference Series, 628, 012112, 2015. (Web of Sciences)	0,15*15=2,25
[C8]	Magdalena Mieloszyk , Szymon Opoka, Wiesław Ostachowicz: <i>Frequency Domain Decomposition performed on the strain data obtained from the</i>	0,7*15=10,5

Lp	Dane bibliograficzne publikacji	liczba punktów wg MNiSW * udział własny
	<i>aluminium model of an offshore support structure</i> , Journal of Physics Conference Series 07/2015; 628(1). 2015. (Web of Sciences)	
[K2]	Marek Krawczuk, Magdalena Mieloszyk , Magdalena Palacz, Wiesław Ostachowicz: <i>Damage detection in riveted structures by laser measurements</i> . Proc. the 4th European Workshop Structural Health Monitoring, Kraków, Polska, pp. 915–921, 2008. (Web of Sciences)	0,1*10=1
[K6]	Magdalena Mieloszyk , Katarzyna Majewska, Arkadiusz Żak, Wiesław Ostachowicz: <i>A Wing for Small Aircraft Application with an Array of Fibre Bragg Grating Sensors</i> . Proc. 5th European Workshop on SHM, Sorrento, Włochy, pp 106-112, ISBN No. 978–1–60595–024–2, 2010. (Web of Sciences)	0,6*10=6
[K7]	Katarzyna Majewska, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz: <i>Fibre Bragg Grating Sensors Applications for Damage Detection and Localisation in Isotropic Structures</i> . Proc. of 5th European Workshop on SHM, Sorrento, Włochy, pp 768-774. ISBN No. 978–1–60595–024–2, 2010. (Web of Sciences)	0,45*10=4,5
[K8]	Magdalena Mieloszyk , Arkadiusz Żak, Wiesław Ostachowicz: <i>An adaptive wing with a configuration of Fibre Bragg Grating sensors</i> . Proc. International Conference on Noise and Vibration Engineering including USD2010, Leuven, Belgia, pp. 3741–3755, 2010. (Web of Sciences)	0,7*10=7
[K19]	Codrut Dan, Paweł Malinowski, Paweł Kudela, Szymon Opoka, Maciej Radzieński, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz, Validation of Macro Fiber Composites for Strain Measurements in Structural Health Monitoring Applications of Complex Aerospace Structures, Proc. the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO Dyn 2014, Porto, Portugalia, 2014, 2127-2134. (Web of Sciences)	0,1*15=1,5
[K23]	Katarzyna Majewska, Rohan Soman, Magdalena Mieloszyk , Wiesław Ostachowicz: <i>Assessment of delamination in composite beam using infrared thermography, optical sensors and terahertz technique</i> . Proc. SPIE Conf. on Health Monitoring of Structural and Biological Systems Location, Portland, USA, Vol. 10170, pp. 1017005-1 - 1017005-14, 2017. (Web of Sciences)	0,3*15=4,5
[K24]	Magdalena Mieloszyk , Rohan Soman, Veronica Bonilla Mora, Wiesław Ostachowicz: <i>Moisture contamination detection in adhesive layer using embedded fibre Bragg grating sensors</i> . Proc. SPIE Conf. on Health Monitoring of Structural and Biological Systems Location, Portland, USA, Vol. 10170, pp. 101702W-1 - 101702W-9, 2017. (Web of Sciences)	0,65*15=9,75
	SUMA	306,65

Tabela 3. Podsumowanie wszystkich osiągnięć

Osiągnięcie	Wartość
Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	13
Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	BRAK
Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe	BRAK
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	58
Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	60
Sumaryczny <i>impact factor</i> według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	36,613
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): wszystkich/bez samocytowań	68/57
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	5
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	23
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną	3
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	19
Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	10
Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	45
Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	1
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione w pkt II K	4
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	7
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	4
Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki	8
Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji	3
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	BRAK
Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	1
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	BRAK
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	3
Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	BRAK
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	52
Inne osiągnięcia, nie wymienione w pkt III A – III P	3

Podpis

