

Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
Instytut Dróg i Mostów

## **R e c e n z j a**

### **pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Kulpy**

#### **pt. „Nośność i sztywność warstwowych pomostów kompozytowych w mostach drogowych”**

Recenzję opracowano na zlecenie Prorektora Politechniki Rzeszowskiej - prof. dr hab. inż. Grzegorza Budzika – umowa o dzieło nr OK-N/834/2017 z dnia 19 lipca 2017 roku.

### **1. Charakterystyka i tematyka pracy**

Opiniowana praca doktorska składa się z 10-ciu rozdziałów i załącznika, streszczeń oraz wykazu literatury. Zestawienie zawiera 209 pozycji, z czego w 12-tu z nich Doktorant jest współautorem. Całkowita objętość rozprawy wynosi 499 stron.

Rozprawa ma charakter analityczno – doświadczalny oraz zawiera dużą część monograficzną, która sama w sobie mogłaby stanowić osobne opracowanie.

Praca dotyczy bardzo ważnego, o innowacyjnym charakterze zagadnienia, a mianowicie zaprojektowania, zbudowania i w pewnym stopniu także eksploatacji pomostów wykonanych z kompozytów polimerowych.

Poszczególne rozdziały rozprawy zawierają:

- wstęp, a w nim zarys problematyki konstrukcji mostów z kompozytów polimerowych,
- cele, zakres i tezy pracy,
- przegląd materiałów i technologii wytwarzania pomostów kompozytowych,
- opis różnego rodzaju konstrukcji paneli pomostów kompozytowych i ich zastosowań w praktyce,
- przedstawienie sposobu kształtowania materiałowo – konstrukcyjnego pomostu kompozytowego według własnego pomysłu (trzy warianty) wraz z analizą porównawczą wyników badań laboratoryjnych z wynikami analiz numerycznych,
- analizę teoretyczną nośności i sztywności wybranego do dalszych badań jednego z trzech wariantów panelu pomostu,
- przedstawienie badań laboratoryjnych wybranego panelu pomostu pod obciążeniem statycznym,
- analizę numeryczną badanego wcześniej panelu pomostu,
- porównanie wyników badań statyczno – wytrzymałościowych z wynikami analizy numerycznej,
- ostateczną ocenę nośności i sztywności panelu pomostu, który ma stanowić element rzeczywistej konstrukcji mostu,
- podsumowanie i wnioski końcowe wraz z opisem potencjalnych kierunków przyszłych badań.

## 2. Ocena merytoryczna pracy

Zagadnienie będące przedmiotem dysertacji tj. zastosowanie kompozytów polimerowych w mostownictwie jest przedmiotem badań i analiz od początku lat 90-tych XX wieku. Podstawowym czynnikiem niejako wymuszającym takie zainteresowanie jest rosnąca świadomość zapewnienia jak największej trwałości mostom. Przytaczane przez Doktoranta dane statystyczne tylko potwierdzają to przekonanie, choć trzeba tu brać poprawkę na wiarygodność tych informacji. Zasady utrzymania mostów w Ameryce Północnej różnią się znacząco (in minus) w porównaniu z wymaganiami europejskimi, w tym i z polskimi.

Wzrost zainteresowania kompozytami polimerowymi w budownictwie jest naturalnym procesem przepływu nowatorskich rozwiązań z przemysłu lotniczego, kosmicznego czy stoczniowego. Kwestią czasu było pojawienie się w konstrukcjach mostów pomostów wykonanych z kompozytów polimerowych, najpierw w Stanach Zjednoczonych AP, a potem w Wielkiej Brytanii i Danii oraz krajach Dalekiego Wschodu. Zdobyte doświadczenia, szczególnie negatywne, pokazały, że nadeszła pora na stworzenie „polskiego pomostu”. Prezentowana rozprawa doktorska jest w całości poświęcona temu celowi.

Rozprawa składa się z bardzo obszernej części studialnej oraz bardzo rozbudowanych części: teoretycznej i numerycznej, a także części badawczej. Należy podkreślić, że w przemyślany sposób Doktorant przestrzegał sekwencji prac w ramach programu badawczego tj. najpierw badał i analizował materiały, z których wykonywano elementy pomostów, potem same elementy składowe pomostów i na końcu trzy warianty pomostów. Następnie wybrał do dalszych badań i analiz jeden z ww wariantów. Po jego zbadaniu i wykonaniu symulacji komputerowej na bazie MES skorygował jego parametry techniczne. Ten produkt finalny mógł już stanowić element „projektowy” tzn. mógł zostać zastosowany w konkretnym obiekcie mostowym. Opisany wyżej cykl badawczy jest rzadko spotykany w Polsce, a był możliwy do zrealizowania po pierwsze ponieważ w zespole znalazł się partner z przemysłu i po drugie, że było należyte finansowanie projektu badawczego.

