

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Pauliny Siwowskiej

pt. „Nośność i sztywność belek stalowych wzmacnianych taśmami CFRP”

Recenzję opracowano na zlecenie Prorektora ds. Nauki Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Lesława Gniewka, prof. PRz. - umowa o dzieło nr NN/13/2022 z dnia 18.05.2022 roku oraz Uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej z dnia 16.03.2022 roku.

1. Charakterystyka i tematyka pracy

Opiniowana praca doktorska składa się z 7-miu rozdziałów merytorycznych, wykazu piśmiennictwa i streszczeń. Ponadto dołączone są 3 załączniki w postaci cyfrowej (CD). Bibliografia zawiera cytowane 233. W dwóch z nich doktorantka jest współautorem. Przedstawiono także streszczenia w języku polskim i angielskim. Całkowita objętość rozprawy wynosi 322 strony plus 448 stron w załącznikach.

Rozprawa ma charakter analityczno-eksperymentalno-wdrożeniowy. Opracowanie dotyczy ważnego i rozwojowego zagadnienia stosowania taśm CFRP do wzmacniania dwuteowych belek stalowych.

Poszczególne rozdziały rozprawy zawierają:

- We Wstępie Autorka zaprezentowała w skrócie przedmiot, zakres i cel opracowania oraz przedstawiła motywację, która skłoniła ją do zajęcia się wspomnianymi wyżej problemami.
- W rozdziale 2 opisano czynniki wpływające na nośność i sztywność belek stalowych wzmocnionych taśmami CFRP. Przedstawiono charakterystyki materiałowe i geometryczne taśm i skleń. Dużo uwagi poświęcono systemom zakotwień końców taśm i ich wykorzystaniu do wstępnego naciągu, czyli sprężania. Zasygnalizowano także problem wpływu obciążeń o charakterze zmęczeniowym na szeroko rozumianą efektywność wzmacniania konstrukcji taśmami CFRP.
- W rozdziale 3 przedstawiono analizę teoretyczną określania nośności belki stalowej wzmocnionej taśmami CFRP, przyklejonymi biernie lub w stanie wstępnie naprężonym do pasa dolnego belki stalowej. Analizy wykonano dla kilku wariantów zniszczenia wzmocnienia tj. pęknięcia taśmy, odspojenia (adhezyjnego) kleju na styku stal - klej i/lub klej - taśma CFRP, odspojenia (kohezyjnego) przez zniszczenie struktury kleju, delaminacji (rozwarstwienia) kompozytu CFRP oraz utraty nośności zakotwienia (wysunięcie się taśmy).
- Rozdział 4 poświęcono opisowi badań mających na celu ocenę nośności i sztywności belek stalowych wzmocnionych taśmami CFRP, a w szczególności określenia efektywności wzmocnienia zarówno w sposób bierny jak i czynny.
- W rozdziale 5 przedstawiono weryfikację analitycznych procedur wyznaczania nośności belki stalowej wzmocnionej taśmami CFRP, czyli porównanie wyników badań laboratoryjnych i obliczeń przy zastosowaniu metod analitycznych.

- Rozdział 6 jest poświęcony ocenie efektywności wzmocnienia rzeczywistego, belkowego mostu stalowego taśmami CFRP, ale przy wykorzystaniu numerycznego (MES) modelu konstrukcji.
- W rozdziale 7 przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe wraz z opisem potencjalnych kierunków przyszłych badań. Omówiono stopień realizacji celów rozprawy oraz podano zalecaną procedurę projektowania wzmocnienia konstrukcji stalowych taśmami CFRP.

Ponadto w załącznikach przedstawiono obliczenia wykonane wg procedur analitycznych:

- wzmocnienia 10-ciu belek badanych w laboratorium (Załącznik m 1),
- nośności granicznej belki wzmocnionej taśmami CFRP (Załącznik m 2),
- wzmocnienia dźwigara mostu rzeczywistego (Załącznik m 3).

2. Ocena merytoryczna pracy

Przedmiotem rozprawy jest szeroko rozumiana technologia wzmocniania przy użyciu taśm CFRP belek stalowych o przekroju dwuteowym. Taka konieczność zachodzi np. w wyniku ubytków korozyjnych lub z powodu zwiększenia obciążeń użytkowych.

