

Załącznik 3

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Beata Stankiewicz

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Magister inżynier

Wydział Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej, specjalność Konstrukcje Mostowe.
Temat pracy magisterskiej „Projekt prefabrykowanego wiaduktu żelbetowego o konstrukcji dwuprzęsłowej uciążłonej”, 03.07.1987 r., promotor: doc. dr inż. Zygmunt Kozakow.

Doktor nauk technicznych

Wydział Budownictwa Politechniki Opolskiej, nauki techniczne, dyscyplina budownictwo,
Temat pracy doktorskiej: „Ocena poziomu hałasu w otoczeniu różnych typów stalowych mostów kolejowych”, 27.04.2005 r. Promotor: dr hab. inż. Zbigniew Mańko, prof. PWr, recenzenci: dr hab. inż. Barbara Szudrowicz, prof. ITB, prof. zw. dr hab. inż. Zbigniew Engel.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

01.11.1987 - 30.09.1998 – konstruktor w Zakładzie Mostów Betonowych, na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Gdańskiej

15.01.2000 – 27.04.2005 – asystent naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Konstrukcji Mostowych, na Wydziale Budownictwa Politechniki Opolskiej

27.07.2005 – obecnie – adiunkt na podstawie mianowania w Katedrze Dróg i Mostów Wydziału Budownictwa, od 2015 r. Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Opolskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny budownictwo

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Zastosowanie kompozytów na bazie włókien szklanych (GFRP) w pomostach konstrukcji mostowych.

4.2. Autor, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa

Stankiewicz B., *Zastosowanie kompozytów na bazie włókien szklanych (GFRP) w pomostach konstrukcji mostowych*. Monografia SM430, s.189, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2015, ISBN 978-83-65235-28-2. Recenzenci wydawniczy: dr hab. inż. Janusz Szelka, prof. WSOWL i UZ; prof. dr hab. inż. Sylwester Kobiela.

4.3. Omówienie celu naukowego w pracy i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich wykorzystania

We współczesnej inżynierii materiałowej dużą rolę odgrywają tworzywa konstrukcyjne modyfikowane włóknami. Materiały na bazie włókien umieszczonych w osnowie polimerowej są nowym otwarciem technologicznym w kształtowaniu lekkich, trwałych elementów konstrukcyjnych w budownictwie ogólnym, ale też w budownictwie mostowym. Materiały CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) lub GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers) są już powszechnie stosowane w systemach wzmocnień oraz modernizacji konstrukcji i coraz częściej wykorzystywane jako tworzywo konstrukcyjne. Rozwój linii produkcyjnych włókien szklanych oraz wszechstronne możliwości technologiczne produkcji współczesnych polimerów epoksydowych i poliestrowych wygenerowały nowatorskie systemy konstrukcyjne, odmienne, w aspekcie właściwości, od mechaniki materiałów tradycyjnych.

Elementem konstrukcyjnym obiektu mostowego ulegającym zniszczeniu w pierwszej kolejności jest płyta pomostowa. Jej korozja powoduje degradację kolejnych elementów konstrukcyjnych i w efekcie obniżenie nośności obiektu. Ponadto, wraz z rozwojem transportu wzrastają wymagania dotyczące nośności obiektów, w związku z tym nawet budowle będące w zadawalającym stanie technicznym wymagają modernizacji. Koszty takich remontów są zwykle bardzo duże. Popularne jest obecnie stosowanie taśm i mat z włókien węglowych przy wzmacnianiu elementów nośnych – dźwigarów żelbetowych, czy płyt. Jednak istnieją granice podnoszenia nośności w taki sposób. Można zmniejszyć

ciężar własny konstrukcji wymieniając tradycyjną ciężką płytę żelbetową na lżejszą kompozytową. Pomostowe płyty kompozytowe mogą być zastosowane w konstrukcjach mostów tymczasowych, wykorzystywanych w budowlach cywilnych i wojskowych.

Dodatkowym uzasadnieniem kompleksowych badań nad stosowaniem kompozytów polimerowych w mostownictwie jest fakt ich implementacji w mobilnych mostach wojskowych (np. płyty pomostowe w amerykańskim systemie Coruposite Army Bridge – CAB), od których wymaga się dużej wytrzymałości. Muszą to być konstrukcje lekkie, gdyż są transportowane drogą powietrzną, a jednocześnie dostosowuje się je do obciążeń czołgów o masie około 70 ton.

Zainteresowanie kompozytami GFRP wynika z dwóch podstawowych przesłanek: pierwsza - to ich doskonałe parametry mechaniczne i wytrzymałościowe, a druga - to mały ciężar własny. Jednoczesna kombinacja wymienionych cech występuje w zasadzie tylko w przypadku kompozytów, stąd gwałtownie rosnące w ostatnich latach ich wykorzystanie w konstrukcjach, dla których ta kompilacja ma pierwszorzędne znaczenie.

Makroskopowe cechy kompozytu zależą w wyraźny sposób od jego budowy wewnętrznej, a w szczególności od orientacji włókien, ich rozmieszczenia w przekroju kompozytu i jednorodności własności włókna. Budowa wewnętrzna materiału włóknistego zależy natomiast bezpośrednio od procesu technologicznego, a w zasadzie od zachowania ścisłych rygorów produkcyjnych i kontroli jakości.

Generalna zaleta stosowania włókien wynika z ich dużej sztywności i wytrzymałości, wielokrotnie większych od wartości odpowiednich charakterystyk dla materiału, z którego wykonano włókna, ale wyznaczonych na podstawie badań tego materiału. Istnieją dwa podstawowe typy włókien szklanych - E i S, o odmiennych własnościach mechanicznych: wytrzymałościowych, zmęczeniowych, udarowościowych, termicznych oraz reologicznych.

Z punktu widzenia cech wytrzymałościowych kompozytu bardziej efektywne w jego strukturze są włókna ciągłe, długie, przebiegające w warstwie w jednym kierunku.

Kompozyty polimerowe zbrojone włóknem szklanym (GFRP) charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością właściwą, w kierunku zatopionych włókien, a dodatkowymi ich cechami są między innymi trwałość, odporność na czynniki atmosferyczne i chemiczne oraz duże tłumienie materiałowe drgań. Kompozyty polimerowe to współcześnie innowacyjny obszar badawczy i fakt ten znajduje odzwierciedlenie w opracowywanych obecnie projektach naukowych oraz w nowatorskich, wciąż udoskonalanych systemach technologicznych. Inżynieria materiałowa dąży do spełnienia przez tworzywa konstrukcyjne

bardzo ważnego współcześnie parametru trwałości i stąd tak duża presja badań nad kompozytami, a w tym GFRP.

W warunkach polskich, temat możliwości implementacji kompozytów GFRP, w budowlach mostowych, nie został opisany w żadnej wcześniejszej monografii (2015 rok).

Celem rozprawy „*Zastosowanie kompozytów na bazie włókien szklanych (GFRP) w pomostach konstrukcji mostowych*” jest poszerzenie i pogłębienie wiedzy o budowie morfologicznej kompozytów GFRP, które można zastosować w modułowych ortotropowych płytach konstrukcji mostowych. Inną płaszczyzną syntetycznej, przedstawionej w monografii wiedzy to określenie parametrów wytrzymałościowych GFRP oraz kompleksowa analiza mechanizmów zniszczenia kompozytów, których natura różni się od sposobów zniszczenia materiałów tradycyjnych. Istotny obszar poznawczy badań to określenie skutecznych metod badawczych cech wytrzymałościowych GFRP do zastosowań mostowych i efektywny rejestr zmian w mikrostrukturze kompozytu, prowadzących do delaminacji materiału.

Publikacja zawiera 10 spójnych tematycznie rozdziałów. I rozdział to ogólna charakterystyka materiałów kompozytowych FRP. W rozdziale II umieszczono rezultaty badań własnych wybranego kompozytu GFRP. Rozdział III przedstawia przykłady realizacji budowli mostowych z udziałem pomostów kompozytowych. Tytuł IV rozdziału to *Proces projektowo-badawczy płyt pomostowych GFRP w analizie J. Knippersa i M. Gablera z Uniwersytetu w Stuttgarcie*. Rozdział V opisuje model numeryczny modułu ASSET Fiberline, według autorskiej analizy. Rozdział VI i VII to kolejno prezentacja wyników amerykańskich badań płyt GRFP systemu DuraSpan oraz badań modułów GFRP według Herberta Gurtlera. W rozdziale VIII opisano wykorzystanie kompozytów GFRP i innych FRP do wzmocnienia filarów mostowych. Rozdział IX jest poświęcony mechanizmom zniszczenia kompozytów wraz z analizą rezultatów własnych testów wytrzymałościowych, wzbogaconych o obserwację skaningową mikrostruktury kompozytu, w procesie delaminacji. Rozdział X przedstawia założenia do koncepcji projektowej kładki dla pieszych z pomostem kompozytowym wraz z wynikami autorskiej, kompleksowej analizy numerycznej.

