

Warszawa, dnia 11.09.2017 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Armii Ludowej 16  
00-637 Warszawa

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej pt.**

**„ZASADY KWALIFIKACJI I MONITOROWANIA ROZWOJU USZKODZEŃ  
W KOMPOZYTACH O OSNOWIE POLIMEROWEJ DO ZASTOSOWAŃ  
W OBIEKTACH INŻYNIERII LĄDOWEJ”**

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

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 9 lipca 2015 r. oraz pismo zlecające prof. dr hab. inż. Jarosława Mizery dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej z dnia 31.07.2017 r.

### **2. Przedmiot recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Panów mgra inż. Radosława Karczewskiego i mgra inż. Łukasza Gołębiowskiego przygotowana na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Kurzydłowski, a promotorami pomocniczymi są dr inż. Romuald Dobosz i dr inż. Wojciech Spychalski.

Rozprawa liczy 176 stron wydruku komputerowego, zawiera 155 rysunków i 15 tablic. Spis literatury zawiera 100 pozycji.

Recenzja rozprawy została opracowana zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami),

### **3. Charakterystyka rozprawy**

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy wykorzystania metody emisji akustycznej w diagnostyce mostów z kompozytów polimerowych zbrojonych włóknem (FRP). Treść rozprawy zawarto w ośmiu zasadniczych rozdziałach. Zasadnicza jej część została

poprzedzona informacją o zakresie badań wykonanych przez każdego z Autorów rozprawy.

Mgr inż. R.Karczewski przeprowadził badania metodą emisji akustycznej i opracował podrozdziały dotyczące: zastosowania kompozytów polimerowych w budownictwie mostowym (p.2.2) i metod ich badania (p.2.7), zastosowania emisji akustycznej w kompozytach warstwowych (p.2.8), koncepcji systemu badawczego do modelowania i monitorowania wad w konstrukcjach mostowych (p.2.9), wyników badań za pomocą emisji akustycznej próbek laboratoryjnych (p.5.1), dźwigarów (p. 6.1.3) oraz podczas prób odbiorczych mostów kompozytowych (p.6.2). Opracował również podsumowanie przeprowadzonych badań składające się z dwóch podrozdziałów dotyczących wytycznych do systemu wykrywania i monitorowania uszkodzeń (p.7.1) i klasyfikacji wad w kompozytowych obiektach mostowych (p.7.2).

Mgr inż. Łukasz Gołębiowski zajmował się modelowaniem obiektów mostowych za pomocą metody elementów skończonych oraz opracował rozdziały dotyczące: historii budowy mostów (p.2.1), budowy i właściwości (p.2.3), mechanizmów niszczenia (p.2.4) oraz wad kompozytów warstwowych (p.2.5), oraz metod komputerowych stosowanych w inżynierii lądowej (p.2.6). Przygotował także rozdział poświęcony charakterystyce materiałów i elementów poddanych badaniom (p.4), oraz podrozdziały prezentujące wyniki czteropunktowego zginania obiektów wielkogabarytowych (p.6.1.1) oraz analizy numerycznej MES (p.6.1.2). Wprowadzenie, cele i tezy pracy oraz wnioski końcowe zostały, co naturalne, napisane wspólnie przez obu Autorów.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy doktorskiej. Podkreślono w nim, że kompozyty polimerowe zbrojone włóknami są stosunkowo nowym materiałem kompozytowym stosowanym do wykonywania obiektów mostowych, w szczególności w Polsce. Krótki czas eksploatacji istniejących obiektów sprawia, że doświadczenia dotyczące ich trwałości są nieliczne. W pracy postawiono tezę, że emisja akustyczna jest metodą umożliwiającą monitorowanie zachowania się obiektów mostowych wykonanych z kompozytów FRP.

W rozdziale 2 pt. „Stan wiedzy analizowanego zagadnienia” przedstawiono zarys historii budowy mostów (podrozdział 2.1.) oraz obszary zastosowań kompozytów polimerowych jako materiału konstrukcyjnego w tego rodzaju obiektach (podrozdział 2.2). Wspomniano też o wzmacnianiu obiektów mostowych taśmami i matami z FRP oraz stosowaniu prętów zbrojeniowych FRP jako alternatywnego do zbrojenia stalowego konstrukcji betonowych. Jest to jeden z obiecujących kierunków zastosowań kompozytów FRP.

