

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Pawła Ponety:  
„Dźwigary mostowe z kompozytów FRP – kształtowanie i badanie ich  
zachowania pod obciążeniem statycznym”**

### **1. Podstawa formalna opracowania**

Opinię opracowano na prośbę dziekana Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej, dr hab. inż. Piotra Koszelnika prof. PRz. (pismo z dnia 20.04.2017r.).

### **2. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa dotyczy zagadnień technicznych i teoretycznych, związanych z opracowaniem technologii produkcji mostowych dźwigarów kompozytowych typu FRP. Doktorant dokonał rozpoznania przydatności kompozytów FRP do budowy przęseł mostowych. Rozpoznano właściwości mechaniczne kompozytów FRP, ich trwałość oraz aspekty technologiczne związane z produkcją i montażem. Dokonano także oceny konkurencyjności rozwiązań typu FRP w porównaniu do tradycyjnych materiałów i sposobów budowy, biorąc pod uwagę cały cykl życia. Uwzględniono zatem nakłady na utrzymanie i utylizację konstrukcji.

Celem szczegółowym pracy doktorskiej jest opracowanie własnej oryginalnej konstrukcji powtarzalnego przęsła mostu oraz technologii wytwarzania. Całość prac projektowych i badawczych została zwieńczona wykonaniem prototypowych dźwigarów mostowych. W tym celu przeprowadzono złożone badania wytrzymałościowe wykonanych elementów i sformułowano szereg istotnych dla tematu wniosków.

Tematyka pracy jest wysoce aktualna. Obecnie rozwijają się poszukiwania alternatywnych sposobów budowy mostów, związane z niskim kosztem życia i małym wydatkiem energetycznym. Kompozyty FRP dobrze wpisują się w ten ogólny trend.

Charakteryzując ogólnie pracę należy podkreślić, że jest ona połączeniem rozważań teoretycznych, badań eksperymentalnych, opracowań technologicznych i ostatecznie konkretnej produkcji. Stanowi zatem komplet zagadnień potrzebnych tym, którzy będą chcieli podjąć się wykonania podobnych konstrukcji.

Opiniowana rozprawa liczy 317 stron maszynopisu i składa się z 10 rozdziałów, spisu oznaczeń i definicji, spisu bibliografii, dwóch załączników oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

**Rozdział 1** zawiera wprowadzenie do tematyki. Opisuje program badawczy i przedmiot rozprawy, określa zakres oraz precyzuje tezy, które brzmią następująco:

- Optymalne pod względem wytrzymałościowym ukształtowanie mostowych dźwigarów kompozytowych zależy w porównywalnym stopniu od zastosowanych rozwiązań materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych.
- Poprawnie ukształtowane dźwigary mostowe z kompozytów FRP mają nośność doraźną i sztywność zapewniającą bezpieczne ich zastosowanie w obiektach mostowych.

**Rozdział 2** – Przedstawia kompozyty FRP jako materiał do budowy mostów. W rozdziale przedstawiono podstawy wiedzy materiałowej związanej z kompozytami FRP. Opisano elementy składowe kompozytów. Scharakteryzowano włókna i tkaniny. Podano ich cechy mechaniczne i własności związane z wpływem środowiska. W kolejnych podrozdziałach dokonano przeglądu żywic syntetycznych. Sklasyfikowano je pod względem cech mechanicznych, technologicznych i ogólnej przydatności w wytwarzaniu konstrukcji mostowych. Dokonano także przeglądu środków uszlachetniających polimer.

W dalszej części rozdziału autor opisuje w ujęciu encyklopedycznym podstawowe elementy płyt kompozytowych o konstrukcji przekładkowej. Dużo uwagi poświęcono materiałom rdzenia.

W kolejnych podrozdziałach autor przedstawia bogate zestawienia cech materiałów kompozytowych. Przedstawiono cechy mechaniczne, trwałość i odporność na temperaturę. W podsumowaniu rozdziału autor dokonuje klasyfikacji wyrobów kompozytowych i ich przydatności do konstrukcji budowlanych.

