

Warszawa, 11 września 2017 r.

Dr hab. inż. Janusz Rymsza prof. nadzwyczajny
Instytutu Badawczego Dróg i Mostów

Opinia

o rozprawie doktorskiej pt.

**„Zasady klasyfikacji i monitorowania rozwoju uszkodzeń
w kompozytach o osnowie polimerowej
do zastosowań w obiektach inżynierii lądowej”
(wspólny doktorat)**

autorstwa

**mgr. inż. Radosława Karczewskiego
i
mgr. inż. Łukasza Gołębiowskiego,**

której promotorem jest
prof. dr hab. inż. Krzysztof Jan Kurzydłowski,

a promotorami pomocniczymi
dr inż. Romuald Dobosz i dr inż. Wojciech Leon Sychalski,

wydanej na Wydziale Inżynierii Materiałowej w 2017 r.

Opinię opracowano na prośbę
Prof. dr. hab. inż. Jarosława Mizery
Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej

1. Informacja o rozprawie

1.1. Informacja ogólna

Rozprawa doktorska, w dalszej części opinii zwana również „rozprawą” lub „pracą”, liczy 176 stron i jest podzielona na 10 następujących rozdziałów:

1. Wprowadzenie
2. Stan wiedzy analizowanego zagadnienia
3. Cel i tezy pracy
4. Materiały i elementy konstrukcyjne do badań
5. Badania laboratoryjne
6. Badania obiektów wielkogabarytowych
7. Podsumowanie
8. Wnioski końcowe
9. Podziękowania
10. Literatura

Praca została realizowana przez dwóch Doktorantów – pana mgr. inż. Radosława Karczewskiego (RK) i pana mgr. inż. Łukasza Gołębiowskiego (ŁG). Podział pracy był następujący:

- 6 rozdziałów było napisane wspólnie – są to rozdziały: 1, 3, 5, 8, 9 i 10;
- 2 rozdziały były napisane przez jednego z Doktorantów - są to rozdziały 4 (ŁG) i 7 (RK);
- w 2 rozdziałach podrozdziały były napisane przez jednego z Doktorantów - są to rozdziały 2 (2.1. (ŁG), 2.2. (RK), 2.3.-2.6. (ŁG), 2.7.-2.9. (RK)) i 6 (6.1.1. i 6.1.2. (ŁG), 6.1.3 (RK) i 6.2. (RK)).

Spis literatury zawiera 100 pozycji.

W pracy zawarto 155 rysunków, 17 tablic oraz spis skrótów i oznaczeń. Praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim.

1.2. Informacja o poszczególnych rozdziałach

Zgodnie z zapisami w rozdziale 1. pt. „Wprowadzenie” (str. 13-14):

Kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami są od niedawna stosowane jako materiał konstrukcyjny do budowy obiektów mostowych. Nie ma więc doświadczenia z ich zachowaniem w trakcie eksploatacji. Wykonano badania laboratoryjne i „in situ”, które porównywano z symulacjami obliczeniowymi MES. Wysłunięto tezę, że do badania kompozytowych obiektów mostowych można zastosować metodę emisji akustycznej.

W podrozdziale 2.1. pt. „Zarys historii budownictwa mostów” (str. 15-18) w skrócie opisano historię budowy mostów.

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 2.2. pt. „Kompozyty polimerowe w budownictwie mostowym” (str. 19-23):

Do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych kompozyty polimerowe w formie taśm i mat są stosowane na świecie od 1991 r., a w Polsce od 1997 r. Ponadto kompozyty w formie prętów są stosowane do zbrojenia betonu (zamiast prętów stalowych). Z kompozytów polimerowych są wykonywane konstrukcje mostowe.

Po raz pierwszy pomost mostowy z kompozytów wykonano w Chinach w 1982 r., kładkę dla pieszych w Szkocji w 1992 r., a most drogowy w Stanach Zjednoczonych w 1997 r. Od tego czasu wybudowano na świecie kilkanaście obiektów mostowych o przęsłach kompozytowych o rozpiętości od 10 do 20 m, w tym mosty wojskowe. W Polsce w 2008 r. wykonano kładkę dla pieszych w m. Gądku koło Poznania, która ma kompozytowy pomost, a w 2014 r. most drogowy w m. Błazowa o rozpiętości przęsła 21 m (taka rozpiętość jest osiągnięciem na skalę światową).