Przedstawiony powyżej zakres rozprawy miał służyć udowodnieniu następujących tez:

- *prawidłowo ukształtowane i zaprojektowane kompozytowe pomosty warstwowe z kompozytów FRP mają nośność doraźną i sztywność zapewniającą bezpieczne ich zastosowanie w drogowych obiektach mostowych bez ograniczeń i klasy obciążenia;*
- *optymalne pod względem wytrzymałościowym (nośność, sztywność) ukształtowanie warstwowych pomostów kompozytowych zależy w porównywalnym stopniu od zastosowanych rozwiązań materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych;*
- *projektowanie warstwowych pomostów kompozytowych wymaga zastosowania metod numerycznych, gdyż metody analityczne oparte na ścisłej teorii płyt są zbyt mało dokładne by zbyt prognozować zachowania się takich pomostów pod obciążeniem użytkowym.*

Reasumując, Doktorant zrealizował bardzo obszerny program własnych badań i analiz studialnych, laboratoryjnych i obliczeniowych zarówno teoretycznych jak i numerycznych. Wykazał przy tym duży profesjonalizm. Uzyskał dobrą zgodność wyników badań laboratoryjnych i obliczeniowych. W ocenie recenzenta Doktorant zrealizował wszystkie zaplanowane przez siebie cele i udowodnił postawione tezy.

Zaprezentowany poziom merytoryczny rozprawy, a także sposób i logika wnioskowania są na bardzo dobrym poziomie. Na każdym etapie prac badawczych Doktorant prawidłowo planuje przeprowadzenie eksperymentu, przeprowadza go i wyciąga wnioski, które niekiedy nie sprawdzają się, gdy przechodzi do następnego etapu. Ale tak jest zawsze, gdy zajmujemy się tworzeniem czegoś nowego, a nie kopiowaniem już znanych rozwiązań.

Najważniejsze jest jednak to, że Dyplomant prawidłowo ocenia przyczyny niepowodzeń. Dysponuje na tyle szeroką wiedzą (nie tylko „budowlaną”), że wie, że rozwiązanie problemów związanych z pracą pomostów kompozytowych jest nie tylko w po stronie modelu obliczeniowego, ale również właściwości materiałowych i technologii wytwarzania elementów konstrukcyjnych.

W zasadzie nie stwierdzono poważnych błędów, a pojawiające się niekiedy nieścisłości czy wątpliwości nie wpływają ujemnie na odbiór i jakość rozprawy.

Uzyskane wyniki potwierdzają nie tylko słuszność zaproponowanych rozwiązań. Mogą one być bezpośrednio wykorzystane w praktyce inżynierskiej, Stąd też praca oprócz naukowego ma bardzo pożądaną charakter aplikacyjny.

Można zatem stwierdzić, że mgr inż. Maciej Kulpa wnosi oryginalny wkład w rozwój mostownictwa.

### 3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Jak to wynika z powyżej przedstawionej oceny poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kulpy jest wysoki. Tym niemniej recenzentowi nasunęły się następujące wątpliwości i uwagi, które wymagają ustosunkowania się do nich, jak na przykład:

- Niewątpliwie metoda elementów skończonych daje zdecydowanie większe możliwości oceny pracy konstrukcji. Tym niemniej teorię płyt cienkich (rozumiem, że płyt ortotropowych a nie membran) nie uważałbym za nie przydatną. Wszystko zależy od przyjętego modelu obliczeniowego. Opracowany przez Doktoranta chyba nie uwzględnił faktu braku poprzecznic. Zapewne sztywność skrętna także powinna być inaczej zdefiniowana. Można by do tego dodać problem z określeniem szerokości współpracującej żeber i w konsekwencji kwestii rozłożenia obciążeń na poszczególne żebra.
- Wszystkie badane panele pomostowe pracowały w zakresie sprężystym. A czy istnieje możliwość pracy w stanie plastycznym, czy też następuje od razu zniszczenie? Powstaje pytanie jaki element panelu pierwszy ulega zniszczeniu? Wyniki badań laboratoryjnych pokazują, że traktowanie panelu kompozytowego jako płyty nie do końca jest uzasadnione – nie tyle ze względów obliczeniowych (adekwatność modelu obliczeniowego do rzeczywistego), ale z powodów materiałowych (różne właściwości i technologia wytwarzania). To nie wymiary panelu powinny decydować o przyjęciu modelu obliczeniowego, a jego układ konstrukcyjny. W badanym przypadku wydaje się, że lepiej (bezpieczniej) byłoby potraktować panel jako pasmo płytowe, a może nawet jako belkę. Przecież w panelu nie ma poprzecznic!
- Na str. 297 (Podsumowanie analizy teoretycznej panelu) napisano: *Wykazano satysfakcjonującą sztywność i nośność panelu przy rozwiązaniu zagadnienia analitycznego (5.2). Jednocześnie sprawdzenie panelu za pomocą modelu numerycznego z użyciem MES nie potwierdziło wystarczającej sztywności i nośności panelu pod działaniem obciążenia normowego. Ta rozbieżność jest wynikiem tego, że w rozwiązaniu analitycznym zastosowano zbyt wiele uproszczeń (m.in. pominięcie grubości panelu, wpływ siły poprzecznej na przemieszczenia i stan wyężenia. Porównując wyniki obu analiz uznano, że model numeryczny MES znacznie lepiej odwzorowuje zachowanie panelu pod obciążeniem normowym.* Nie rozumiem tego wyjaśnienia. Skoro wyniki analiz teoretycznych spełniają SGN i SGU to po co stosować MES. Myślę, że uzasadnienie dalszego stosowania MES powinno być inne.
- Problem przyjęcia odpowiedniego modelu obliczeniowego oraz analizy pracy panelu znajduje odzwierciedlenie w przedstawianiu otrzymanych wyników. W większości przypadków są to rozkłady przemieszczeń czy odkształceń w przekrojach poprzecznych na

szerokości panelu, ale skoro modelem jest płyta to wskazane byłoby przedstawić powierzchnię ugięcia. Wątpliwości recenzenta biorą się z używanego w kilku miejscach rozprawy pojęcia *szttywność panelu* – ale względem której osi?

- Prześledzenie wniosków wyciąganych przez Doktoranta po zakończeniu poszczególnych etapów badań pokazuje z jednej strony jak początkowe założenia muszą ulec modyfikacji, a z drugiej, że nie zawsze warto się spieszyć, bo to co wydaje się prawidłowe na początku może przynieść negatywne skutki na końcu. Dowodem na to są następujące zapisy: str 433 – *Po przeprowadzeniu badań porównawczych trzech wariantów prototypów w małej skali dokonano wyboru odpowiedniego rozwiązania. Obserwując duże zapasy sztywności i nośności, zdecydowano się na zmniejszenie grubości laminatów zewnętrznych i wewnętrznych* (rozdział 4). Jak okazało się w kolejnych badaniach to odchudzanie nie wyszło na dobre, co w szczególności dotyczy laminatów wewnętrznych (patrz rozdziały 7, 8 i 9).
- Osobnym tematem jest kwestia skleiny. W zasadzie można było przewidzieć, że ona pierwsza ulegnie zniszczeniu. Wiadomo, że własności wytrzymałościowe klejów i żywic są gorsze niż włókien i inaczej być nie mogło i w przewidywalnej przyszłości nie będzie. Także pomysł modelowania numerycznego klejów jako materiału konstrukcyjnego budzi wątpliwości, ale to wykracza już bardzo daleko poza zakres rozprawy. Zdaniem recenzenta rozwiązanie tego problemu jest zadaniem dla chemików i specjalistów od inżynierii materiałowej a nie dla inżynierów budowlanych.

Stawia to pod znakiem zapytania celowość dalszych prac nad tak ukształtowanym panelem warstwowym. Dla pełnej jasności, nie podważam sensowności rozprawy. To jest po prostu cena postępu. Oczywiście wykracza to poza zakres rozprawy, ale pozwolę sobie zaproponować modyfikacje konstrukcji panelu. Należy zrezygnować ze sklejanie dwóch paneli ze sobą, czyli zrezygnować z warstw w pomostach. Lepszym wydaje się być rozwiązanie składające się tylko z jednej warstwy, z pojedynczych żeber, przy czym ich rozstaw powinien ulec zmniejszeniu, a ścianki boczne wzmocnieniu (co z resztą udowodnił sam Doktorant).