Przeprowadzone własne badania wewnętrznej struktury potwierdziły anizotropową budowę wybranego kompozytu GFRP (Fiberline). Scharakteryzowały szczegółowo morfologię tworzywa konstrukcyjnego złożonego z włókien szklanych typu ECR i osnowy polimerowej, jako mieszaniny wyodrębnionych żywic poliestrowej i epoksydowej.

Układ włókien w kompozycie jest relewantny dla parametrów wytrzymałościowych elementów GFRP. Stwierdzenie to należy uznać za tezę badawczą, którą potwierdzają autorskie analizy. Dla wyselekcjonowanych włókien przeprowadzono termiczną analizę różnicową DTA, która wskazała na wysoką wartość temperatury dylatometrycznego mięknięcia $T_d=852^{\circ}\text{C}$. Otrzymane wyniki świadczą o wysokiej trwałości włókien szklanych, umieszczonych w kompozycie. Czynnikiem ten niewątpliwie ma wpływ na trwałość całościowego kompozytu.

Jako badanie komplementarne, celem potwierdzenia składu chemicznego włókna szklanego wyodrębnionego z kompozytu, wykonano analizę EDAX. Przy pomocy mikroskopu skaningowego SEM przeprowadzono obserwacje morfologii, pokroju i wzajemnego ułożenia włókien szklanych w matrycy.

Do identyfikacji rodzaju osnowy tj. materiału umożliwiającego powiązanie włókien w elementy powierzchniowe, stanowiące podstawę do wytwarzania elementów konstrukcyjnych, użyto fourierowskiej spektroskopii w podczerwieni.

Na podstawie analizy widma IR w podczerwieni stwierdzono, że materiał osnowy należy do klasy tworzyw termoutwardzalnych. Pasma występujące w zakresie od $3084\text{--}2586\text{ cm}^{-1}$ są charakterystyczne zarówno dla żywic epoksydowych jak i poliestrowych, natomiast pasmo leżące przy 1734 cm^{-1} dla żywicy poliestrowej. Pasma absorpcji występujące przy częstotliwości 1734 cm^{-1} odpowiada drganiom rozciągającym C=O grupy estrowej, natomiast pasmo absorpcji pojawiające się przy częstotliwości 3447 cm^{-1} odpowiada drganiom rozciągającym grupy OH grupy alkoholowej. Dwa pasma absorpcji przy częstotliwości 2930 cm^{-1} oraz pasmo przy 2856 cm^{-1} odpowiada drganiom symetrycznym grupy $=\text{CH}_2$. Można stwierdzić, że osnowę włókien stanowi mieszanina żywicy epoksydowej usieciowanej aminą opartą na bisfenolu A, oraz żywicy alifatycznej poliestrowej na bazie nienasyconego poliestru. Osnowa stanowi powłokę ochronną włókien, jak również w pewnym stopniu uczestniczy w przenoszeniu obciążeń, jakim poddany jest kompozyt GFRP.

Zrealizowaną analizę DTA dla wyodrębnionych włókien porównano oraz uzupełniono, w dalszej części publikacji z kompleksową analizą DSC.

W ramach podjętych własnych analiz materiałowych, przeprowadzono badania laminatu na bazie włókien szklanych, zatopionych w mieszaninie żywic epoksydowych i poliestrowych (GFRP Fiberline HD) wykonując różnicową kalometrię skaningową DSC. Pomiar o charakterze dynamicznym, zrealizowano w systemie przepływowym, w aparacie METTLER DSC. Technika DSC posłużyła do pomiaru mocy cieplnej, a dokładniej zmiany różnicy strumienia cieplnego powstającego między próbką badaną i referencyjną,

w trakcie przemiany termicznej. Wykonano również dynamiczną analizę mechaniczną (DMA), którą zastosowano do pomiaru mechanicznych i lepkosprężystych właściwości materiału w funkcji temperatury, czasu i częstotliwości, podczas periodycznych zmian obciążenia, któremu poddawana jest próbka. Badanie dla próbki laminatu (GFRP Fiberline HD) przeprowadzono, przy użyciu aparatu METTLER TOLEDO DMA/SDTA861e, który pozwala na bardzo dokładne wyznaczenie wielkości modułów sprężystości. Rezultaty analizy DSC oraz DMA stały się podstawą ważnego zakresu monografii, poświęconemu w całości aspektom trwałości materiału, jakim jest GFRP Fiberline, służącemu do wykorzystania w płytach pomostowych. Wykonano próby wytrzymałościowe zginania i rozciągania próbek materiału w urządzeniu ISTRON ARAMIS, z obserwacją mikroskopową zjawiska delaminacji kompozytu (mikroskop KEYENCE VHX-5000).

Zastosowanie analizy DTA, DSC i DMA posłużyło do określenia stabilności termicznej i mechanicznej badanego kompozytu, jako istotnych cech w aspekcie trwałości materiału.

Na podstawie przeprowadzonej analizy DSC wykazano, że badany materiał GFRP (pozyskany z pomostu Fiberline HD) jest stabilny termicznie i odporny na zmiany temperatury, w obszernym przedziale od -50°C do $+300^{\circ}\text{C}$. W swoim składzie wykazuje przewagę fazy amorficznej. Na podstawie analizy DTA, dotyczącej włókien szklanych ECR (wyodrębnionych z kompozytu GFRP Fiberline HD), określono, że temperatura transformacji T_g osiąga wartość 703°C . Dla kompozytu (włókna plus żywica poliestrowa i epoksydowa) wyznaczono temperaturę przemiany endotermicznej na poziomie 255°C . Wykonana analiza DSC jest uzupełniająca i cenna, w aspekcie porównania, w jaki sposób samodzielne włókna szklane ECR są odporne na wpływ narastającej temperatury, w stosunku do trwałości całościowego kompozytu.

Termiczna analiza różnicowa DTA i różnicowa kalorymetria skaningowa, typu przepływowego DSC oraz próby DMA to nowoczesny standard badań materiałowych. W wykonanych termicznych analizach dynamicznych temperatura próbek zmieniała się w sposób liniowy. Wartościowe okazało się połączenie różnych metod analizy termicznej, w celu dokonania całościowego, kompleksowego sprawdzenia materiału. W badaniach wykorzystano wysokiej klasy aparaturę badawczą, najlepszą w rankingu jednostek naukowych w Polsce w latach 2014-2015 (aparatura dostępna na AGH w Krakowie oraz na Wydziale Chemii Politechniki Rzeszowskiej; Politechnika Opolska nie dysponuje tego typu możliwościami badawczymi). Rezultaty badań materiałowych DTA, DSC i DMA kompozytu GFRP (systemu Fiberline), do zastosowań mostowych w płytach pomostowych, zostały po raz pierwszy opisane w Polsce, w prezentowanej monografii w roku 2015 [M1]

i innych autorskich publikacjach, powiązanych ze sobą tematycznie w kolejnych latach [M1]-[M24].

Wytrzymałościowe badania testowe materiału GFRP wykazały bardzo dobre parametry wytrzymałościowe rozciąganego osiowo elementu kompozytowego (wyciętego z modułu płyty pomostowej Fiberline HD), złożonego z włókien szklanych i żywicy epoksydowej oraz poliestrowej. Element uległ zniszczeniu, w momencie gdy naprężenie rozciągające osiągnęło wartość ≈ 300 MPa. Badania udowodniły również bardzo dobre parametry wytrzymałościowe zginanego elementu kompozytowego (wyciętego z modułu płyty pomostowej Fiberline HD). Zniszczeniu elementu, w próbie 4-punktowego zginania, odpowiadało naprężenie zginające o wartości ≈ 267 MPa. Analizy DMA udowodniły natomiast stabilność termiczną próbki i wysokie wartości modułu zachowawczego.