Podrozdziały 2.3, 2.4, 2.5 poświęcono omówieniu budowy i właściwości polimerowych kompozytów warstwowych, mechanizmom niszczenia kompozytów polimerowych oraz najczęściej spotykane wady (a właściwie wady i uszkodzenia). Na tej podstawie Doktoranci założyli, że w swoich analizach mechanicznych będą opierali się na kilku kryteriach wytrzymałościowych: maksymalnych naprężeń, kryterium Tsai-Hilla i kryterium Tsai-Wu oraz kryterium Hashina. Kryteria te zaliczane są do dwuosiowych

(płaski stan naprężeń); przy czym nie wszystkie te kryteria uwzględniają mechanizm zniszczenia. Wybór kilku kryteriów oceny jest uzasadniony, ponieważ nie ma jednego kryterium odzwierciedlającego zachowanie się laminatu, a zastosowanie różnych kryteriów dla tego samego materiału daje różne obwiednie graniczne.

Cztery kolejne podrozdziały dotyczą zasadniczych treści rozprawy, tj. metod komputerowych stosowanych w inżynierii lądowej (podrozdział 2.6), metod badania konstrukcji mostowych (podrozdział 2.7), wykorzystania emisji akustycznej w badaniach akustycznych (podrozdział 2.8) oraz koncepcji systemu badawczego wykorzystanego do modelowania MES i monitorowania wad w rzeczywistych obiektach mostowych metodą emisji akustycznej (podrozdział 2.9). Podrozdziały te, napisane w sposób skondensowany, ale jednocześnie jasny, zawierają podstawowe informacje niezbędne do zrozumienia zagadnień badawczych, których dotyczy rozprawa. Na podstawie studiów i analiz przedstawionych w tych rozdziałach Doktoranci sformułowali cel pracy oraz następujące tezy (rozdział 3):

1. Numeryczne symulacje z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwalają określić wpływ na użyteczność eksploatacyjną wielkogabarytowych konstrukcji kompozytowych oraz ułatwiają monitorowanie stanu technicznego wykonanych z nich obiektów mostowych;
2. Badania metodą emisji akustycznej umożliwiają wykrywanie uszkodzeń strukturalnych, istotnych w kontekście bezpiecznej eksploatacji kompozytowych obiektów drogowych;
3. Współcześnie dostępne systemy do badań metodą emisji akustycznej pozwalają na określenie typu i sklasyfikowanie uszkodzeń dużych elementów kompozytowych powstałych na etapie ich produkcji i/lub w trakcie eksploatacji obiektów inżynierii lądowej.

Jako ogólny cel rozprawy Doktoranci wskazali opracowanie systemu badawczego pozwalającego na modelowanie i monitorowanie kompozytowych konstrukcji mostowych. Postawiano cel badań należy uznać za ambitny i ważny zarówno z naukowego punktu widzenia, ale również o dużym znaczeniu praktycznym. Połączenie „tradycyjnych” metod badawczych (w tym do elementów w skali rzeczywistej) z modelowaniem MES i wykorzystaniem emisji akustycznej do monitorowania stanowi niewątpliwy walor pracy. Tego rodzaju podejście odpowiada trendom badawczym w inżynierii lądowej.

W rozdziale 4 omówiono materiały i elementy konstrukcyjne poddane badaniom. Badania dotyczyły dwóch kompozytowych dźwigarów skrzynkowych w skali naturalnej, jeden z pomostem kompozytowym, drugi z pomostem betonowym. Zbadano również próbki kompozytów warstwowych GFRP (z włóknem szklanym), CGFRP (z włóknem szklanym i węglowym) oraz GFRP\_PUR (z włóknem szklanym i rdzeniem poliuretanowym). Próbki tych kompozytów były reprezentatywne dla różnych stref badanych dźwigarów.

