

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Ilony SZEWCZAK

pod tytułem:

**„Analiza efektywności wzmocnienia stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP”**

promotor: dr hab. inż. Katarzyna Rzeszut

**1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawę opracowania stanowi uchwała Rady Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Lądowa i Transport* Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej z dnia 15 stycznia 2020 r, przekazana w formie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Lądowa i Transport* prof. dr hab. inż. Wojciecha Franus, z dnia 28.01.2020 roku.

**2. Tematyka i cel rozprawy**

Elementy stalowe gięte na zimno, z uwagi na szereg istotnych zalet, są coraz powszechniej stosowane w budownictwie, i to nie tylko na drugorzędne elementy budowlane ale również na główne elementy nośne jak dźwigary kratownicowe czy słupy. Rosnący udział w rynku budowlanym kształtowników giętych na zimno powoduje, że inżynierowie budownictwa mają do czynienia z coraz większą liczbą sytuacji projektowych, wykonawczych, a także wynikających z warunków eksploatacji i rzutujących na trwałość obiektów z kształtowników giętych na zimno. Tematyka pracy doktorskiej Pani mgr inż. I. Szewczak jest związana właśnie z obszarem przedłużania czasu życia konstrukcji poprzez wzmocnianie wymagających tego elementów. Jest to obszar wiedzy bardzo trudny i stosunkowo mało dotychczas zbadany, a dotyczący zagadnienia współpracy trwale połączonych ze sobą materiałów. Trudność w analizowaniu tych zagadnień polega nie tylko na doborze odpowiednich parametrów geometryczno-materiałowych, ale także na

uwzględnieniu istniejącego we wzmacnianym elemencie stanu naprężeń (zazwyczaj mamy do czynienia z obiektem obciążonym), a także warunków w jakich realizowany jest proces wzmocnienia (dostęp, usytuowanie powierzchni na które nakładane są elementy wzmacniające, stosowane rozwiązania technologiczne). Metoda wykorzystania taśm CFRP do wzmacniania elementów konstrukcyjnych jest dobrze rozpoznana w przypadku konstrukcji żelbetowych. Jednakże w przypadku konstrukcji stalowych, w szczególności wykonanych z elementów giętych na zimno, które charakteryzujących się dużymi smukłościami zarówno globalnymi jak i lokalnymi / płytowymi, metoda ta wymaga jeszcze wielu badań i analiz. Niewątpliwą zaletą tej metody jest bezinwazyjne połączenie elementu wzmacniającego z wymagającą wzmocnienia konstrukcją, co w przypadku konstrukcji stalowych jest szczególnie przydatne.

Tak więc podjęty przez Autorkę temat pracy doktorskiej mający na celu poszerzenie wiedzy na temat skuteczności wzmacniania giętych na zimno stalowych belek typu sima kompozytami CFRP jest jak najbardziej aktualny i potrzebny z praktycznego punktu widzenia.

Następujące trzy tezy rozprawy doktorskiej (str.34):

1. *Kompozyty CFRP mogą poprawić nośność stalowych belek cienkościennych o przekroju typu sigma,*
2. *Umieszczenie wzmocnienia z taśm CFRP na wysokości przekroju cienkościennego silnie wpływa na pole odkształceń i przemieszczeń stalowych belek cienkościennych,*

zostały sformułowane poprawnie, chociaż wyrażenia w tezie nr 1 „poprawić nośność” i w tezie nr 2, że lokalizacja taśm CFRP „silnie wpływa”, wymagałyby językowej korekty. Podstawowy cel pracy (str. 35) sformułowany jako: „...analiza efektywności wzmocnienia stalowych belek cienkościennych typu sigma taśmami CFRP” jest również poprawny.

### **3. Analiza treści i ocena rozprawy**

W pracy można wyróżnić cztery zasadnicze części. W części pierwszej, mającej charakter kompilacyjny (rozdziały 1÷4), autorka zwięźle i przejrzysto przedstawiła:

- definicje i informacje na temat prętów cienkościennych, form utraty stateczności, charakterystycznych imperfekcji oraz materiałów kompozytowych (rozdział 1),



- stan wiedzy na temat metod wzmocnienia konstrukcji stalowych z wykorzystaniem CERP (rozdział 2),
- genezę tematu pracy (rozdział 3),
- stan wiedzy na temat metod pomiarowych, które zostały wykorzystane w przedmiotowych badaniach (rozdział 4).