W badaniach uwzględniono częstotliwość drgań próbki kompozytu 5 Hz, wartość przyłożonej siły to 2 N, wymiary badanej próbki 70 x 10,22 x 3,44 mm. Jak potwierdziły badania, wartość modułu zachowawczego wzrastała wraz ze wzrostem temperatury. Przy temperaturze 50 °C osiągnęła wysoką wartość 20600 MPa. Wybrany zakres temperatur dostosowany został do hipotetycznych warunków rzeczywistych pracy konstrukcji, z udziałem kompozytu polimerowego. Generalnie badania izotermiczne udowodniły wysokie wartości modułu zachowawczego, w szerokim zakresie temperatur od - 30 °C do + 50 °C. Techniczna przydatność materiałów polimerowych zależy od tego, czy spełniają one wymagania sztywności i wytrzymałości tak, aby ich trwałość w warunkach użytkowania była dostateczna. Tradycyjne mechaniczne charakterystyki otrzymywane jako wynik badań przy obciążeniu statycznym, przy rozciąganiu, ściskaniu i skręcaniu są niewystarczające do przewidywania zachowania się materiałów polimerowych w ekstremalnych warunkach użytkowania (np. wysokie i niskie temperatury), jak również w długim okresie czasu. Problemem jest więc wybór metod badania, pozwalających przewidywać zmianę właściwości lepkosprężystych, w funkcji czasu na podstawie danych doświadczalnych.

Moduł Younga E wyznaczony metodą DMA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis) jest modułem zespolonym M^* ($E=M$, według oznaczeń w aparacie METTLER, opisany równaniem $M^* = M' + M''$). Składa się on z części rzeczywistej M' (moduł zachowawczy), występującej zgodnie z fazą odkształcenia, i urojonej M'' (moduł stratności), która jest przesunięta względem odkształcenia o $\pi/2$. Często zamiast modułu stratności M'' podaje się tangens kąta stratności mechanicznej $\text{tg}\delta$. W przypadku ciał doskonale sprężystych $M'' = 0$, natomiast dla ciał doskonale lepkich $M' = 0$. Dla polimerów i kompozytów na osnowie polimerowej na ogół $M'' < M'$. Uzyskany w badaniach własnych moduł Younga,

dla próbki laminatu (GFRP Fiberline HD) w części rzeczywistej, czyli moduł zachowawczy - M' osiągnął wartość w godzinnym oziębianiu lub godzinnym nagrzewaniu próbki, odpowiednio:

- temperatura -30°C , $M' = 14000$ MPa,
- temperatura -5°C , $M' = 18200$ MPa,
- temperatura $+50^{\circ}\text{C}$, $M' = 20600$ MPa.

Przytoczone uzupełniająco w monografii przykłady istniejących w rzeczywistości mostowych konstrukcji drogowych oraz kładek dla pieszych potwierdziły generalną tezę rozważań publikacji, sprowadzającą się do stwierdzenia, że kompozyty GFRP, wytwarzane w technologii pultruzji, w postaci elementów modułowych mogą zastąpić elementy z tworzyw tradycyjnych typu beton i stal, i mogą być wykorzystywane jako system płyt pomostowych, bądź również jako elementy konstrukcyjne nowoczesnych, lekkich, łatwych w montażu, ciekawych architektonicznie budowli mostowych o małych i średnich rozpiętościach teoretycznych przęseł. Pojawiające się pytanie natury naukowo-konstrukcyjno-badawczej to zagadnienie dotyczące trwałości samego tworzywa konstrukcyjnego, w czasie rzeczywistej eksploatacji, trwałości połączeń pomiędzy modułami GFRP oraz trwałości całościowej konstrukcji, poddanej obciążeniom statycznym i dynamicznym. Opisane w monografii badania i analizy sprawdziły wszechstronnie wybrany system modułowy GFRP Fiberline w autorskich badaniach materiałowych oraz w testach wytrzymałościowych i numerycznych.

Podjęte badania potwierdziły tezę badawczą, że kompozyt GFRP (Fiberline) jest predysponowanym materiałem do zastosowań mostowych (płyty pomostowe), gdyż wykazuje trwałość w każdej temperaturze eksploatacyjnej. Oczywiście cenne są analizy DSC i DMA dla materiału postarzanego, pozyskanego z płyty pomostowej, przez wiele lat eksploatowanej. Takie badania zostały zrealizowane w dalszej działalności naukowej autorki publikacji i opisane w artykule, opublikowanym w roku 2018 w *Journal of Composite Materials* [M3].

Bardzo ważnym działem mechaniki kompozytów jest mechanika niszczenia. Kompozyt, ze złożoną strukturą, ulega złożonemu procesowi niszczenia, a jednocześnie jest w stanie przenosić obciążenie jeszcze długo po pojawieniu się pierwszych oznak uszkodzeń. W uszkodzeniu możemy wyróżnić zarysowanie matrycy, zerwanie włókna czy ścięcie włókna i matrycy. Do identyfikacji powstania i rozwoju tego typu zniszczeń stosuje się makromodele bazujące na kryteriach wytrzymałości warstwy kompozytu ortotropowego, a ich zadaniem jest możliwie dokładne odzwierciedlenie skomplikowanego mechanizmu niszczenia

w tym niejednorodnym materiale. Bardziej płynna modyfikacja właściwości materiału wraz z powstaniem uszkodzenia, aż do całkowitego zniszczenia jest przedmiotem działu mechaniki zatytułowanego mechanika continuum uszkodzeń (ang. continuum damage mechanics (CDM)). Podejście to polega na wprowadzeniu pewnego parametru nazywanego parametrem niszczenia, który zależy od odkształcenia lub naprężenia i przyjmuje wartości od zera dla materiału bez uszkodzeń do jednego dla materiału całkowicie zniszczonego. W odniesieniu do makromodelowania struktur kompozytowych należy zdefiniować odrębne parametry niszczenia dla różnych form uszkodzeń, które modyfikują sztywności odpowiadające tym formom. Można w przypadku kompozytów posłużyć się techniką wirtualnego zamykania rys (ang. virtual crack closure technique (VCCT)). Podejście to jak i inne bazujące na mechanice pęknięcia (wirtualne wydłużanie rysy, J-integral) wymaga istnienia rysy i jest w stanie jedynie modelować jej rozwój. Niemniej jednak temat ten jest wciąż otwarty na nowe idee badaczy, a związane to jest w głównej mierze ze skomplikowaną strukturą wewnętrzną kompozytów i co się z tym wiąże z trudnym do przewidzenia oraz opisu mechanizmem niszczenia przy jednocześnie dość długiej „żywności” pomimo uszkodzeń. Ważnym aspektem jest również rozwój uszkodzenia na skutek dalszego obciążenia, aż do całkowitej utraty nośności przez element konstrukcyjny. Proces zniszczenia kompozytów może mieć różnorodny przebieg w zależności od rodzaju kompozytu i obciążenia na niego działającego. Ogólnie zniszczenie kompozytu w sensie mechanicznym to znacząca zmiana właściwości materiału, niebezpieczna dla konstrukcji. Zanim dojdzie do zniszczenia, kompozyt często ulega uszkodzeniom, które nie zawsze są niebezpieczne dla konstrukcji, powodują jednak zmianę właściwości mechanicznych kompozytu, najczęściej jego osłabienie, co należy uwzględnić w procesie projektowania. Ważnym elementem jest identyfikacja uszkodzenia i modyfikacja właściwości materiału z uszkodzeniem. Rodzaj uszkodzenia zależy głównie od właściwości mechanicznych komponentów, w przypadku włóknokompozytów - osnowy i włókna, a także od rodzaju ich zespolenia. W przypadku pojedynczej laminy występują uszkodzenia wewnątrz struktury warstwy (ang.: intralaminar failure) i dominują następujące rodzaje uszkodzeń pęknięcie matrycy, pęknięcie lub wyboczenie włókna, wyciąganie włókna z matrycy (utrata adhezji), ścięcie kompozytu. W celu wyznaczenia miejsca powstania i rodzaju uszkodzenia niezbędne są pewne wielkości charakterystyczne określające stany graniczne materiału. Wielkościami tymi mogą być zarówno odkształcenia jak i naprężenia, charakteryzujące stan graniczny materiału. Wyznaczenie krytycznych wartości naprężeń przy złożonym ich stanie, z jakim mamy do czynienia w trakcie eksploatacji, jest niezwykle skomplikowane i wymagałoby

przeprowadzenia olbrzymiej ilości doświadczeń dla różnych, możliwych zestawów obciążeń. Należy tu zaznaczyć, że w przypadku kompozytów włóknistych wspomniane wielkości krytyczne są odmienne w różnych kierunkach i zależą od sposobu ułożenia włókien.