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 2.3. pt. „Budowa i właściwości mechaniczne kompozytów warstwowych” (str. 23-27):

Kompozyt składa się ze zbrojenia i osnowy. Zbrojenie jest w postaci włókien ciągłych uformowanych w tkaninę. Tkanina w osnowie tworzy laminat. Właściwości mechaniczne laminatu są uzależnione od usytuowania zbrojenia w stosunku do kierunku jego obciążenia. W laminatach z osnową polimerową są zazwyczaj stosowane włókna szklane, węglowe lub ich kombinacja.

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 2.4. pt. „Mechanizmy niszczenia materiałów kompozytowych” (str. 28-34):

W rozprawie przyjęto założenie, że w uszkodzonym kompozycie obciążenie jest przenoszone przez część nieuszkodzoną. Wytrzymałość kompozytów określano na podstawie trzech hipotez wytrzymałościowych: maksymalnych naprężeń, kryterium wielomianowego określonego empirycznie (kryterium Tsai-Wu i Tsai-Hilla) i kryterium wielomianowego identyfikującego rodzaj uszkodzenia (kryterium Hashina).

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 2.5. pt. „Wady w kompozytach polimerowych” (str. 35-48) typowe wady technologiczne w laminatach to:

- porowatość osnowy
- niedosycenie osnowy
- sfałdowanie włókien (zmarszczenia)
- wady powstające wokół otworu.

Natomiast typowe uszkodzenia laminatów powstające podczas obciążenia to:

- pęknięcie osnowy
- delaminacja (rozwarstwienie warstw)
- odklejenie włókien od osnowy (debonding)
- pęknięcie włókien (dekohezja).

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 2.6. pt. „Metody komputerowe w inżynierii obiektów mostowych” (str. 48-58) uszkodzenie można opisać za pomocą funkcji intensywności i rozległości.

W podrozdziale 2.7. pt. „Metody badań konstrukcji mostowych” (str. 59-60) zestawiono zasady wykonywania badań konstrukcji mostowych.

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 2.8. pt. „Emisja akustyczna w kompozytach warstwowych” (str. 60-79):

Emisja akustyczna to sygnały akustyczne generowane przez gwałtowne uwolnienie energii ze źródła znajdującego się w materiale np. w kompozycie, które są zamieniane na sygnały elektryczne. Sygnały o wysokiej częstotliwości mogą być wykorzystane do detekcji lokalnej, a sygnały o niskiej częstotliwości do detekcji całej konstrukcji.

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 2.9. pt. „Koncepcja systemu badawczego do modelowania i monitorowania wad w realnych konstrukcjach mostowych” (str. 80-81):

Koncepcja niniejszej rozprawy opiera się przede wszystkim na spójnym zastosowaniu modelowania metodą elementów skończonych, zwaną dalej „metodą MES” lub „MES” oraz badań metodą emisji akustycznej. Dzięki metodzie emisji akustycznej będzie możliwe zlokalizowanie wad i uszkodzeń w konstrukcji, a dzięki metodzie MES - określenie ich wpływu na nośność konstrukcji.

Zgodnie z zapisami w rozdziale 3. pt. „Cel i tezy pracy” (str. 82):

W rozprawie Doktoranci postawili tezę, że badania metodą emisji akustycznej (za które odpowiada RK) połączone z modelowaniem metodą MES (za które odpowiada ŁG) pozwolą na:

- identyfikację i klasyfikację wad i uszkodzeń w eksploatowanych kompozytowych konstrukcjach mostowych,

oraz

- określenie wpływu tych wad i uszkodzeń na bezpieczną eksploatację kompozytowych konstrukcji mostowych,

tym samym pozwolą na monitoring metodą emisji akustycznej takich konstrukcji podczas ich wieloletniej eksploatacji.

Celem rozprawy doktorskiej jest stworzenie systemu badawczego do modelowania i monitorowania kompozytowych konstrukcji mostowych. Realizacja tego celu pozwoli na upowszechnienie konstrukcji kompozytowych w mostownictwie.

