

Gliwice, 28 lutego 2020 r.

dr hab. inż. Marek Salamak prof. P. Śl.  
Katedra Mechaniki i Mostów  
Wydział Budownictwa  
Politechnika Śląska  
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

## OPINIA

o pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Rajchela pt.:

### **Projektowanie i badania hybrydowego dźwigara mostowego z kompozytów FRP i betonu lekkiego**

#### 1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja wykonana została na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej, dr hab. inż. Marka Goszyła, prof. PRz (pismo z dnia 15.01.2020), która w imieniu Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Rzeszowskiej, zwróciła się z prośbą o przygotowanie recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Rajchela. Praca zatytułowana jest *Projektowanie i badania hybrydowego dźwigara mostowego z kompozytów FRP i betonu lekkiego*.

#### 2. Uwagi ogólne

Ostatnie dziesięciolecie, to coraz wyraźniej dostrzegalna na świecie zmiana w podejściu do projektowania i budowy nowych obiektów mostowych. Chodzi już teraz nie tylko o pożądaną redukcję zużycia materiałów czy ortodoksyjnie traktowane wskaźniki ilości betonu i stali w przeliczeniu na metr kwadratowy powierzchni mostu. Znacznie więcej mówi się dziś o lepszej trwałości oraz o szybszej i mniej uciążliwej budowie. O trwałości, która pozwoli uniknąć potrzeby zbyt częstej wymiany kolejnych kluczowych elementów infrastruktury drogowo-kolejowej oraz o procesie budowlanym, który nie będzie powodować nadmiernych utrudnień dla środowiska i społeczeństwa. Można więc powiedzieć, że wreszcie koszty obiektu mostowego w całym jego cyklu życia (w tym również koszty utrzymania) stają się równie ważne, jak koszty budowy. Te czynniki są jednym z głównych motorów rozwoju technologii mostów z kompozytów FRP. To rozwiązanie daje bowiem nadzieję właśnie na lepszą trwałość i na krótszy czas budowy. Dotychczasowe zjawiska korozyjne przestają być tak destrukcyjne, a lekkie komponenty, wytwarzane podobnie jak produkty przemysłowe, mogą być łatwo transportowane i szybko montowane na budowie. W ten sposób właśnie, wyobrażaliśmy sobie kiedyś tak zwane uprzemysłowione budownictwo. Cieszy więc fakt, że jest już ono obecne również w Polsce. I to na najwyższym poziomie. Dowodem na to jest przedstawiona do recenzji praca.

### 3. Treść i zakres rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska, obejmująca 265 stron maszynopisu, składa się ze: spisu treści, 7 rozdziałów, w tym wstępu i podsumowania oraz bibliografii, która obejmuje 151 pozycji, w tym ponad połowa (102) obcojęzycznych. Praca zawiera liczne rysunki i zdjęcia (182) oraz tabele (98) zamieszczone w tekście.

Dysertacja poświęcona jest zagadnieniom związanym z projektowaniem i badaniem drogowych obiektów mostowych, w których konstrukcję przęsła stanowi hybrydowy dźwigar łączący cienkościenną belkę z kompozytu FRP i żelbetową płytę pomostu. Szczególnie dokładnie potraktowana została efektywność współpracy tych dwóch zasadniczych elementów konstrukcyjnych.

Rozdział pierwszy zaczyna się od przedstawienia ważnego dla całej pracy tła jakim był projekt badawczo-rozwojowy Com-Bridge, którego doktorant był koordynatorem i jednocześnie głównym wykonawcą prac naukowo-badawczych. To jest bardzo ważna informacja, która wskazuje jak duże i jak praktyczne było jego zaangażowanie w opiniowaną tu pracę. Dalej, znajduje się syntetyczne wprowadzenie do historii polimerowych kompozytów włóknistych FRP. W kolejnych podpunktach tego rozdziału przedstawiony został problem badawczy i przedmiot rozprawy oraz zredagowane zostały jej cele i zakres. Doktorant wskazał więc cel główny, którym było opracowanie autorskiej konstrukcji dźwigara hybrydowego, składającego się z korpusu wykonanego z kompozytu FRP i płyty z betonu lekkiego zbrojonej polimerowymi prętami kompozytowymi. Taka konstrukcja mogłaby być stosowana do budowy mostów drogowych o rozpiętości około 20 m. Osiągnięcie tego możliwe było przez realizację pięciu celów szczegółowych, które w skrócie polegały na przeglądzie dotychczasowej wiedzy na temat takich właśnie dźwigarów hybrydowych, zaprojektowaniu samego dźwigara, przeprowadzeniu na nim badań eksperymentalnych oraz na opracowaniu i walidacji jego modelu numerycznego wraz ze sprawdzeniem odpowiednich stanów granicznych.

W drugim rozdziale Autor omawia stan wiedzy na temat kompozytów włóknistych FRP. Przedstawione są zasadnicze składniki tego materiału, sposoby wytwarzania oraz wynikający z nich typy produktów. Osobne punkty dotyczą samych hybrydowych dźwigarów mostowych. Pokazane zostały przy tym liczne przykłady zbudowanych z nich mostów oraz stosowane na świecie metody projektowania.