W rozdziale 5 pt. „Badania laboratoryjne” omówiono wyniki badań próbek reprezentatywnych dla różnych stref dźwigarów. Podczas rozciągania i ścinania prowadzono badania z wykorzystaniem emisji akustycznej (podrozdział 5.2). W podrozdziale 5.1. skupiono się na obrazowaniu wad w elementach kompozytowych. W tym celu wykorzystano badania ultradźwiękowe. Identyfikację defektów przeprowadzono z wykorzystaniem technik mikroskopowych. To potwierdza rosnące znaczenie stosowania narzędzi naukowych inżynierii materiałowej w inżynierii lądowej.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań dwóch dźwigarów w próbie czteropunktowego statycznego zginania, analizy numerycznej MES dźwigara z pomostem betonowym dźwigarów oraz wyniki badań metodą emisji akustycznej. Przedstawiono także wyniki badań emisją akustyczną wykonanych podczas odbioru dwóch obiektów mostowych wykonanych z kompozytów FRP.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowych (rozdział 7) opracowano wytyczne do systemu wykrywania i monitorowania rozwoju wad i uszkodzeń w kompozytowych obiektach mostowych (podrozdział 7.1) oraz sposób klasyfikowania wad w tego rodzaju obiektach (podrozdział 7.2.). Na tej podstawie sformułowano wnioski końcowe.

W rozdziale dziewiątym zawarto podziękowania skierowane do NCBR i przywołano trzy projekty, w ramach których przeprowadzono badania naukowe zaprezentowane w rozprawie.

Zgodnie z informacją dotyczącą podziału pracy (str.9) celem przygotowania rozprawy przez dwóch Autorów była chęć objęcia w sposób komplementarny i całościowy postawionego zadania badawczego. Postawiony cel został zrealizowany, a w pracy opisano w logiczny sposób przebieg podjętych badań (niszczących i nieniszczących) oraz symulacji komputerowych. Stanowiły one podstawę do sformułowania wytycznych do systemu wykrywania i monitorowania rozwoju uszkodzeń w kompozytowych obiektach mostowych, w oparciu o opracowane zasady klasyfikacji, wykorzystujące wyniki badań metodą emisji akustycznej.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zastosowania nowoczesnej metody badań niszczących jaką jest emisja akustyczna w diagnostyce konstrukcji budowlanych. Mimo swoich zalet nie jest ona powszechnie stosowana w ocenie stanu technicznego konstrukcji budowlanych. W ostatnich latach rośnie zainteresowanie możliwościami jakie daje metoda EA w lokalizacji różnego rodzaju defektów, przede wszystkim rys, pęknięć i monitorowania ich propagacji. Zyskuje ona coraz większe zainteresowanie w Polsce, głównie do monitorowania propagacji procesu destrukcji. Tego rodzaju podejście zostało zastosowane w pracy do oceny stanu technicznego elementów obiektów mostowych wykonanych z kompozytów polimerowych zbrojonych włóknami. To połączenie stanowi nowe wyzwanie badawcze. Skuteczne zastosowanie

emisji akustycznej w diagnostyce konstrukcji budowlanych, niezależnie od jej rodzaju, zwiększa wiarygodność metod nieniszczących i upowszechnienie ich stosowania. Oceniana rozprawa wychodzi naprzeciw tym oczekiwaniom.

Cel i tezy pracy są dość ogólne i trudno z nimi dyskutować, ale jasno określają kierunki badań, które powinny być podjęte aby je udowodnić. Zarówno stosowanie modelowania MES, jak i emisji akustycznej służy celom wskazanym w dwóch pierwszych tezach rozprawy. Stwierdzenie, że realizacja ogólnego celu pozwoli „na rozwój konstrukcji kompozytowych do zastosowań w inżynierii lądowej” jest optymistyczne. Niewątpliwie zaproponowany sposób będzie elementem upowszechniania tego rodzaju rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego, ale oprócz tego istnieje szereg innych barier od formalnych po przyzwyczajenia projektantów. Z tego względu rozprawa doktorska, jak i projekty badawcze, w ramach których powstała, mają duże znaczenie praktyczne.