Cele rozprawy były bezpośrednio związane z podjętymi problemami badawczymi. Głównym problemem badawczym w rozprawie była ilościowa ocena efektywności wzmocnienia dźwigarów stalowych taśmami CFRP przyklejanymi biernie i czynnie tj. wstępnie naprężonymi. Z tego wynikał inny problem badawczy, a mianowicie ocena skuteczności systemu wzmocniania konstrukcji stalowych typu Neoxe Prestressing System II (NPS II). Zagadnienia te były przedmiotem prac w ramach projektu finansowanego przez NCBiR pt. „Innowacyjny system wzmocniania konstrukcji budowlanych naprężonymi taśmami z kompozytów polimerowych”. W ramach realizacji ww grantu (cytat str. 32) *„Autorka opiniowanej rozprawy brała udział we wszystkich pracach analitycznych oraz badaniach nad dostosowaniem i wdrożeniem tej nowej technologii do wzmocniania konstrukcji stalowych. Indywidualnym wkładem Doktorantki są opracowanie, badania i weryfikacja efektywności działania nowego systemu na belkach stalowych w laboratorium i na istniejącym obiekcie mostowym. Ponadto Autorka rozprawy opracowała zasady projektowania wzmocnienia (procedury obliczeniowe) i narzędzie wspomagające wdrażanie nowego systemu na konstrukcjach stalowych. Częściowe wyniki tych prac zostały również przedstawione w rozprawie”*. Reasumując prace własne Doktorantki przedstawiono w rozdziałach 3 ---: 6 stanowiących zasadniczą część rozprawy.

Reasumując (cytat str. 30), *„głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest ilościowa ocena efektywności wzmocnienia belek (dźwigarów) stalowych za pomocą zarówno biernych jak i czynnych (wstępnie naciągniętych) taśm CFRP oraz zbadanie czynników wpływających na te efektywność”*.

Doktorantka zdefiniowała efektywność wzmocnienia jako (cytat str. 31): *„stosunek zmiany wartości nośności granicznej (zniszczenie wzmocnienia), nośności sprężystej (wynikającej z uplastycznienia pasa belki stalowej) oraz sztywności belki po wzmocnieniu do odpowiadających wielkości dla belki niewzmocnionej”*.

Doktorantka podjęła się wykonania zadania polegającego na identyfikacji i ocenie wpływu różnych parametrów na nośność i sztywność wzmocnionych w ten sposób belek. Wobec braku jednolitych zasad projektowania (znajdą się one w II edycji normy EN 1992-1-1) postanowiła opracować szczegółowe zasady analitycznej oceny nośności granicznej wyżej wspomnianych konstrukcji. W tym celu Doktorantka przeprowadziła szeroką i dogłębną analizę dotychczas przeprowadzonych badań zarówno eksperymentalnych jak i obliczeniowych. W przypadku

tych ostatnich skupiła się na klasycznych metodach analitycznych. Imponujące jest zebranie tych wszystkich procedur analitycznych w jednym opracowaniu. Jest to dowód na to, że niekoniecznie MES jest „dobry na wszystko”. Zastosowanie MES Doktorantka przedstawiła jedynie w odniesieniu do obiektu rzeczywistego. Szkoda, że Doktorantka nie porównała wad i zalet podejścia analitycznego i numerycznego (rozprawa jest bardzo obszerna!).

Na uznanie zasługuje twórcze wykorzystanie prac innych autorów. Pozwoliło to Doktorantce nie tylko na podniesie poziomu swojej wiedzy, ale i umiejętne jej wykorzystanie w swoich analizach i badaniach.

Zaprezentowane wyniki badań laboratoryjnych są imponujące i bardzo profesjonalnie opracowane.

Generalnie można stwierdzić, że uzyskane wyniki potwierdzają słuszność zastosowanych procedur badawczych i analiz. Technologia wzmocnienia belek stalowych na zginanie za pomocą taśm kompozytowych CFRP okazała się być efektywna do praktycznych zastosowań w budownictwie. Opracowane i zweryfikowane w rozprawie procedury analityczne wyznaczania nośności granicznej belek wzmocnionych taśmami CFRP mogą być stosowane w praktyce projektowej.