Materiał kompozytowy GFRP wbudowany w płytę pomostową narażony jest na wpływy dynamiczne, wynikające z eksploatacji konstrukcji mostowej. W tym aspekcie istotna jest wytrzymałość zmęczeniowa modułów kompozytowych, a także analiza dotycząca istnienia wczesnej delaminacji w strukturze laminatu pomostowego. Obserwacja materiału pod kątem wczesnej delaminacji, a następnie postępującej delaminacji jest bardzo istotna w czasie monitoringu konstrukcji mostowej, z kompozytową płytą pomostową, bądź innymi elementami konstrukcyjnymi z GFRP. Wyróżniająca są mikrorysy, a następnie rysy w kierunku prostopadłym do przyłożonego obciążenia zewnętrznego oraz mikrorysy i rysy równoległe do załaminowanych włókien, czyli uszkodzenia, które pojawiają się w osnowie kompozytu w kierunku zgodnym do osi pultruzji włókien, a także rysy postępujące ułożone pod kątem 45^0 pomiędzy włóknami.

Wczesna delaminacja zostaje zapoczątkowana przez powstanie rys w matrycy pomiędzy włóknami, ale równocześnie też na powierzchni styku matrycy i włókna.

Opisana w monografii analiza mikroskopowa, wewnętrznej mikrostruktury zniszczonego w przeprowadzonych testach wytrzymałościowych materiału, pokazała strefową utratę połączenia włókien z matrycą oraz zerwanie włókien szklanych, w pierwszej kolejności w bocznych strefach kompozytu. Najtrwalszy okazał się środkowy trzon kompozytu, złożony z gęsto upakowanych szklanych włókien w układzie równoległym.

We własnych publikacjach, o tematyce zastosowań GFRP w mostownictwie, przedstawiono kierunki możliwości modyfikacji kompozytów GFRP, w celu ograniczenia mikrozarysowań, występujących w matrycy polimerowej, pomiędzy włóknami. Mikrozarysowania te są generalnie inicjacją wczesnej delaminacji, obserwowanej w skali mikro.

W pracy monograficznej przedstawiono kierunki możliwych modyfikacji kompozytów GFRP, aby ograniczyć mikrozarysowania występujące w matrycy polimerowej, pomiędzy włóknami. Modyfikacja, uszlachetnienie matrycy polimerowej z zastosowaniem nanocząstek, na przykład nanokrzemionki lub nanotub węglowych jest nowatorskim podejściem do materiałów kompozytowych, szeroko badanych na świecie, w aspekcie aplikacji lotniczych, budowlanych i wojskowych. Wymienione zagadnienia stały się podstawą angielskojęzycznej publikacji autorki *GFRP Bridge panel by material and FEM analysis*, opublikowanej przez Lambert Academic Publishing, Germany 2015 [M5].

Nowatorskie, w podjętych działaniach badawczych, było połączenie skali makro i mikro w prowadzonych rozważaniach. Nowoczesne materiały kompozytowe, w tym GFRP charakteryzują się innymi mechanizmami zniszczenia, od tych, które występują w procesach destrukcji materiałów tradycyjnych. Istotne dla kompozytów są badania za pomocą mikroskopii skaningowej, służące do opisu zjawisk delaminacji. W procedurze badawczej analiza skaningowa SEM oraz mikroskopia elektronowa była ważnym uzupełniającym polem działań poznawczych. Temat genezy powstawania wczesnej delaminacji modułów mostowych GFRP został zaprezentowany w autorskich publikacjach konferencyjnych na światowej cyklicznej konferencji MechComp 2014 Long Island, w 2014 r. [C7], a także na światowym kongresie Spring World Congress on Engineering and Technology (SCET 2015) w Pekinie, w roku 2015 [C5].

Dla konstrukcji mostowych, w których definiujemy pomost kompozytowy GFRP, istotne i ciekawe ze względów naukowo-inżynierskich są analizy wpływów dynamicznych. Generalnie zagadnienia dynamiki obejmują jednocześnie trzy podstawowe aspekty: opis oddziaływań dynamicznych, dynamiczne cechy materiałów, zwłaszcza ustroju nośnego, ale też pomostu oraz interakcję pomiędzy oddziaływaniami, a konstrukcją. W monografii przedstawiono wyniki badań i analiz wpływów dynamicznych na konstrukcję kładki dla pieszych, z lekkim pomostem kompozytowym GFRP HD Fiberline. Analizy numeryczne obejmowały analizę modalną oraz przejście pieszego w różnych konfiguracjach konstrukcyjnych, różnorodnych zadanych schematach statycznych, systemach łożyskowania itd. Głównym celem analiz było sprawdzenie uwarunkowań zastosowania pomostów kompozytowych GFRP, w aspekcie wyznaczenia wartości i postaci drgań własnych.

Kompleksowa weryfikacja numeryczna kładki dla pieszych z pomostem kompozytowym, przedstawiona w monografii, jest pierwszym etapem nurtu koncepcyjno-projektowego, wykorzystania pomostów GFRP w kładkach dla pieszych. Otrzymane rezultaty analizy modalnej oraz odpowiedzi konstrukcji na przejście pieszego były zaprezentowane na światowej cyklicznej konferencji Footbridge 2014, London, w lipcu 2014 roku [C8]. W dalszych fazach działań, przeprowadzona została analiza pracy dynamicznej kładki dla pieszych o konstrukcji podwieszanej, z pomostem GFRP. W perspektywicznych badaniach, opracowany zostanie projekt remontu, połączonego z modernizacją konstrukcji mostowej, w której starą płytę pomostową zastąpi lekka płyta kompozytowa. Dla tej budowli, po jej zrealizowaniu zostaną przeprowadzone badania, które ideowo mają wykazać w jaki sposób materiał kompozytowy płyty pomostowej jest odpowiedzialny za tłumienie drgań przęsła mostowego.

Najważniejszą konkluzją z przeprowadzonej modalnej analizy numerycznej (opisanej w monografii) było to, że przy konstrukcji kładki, o pomoście kompozytowym, zadanej jako układ dwuprzęsłowy, o niezależnie pracujących i swobodnie podpartych przęsłach uzyskano w pierwszych postaciach drgań własnych, jak również przy zadanym przejściu pieszego częstotliwości drgań poniżej 5 Hz. Wartość ta jest wymagana (obligatoryjna do uzyskania) w analizie pracy dynamicznej konstrukcji kładki dla pieszych, w nadrzędnym celu zapewnienia bezpieczeństwa jej użytkowania i zagwarantowania komfortu dla użytkowników.

Otrzymane rezultaty są istotne ze względu na to, że analizowaną budowlę – most dla pieszych można zakwalifikować do konstrukcji smukłych i wiotkich, charakteryzujących się małą szerokością (szerokość użytkowa 3000 mm, całkowita konstrukcyjna 3440 mm) przy dużej rozpiętości – dwa przęsła powyżej 24000 mm. Dla takich obiektów wpływy dynamiczne, ich praca w zakresie dynamicznym jest wyjątkowo specyficzna. Oczywiście dodatkowe znaczenie ma mały ciężar własny pomostu kompozytowego, który powoduje wrażliwość konstrukcji na oddziaływania dynamiczne.

Uciążlenie konstrukcji, rozważane w wielowątkowych analizach, spowodowało efekt zwiększenia częstotliwości drgań własnych i częstotliwości drgań, przy przejściu pieszego, co należy uznać za zjawisko niepożądane.

Na obecnym stopniu własnego zaawansowania w analizę numeryczną wiadomo, że bardzo wymagające jest zamodelowanie połączenia płyty z dźwigarami nośnymi ustroju mostu – stalowymi bądź betonowymi. W przypadku połączenia klejonego zaakcentować należy potrzebę głębokiego wejścia w bazę danych, identyfikującą takie połączenie. Na trudności napotyka się w prawidłowym zamodelowaniu płyty pomostowej, kompozytowej, z materiału anizotropowego współpracującej ze stalowymi bądź żelbetowymi dźwigarami, które są tworzywem izotropowym.