- Rozprawa jest poświęcona przede wszystkim analizie nośności i sztywności pewnego typu pomostów kompozytowych. Siłą rzeczy jest klasycznym przykładem rozprawy z zakresu inżynierii budowlanej. I tak powinno być. Jednak sam fakt, że przedmiotem analiz jest konstrukcja wykonana z materiału bardzo słabo rozpowszechnionego w budownictwie powinno nieco bardziej „zmobilizować” Doktoranta do przyjrzenia się jak przedstawia się stosowanie kompozytów polimerowych w innych dziedzinach techniki np. w przemyśle lotniczym czy kosmicznym nie mówiąc o stoczniowym (jachty). Przecież nie musimy odkrywać wszystkiego od początku. Przykładowo, jak poradzono sobie z niedoskonałościami metody infuzji przy produkcji elementów samolotów? Jak w takich elementach kontrolowane są właściwości materiałowe itp.

#### 4. Ocena strony formalnej pracy

Treść rozprawy jest zgodna z tytułem. Układ opracowania jest logiczny i uporządkowany. Rozprawa jest napisana dobrą polszczyzną. Narracja jest płynna, choć czasami zbyt rozbudowana. Niestety, zdarzają się powtórzenia tekstu w różnych rozdziałach czemu sprzyja duża (można powiedzieć zbyt duża) objętość pracy. Bez uszczerbku dla meritum, można by zredukować rozdział 5 wraz załącznikiem. Nieliczne, dostrzeżone w tekście usterki redakcyjne nie obniżają jej poziomu merytorycznego. Zdarzają się także lapsusy językowe jak np. „*uniepalniacz*” na str 29 czy „*pod działaniem interakcji obu sił wewnętrznych ...*” na str 359, ale nie jest ich wiele. Wskazana byłaby zmiana słowa *tabela* (germanizm) na *tablica*.

Generalnie, odbiór rozprawy jest dobry. Także opracowanie graficzne jest również na bardzo dobrym poziomie.

## 5. Wnioski końcowe

Rozwój konstrukcji mostowych jest bardzo ważnym zagadnieniem zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. Doktorant przeprowadził przemyślany cykl badań i analiz udowadniając, że zaproponowane rozwiązania, choć niedoskonałe, nie dość, że poprawią szeroko rozumianą jakość konstrukcji mostowych to jeszcze wpłyną pozytywnie na ich trwałość.

Opiniowana rozprawa stanowi udane rozwiązanie postawionego zadania naukowego i praktycznego. Autor rozprawy wykazał się umiejętnością rozwiązywania zagadnień teoretycznych, korzystania z istniejących programów komputerowych, przygotowania i realizacji badań laboratoryjnych i w końcu logicznym wnioskowaniem. Całość opracowania pokazuje również, że Doktorant oprócz umiejętności analizy zagadnienia wykazał także zdolność syntetyzowania wiedzy. Wyniki przedstawionych prac zostały wykorzystane przy sformułowaniu interesujących wniosków. Wskazane zostały także obszary do dalszych badań naukowych.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej oceny stwierdzam, że przedłożona przez **mgr inż. Macieja Kulpę** praca doktorska pod tytułem „**Nośność i sztywność warstwowych pomostów kompozytowych w mostach drogowych**” stanowi twórczy wkład do nauki w zakresie mostownictwa i spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z dnia 14 marca 2003 roku, poz. 595 z późniejszymi zmianami) oraz w Rozporządzeniu Ministra NiSzW z dnia 1 września 2011 roku (Dz. U. nr 196, poz. 1165), a także w Rozporządzeniu Ministra NiSzW z dnia 3 października 2014 roku (Dz. U. RP z dnia 14 października 2014 roku poz. 1383).

Mając powyższe na uwadze, stawiam wniosek o przyjęcie opiniowanej rozprawy jako spełniającej wymagania ustawowe i dopuszczenie do publicznej obrony.

Wnoszę o nadanie stopnia doktora nauk technicznych w obszarze wiedzy nauki techniczne, dziedzinie nauki techniczne, w dyscyplinie naukowej Budownictwo.

Stawiam również wniosek o wyróżnienie rozprawy.