Wszystkie wyżej wymienione dokonania są zatem ważne nie tylko ze względów naukowych, ale mają duże znaczenie praktyczne, a co za tym idzie i ekonomiczne.

Zaprezentowany poziom merytoryczny rozprawy, a także sposób i logika wnioskowania są na bardzo dobrym poziomie. W ocenie recenzenta Doktorantka zrealizowała wszystkie założone sobie cele.

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

Można zatem stwierdzić, że mgr inż. Paulina Siwowska wnosi oryginalny wkład w rozwój budownictwa w zakresie konstrukcji stalowych, a w tym także i mostownictwa.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Jak to wynika z powyżej przedstawionej oceny poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Siwowskiej jest wysoki. Tym niemniej recenzentowi nasunęły się następujące wątpliwości i uwagi:

- Czy „skuteczność” jest synonimem „efektywności” (str. 33)? O ile zdefiniowano to drugie pojęcie o tyle nie określono „miary skuteczności”.
- Most Tickford w Buckinghamshire nie jest najstarszym eksploatowanym mostem żeliwnym na świecie. Na to miano zasługuje za to most Coolbrokesdale z 1779 roku zlokalizowany także w Anglii (str. 28).
- Doktorantka dostrzega problem jakości skleiny (str. 45 – 46 oraz str. 90). Jednak omawia skrótkowo jedynie problem adhezji (jakość powierzchni stali taśmy CFRP) i kohezji (dot. właściwości kleju). Piszze tylko, że „zalecane jest stosowanie klejów plastycznych zdolnych do przenoszenia dużych odkształceń”. Na str. 265 pojawia się też pojęcie „sprężystość kleju”. Niestety w opisie zarówno procedur obliczeniowych jak i badań eksperymentalnych ten temat nie jest rozwijany. Przecież zastosowanie innych rodzajów klejów mogłoby mieć wpływ na wyniki. Nie poruszono także tematu „odcinkowego podgrzewania kleju do różnych temperatur” w zależności od odległości od zakotwienia.
- Mając świadomość, że zawartość intelektualna rozprawy musi być ograniczona, to brakuje jednak informacji na temat przewidywanej trwałości wzmocnienia. Szczególnie interesujące mogłoby być przedstawienie opinii Doktorantki na temat wpływów środowiskowych (gradienty temperatur, wpływ wody, wpływ zanieczyszczenia powietrza itp.).
- Wśród analizowanych parametrów taśm CFRP takich jak grubość, ich liczba i rozmieszczenie na pasie dźwigara stalowego, moduł sprężystości jest wymieniany stosunek

długości taśmy do długości wzmacnianej belki. Czy te parametry są w jakiś sposób powiązane ze sobą? W tekście rozprawy są podane takie cząstkowe zależności, ale brakuje zbiorczego, w którym uwzględniono by także rodzaj zakotwienia w przypadku wstępnego naprężania taśm (czynnego) czy wykończenia końcówek w przypadku przyklejania biernego.

- Co to jest wytrzymałość zakotwienia? Pojęcie jest szerokie i wymaga doprecyzowania. Z tym zagadnieniem wiąże się problem obliczania strat siły sprężającej taśm.
- Stopień zbrojenia taśmy oraz kontrola rozmieszczenia włókien w niej, a także możliwość przecięcia włókien w zakotwieniach. W rozprawie nie znaleziono ustosunkowania się doktorantki do tych parametrów, choć były one „punktowo” sygnalizowane. Są to zagadnienia technologiczne, ale mogące decydować o jakości nie tylko wzmocnienia, ale i bezpieczeństwa całej wzmacnianej konstrukcji. Szkoda, że nie sprawdzono ww parametrów i zawierzono producentowi taśm CFRP.
- Co to jest współczynnik zniszczenia „d” we wzorach (3.43) i (3.44) na str. 112 - 113.
- Jak zdefiniować w prosty sposób parametr A we wzorach (3.214) i (3.215) na str. 146?
- Czy istnieje efekt skali? Wprawdzie efekty wzmocnienia belek „laboratoryjnych” i w rzeczywistym moście nie wykazują tego, ale czy tak jest zawsze?
- Brakuje opisu parametru S_0 we wzorze 4.1 na str. 159.
- Ciekawe są wyniki badań modułu Younga stali podane w tab. 4.1 i 4.2 na str. 160. Z czego mogą wynikać takie odbiegające od standardów wartości?
- W rozprawie wielokrotnie pojawia się problem wpływu odspajania taśmy CFRP od belki stalowej w środku rozpiętości na nośność konstrukcji. Przydałoby się skumulowanie rozważań na ten temat w jednym, wyodrębnionym rozdziale (podrozdziale).