Podsumowując, publikacja poszerza wiedzę przydatną dla mostowców na temat nowoczesnych rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych przy projektowaniu i budowie pomostów obiektów drogowych oraz kładek dla pieszych, dla celów cywilnych i wojskowych. Włókna szklane ECR produkowane są w Polsce, żywice epoksydowe i poliestrowe są ogólnie dostępne. Perspektywicznie, możliwa jest produkcja polskich modułów GFRP do zastosowań mostowych, z wykorzystaniem technologii pultruzji. Na początku drogi zaistnienia tej technologii na gruncie polskim ważne jest poznanie morfologii materiału, poszerzanie wiedzy o możliwościach technicznych, konstrukcyjnych i żywotności eksploatacyjnej kompozytów GFRP. Poszczególne rozdziały monografii syntetycznie pokazały analizy materiałowe, testy wytrzymałościowe materiału GFRP jako

takiego oraz modułów tworzących płyty pomostowe. Wszystkie badania, własne oraz opisane na podstawie osiągnięć jednostek naukowych na świecie, potwierdzają przydatność kompozytów GFRP w budowlach mostowych.

Ze względu na swoje właściwości mechaniczne (wysoką wytrzymałość na rozciąganie i wysoki moduł sprężystości podłużnej) najczęściej stosowane są inne kompozyty na bazie włókien węglowych CFRP. Do wzmocnienia zginanych konstrukcji żelbetowych używa się sztywnych laminatów lub wiotkich mat, które przyklejone na powierzchni betonu pełnią funkcję zewnętrznego zbrojenia rozciąganego. Wysoka efektywność wzmocniania elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu kompozytów została potwierdzona licznymi krajowymi i zagranicznymi badaniami laboratoryjnymi oraz praktycznymi aplikacjami na istniejących obiektach. R. Kotynia, pioniersko w skali kraju, zrealizowała kompleksowe badania w kierunku przydatności biernych i czynnych wzmocnień CFRP konstrukcji żelbetowych w budownictwie ogólnym. K. Furtak i T. Siwowski wprowadzili, jako pierwsi w Polsce, zewnętrzne zbrojenie lamelami CFRP w modernizowanych konstrukcjach mostowych. Coraz częściej próbuje się w inżynierii materiałowej połączyć różne rodzaje włókien w kompozycie polimerowym – przykład mostu drogowego, zrealizowanego jesienią 2015 r. pod Rzeszowem z elementów kompozytowych FRP. Zaprojektowano i kompleksowo analizowano kładkę dla pieszych (zespół naukowy Politechniki Gdańskiej i WAT) o konstrukcji powłokowej z kompozytu przekładkowego GFRP z rdzeniem PET (projekt doczekał się rzeczywistej realizacji). W aplikacjach modernizacyjnych mostowych elementów konstrukcyjnych łączy się materiały kompozytowe, wzmacniające, wytworzone z różnego rodzaju włókien, w tym szklanych.

W Europie wiodącą jednostką badawczą, w dziedzinie kompozytów jest Composite Construction Laboratory w Szwajcarskim Instytucie Technologicznym w Lozannie. Różne podzespoły pod kierunkiem T. Kellera realizują tam projekty badawcze, głównie skupiając uwagę na płytach pomostowych produkowanych przez duńskiego producenta Fiberline. T. Keller jako pierwszy w Europie, na podstawie badań materiałowych, pokazał anizotropową budowę kompozytu GFRP, złożonego z konglomeratu włókien szklanych zatopionych w żywicy polimerowej. Natomiast rozprawa jest kompleksowym raportem z badań materiałowych przeprowadzonych po raz pierwszy w Polsce, które przeanalizowały w ujęciu makroskopowym i mikroskopowym materiał wycięty z elementu płyty kompozytowej GFRP Fiberline.

Obiekty mostowe o konstrukcji wykonanej w całości z kompozytu na bazie włókien szklanych GFRP wciąż należą do nielicznych. Na świecie znanych jest zaledwie kilka takich

konstrukcji. Wśród nich można wymienić: kładkę dla pieszych o konstrukcji podwieszanej Scripps Bridge w miejscowości La Jolla, USA, kładkę Aberfeldy Bridge w Szkocji, Wielka Brytania, kładkę z kratownicowym dźwigarem nośnym Pontresina Bridge w Szwajcarii, kładkę łukową w pobliżu hiszpańskiego miasta Lleida, kładkę w miejscowości Tainan na Tajwanie, kładkę o konstrukcji podwieszanej, w miejscowości Kolding w Danii, która była przedmiotem współautorskich badań dynamicznych, zrealizowanych w 2016 roku (M4), a nie opisanych we wcześniejszej monografii własnej z roku 2015.

Podstawowymi charakterystykami modalnymi konstrukcji inżynierskich są częstości drgań własnych, odpowiadające im postaci drgań własnych i tłumienie konstrukcyjne. Znajomość wartości rzeczywistych charakterystyk stanowi podstawę weryfikacji poprawności rozwiązań przyjętych na etapie projektowania konstrukcji i może być pomocna do oceny i monitorowania stanu technicznego konstrukcji poddanych działaniom obciążeń dynamicznych. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do tłumienia konstrukcyjnego, które jest jednym z ważniejszych, a jednocześnie niepewnym parametrem, znacząco redukującym niepewność obliczeniowej odpowiedzi konstrukcji. Wiarygodnym sposobem określenia rzeczywistych wartości charakterystyk dynamicznych konstrukcji jest wykonanie pomiarów ich drgań. Publikacje dotyczące badania charakterystyk dynamicznych i odpowiedzi pod obciążeniem dynamicznym obiektów mostowych o konstrukcji wykonanej z kompozytów polimerowych na bazie włókien szklanych GFRP są wciąż nieliczne i niewystarczające do sformułowania wytycznych i zaleceń do projektowania tego typu obiektów. Dlatego obecnie istnieje duża potrzeba wykonania takich badań.

W analizie współautorskiej przedstawiono sposób określenia i wyniki analizy charakterystyk dynamicznych podwieszanej kładki dla pieszych, znajdującej się w miejscowości Kolding w Danii, wykonanej w całości z kompozytu polimerowego na bazie włókien szklanych GFRP. Konstrukcja została wykonana jako dwuprzęsłowa z pomostem podwieszonym do pylonu w kształcie litery A. Całkowita długość pomostu wynosi 40,77 m, zaś jego szerokość użytkowa 3,21 m. Na podstawie pomiarów przyspieszeń drgań swobodnych pomostu kładki, wymuszonych podskokami jednej osoby, dokonano identyfikacji pięciu pierwszych częstości drgań własnych, odpowiadających postaci drgań własnych i wartości liczby tłumienia konstrukcyjnego. Częstości i postaci drgań własnych wyznaczono metodą dekompozycji w dziedzinie częstotliwości. Wartości liczby tłumienia konstrukcyjnego wyznaczono na podstawie aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów odfiltrowanych drgań swobodnych pomostu kładki. Otrzymane wartości liczby tłumienia porównano z wartościami podanymi w literaturze dla wybranych kładek o konstrukcjach

wykonanych z innych, powszechnie stosowanych materiałów. Stwierdzono stosunkowo dużą wartość tłumienia konstrukcyjnego analizowanej kładki. Otrzymane wyniki badań mogą być pomocne do przewidywania dynamicznej odpowiedzi nowoprojektowanych konstrukcji mostowych, a także do oceny i monitorowania stanu technicznego istniejących obiektów mostowych o konstrukcji wykonanej z kompozytów na bazie włókien szklanych GFRP.

Pomiary drgań swobodnych kładki wykonano po dwóch dekadach eksploatacji obiektu. Do pomiarów zastosowano dwa niskoszumowe czujniki typu PCB 3711E112G, wykonane w technologii Micro-Electro-Mechanical System (MEMS), które mają zdolność rejestracji przyspieszeń drgań o częstościach w przedziale od 0 do 400 Hz w zakresie pomiarowym ± 2 g. Czujniki przyspieszeń były połączone z kartą pomiarową typu Data Translation DT9837A, a ta z kolei z komputerem typu Laptop, służącym do stałej kontroli i zapisu danych w trakcie prowadzonych badań. Do określenia postaci drgań konieczne było zastosowanie dwóch czujników jednocześnie. W tym celu wybrano 28 punktów pomiarowych znajdujących się w górnej części dźwigarów nośnych przęseł kładki (dźwigar „A” i „B”), głównie w odstępach co 3,1 m wzdłuż osi podłużnej dźwigarów. W czasie badań jeden z czujników znajdował się w stałym położeniu w punkcie referencyjnym, zaś drugi był umieszczany kolejno od punktu 1 do punktu 27.

Po każdej zmianie położenia czujnika ruchomego wykonywane były pomiary drgań swobodnych pomostu kładki w płaszczyźnie pionowej, w czasie co najmniej 15 sekund, wymuszonych pojedynczym podskokiem jednej osoby. Podskoki wykonywane były na środku pomostu w pobliżu punktu referencyjnego. Pomiary rejestrowano z częstością próbkowania 200 Hz.