Autorzy rozprawy wykazali możliwość wykorzystania emisji akustycznej do oceny stanu technicznego stosunkowo mało rozpoznanych obiektów mostowych wykonanych z kompozytów polimerowych. Istotnym elementem tej oceny jest opracowanie modelu MES badanego obiektu mostowego. Na tej podstawie Doktoranci zaproponowali autorskie kryteria oceny rodzaju i stopnia uszkodzenia obiektu. Klasy wad przyjmowane są na podstawie „klasyfikatora” (klasyfikatorów) wyznaczanych na podstawie symulacji MES i wyników badań emisją akustyczną. Przedstawiona koncepcja jest oryginalna i interesująca. Pojawiają się jednak pytania, które częściowo mogą wynikać ze zbyt skondensowanego przedstawienia symulacji komputerowych oraz badań laboratoryjnych, a mianowicie:

- przedstawiona koncepcja oceny wymaga opracowania odpowiedniego modelu MES. Model MES obiektu budowlanego jest pojęciem bardzo szerokim. Przydatność MES zależy od przyjętych założeń przy budowie modelu. Zastosowane kryteria wytrzymałościowe są stosunkowo proste. Na ich podstawie określano parametr zniszczenia  $f$ . W tabelicy 15 podane są „klasy MES” określone na podstawie parametru  $f$  wraz z przedziałami jego zmienności, które są takie same dla trzech kryteriów wytrzymałościowych. Dane literaturowe wskazują, że nie zawsze tego rodzaju założenie jest słuszne – różne obwiednie dla tego samego materiału;
- w podrozdziale 2.4 krótko scharakteryzowano kryteria, które mogą być wykorzystane do opisu procesu degradacji kompozytów polimerowych; na stronie 92 podano, że „obwiednie wytrzymałości i nośności wyznaczono..., według kryteriów wytrzymałościowych: maksymalnych naprężeń, Tsai-Wu i Tsai-Hilla”. Nie zastosowano kryterium zaproponowanego przez Hashina, które teoretycznie umożliwia identyfikację rodzaju uszkodzenia. Wydaje się, że korzystne byłoby uzasadnienie tej decyzji badawczej poprzez odpowiedź na pytanie: dlaczego zastosowanie kryteriów wielomianowych jest wystarczające, albo dlaczego nie można było wykorzystać kryterium Hashina;

- badania metodą emisji akustycznej, służące opracowaniu i walidacji systemu do monitorowania stanu obiektów mostowych, były prowadzone na próbkach kompozytów o różnych wymiarach. Metody wykorzystujące fale sprężyste o niskich częstotliwościach, np. metody ultradźwiękowe, metoda impact-echo stosowanych, np. w badaniach obiektów betonowych, są czułe na wymiary próbek - możliwość wystąpienia efektów krawędziowych. Stąd w normach są podawane minimalne wymiary próbek służących kalibracji krzywych, na podstawie których szacuje się wytrzymałość za pomocą metod ultradźwiękowych. Z rysunku 93 (str.108) wynika, że czujniki emisji akustycznej były umieszczone stosunkowo blisko krawędzi. Czy tego rodzaju efekty były obserwowane podczas badań próbek kompozytów, szczególnie w przypadku czujników niskoczęstotliwościowych?;
- przy omawianiu metody emisji akustycznej i przeglądzie jej zastosowań do badania obiektów mostowych, korzystne byłoby wspomnienie o innych procedurach oceny stanu obiektu z wykorzystaniem metod nieniszczących. Przykładem takiego podejścia jest metoda opracowana w Politechnice Świętokrzyskiej, wykorzystująca analizę sygnału emisji akustycznej dla klasyfikowania stanu mostów żelbetowych, czy też system wykrywania rys w konstrukcjach żelbetowych z wykorzystaniem odpowiednio rozmieszczonych przetworników piezoelektrycznych. Warto też zastanowić się nad wykorzystaniem bardziej zaawansowanej analizy sygnału np. z zastosowaniem analizy falkowej. W literaturze można znaleźć przykłady takiego podejścia;
- Czy doktoranci planują dalszy rozwój systemu monitorowania konstrukcji wykonanych z FRP przy użyciu metody emisji akustycznej?. Pozwoliłoby to ograniczyć wpływ ewentualnych niedoskonałości przyjętego modelu MES.