Do drugiej części pracy, dotyczącej badań doświadczalnych, należą rozdziały 4÷7. Doktorantka przeprowadziła szereg badań eksperymentalnych poprzedzonych badaniami wytrzymałościowymi stali, z której wykonane były badane belki oraz badaniami pilotażowymi sześciu giętych na zimno belek typu sigma (dwóch bez wzmocnienia, dwóch wzmocnionych na półce dolnej, a dwóch na półce górnej). Wnioski wyciągnięte z badań pilotażowych pozwoliły na modyfikację stanowiska badawczego i przeprowadzenie trzech serii badań: dwóch rodzajów belek ( $\Sigma 200$  i  $\Sigma 140$ ) wzmocnionych taśmami CFRP i jednego rodzaju belek ( $\Sigma 200$ ) wzmocnionych taśmami stalowymi, w każdym z przypadków różnicując położenie taśmy wzmacniającej.

Na szczególną uwagę zasługują schematy blokowe przedstawiające metodykę badań, oraz programy badań laboratoryjnych i badań numerycznych. (rys. 5.1 ÷ 5.3).

Ta część pracy zakończona jest wnioskami określającymi efektywność poszczególnych rodzajów wzmocnienia stalowych belek.

Do trzeciej części pracy, tzw. analitycznej, można zaliczyć rozdział 8, zawierający analizy numeryczne. W tym przypadku również przeprowadzono analizy pilotażowe mające na celu wyłonienie właściwych parametrów modeli numerycznych. Porównano sześć modeli: dwóch zbudowanych z bryłowych elementów skończonych i czterech z elementów powłokowych różnicując sposoby modelowania widełkowego podparcia belek oraz rodzaj funkcji kształtu w zastosowanych elementach skończonych. Zweryfikowano również rozmiar powłokowego elementu skończonego oraz sprawdzono wpływ zagęszczenia siatki MES na krawędziach kształtownika (w przypadku modelu powłokowego). Dla wyselekcjonowanych parametrów wykonano modele numeryczne odpowiadające wszystkim przebadanym w warunkach laboratoryjnych belek stalowych. Ta część pracy zakończona jest wnioskami dotyczącymi zgodności wyników analiz numerycznych w programie Abaqus z wynikami badań eksperymentalnych.

Druga i trzecia część rozprawy charakteryzują się aspektami poznawczo-naukowymi i zawierają szereg elementów oryginalnych, stanowiących własny dorobek naukowy Autorki. Należą do nich:

- opracowanie metodyki badań efektywności wzmacniania giętych na zimno belek typu sigma kompozytami CFRP,
- zaplanowanie i wykonanie badań eksperymentalnych w skali 1:1 dwóch rodzajów belek typu sigma wzmacnianych taśmami CFRP lub taśmami stalowymi,
- opracowanie wyników poszczególnych serii badań w celu przedstawienia efektywności zastosowanego rodzaju wzmocnienia,
- zaplanowanie i wykonanie modeli numerycznych badanych belek oraz przeprowadzenie analiz porównawczych wyników badań doświadczalnych i numerycznych.

Czwartą część rozprawy stanowi ostatni rozdział dziewiąty, zawierający podsumowanie oraz zestawienie wniosków wynikających z przeprowadzonych przez Autorkę badań. Wnioski są szczegółowe i dotyczą nie tylko efektywności wzmacniania stalowych belek typu sigma ale również, co bardzo cenne, metod pomiarowych. Ponadto Autorka w uwagach końcowych komentuje uzyskane wyniki pod kątem ich praktycznej przydatności wykazując się przy tym znajomością problematyki wzmacniania konstrukcji.

Tekst przedłożonej rozprawy (146 stron) uzupełnia spis literatury (147 pozycje).

Wyniki badań doświadczalnych i przeprowadzonych analiz numerycznych stanowią istotny wkład w rozszerzenie wiedzy na temat wzmacniania stalowych cienkościennych belek typu sigma przy użyciu taśm CFRP. Co więcej opracowane i zwalidowane modele numeryczne belek typu sigma stanowią doskonały materiał do prowadzenia dalszych analiz o rozszerzonym zakresie.

Autorka rozprawy doktorskiej wykazała się umiejętnością jasnego formułowania i analizowania problemu badawczego, jak również znajomością literatury z zakresu badań konstrukcji wykonanych z prętów cienkościennych, również wzmacnianych taśmami CFRP.

Uważam, że przyjęte cele pracy zostały osiągnięte, a postawione tezy potwierdzone wynikami przeprowadzonych eksperymentów oraz obliczeń numerycznych.