Na podstawie pomierzonych przyspieszeń drgań pomostu określono, za pomocą szybkiej transformacji *Fouriera*, częstości drgań swobodnych pomostu, które na osi odciętych odpowiadały wartościom dominującym w uzyskanym spektrum. Na otrzymanym spektrum widocznych wyodrębniono pięć wyraźnych pików, których wartości odpowiadają pięciu pierwszym częstościom drgań swobodnych pomostu, tj.: $f_1=4,30$ Hz, $f_2=6,59$ Hz, $f_3=11,13$ Hz, $f_4=17,09$ Hz, i $f_5=20,23$ Hz.

W celu wyznaczenia postaci drgań własnych pomostu analizowanej kładki, odpowiadających kolejnym częstościom drgań własnych, zastosowano procedurę metody dekompozycji w dziedzinie częstotliwości, znanej w literaturze światowej pod nazwą *Frequency Domain Decomposition* (FDD).

Metoda FDD została opracowana przez *Brincker'a* i stanowi rozszerzenie metody znanej pod nazwą *Peak-Picking*. Metoda ta służy do określenia częstości i odpowiadających

im postaci drgań własnych konstrukcji na podstawie zarejestrowanych sygnałów cyfrowych przedstawiających drgania konstrukcji w co najmniej dwóch punktach pomiarowych jednocześnie. W tym celu konieczne jest wyznaczenie rozkładu według wartości osobliwych (*ang. Singular Value Decomposition*) zbioru macierzy gęstości widmowych mocy $\mathbf{G}_{xx}(if_i)$ zarejestrowanych odpowiedzi konstrukcji. Zbiór tych macierzy w skończonym dyskretnym przedziale częstości należy wyznaczyć za pomocą dyskretnej transformaty *Fouriera*.

Postacie drgań własnych analizowanej kładki wyznaczono na podstawie wyników pomiarów przyspieszeń pionowych drgań swobodnych jej pomostu, wymuszonych pojedynczymi podskokami jednej osoby, zarejestrowanych jednocześnie w dwóch różnych punktach pomiarowych, tj. w stałym punkcie referencyjnym i w punktach pomiarowych od 1 do 27. Obliczenia wykonano za pomocą autorskiego programu komputerowego, napisanego w środowisku MATLAB. Gęstości widmowe *PSD* i *CSD* dyskretnego sygnału cyfrowego, przedstawiającego drgania swobodne analizowanej kładki, wyznaczono techniką *Welcha*.

Wartości liczby tłumienia konstrukcyjnego ξ_k pomostu analizowanej kładki, odpowiadające częstościom drgań własnych f_{0k} , zostały obliczone na podstawie zarejestrowanych przyspieszeń pionowych drgań swobodnych pomostu w punkcie referencyjnym. W tym celu dokonano dekompozycji zarejestrowanych przyspieszeń drgań na pięć składowych drgań swobodnych charakteryzujących się analizowanymi częstościami drgań od f_{01} do f_{05} . Dekompozycji drgań dokonano techniką filtracji z zastosowaniem filtru Chebysheva typ 1, pasmowo-przepustowego, rzędu 8, ze współczynnikiem zafalowań 1 dB. Procedurę filtracji wykonano przyjmując pasma częstości przepustowych znajdujących się w następujących przedziałach: 3,5-5,0 Hz; 6,0-6,8 Hz; 11,0-11,5 Hz; 16,8-17,3 Hz i 19,5-20,7 Hz.

Na podstawie wykonanych badań *in situ* kładki podwieszanej z elementów konstrukcyjnych w całości wykonanych z kompozytu GFRP, sformułowano następujące wnioski:

- a) dokonano identyfikacji pięciu pierwszych częstości drgań własnych, odpowiadających postaci drgań własnych i wartości liczby tłumienia konstrukcyjnego. Postacie drgań własnych nr 1, 3, 4 i 5 reprezentują formy drgań giętnych pomostu, zaś postać nr 2 jest skrętną formą drgań,
- b) na podstawie porównania otrzymanych wartości liczby tłumienia analizowanej kładki i wartości literaturowych dla wybranych kładek dla pieszych wykonanych z betonu lub stali o porównywalnych rozpiętościach stwierdzono, że tłumienie konstrukcyjne kładki wykonanej

w całości z kompozytu GFRP jest największe i mieści się w przedziale od 1,6 do 2,8 % dla wszystkich analizowanych częstości drgań własnych. Tłumienie kładek betonowych mieści się w przedziale od 0,2 do 1,8 %, zaś stalowych od 0,2 – 2,1 %.

W następnej części badań określono komfort użytkowania obiektu Kolding Footbridge według kryteriów Eurokodu i zaproponowanych zaleceń projektowych w pracy Sétra. W tym celu wyznaczono wartości przyspieszeń drgań wymuszonych kładki wywołanych przejściem lub biegiem jednej bądź dwóch osób.

Czujniki niskoszumowe (typu PCB 3711E112G) zostały umieszczone w dwóch punktach pomiarowych, będących punktami odbioru drgań wymuszonych ruchem osób na pomoście kładki. Kompleksowe testy polowe obejmowały wyznaczenie dynamicznej odpowiedzi konstrukcji wzbudzonej kolejno przejściem swobodnym i biegiem pieszego oraz synchronicznym przejściem i biegiem dwóch osób po kładce kompozytowej. Zarejestrowane w dwóch punktach pomiarowych maksymalne wartości przyspieszeń pionowych drgań przęśła kładki od przejścia jednej osoby wynoszą odpowiednio $a^{Nr\ 1}=0,37\text{ m/s}^2$ i $a^{Nr\ 2}=0,57\text{ m/s}^2$. Wartości te mieszczą się w zakresie podanym w przepisach normowych Eurokod, dla których w przypadku drgań pionowych dowolnej części przęśła maksymalne przyspieszenia pomostu nie powinny przekraczać $0,7\text{ m/s}^2$. Przyspieszenia pionowe zarejestrowane przy synchronicznym przejściu i biegu dwóch osób oraz biegu jednej osoby nie spełniają, w przypadku pomostu kładki w Kolding, wymogów podanych w Eurokodzie, jednakże spełniają minimalny komfort użytkowania według zaleceń technicznych przedstawionych w pracy Sétra. Maksymalne wartości przyspieszeń przęśła wymuszone synchronicznym biegiem dwóch osób wyniosły odpowiednio w pierwszym i drugim punkcie pomiarowym $a^{Nr\ 1}=1,87\text{ m/s}^2$ i $a^{Nr\ 2}=1,79\text{ m/s}^2$.

Ze względu na niewystarczającą liczbę publikacji dotyczących badań charakterystyk dynamicznych i odpowiedzi pod obciążeniem dynamicznym obiektów mostowych o konstrukcji wykonanej z kompozytów polimerowych GFRP obecnie istnieje duża potrzeba wykonania takich badań. Informacje uzyskane z tych analiz mogą być pomocne na etapie projektowania tego typu nowych obiektów w celu weryfikacji przyjętych dla nich modeli obliczeniowych i przewidywania ich odpowiedzi pod obciążeniem dynamicznym, a także w celu oceny i monitorowania stanu technicznego istniejących obiektów. Wykonane badania in situ, ich analiza oraz efekt publikacyjny stanowi materiał uzupełniający w stosunku do podstawowego nurtu badawczego, przedstawionego w monografii M1.

Publikacja monograficzna opisała spektrum możliwości zastosowań kompozytowych płyt pomostowych GFRP, opierając się o własne badania wytrzymałościowe, jak również

doświadczenia badawcze czołowych ośrodków naukowych na świecie, zajmujących się problematyką zastosowań GFRP w mostownictwie. Wykorzystując najnowocześniejszą aparaturę, dostępną w Polsce, przeprowadzono kompleksowe badania materiału GFRP Fiberline, wykonując analizy DTA, EDAX, DSC i DMA. Rezultaty tych badań, przyczyniły się do poznania morfologii materiału i udowodniły trwałość testowanego GFRP Fiberline. Praca poruszyła temat specyfiki mechanizmu zniszczenia kompozytu GFRP, analizując zjawiska w wymiarze mikroskopii elektronowej. Odrębną częścią publikacji stała się propozycja koncepcji projektowej kładki dla pieszych z pomostem GFRP Fiberline HD, z zamieszczonymi rezultatami analizy modalnej. Monotematyczna monografia w swoich zamierzeniach jest raportem kompleksowego tematu naukowo-badawczego, wykorzystania modułowych płyt pomostowych GFRP w nowych i modernizowanych konstrukcjach mostowych, cywilnych i wojskowych, z analizą ich trwałości, przewagi nad rozwiązaniami tradycyjnymi, sprawdzeniem możliwości ich recyklingu.