Zgodnie z zapisami w rozdziale 4. pt. „Materiały i elementy konstrukcyjne do badań” (str. 83-90):

Zbadano dwa skrzynkowe dźwigary kompozytowe w skali naturalnej. Jeden kompozytowy - z pomostem wykonanym z kompozytu, a drugi hybrydowy - z pomostem wykonanym z betonu. Ponadto zbadano następujące laminaty polimerowe:

- CGFRP (wzmocnione włóknami szklanymi i węglowymi) - laminat występujący w dolnym pasie dźwigara hybrydowego oraz górnym i dolnym pasie dźwigara kompozytowego,
- GFRP (wzmocnione włóknami szklanymi) - laminat występujący na górnych półkach dźwigara hybrydowego,
- GFRP_PUR (wzmocnione włóknami szklanymi z rdzeniem poliuretanowym) - laminat występujący na bocznych ścianach dźwigara hybrydowego i kompozytowego.

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 5.1. pt. „Badania wytrzymałościowe wspomaganie symulacjami MES i analizą AE” (str. 91-113):

Wykonano badania wytrzymałościowe, które obejmowały:

- rozciąganie płyty CGFRP (warunki pracy dolnego pasa dźwigara) o grubości pasa dźwigara kładki dla pieszych;
- ścinanie płyty GFRP i CFRP (warunki pracy bocznej ściany dźwigara);
- zginanie dźwigara kompozytowego i hybrydowego.

Podczas rozciągania i ścinania przeprowadzono badania metodą emisji akustycznej. Część próbek miała wady technologiczne w postaci sfałdowania, część została uszkodzona w wyniku uderzenia, co spowodowało spękania osnowy, a w części wykonano otwór technologiczny.

Zgodnie z zapisami w podrozdziale 5.2. pt. „Obrazowania wad w kompozytowych obiektach mostowych” (str. 113-126) do weryfikacji położenia wad i uszkodzeń zastosowano metodę ultradźwiękową. W celu identyfikacji defektów, np. sfałdowania oraz w pobliżu otworu, próbki kompozytu CGFRP poddano obserwacji mikroskopowej, tomografii komputerowej i elektronicznej mikroskopii skaningowej.

W podrozdziale 6.1.1. pt. „Czteropunktowe statyczne zginanie” (str. 127-130) zbadano podczas statycznego zginania dźwigar kompozytowy i hybrydowy w skali naturalnej.

W podrozdziale 6.1.2. pt. „Analizy numeryczne metodą elementów skończonych” (str. 130-138) wykonano analizy numeryczne dźwigara hybrydowego.

W podrozdziale 6.1.3. pt. „Badania dźwigarów metodą emisji akustycznej” (str. 139-151) opisano badania dźwigara kompozytowego i hybrydowego. Podczas badania na zginanie dźwigarów poddano je badaniu metodą emisji akustycznej. Dźwigary były badane pod obciążeniem eksploatacyjnym (I cykl) i obciążeniem znacznie go przekraczającym (II cykl). Detekcja sygnałów emisji akustycznej o czasie trwania powyżej 2000 μ s w II cyklu obciążenia potwierdziła występowanie aktywnego uszkodzenia kompozytu. Wykonano również badania dynamiczne dźwigara hybrydowego do 2 mln cykli obciążeń, w trakcie których wykonano pomiary emisji akustycznej.

W podrozdziale 6.2. pt. „Badania metodą emisji akustycznej w trakcie odbiorczych prób mostów kompozytowych” (str. 152-159) opisano badania metodą emisji akustycznej podczas próbnego obciążenia dwóch obiektów mostowych.

W podrozdziale 7.1. pt. „Wytyczne do systemu wykrywania i monitorowania rozwoju uszkodzeń w kompozytowych obiektach mostowych” (str. 160-161) podano autorską procedurę wykrywania i monitorowania rozwoju wad i uszkodzeń w kompozytowych przęsłach mostowych.

W podrozdziale 7.2. pt. „Klasyfikacja wad w kompozytowych obiektach mostowych” (str. 162-165) podano klasyfikator reprezentatywnych wad w przęsłach z elementów kompozytowych.

W podrozdziale 8. (str. 166) przedstawiono wnioski końcowe.