**Rozdział 3** – Technologia wytwarzania elementów konstrukcyjnych z kompozytów FRP.

W rozdziale omówiono metody wytwarzania elementów z kompozytów FRP. Opisano metody „ręczne” - wymagające ciągłego udziału pracowników, metody półautomatyczne i automatyczne. Następnie przeprowadzono dyskusję cech kompozytów otrzymanych z wykorzystaniem opisanych wcześniej technologii i ich przydatności w produkcji wielkogabarytowych elementów mostowych.

**Rozdział 4** – Przegląd obiektów mostowych z kompozytów FRP

W rozdziale przedstawiono historyczny przegląd dokonań dotyczących przeseł mostów kompozytowych. W każdym przypadku podano zasadnicze rozwiązania konstrukcyjne, materiałowe i technologiczne. Cennym elementem jest tabelaryczne podsumowanie zrealizowanych obiektów z przeseł kompozytowym.

**Rozdział 5** – Projekt konstrukcyjny kompozytowego dźwigara mostowego.

Autor wykonał projekt szczegółowy dźwigara kompozytowego kładki dla pieszych stosując materiały i technologie wybrane na podstawie studiów literatury przedstawionych w poprzednich rozdziałach. Zastosowano kompozyt GFRP z żywicą epoksydową i z dodatkiem włókna węglowego w wymaganych miejscach. Zaprojektowano konstrukcję przekładkową z rdzeniem z pianki PVC. Projekt przystosowano do technologii infuzji. Autor przedstawił założenia dotyczące projektowanych parametrów mechanicznych materiału i materiałowego współczynnika bezpieczeństwa. Kolejne części rozdziału to standardowe elementy procedury projektowania dźwigara mostowego. Elementem nowym dla mostowca posługującego się tradycyjnymi materiałami było określenie parametrów materiałowych sprowadzonych do modelu powłoki cienkiej. Doktorant wyliczył parametry sprowadzone do własności ortotropowych korzystając z programu ESAComp. Następnie sformułował

powłokowy model numeryczny w środowisku oprogramowania SOFiSTiK. Analiza numeryczna pozwoliła na określenie wielkości naprężeń w elementach powłoki dźwigara. Obliczono także wielkości przekrojowe sił wewnętrznych. W kolejnym podrozdziale doktorant zamieścił podstawy teoretyczne dla analizy statycznej ustrojów powłokowych i kryteria wytrzymałościowe. Stan naprężeń w poszczególnych warstwach laminatu obliczono korzystając z oprogramowania ESAComp.

**Rozdział 6** – Wytworzenie pełnowymiarowego modelu badawczego dźwigara kompozytowego.

W rozdziale przedstawiono proces projektowania technologicznego i wykonanie elementu badawczego o wymiarach  $l=12\text{m}$ ,  $h=1.06\text{m}$  i  $b=1.7\text{m}$ . Przedstawiono precyzyjnie konstrukcję powłok kompozytowych, detale konstrukcyjne i materiały. Opisano proces wytworzenia elementu z uwzględnieniem detali technicznych. Całość jest bogato ilustrowana zdjęciami.

**Rozdział 7.** – Badanie modeli dźwigara kompozytowego pod obciążeniem statycznym.

W rozdziale zdefiniowano cele badań. Opisano przygotowanie stanowiska badawczego, sposoby przyładania obciążeń i warunki podparcia. Opisano sposoby rejestrowania przemieszczeń i odkształceń oraz program obciążania modelu. Całość jest bogato ilustrowana rysunkami i zdjęciami.

Najważniejszą część rozdziału to prezentacja wyników przeprowadzonych badań. Zaprezentowano wyniki pomiarów przemieszczeń i odkształceń w wybranych punktach pomiarowych.

W kolejnym podrozdziale opisano mechanizm zniszczenia, polegający jak można było się spodziewać na wyczerpaniu nośności matrycy i delaminacji w strefie ściskania. Kolejne oznaki zniszczenia były konsekwencją tego zjawiska.

Rozdział zakończono podsumowaniem krytycznie oceniającym zaprojektowany model badawczy.