Autorska monografia skoncentrowała się na nowatorskich zagadnieniach analiz termicznych trwałości kompozytu GFRP oraz obserwacji mechanizmów zniszczenia w jego mikrostrukturze. Wielowątkowe opracowanie oparto na badaniach, testach, próbach doświadczalnych oraz na kompleksowych analizach numerycznych.

Monografia habilitacyjna przedstawia stan wiedzy, możliwość zastosowań kompozytów GFRP w aspekcie konstrukcji mostowych, kierunków badawczych i metodyki badań, możliwości projektowych w nowoczesnym kształtowaniu konstrukcyjnym. Pierwsza publikacja autorska zamieszczona w roku 2016 w *Journal of Composite Materials* [M2] to pokazanie nowoczesnej metodologii badań, udowodniającej trwałość materiału kompozytowego GFRP, w zakresie nowatorskim w skali polskiej i światowej. Kompatybilną metodykę badań i analiz porównawczych wykorzystano dla procesu badawczego dla próbek kompozytu GFRP po 20 latach obecności w naturalnym środowisku w konstrukcji mostowej, co opisano w roku 2017, również w *Journal of Composite Materials* [M3].

Analizy metod badawczych, trwałości polimerów zbrojonych włóknami szklanymi, opisane w monografii stały się podstawą do opracowania metodologii badań, w celu określenia zmian zachodzących w strukturze GFRP w wyniku synergicznego efektu wpływów środowiskowych na materiał kompozytowy.

Przeprowadzono kompleksowe badania dynamiczne konstrukcji kładki dla pieszych, wykonanej z 100% GFRP, aby potwierdzić bardzo dobry stan techniczny kładki, po dwudziestu latach eksploatacji. Ponadto uzyskano potwierdzenie potrzeby przeprowadzenia określonych badań materiałowych i testów in situ w celu określenia

trwałości rozwiązań konstrukcyjnych, skuteczności połączeń elementów, braku zmian degradacyjnych w materiale. Opracowano tym samym zespół zasad monitoringu i inwentaryzacji konstrukcji kompozytowych. Na podstawie szerokiego przeglądu literatury wypracowano wzorce własne, dotyczące metodologii badań kompozytowych budowli mostowych. Rezultaty badań monitoringu kładki dla pieszych o konstrukcji podwieszanej, złożonej ze wszystkich elementów kompozytowych (Kolding Footbridge) opisano w roku 2018 w czasopiśmie *Steel & Composite Structures An International Journal* Techno Press [M4].

Za największe osiągnięcia naukowe rozprawy uważam:

- a) potwierdzenie przydatności instrumentalnych metod termicznych i skaningowej mikroskopii elektronowej do określenia trwałości mostowego kompozytu GFRP i jego stabilności w szerokim zakresie temperatur oraz wyjaśnienia mechanizmów zniszczenia kompozytu,
- b) zaproponowanie procedury badawczej dotyczącej określenia parametrów wytrzymałościowych modułowych płyt pomostowych z GFRP,
- c) kompleksową ocenę zależności parametrów technicznych kompozytu GFRP od anizotropowej budowy materiału włóknistego,
- d) szczegółową weryfikację badań własnych w aspekcie wyników otrzymanych przez naukowców zrzeszonych w znaczących zespołach badawczych w Europie i na świecie,
- e) sprawdzenie możliwości rzeczywistych implementacji płyt GFRP w polskim mostownictwie oraz możliwości zaistnienia produkcji mostowych kompozytów GFRP w Polsce,
- f) wskazanie na celowość stosowania płyt GFRP dla nowych konstrukcji mostowych i obiektów modernizowanych, stworzenie bazy danych, dotyczących kompozytu polimerowego, do zastosowań mostowych, w celu przyszłościowego opracowania nieistniejących jak dotąd zaleceń normowych, jako wykładni projektowej, wykorzystywanej w obliczeniach konstrukcji mostowych z udziałem GFRP.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

5.1. Przed uzyskaniem stopnia doktora

Zrealizowana w roku 2005 praca doktorska, swym zakresem obejmowała wielokierunkowe badania zjawisk akustycznych w otoczeniu różnorodnych kolejowych obiektów mostowych, w celu wyznaczenia klimatu akustycznego, panującego w ich sąsiedztwie oraz analizy czynników (takich jak np. rodzaj konstrukcji obiektu, jego lokalizacja), od których zależały charakterystyczne, wyznaczone parametry akustyczne. Podjęte kompleksowe badania terenowe, opisane i przeanalizowane w pracy doktorskiej były podstawą odpowiedzi na pytanie w jaki sposób obiekt mostowy, będący częścią składową drogi kolejowej, wpływa na zwiększenie poziomu hałasu (ciśnienia akustycznego), za sprawą zjawisk wibroakustycznych, polegających na ścisłej korelacji poziomu ciśnienia akustycznego i poziomu przyspieszeń drgań stalowej konstrukcji mostowej, w wyselekcjonowanych sekwencjach czasowych, w czasie poruszania się po obiekcie taboru kolejowego.

Uzupełniającym nurtem badań naukowych i opublikowanych opracowań było zagadnienie stosowania ekranów akustycznych na obiektach mostowych drogowych i kolejowych, a także temat specyfiki wielokrotnych odbić fali akustycznej, pomiędzy równoległymi, mostowymi ekranami transparentnymi. Zagadnienie mocowania ekranów do konstrukcji mostu oraz zdefiniowanie akustycznej efektywności ich działania, w różnych konfiguracjach, dotyczących układu obiekt mostowy- ekran- sąsiadujący teren przyległy. W okresie realizacji pracy doktorskiej, lata 2000-2005, temat ochrony przed hałasem sąsiedztwa konstrukcji mostowych i stosowanie ekranów akustycznych był w Polsce słabo rozpoznany i opisany. Jednakże, po roku 2005 nastąpiła szeroka ekspansja inwestycji ekranów akustycznych przy drogach, na mostach, wiaduktach oraz estakadach śródmiejskich.

5.2. Po uzyskaniu stopnia doktora

Głównymi kierunkami moich prac naukowo-badawczych, po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, nawiązującymi tematycznie do problematyki rozprawy doktorskiej są zagadnienia związane z problematyką sposobów ograniczenia propagacji hałasu, wynikającego z przejazdu taboru samochodowego, bądź kolejowego przez obiekty mostowe. Wiele publikacji autorskich dotyczyło efektywności ekranów akustycznych z panelami wypełniającymi ze szkła akrylowego, bądź mineralnego. Innym nurtem analiz jest możliwość implementacji szkła hartowanego i klejonego w konstrukcjach mostowych. Zastosowanie szkła, wykazującego pożądane parametry techniczno-wytrzymałościowe w pomostach oraz jako wypełnienie balustrad budowli mostowych.

Niektóre dotychczasowe publikacje poświęcone były sposobom ograniczenia hałasu, wynikającego z przejazdu taboru samochodowego przez dylatacje mostowe, a w tej tematyce

właściwy dobór dylatacji np. modułowych, określenie w jaki sposób wpływają one na zwiększenie poziomu hałasu, w jaki sposób przyczyniają się do intensyfikacji zjawisk wibro-akustycznych, a uzupełniając jaką zastosować izolację pod dylatacją, ażeby zmniejszyć propagację hałasu.

W tym nurcie zagadnień naukowo-badawczych zrealizowałam, w roku 2013 roku, badania autorskie na obiektach mostowych autostradowych w Węźle Knurów, w ciągu autostrady A1, w odcinku południowym. Pomiary terenowe i ich kompleksowe analizy, zostały opisane w publikacjach R1 i B10.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, tj. od kwietnia 2005 roku inne zainteresowania naukowo-badawcze były skoncentrowane na wiodących zagadnieniach nowoczesnych technologii materiałowych w budownictwie komunikacyjnym. Na kanwie zainteresowań naukowo-badawczych powstały współautorskie publikacje książkowe poświęcone nowatorskim rozwiązaniom technicznym w budownictwie drogowym, mostowym i kolejowym.