2. Uwagi o rozprawie

2.1. Uwagi merytoryczne

- na str. 15 (11 wiersz od góry) podano informację, że most Trajana na Dunaju był mostem kamiennym. Zdaniem Recenzenta most miał przęsła wykonane z drewna, był 21 przęsłowy, a przęsła miały rozpiętość teoretyczną ponad 50,00 m. Budowa mostu kamiennego o takich wymiarach w ciągu krótkiego czasu była i jest niemożliwa;
- na str. 23 (8 wiersz od dołu) stwierdzono, że rola osnowy polega na „przenoszeniu obciążeń zewnętrznych”. Zdaniem Recenzenta przenoszenie tych obciążeń jest – przede wszystkim - rolą zbrojenia, a osnowa w przenoszeniu obciążenia pełni rolę pomocniczą;

- na str. 33 (1-2 wiersz od góry) podano, że „w przypadku laminatów nie stosuje się pojęcia wytrzymałości, ale używa się nośności”. Zdaniem Recenzenta laminaty, rozumiane jako wielowarstwowe tworzywo produkowane w postaci płyt, powinna charakteryzować wytrzymałość. Natomiast wykonana z laminatów np. belka, ma określoną nośność, wynikającą z wytrzymałości laminatów. Tak więc – z zasady - materiały (w tym laminaty) powinny być charakteryzowane przez wytrzymałość, a wykonane z nich elementy – nośność;
- na str. 52 w tablicy 5 przyjęto poziomy klasyfikacji uszkodzeń. Zdaniem Recenzenta fałdowania nie wskazują na nieciągłość, a raczej destrukcję materiału. Do nieciągłości Recenzent zaliczyłby pęknięcia osnowy i włókien, odklejenie włókien od osnowy, uszkodzenia wokół otworu (otwór, wprowadzając nieciągłość, nie stanowi uszkodzenia), a do destrukcji materiału: sfałdowanie i delaminację. Uderzenie może spowodować zarówno nieciągłość, jak i destrukcję materiału;
- na str. 94 (2-4 wiersz od dołu) i na str. 105 (2 wiersz od dołu) podano informację, że otwór technologiczny jest wadą lub uszkodzeniem. Zdaniem Recenzenta otwór powoduje nieciągłość, ale nie jest ani wadą, ani uszkodzeniem;
- w rozprawie określenia „wada” i „uszkodzenie” są stosowane wymiennie - np. na str. 161, rys. 155 jest mowa o wadach, a w podpisie rysunku - o uszkodzeniach; na str. 107 (7-8 wiersz od dołu) wadą jest zarówno otwór przelotowy, jak i spękanie osnowy powstałe w wyniku uderzenia. Recenzent ma następującą propozycję dla Doktorantów do zastosowania w przyszłych publikacjach: określnie „wada” można byłoby odnieść do defektu powstałego w kompozycie w czasie produkcji (na podobieństwo „wady wrodzonej”, produkcyjnej), a określenie „uszkodzenie” odnieść do defektu powstałego w czasie montażu lub eksploatacji;
- na str. 127 (5-6 wiersz od góry) stwierdzono, że w pobliżu środka rozpiętości dźwigara jest przekrój krytyczny ze względu na obciążenie. Zdaniem Recenzenta przy obciążeniu równomiernie rozłożonym w środku rozpiętości belki występuje największy moment zginający, ale największa siła poprzeczna – przekrój krytyczny ze względu na ścinanie - występuje przy podporze;
- na str. 129 (7 wiersz od góry) stwierdzono, że obciążenia przyjęto zgodnie „z charakterystycznymi oraz obliczeniowymi wartościami sił wewnętrznych”. Zdaniem Recenzenta przyjęto – i jest to poprawne – obciążenie oparte wyłącznie o wartości charakterystyczne;
- na str. 133 (2 wiersz od góry) stwierdzono, że założono sprężysto-idealnie plastyczny model odkształcenia materiału. Zdaniem Recenzenta laminat jest materiałem sprężystym (o czym świadczy np. rys. 83 na str. 97, na którym odkształcenia są proporcjonalne do obciążenia, aż do zniszczenia);
- na str. 139 (6-7 wiersz od góry) podano, że dźwigar kompozytowy podczas badania był oparty na podporach przesuwnych, a na schemacie pokazanym na rys. 126 dźwigar jest oparty na podporach nieprzesuwnych. Zdaniem Recenzenta na rys. 131 podano prawidłowy schemat podparcia: dźwigar z jednej strony jest oparty na podporze stałej, z drugiej – na podporze przesuwniej.