Trzeci rozdział zawiera opracowaną przez autora analityczną procedurę projektowania przęsła mostu drogowego z dźwigarów hybrydowych. Zostało to przedstawione w postaci realnego przykładu mostu, jaki został zbudowany w efekcie projektu badawczo-rozwojowego Com-Bridge. Był to most w miejscowości Błażowa koło Rzeszowa. Jego ogólna geometria i struktura samego hybrydowego dźwigara ukształtowana została na podstawie założeń związanych z przekraczaniem przeszkodą oraz zasad sformułowanych w poprzednim rozdziale.

W rozdziale czwartym opisane zostały zaprogramowane i przeprowadzone przez doktoranta badania eksperymentalne, których celem było sprawdzenie przyjętych wcześniej głównych założeń projektowych. Badania te obejmowały próby statyczne, dynamiczne i zmęczeniowe. Wykonywane były w warunkach laboratoryjnych na modelu dźwigara oraz in-situ na zbudowanym moście. Przy tej okazji, opisana została metoda wytworzenia dźwigara oraz proces budowy prototypowego mostu drogowego w Błażowej koło Rzeszowa.

Piąty rozdział jest opisem prac analitycznych polegających na budowie modelu numerycznego dźwigara hybrydowego jak i przęsła mostu za pomocą MES. Do walidacji modeli wykorzystane zostały wyniki wcześniejszych badań eksperymentalnych.

W szóstym rozdziale Autor skupił się na weryfikacji SGN i SGU dźwigara hybrydowego oraz przęsła mostu. Porównał przy tym metodę analityczną i numeryczną sprawdzania stanów granicznych i sformułował swoje wnioski dotyczące projektowania dźwigarów hybrydowych.

Siódmy rozdział zawiera podsumowanie całej pracy, wnioski końcowe oraz propozycje dalszych prac w przyszłości.

## 4. Ocena rozprawy

### 4.1. Ocena merytoryczna

Podjęta przez Autora tematyka dotycząca hybrydowych dźwigarów mostowych z kompozytów FRP i betonu lekkiego jest bardzo ważna i perspektywiczna. W branży inżynierskiej ogólnie znane są już zalety kompozytów FRP i ich przewagi w stosunku do konwencjonalnych materiałów budowlanych. Mimo to, przykłady zastosowania w budownictwie mostowym wciąż są ograniczone głównie do napraw i wzmocnień istniejących konstrukcji lub wymiany żelbetowych płyt pomostowych na kompozytowe panele. Głównym powodem są utrzymujące się wysokie koszty produkcji tego materiału, zbyt mała sztywność elementów konstrukcyjnych, a także nagła postać zniszczenia, która jest szczególnie niebezpieczna w konstrukcjach budowlanych. O ile problem wysokiej ceny może zniknąć również szybko jak kiedyś nastąpiło odejście od żeliwa na korzyść stali, to problemy techniczne mogą być rozwiązane tylko przez poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań projektowych. Takim rozwiązaniem zdają się być konstrukcje hybrydowe, w których wykorzystuje się zalety łączonych ze sobą różnych materiałów. W tym przypadku kompozytu FRP i betonu.

Ten kierunek został słusznie przyjęty przez Doktoranta, który skorzystał z najlepszej wiedzy i doświadczenia wielu inżynierów i badaczy z najbardziej rozwiniętych krajów świata. Potrafił on skutecznie i prawidłowo ukształtować oraz zaprojektować hybrydowy dźwigar z kompozytów FRP i betonu lekkiego. Udowodnił w praktyce, że można go bezpiecznie wykorzystywać w przęsłach drogowych obiektów mostowych bez ograniczenia ich klasy obciążenia. Wykazał również, że projektowanie dźwigarów hybrydowych wymaga stosowania metod numerycznych, gdyż metody analityczne, które oparte są na klasycznej teorii laminacji okazały się być niewystarczająco dokładne. Po zapoznaniu się z wykonanymi przez Doktoranta modelami analitycznymi i numerycznymi można stwierdzić, że niewątpliwie cechuje je wysoki stopień złożoności i wyrafinowania. Pozytywnie świadczy to o posiadanych przez niego umiejętnościach modelowania konstrukcji mostów wraz z ich nietypowymi właściwościami materiałowymi.

Imponujące są wszystkie zrealizowane przez Doktoranta badania eksperymentalne, które w laboratorium dotyczyły nie tylko drobnowymiarowych detali zespolenia sworzniowego, ale też pełnowymiarowego dźwigara hybrydowego. Zakres badań tych elementów obejmował zarówno próby statyczne, dynamiczne jak i zmęczeniowe. Pokazuje to jego dużą wiedzę i doświadczenie w planowaniu i prowadzeniu tego typu eksperymentów. Na koniec wykonał jeszcze testy statyczne i dynamiczne na zbudowanym już moście. Wszystkie badania zostały przejrzyście opisane, a wyniki we właściwy sposób zinterpretowane.