Zaawansowanie technologiczne w budownictwie mostowym jest świadectwem rozwoju w danym kraju, czego niezbitym dowodem jest ekspansywny rozwój konstrukcji mostowych w Chinach. Współautorska publikacja pod tytułem *Mostowe giganty Chin* przedstawiła wybrane, ciekawe pod względem architektonicznym i konstrukcyjnym przykłady obiektów mostowych, w Chinach. Zawiera ona również statystyki mówiące o tym, jak wiele chińskich budowli mostowych ma rekordowe rozpiętości przęseł głównych, w skali obiektów z całego świata. Publikacja podaje informacje o ilości wybudowanych w ostatniej dekadzie konstrukcji i są to dane imponujące. Opracowanie zostało wzbogacone zdjęciami, wizualizacjami, rysunkami konstrukcyjnymi, w bogatej szacie kolorystyczno-graficznej. Kolejne rozdziały publikacji pokazują konstrukcje różnego typu, wyróżniające się w swojej klasie. Trudno opisać wszystkie nowe zrealizowane budowle, będące w czasie realizacji, czy w fazie przyszłych inwestycji, gdyż jest ich w Chinach tysiące. Jednakże dokonana selekcja, na potrzeby publikacji jest wystarczająca do pokazania nieprzeciętnego tempa powstawania chińskich konstrukcji mostowych oraz zaprezentowania bogactwa i różnorodności zastosowanych systemów, technologii, wykorzystanych materiałów, sposobu kształtowania formy estetycznej itd. Jest to również dobry materiał edukacyjny, który przybliży generalnie rodzaje mostów, opisuje ich elementy składowe, różnicuje rodzaje przyjmowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

Istotnym parametrem technicznym jest trwałość materiału. Dlatego też istotnym obszarem moich zainteresowań badawczo-naukowych jest trwałość tworzyw konstrukcyjnych,

stosowanych w budowlach mostowych. Inżynieria materiałowa poszukuje tworzyw konstrukcyjnych o pożądanym parametrach wytrzymałościowych, ale równocześnie niekorodujących, będących alternatywą dla materiałów tradycyjnych. Zarówno kompozyty polimerowe CFRP, GFRP jak i kompozyty cementowe z rozproszonymi włóknami są nowym otwarciem w kierunku zastosowań w budownictwie, w tym budownictwie mostowym. Autorskie publikacje poświęcone kompozytom cementowym, jakim jest beton z włóknami stalowymi z obecnością nano i mikrokrzemionki osadzone są w tym właśnie nurcie tematycznym.

Nowatorskie materiały kompozytowe, które są wyrazem progresu inżynierii materiałowej i mostowej, są powiązane z estetycznym wymiarem budowli mostowych. Wizualna postać konstrukcji mostowych wykorzystujących nowoczesne szkło, kompozyty polimerowe i cementowe jest również podjętym nurtem badawczym i znalazła swoje odzwierciedlenie w autorskich artykułach.

Po uzyskaniu stopnia dra nauk technicznych opublikowałam: 6 monografii, książek i skryptów; 10 rozdziałów zawartych w książkach i monografiach; 3 artykuły opublikowane w czasopiśmie z listy A; 35 artykułów opublikowanych w języku angielskim i polskim w czasopismach zakwalifikowanych jako lista B MNiSW; 17 referatów konferencyjnych wydrukowanych w materiałach konferencji zagranicznych i krajowych; 16 innych artykułów.

Współcześnie, problematyka kompozytów polimerowych i cementowych oraz kompleksowego rozpoznania ich przydatności w mostownictwie jest, według mojej opinii, nowatorskim, progresywnym nurtem naukowych poszukiwań. Perspektywicznie dwa wiodące, autorskie tematy naukowo-badawcze (kanwa doktoratu i wykorzystanie GFRP) zostaną połączone. Kompleksowe analizy będą polegały na określeniu, w jaki sposób płyta kompozytowa GFRP, zastosowana w modernizowanej konstrukcji mostowej przyczynia się do ograniczenia drgań konstrukcji, ograniczania propagacji hałasu itd.

Działalność badawcza zastosowana w praktyce inżynierskiej ma swoje odzwierciedlenie w zrealizowanych autorskich ekspertyzach, które powstały na okoliczność powołania na funkcję biegłego sądowego, w toku spraw prowadzonych przez organy sądowe różnych szczebli w Opolu, Katowicach, Gliwicach, Wrocławiu, Zielonej Górze i Kwidzynie. Opracowania techniczne (w liczbie 17 prac) dotyczyły przyczyn nieprawidłowości projektowych i wykonawczych w realizacjach drogowych i mostowych, poparte były badaniami in situ oraz wszechstronną analizą uwarunkowań technologicznych inwestycji.

Progresywnym tematem podjętym w sferze działań współpartnerskich z akredytowanym Laboratorium Badawczym Labor Aquila oraz Wydziałem Chemicznym Politechniki Rzeszowskiej jest sposób modyfikacji nawierzchni asfaltowej poprzez stosowanie dodatku Asfix Alfa. Dodatek ten, jako modyfikator nawierzchni asfaltowej, do zastosowania w warstwie ścieralnej konstrukcji drogowej i w nawierzchni na obiektach mostowych, został pozytywnie zaopiniowany przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów i będzie zgłoszony do Urzędu Patentowego, w roku 2018.

Przyleganie asfaltu do ziaren kruszywa jest zjawiskiem powierzchniowym i zależy od kontaktu obu materiałów i ich wzajemnego powinowactwa. Środki adhezyjne są w stanie skutecznie wygenerować korzystniejsze warunki przylegania. Wyniki zrealizowanych współautorskich badań materiałowych potwierdziły zdolność Asfix Alfa do zwiększania adhezji asfaltu do kruszywa. Poprawa warunków przylegania, z udziałem modyfikatora, polega na zmniejszeniu napięcia międzyfazowego układu asfalt/kruszywo i osiągnięcia stanu zwiżalności kruszywa przez asfalt również w obecności wody. Dodanie środka adhezyjnego Asfix Alfa do (użytego w badaniach) asfaltu drogowego 50/70 generuje zdecydowanie lepszą odporność na działanie wody. W kompleksowych analizach pozytywnie oceniono wszystkie, uzyskane wyniki badań termostabilności. Wykazana w badaniach normowych przyczepność asfaltu z dodatkiem Asfix Alfa do różnego rodzaju kruszywa jest na bardzo dobrym poziomie od 80-95 %, co potwierdza skuteczność jego oddziaływania.

Odmiernym tematem realizowanym wspólnie z Labor Aquila jest trwałość, m.in. mrozoodporność nawierzchni z betonu cementowego, wykonywanych w technologii betonu wałowanego. Dotychczasowa współpraca polegała na badaniach nawierzchni betonowych, wykonanych na pilotażowych odcinkach dróg.

Zagadnienie mrozoodporności betonu wykonanego w technologii RCC (Rolled Compacted Concrete) nie jest w pełni jeszcze rozpoznane w warunkach krajowych. Literatura amerykańska przedstawia wyniki potwierdzające dobrą trwałość mrozową nawierzchni z RCC, w warunkach eksploatacji typowych dla dróg lokalnych, parkingów, placów postojowych itp. Doświadczenia własne i Laboratorium Badawczym Labor Aquila dotyczyły obserwacji i badań nawierzchni z betonu wałowanego na wykonanych odcinkach dróg, po paru sezonach zimowych. Weryfikowane nawierzchnie z RCC nie wykazały objawów destrukcji, pomimo stosowania środków utrzymania zimowego dróg.

Temat oryginalnych technologii materiałowych, stosowania tworzyw konstrukcyjnych, które cechują właściwości zwiększające trwałość i łatwość aplikacji w konstrukcjach

mostowych i drogowych to płaszczyzna wciąż rozwijanych poszukiwań naukowo – badawczych.

5.3. Podsumowanie pracy badawczej

Generalnie, własna praca badawcza, naukowa i projektowa jest związana z możliwościami implementacji alternatywnych materiałów oraz technologii w budownictwie mostowym i drogowym, w stosunku do rozwiązań tradycyjnych. Działania naukowo-badawcze są przede wszystkim skoncentrowane na kompozytach polimerowych i cementowych. W działalności publikacyjnej przedstawiam, w sposób kompleksowy, stan wiedzy z zakresu nowatorskich rozwiązań technologicznych w budownictwie komunikacyjnym, w aspekcie zwiększenia trwałości konstrukcji i skracania czasu ich realizacji.

Beata Stankiewicz