**Rozdział ten jest niewątpliwie najbardziej wartościowym i oryginalnym elementem pracy.**

**Rozdział 8.** Model numeryczny dźwigara kompozytowego i jego walidacja

Przedstawiono wykonany przez doktoranta model MES badanego dźwigara. Przyjęto parametry materiałowe kompozytu na podstawie wcześniejszych badań. Przyjęto zastępcze modele powłoki warstwowej. Wymiary modelu MES zdefiniowano na podstawie pomiarów wykonanego dźwigara. Przeprowadzono dyskusję dotyczącą zgodności modelu MES z badaniami.

**Rozdział 9.** Kształtowanie konstrukcyjne i technologiczne mostowych dźwigarów kompozytowych

Autor dokonuje podsumowania własnych przemyśleń dotyczących kształtowania i produkcji dźwigarów kompozytowych. Na szczególną uwagę zasługuje opis prototypowego urządzenia do produkcji elementów dźwigarów przez nawijanie rowingu.

## **Rozdział 10. Podsumowanie i wnioski końcowe rozprawy**

W rozdziale autor dokonuje skrótowego podsumowania prac i podkreśla osiągnięte cele. Na zakończenie doktorant przedstawił zagadnienia, które uważa za istotne w dalszych pracach nad zastosowaniem kompozytów w budownictwie mostowym.

### **3. Ocena rozprawy.**

#### **3.1 Uwagi pozytywne**

Praca jest ważnym przyczynkiem do technicznego wdrożenia kompozytów FRF do wytwarzania elementów konstrukcji mostu. Rezultatem pracy jest kompletne dzieło będące kompendium wiedzy teoretycznej i technologicznej potrzebnej do wytwarzania wielkowymiarowych elementów kompozytowych dedykowanych mostom.

Doktorant przeprowadził bogate studia literatury dotyczące historii i aktualnej wiedzy dotyczącej żywic polimerowych, włókien i tkanin zbrojenia oraz materiałów przekładkowych. Dokonał przeglądu metod wytwarzania konstrukcji z kompozytów i ich przydatności do realizacji postawionego zadania.

Niewątpliwie oryginalnym osiągnięciem autora jest opracowanie i wdrożenie technologii produkcji elementów FRP oraz sformułowanie i realizacja programu badań wytrzymałościowych pełnowymiarowego elementu dźwigara mostowego. W rezultacie autor nie tylko wykazał przydatność konstrukcji FRP w mostownictwie, ale również, co uważam za najistotniejsze, określił współczynniki bezpieczeństwa dla tego typu konstrukcji.

Cennym oryginalnym elementem pracy jest porównanie obliczeń teoretycznych z wykorzystaniem standardowych narzędzi analitycznych z wynikami badań pełnowymiarowego elementu mostu. Wyniki badań przekładają się wprost na realne rozwiązania techniczne o zbliżonej konstrukcji.

Praca poza częścią badawczą zawiera szeroki przegląd literatury tematu, charakterystyki materiałów i opisy standardowych technologii produkcji elementów FRP. Cennym, oryginalnym elementem tej części rozprawy jest krytyczna ocena materiałów i technik wytwarzania elementów z FRP przydatnych w realizacji wielkogabarytowych elementów konstrukcyjnych.

Rozprawa została napisana starannie. Wnioski potwierdzono szeregiem oryginalnych wykresów z badań, rysunków i fotografii dokumentujących prace badawcze.

#### **3.2 Uwagi krytyczne**

Praca dotyczy konstrukcji FRP powszechnie stosowanych w innych obszarach gospodarki. Dlatego większość z opisanych w pracy zagadnień i problemów technicznych jest znana i szeroko stosowana w wielu gałęziach przemysłu (przemysł stoczniowy, lotniczy, samochodowy, energetyczny, kosmiczny itd.) Wiedza dotycząca mechaniki struktur typu FRP jest ogromna i wykracza znacznie poza zakres stosowany przez doktoranta. Tak więc z punktu widzenia technologa np. producenta kadłubów opisane

w pracy teorii i technologii wytwarzania są zbiorem podstawowych informacji dotyczących problemu.