Podczas czytania pracy rozprawy odczuwalny jest pewien pośpiech w opracowywaniu jej treści. Miejscami pojawiają się usterki natury terminologicznej, jak i czysto edytorskiej, na przykład:

- druga teza druga odnosi się do kompozytowych obiektów drogowych; obiekty drogowe to znacznie szerszy zbiór niż obiekty będące przedmiotem rozprawy; ponadto, beton asfaltowy, czy cementowy to też kompozyt;
- wymiennie używa się terminów nośność i wytrzymałość laminatów; w większości przypadków chodzi raczej o wytrzymałość kompozytu, dopiero w przypadku elementu wykonanego z laminatu można mówić o nośności;
- klasyfikacja wad i uszkodzeń jest nieprecyzyjna, Autorzy stosują wymiennie terminy „wada” i „uszkodzenie” w odniesieniu do niedoskonałości mikrostruktury wynikających z procesu technologicznego, jak i rzeczywistych uszkodzeń w trakcie eksploatacji; nie wszystkie nieciągłości są wadami lub uszkodzeniami, np. wykonywanie otworów technologicznych jest uzasadnione, zostały wprowadzone w sposób świadomy; nie jest to ani wada ani uszkodzenie. Przy opracowaniu kolejnej wersji wytycznych wskazane byłoby uporządkowanie tej klasyfikacji;

- część rysunków została zamieszczona w wersji angielskojęzycznej;
- nie wszystkie pozycje literatury są cytowane, również sposób podania danych bibliograficznych nie jest jednolity.

Powyższe uwagi nie obniżają wartości merytorycznej pracy.

## 5. WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowaną rozprawę doktorską Panów mgra inż. Radosława Karczewskiego i mgra inż. Łukasza Gołębiowskiego pt. „Zasady klasyfikacji i monitorowania rozwoju uszkodzeń w kompozytach o osnowie polimerowej do zastosowań w obiektach inżynierii lądowej” uważam za ważne osiągnięcie badawcze. Autorzy sformułowali oryginalny problem naukowy, który ma istotne znaczenie dla praktycznego wykorzystania emisji akustycznej w diagnostyce konstrukcji wykonanych z kompozytów o osnowie polimerowej. Mimo sformułowanych uwag dyskusyjnych, uważam że rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Umieszczenie w jednej rozprawie wyników badań mechanicznych próbek i elementów wielkogabarytowych z wynikami badań za pomocą emisji akustycznej oraz z symulacjami komputerowymi MES spełniło cel postawiony przez Autorów – przedstawienie spójnego przedstawienia obszernego programu badawczego. Wyniki badań Autorów przedstawione w rozprawie stanowią istotny wkład w poszerzenie wiedzy z zakresu zastosowania emisji akustycznej w diagnostyce konstrukcji budowlanych.

Postawiony w pracy cel został osiągnięty, a sformułowane tezy udowodnione. Pan mgr inż. Radosław Karczewski i mgr inż. Łukasz Gołębiowski wykazali się przy tym odpowiednią wiedzą teoretyczną i eksperymentalną z zakresu inżynierii materiałowej, którą zastosowali w obszarze inżynierii lądowej. Autorzy wykazali w pracy umiejętność formułowania zagadnień naukowych oraz prowadzenia badań, w tym w skali pełnowymiarowej, przy wykorzystaniu najnowocześniejszych urządzeń badawczych stosowanych obecnie w diagnostyce konstrukcji budowlanych. Na tej podstawie, stwierdzam, że zostały spełnione wymagania Ustawy z dn. 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym (wraz z późniejszymi zmianami). Wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Radosława Karczewskiego i mgra inż. Łukasza Gołębiowskiego do publicznej obrony ich rozprawy doktorskiej.