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 skondensowana. Zdarzają się „wpadki” stylistyczne, tzw. „literówki” i stosowanie slangowych sformułowań. Nieliczne, dostrzeżone w tekście usterki redakcyjne nie obniżają jej poziomu merytorycznego.

Zdarzają się także lapsusy językowe jak np. „*eksperymentalna ocena nośności i sztywności*”. To raczej powinno być napisane jako „ocena nośności i sztywności na podstawie wyników badań laboratoryjnych”.

Lepiej jest używać słowa „tablica” niż „tabela”. To drugie to ewidentny germanizm. Niefortunne jest również sformułowanie „*moment sprężysty*” czy „*graniczne obciążenie sprężyste*”. W tym przypadku przecież chodzi o momenty czy obciążenia działające w zakresie sprężystym pracy konstrukcji.

W podrozdziale 7.2 na str. 297 i 298 wymieniono 6 pozycji literaturowych (w dwóch Autorka jest niewymieniona), a w Piśmiennictwie tylko 2, w których Doktorantka jest współautorką. Jaka jest faktyczna liczba jej publikacji?

Generalnie odbiór rozprawy jest jednak dobry. Opracowanie graficzne i fotograficzne jest również na bardzo dobrym poziomie.

5. Wnioski końcowe


Rozwój konstrukcji mostowych i nierozzerwalnie z tym związane zagadnienie wzmacniania elementów składowych konstrukcji stalowych jest bardzo ważnym zagadnieniem zarówno z technicznego jak i ekonomicznego punktu widzenia. Doktorantka przeprowadziła przemyślany

i szeroko zakrojony cykl badań i analiz udowadniając, że zaproponowane rozwiązania poprawią szeroko rozumianą jakość konstrukcji stalowych, w tym i mostowych.

Opiniowana praca stanowi udane rozwiązanie postawionego zadania naukowego. Autorka rozprawy wykazała się umiejętnością prowadzenia badań laboratoryjnych, rozwiązywania zagadnień teoretycznych, a także korzystania z istniejących programów komputerowych i w końcu logicznym wnioskowaniem. Wyniki przedstawionych analiz 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. Pauliny Siwowskiej praca doktorska pod tytułem „**Nośność i sztywność belek stalowych wzmocnianych taśmami CFRP**” stanowi twórczy wkład do nauki w zakresie budownictwa, a w tym i mostownictwa. Spełnia ona 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. m 65 z dnia 14 marca 2003 roku, poz. 595 ze zmianami tj. Dz.U. poz. 249 i 1767) oraz § 6 ust. 1 i ust. 2 Rozporządzenia Ministra NiSzW z dnia 30 października 2015 roku (Dz. U. poz. 1842) oraz zgodnie z art. 179 ust. 1 i art. 174 ust. 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku „przepisy wprowadzające ustawę -Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2018 poz. 1669 z późniejszymi zmianami) i art. 178 ust. 1 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce” tj. (Dz. U. 2020 poz. 85).

Mając powyższe na uwadze, stawiam wniosek o przyjęcie opiniowanej rozprawy jako spełniającej wymagania ustawowe i dopuszczenie do publicznej obrony. Wnoszę o nadanie mgr inż. Paulinie Siwowskiej stopnia doktora nauk technicznych w dziedzinie nauki inżynierijno - techniczne, w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport.



prof. dr hab. inż. Henryk L. Zobel