Wszystko to sprawia, że pod względem merytorycznym recenzowaną pracę doktorską oceniam ogólnie bardzo pozytywnie. O jej wartości merytorycznej decyduje:

- Właściwie dobrana tematyka rozprawy, która jest ciekawa z poznawczego punktu widzenia i wymaga kompleksowego podejścia. Natomiast podjęte zagadnienie naukowe powiązane jest z potrzebami praktyki inżynierskiej.
- Autor zaprezentował dobre rozeznanie stanu wiedzy w obszarze stanowiącym przedmiot rozprawy. Wykazał przy tym dużą kreatywność w planowaniu i przeprowadzaniu eksperymentów badawczych oraz biegłość w modelowaniu konstrukcji mostowych.
- Wszystkie sformułowane przez niego cele pracy zostały osiągnięte.

#### 4.2. Uwagi krytyczne i wymagające wyjaśnienia

W punkcie 7.2, gdzie zestawione są zrealizowane cele rozprawy, Autor sformułował również zasady kształtowania dźwigarów hybrydowych typu kompozyt FRP – beton, które można stosować w odniesieniu do drogowych obiektów mostowych. Podane są tam na przykład zalecane przedziały rozpiętości przęsła, sugerowana smukłość, czyli liczba i rozstaw dźwigarów. Czy te zasady i w pewnym sensie ograniczenia, wynikają rzeczywiście z przeprowadzonych prac naukowo-badawczych czy może tylko badań literaturowych? Czy jest możliwe zbudowanie mostu z dźwigarem hybrydowym o rozpiętości spoza przedziału 15-25 m, czyli na przykład 10 lub 30 m? A może jest to z jakiegoś powodu nieuzasadnione?

Jaka była motywacja użycia na płytę pomostową akurat betonu lekkiego? W podanych na końcu zasadach kształtowania jest wyraźne zalecenie stosowania zwykłego betonu.

Czy Doktorant ma jakieś doświadczenia w zakresie projektowania i badania przęseł mostów wykonanych w całości z kompozytu FRP, bez udziału tradycyjnych materiałów? Jeśli tak, to na ile uwypuklają się zalety hybrydowej konstrukcji?

Dlaczego Doktorant w swych stwierdzeniach o przydatności swoich prac i wniosków ogranicza się tylko rynku polskiego?

Poza tym, w pracy brakuje słownika pojęć i stosowanych w tekście skrótów.

#### 4.3. Uwagi szczegółowe i edycyjne

Praca napisana jest w poprawnie. Jej układ jest logiczny, struktura podziału treści jest prawidłowa, a tytuł rozprawy oddaje jej treść i zakres.

Pomijając drobne mankamenty, praca jest ładnie zredagowana. Jest bardzo bogato zilustrowana rysunkami, zdjęciami i tabelami. Terminologia pracy jest poprawna, a sprawność językowa może być uznana za dobrą. Pewnym mankamentem jest to, że zawiera drobne pomyłki interpunkcyjne (14 stwierdzonych przypadków), gramatyczne i stylistyczne (3 przypadki), literowe (5 przypadków) oraz składniowe i logiczne (6 przypadków). Stwierdzono również błędy w odniesieniach do rysunków w tekście. Np. na str. 151 jest odniesienie do rys. 4.37, a powinno być do rys. 4.38; na str. 178 jest odniesienie do rys. 4.48, a powinno być do rys. 4.58.

Oczywiste jest jednak, że te drobne usterki są bez większego znaczenia dla ogólnej, merytorycznej oceny całości pracy. Zostały one przekazane Autorowi w postaci elektronicznego dokumentu.

## 5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi podsumowanie przemyśleń i badań Autora w zakresie kształtowania, projektowania, badania i modelowania przęseł mostowych z hybrydowymi dźwigarami, które łączą ze sobą belkę z polimerowego kompozytu FRP oraz żelbetową płytę pomostową.

Doktorant sformułował w pracy jasno określone cele naukowe i zrealizował je w pełni. Za bardzo cenne uważam zaprojektowanie przez Doktoranta pierwszego w Polsce, prototypowego mostu drogowego, w którym zastosowano tego typu hybrydowe dźwigary oraz wykonanie przez niego szeregu interesujących badań eksperymentalnych, które realizowane były zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i in-situ.

Twórczy wkład Autora do rozwiązania ciekawego i złożonego problemu naukowego jest zatem bardzo interesujący i zawiera wiele elementów nowości oraz oryginalności. Chciałbym podkreślić, że propozycje przedstawione w pracy otwierają nowe pola badań i dają możliwość kontynuowania rozważań.

Opracowane przez Doktoranta i odpowiednio zweryfikowane procedury projektowe mogą się przyczynić do upowszechnienia stosowania tego typu dźwigarów i to wcale nie tylko w polskim mostownictwie.

Biorąc pod uwagę ocenę rozprawy doktorskiej uważam, że stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej jaką jest inżynieria lądowa i transport, a także umiejętność prowadzenia pracy naukowej i tym samym wyczerpuje wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ze zmianami) i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

dr hab. inż. Marek Salamak prof. P. Śl.