Teza nr 1: „Optymalne pod względem wytrzymałościowym ukształtowanie mostowych dźwigarów kompozytowych zależy w porównywalnym stopniu od zastosowanych rozwiązań materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych” jest zbyt ogólna i w świetle współczesnej wiedzy oczywista. Ponadto recenzent całkowicie nie zgadza się z uzasadnieniem tej tezy. Autor podkreśla tu różnicę pomiędzy konstrukcjami FRP i tradycyjnymi (stal – beton) twierdząc, że „w przypadku konstrukcji konwencjonalnych budowa materiału oraz w dużym stopniu technologia wytwarzania obiektu nie wpływają na kształtowanie konstrukcji przeszła mostowego na etapie jego projektowania”. Takie stwierdzenie jest zdaniem recenzenta błędne. Konstrukcje żelbetowe i sprężone są również kompozytami. Sposób ich kształtowania jest ściśle powiązany z technologią wytwarzania. Zbrojenie w konstrukcjach żelbetowych jest układane zgodnie z rozkładem sił wewnętrznych. Znane są powszechnie rozwiązania, w których zbrojenie układa się zgodnie z trajektoriami naprężeń głównych.

Teza nr 2: „Poprawnie ukształtowane dźwigary mostowe z kompozytów FRP mają nośność doraźną i sztywność zapewniającą bezpieczne ich zastosowanie w obiektach mostowych”.

Ta teza również wymaga dyskusji. W świetle światowych dokonań w tworzeniu FRP nie ma wątpliwości, że można ukształtować dźwigar spełniający warunki stanów granicznych. Można się zgodzić z potrzebą przełamania bariery mentalnej.

**Jednak autor nie sprecyzował co tak naprawdę wyróżnia konstrukcje mostowe i sprawia, że są czynniki istotne dla materiałów typu FRP, które szczególnie występują w mostach.**

#### **Inne uwagi lub pytania dotyczące pracy.**

Powszechną praktyką przy projektowaniu z kompozytów FRP są testy wytrzymałościowe projektowanych rozwiązań. Wykonuje się próbki o zadanej strukturze (np. laminat szklany z warstwą węglową) i bada się ich prawdziwe właściwości mechaniczne. W pracy zamieszczono wyniki wcześniejszych badań, ale ich związek z realizowaną konstrukcją jest nieokreślony. Określenie zastępczych własności kompozytu na podstawie oprogramowania ESAComp może być informacją pomocniczą, ale w praktyce projektowej nie stanowi podstawy do przyjęcia parametrów mechanicznych materiału.

Czy określenie efektu szerokości współpracującej jest możliwe w przypadku rozmieszczenia trzech czujników pomiaru odkształceń po szerokości?

Czy określono rozrzuty parametrów sztywnościowych kompozytu?

Czy rzeczywista przyczyną zniszczenia modelu był karb? Czy badano próbki kompozytu płyty górnej na ściskanie?

Podsumowanie pracy ma raczej charakter recenzji lub samooceny. Autor pisze, iż otrzymał optymalny pod względem wytrzymałościowym element konstrukcyjny. Jaki zatem proces optymalizacyjny autor zastosował i jak to się ma do wyników testów laboratoryjnych?

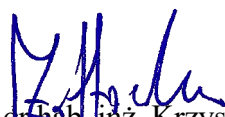
**Recenzent liczy na dyskusję dotyczącą powyższych uwag lub pytań podczas obrony pracy.**

W pracy zauważono też drobne usterki formalne i stylistyczne. Jednak recenzent nie uważa tego rodzaju mankamentów za istotne.

## 5. Ocena końcowa

Przedstawiona do recenzji praca „**Dźwigary mostowe z kompozytów FRP – kształtowanie i badanie ich zachowania pod obciążeniem statycznym**” ma moim zdaniem wartość pracy naukowej i spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Zwłaszcza w części badawczej, dotyczącej autorskiego programu dotyczącego wytworzenia i badań cech wytrzymałościowych pełnowymiarowego dźwigara mostowego.

Na podstawie przedłożonej rozprawy stwierdzam, iż praca doktorska Pana mgr inż. Pawła Ponety spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 roku (art. 13 ust.1, Dz.U.65 poz.595 z późniejszymi zmianami) i może stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora. W związku z powyższym składam przed Wysoką Radą wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski Prof. nadzw. PG