2.2. Uwagi redakcyjne

- nie wszystkie pozycje literaturowe są cytowane w tekście rozprawy - nie zacytowano pozycji 12;
- opisy rysunków powinny być w języku polskim, a nie angielskim (rysunek 21, 23, 29, 35, 36, 37, 41);

- na str. 15 (3 wiersz od dołu) - pierwszy mostu z żeliwa miał rozpiętość 30 m, a nie 30 przęseł;
- na str. 54 (rys. 44) i na str. 56 (rys. 46) rysunki powinny być oznaczone literami „a” i „b”; na rys. 44b nie pokazano intensywności uszkodzenia;
- na str. 62, na rys. 50 jest zaznaczony inny zakres pomiarowy niż od 1 kHz do 3 MHz;
- na str. 87, w tablicy 8 niepoprawnie wskazano na tkaniny jedno- i dwukierunkowe – np. tkanina wymieniona w pierwszej pozycji tablicy jest dwukierunkowa: $\pm 45^\circ$;
- na str. 105 (6 wiersz od dołu) podano wymiary próbki w centymetrach, a powinny być w milimetrach;
- na str. 165 (1 wiersz od góry i tytuł tablicy 17) zamiast „użytkownika” powinno być „zarządcy”.

3. Oryginalne elementy rozprawy

Pan Radosław Karczewski (dalej „RK”) wykonał laboratoryjne badania wytrzymałościowe na rozciąganie i ścinanie elementów kompozytowych. W trakcie badań wytrzymałościowych RK badał elementy metodą emisji akustycznej. Charakterystyki wytrzymałościowe otrzymane podczas badań wykorzystał pan Łukasz Gołębiowski (dalej „ŁG”) jako dane wyjściowe do metody MES. Zgodnie z założeniem teorii płyt laminowanych ŁG wyznaczył wytrzymałości poszczególnych warstw laminatu (według hipotez wytrzymałościowych: maksymalnych naprężeń oraz Tsai-Wu i Tsai-Hilla) i na tej podstawie określił teoretyczną wytrzymałość laminatu. Pozwoliło to na opracowanie algorytmu umożliwiającego określenie wytrzymałości laminatu o dowolnej liczbie warstw (różnej grubości).

Podczas rozciągania RK zbadał próbki nieuszkodzone i z uszkodzeniami. Wada w postaci sfałdowania i otwór spowodowały spadek wartości siły niszczącej o około 20%, a spękania osnowy – o około 45%. Próbkę nieuszkodzoną ŁG potraktował jako referencyjną – na ich podstawie skalibrował model numeryczny otrzymując z obliczeń taką wartość siły niszczącej, jak otrzymana przez RK w badaniu. ŁG wykonał modele numeryczne próbek z uszkodzeniami. W odniesieniu do próbek ze sfałdowaniem i spękaną osnową uzyskał teoretyczną siłę niszczącą mniejszą niż uzyskana podczas badań przez RK odpowiednio o 7,6% i 12,7%, a wypadku otworu technologicznego – większą o 7,2% (w związku z tym, w wypadku numerycznego modelu kompozytu, w odniesieniu do elementów z otworami Doktoranci zalecili wprowadzenie współczynnika 1,1). Jest to dobra zbieżność wyników obliczeń z badaniami. Przy czym charakter zniszczenia uszkodzonego kompozytu, w każdym wypadku jest inny i został dobrze przez ŁG zamodelowany numerycznie.

Podczas ścinania RK zbadał próbki nieuszkodzone i z uszkodzeniami. Spękanie osnowy i otwór technologiczny zmniejszają wytrzymałość na ścinanie o około 7,5%. Taka forma wad znacząco nie wpływa na nośność konstrukcji kompozytowej. Symulacje numeryczne ŁG posłużyły do wyznaczenia teoretycznej wytrzymałości na ścinanie kompozytów. Próbkę nieuszkodzoną ŁG potraktował jako referencyjną – na ich podstawie skalibrował model numeryczny otrzymując z obliczeń taką wartość siły niszczącej, jak otrzymana przez RK w badaniu. ŁG wykonał modele numeryczne próbek z uszkodzeniami. W odniesieniu do próbek ze spękaną osnową i otworem przelotowym uzyskał teoretyczną siłę niszczącą do 2% mniejszą niż uzyskana przez RK podczas badań. Jest to dobra zbieżność wyników obliczeń z badaniami. Przy czym charakter zniszczenia uszkodzonego kompozytu, w każdym wypadku jest inny i został dobrze przez ŁG zamodelowany numerycznie.

W celu opracowania katalogu wad ŁG przeprowadził symulacje MES uzależniające wytrzymałość kompozytów przy rozciąganiu i ściskaniu od intensywności wady (sfałdowania i spękania osnowy) i wielkości otworu, przy wykorzystaniu trzech hipotez wytrzymałościowych. W modelu z otworem przelotowym podał również obciążenie inicjujące pękanie włókien w okolicy otworu.

RK wykonał laboratoryjne badania wytrzymałościowe na zginanie dźwigara kompozytowego i hybrydowego w skali naturalnej. ŁG przeprowadził symulację MES modelu dźwigara hybrydowego poddanego statycznemu zginaniu: bez wad (model referencyjny) i z zinventaryzowanymi podczas badań laboratoryjnych wadami, takimi jak: ubytek materiału i sfałdowanie oraz z otworami (intensywność wady została przyjęta na podstawie badań). W symulacji ŁG przyjął wyznaczone doświadczalnie przez RK właściwości materiałowe oraz wytrzymałości kompozytu według kryterium wytrzymałościowego Tsai-Wu.

Z uwagi na to, że wyniki badań metodą emisji akustycznej w warunkach laboratoryjnych, otrzymane przez RK dobrze korelują z symulacjami numerycznymi wykonanymi przez ŁG, metoda emisji akustycznej może być zastosowana w warunkach terenowych.

W trakcie badań pod próbnym obciążeniem RK zbadał metodą emisji akustycznej dwa kompozytowe mosty. Celem badań była weryfikacja procedury systemu wykrywania i monitorowania rozwoju uszkodzeń w kompozytowych obiektach mostowych. W trakcie badań wykryto najwięcej wad powstałych podczas produkcji kompozytu. Przeprowadzonymi badaniami zweryfikowano założenia procedury badań metodą emisji akustycznej kompozytowych obiektów mostowych. Wykrycie, zlokalizowanie oraz klasyfikacja źródeł emisji akustycznej potwierdziły słuszność przyjętych założeń.

Na podstawie badań dynamicznych dźwigara hybrydowego Doktoranci przyjęli, że granica bezpiecznej eksploatacji dźwigara mostowego wynosi 2 mln cykli.

Na podstawie badań metodą emisji akustycznej Doktoranci przyjęli następującą klasyfikację wad i uszkodzeń kompozytów:

- pękanie włókien - klasa A1,
- delaminacja – klasa A2,
- pękanie osnowy – klasa A3.

Na podstawie analizy wyników MES Doktoranci przyjęli następujące wartości parametru zniszczenia kompozytu:

- $f \leq 0,25$ – klasa M1,
- $0,25 < f \leq 0,50$ – M2 (zaleca się monitoring),
- $f > 0,5$ – M3 (zaleca się naprawę).

Na podstawie kryteriów emisji akustycznej (klasy A) i symulacji MES (klasy M) Doktoranci opracowali klasyfikator reprezentatywnych wad. Jest on uzależniony m. in. od:

- rodzaju wady, takiej jak: sfałdowanie, delaminacja, niedosycenie, ubytek materiału;
- parametru zniszczenia określonego na podstawie trzech hipotez wytrzymałościowych;
- charakterystyki akustycznej uwzględniającej takie elementy, jak: amplituda, liczba sygnałów i energia.

4. Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską pana mgr. inż. Radosława Karczewskiego i pana mgr. inż. Łukasza Gołębiowskiego oceniam wysoce pozytywnie.

W niniejszej rozprawie doktorskiej wyniki badań emisji akustycznej (wykonanych przez Radosława Karczewskiego) posłużyły do walidacji symulacji modeli numerycznych (wykonanych przez Łukasza Gołębiowskiego), co pozwoliło na powstanie zasad oceny stanu technicznego kompozytowych konstrukcji mostowych. Zaproponowane w rozprawie doktorskiej badania kompozytowych konstrukcji mostowych przy zastosowaniu emisji akustycznej są rozwiązaniem bardzo dobrym. Są to badania nieinwazyjne i pozwalają zarówno na identyfikację i klasyfikację wad i uszkodzeń, jak i obserwację ich rozwoju w czasie eksploatacji.

W świetle ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882 i 1311, z późn. zm.) stwierdzam, że **rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a Doktoranci wykazali ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie dyscypliny naukowej budownictwo i inżynieria materiałowa.**

Wnoszę o dopuszczenie pana mgr. inż. Radosława Karczewskiego i pana mgr. inż. Łukasza Gołębiowskiego do publicznej obrony rozprawy przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej w Warszawie.