#### 4. Uwagi krytyczne

Analizując rozprawę doktorską nasunęły mi się uwagi krytyczne i dyskusyjne o charakterze merytorycznym i redakcyjnym, wymagające skomentowania przez Autora w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

##### A. Uwagi merytoryczne

Autorka na samym początku swojej pracy definiuje pojęcie pręta cienkościennego. Z kolei badane stalowe belki typu sigma są to typowe elementy gięte na zimno, które pod wieloma względami różnią się od prętów walcowanych na gorąco. Autorka w żadnym punkcie swojej pracy nie wyróżnia kategorii elementów giętych na zimno jako podzbioru elementów cienkościennych, co na pewno ułatwiłoby na przykład opracowanie przeglądu literatury.

Rozdział 2.1. zawiera przegląd literatury dotyczącej wzmocnienia konstrukcji stalowych przy użyciu CFRP. W rozdziale tym Autorka przywołuje badania elementów stalowych konstrukcji prętowych wykonanych na przestrzeni ostatnich 10 lat, a więc jak najbardziej aktualnych. Jeżeli chodzi o następny rozdział 2.2 pt.: „*Badania stalowych konstrukcji cienkościennych*”, to trudno jest odgadnąć zasadę wyboru przedstawionej w nim literatury. Z treści rozdziału wynika, że dotyczy on badań elementów niewzmocnianych, a liczba wykonanych na świecie takich badań jest ogromna, więc powinno być podane kryterium doboru literatury. Czy chodziło tylko o elementy zginane, i to w dodatku wykonane z kształtowników giętych na zimno?? A jeśli tak, to dlaczego przytoczono właśnie te publikacje a nie inne? Co więcej, w tym krótkim rozdziale (1,5 strony) wymienione są również badania numeryczne, a wśród nich analizy prętów ściskanych, które nie stanowią tematu rozprawy.. Z kolei tytuł rozdział 2.3 pt.: „*Wzmocnianie stalowych konstrukcji cienkościennych przy użyciu materiałów CFRP*” różni się od tytułu rozdziału 2.1 „*Wzmocnianie konstrukcji stalowych przy użyciu CFRP*”, tylko jednym słowem „cienkościennych”, a przecież publikacje omawiane zarówno w rozdziale 2.1 jak i 2.3 dotyczą konstrukcji cienkościennych, zgodnie z podaną przez Autorkę definicją. Podsumowując, brakuje odpowiedniego komentarza wyjaśniającego kryteria wyboru poszczególnych pozycji literatury

W rozdziale 2.4 Autorka zwraca uwagę na wagę odpowiedniego doboru długości zakotwienia, jednak ani w tym rozdziale, ani nigdzie w tekście rozprawy nie definiuje pojęcia

długości zakotwienia. Czy jest to długość przyklejonego odcinka taśmy? Na jakiej podstawie określono długość taśmy LCFPR? Na rys. 2.1 długość zakotwienia jest zaznaczona na zewnątrz przyłożonego obciążenia; brakuje wyjaśnienia dlaczego przyjęto właśnie takie rozwiązanie.

Autorka przeprowadziła badania materiałowe stali, z której wykonane były badane belki typu sigma. Wszystkie, wymienione w tablicy 6.1. parametry wytrzymałościowe, zostały wyznaczone jako 5% kwantyle, co odpowiada wskaźnikowi tolerancji równemu 2 i prawdopodobieństwu równemu 0,9545. Takie podejście jest zgodne z literaturą przedmiotu. Jednakże w załączniku A.6.3 normy PN-EN 1993-1-3 znajduje się zalecenie, żeby wartości charakterystyczne określane na podstawie badań wyznaczać dla wskaźnika tolerancji (współczynnika  $k$ ) przyjętego na podstawie tablicy A2 tejże normy, w zależności od liczby wykonanych prób. Niestety w pracy brakuje informacji na ilu próbkach zostały przeprowadzone badania wytrzymałościowe, a także czy została określona charakterystyka sprężysto-plastyczna, potrzebna do modeli numerycznych.

W opisie właściwego stanowiska badawczego, zmodyfikowanego dzięki przeprowadzonym badaniom pilotażowym znajduje się stwierdzenie, że *„Rozstaw obciążenia dobrano w taki sposób, aby odwzorowywał obciążenie równomiernie rozłożone i wynosił 135 cm, a rozstaw podpór wynosił 270 cm”*. Jest to stwierdzenie niepoprawne, gdyż inny jest cel modelowania schematu zginania czteropunktowego. Natomiast schemat zastosowany w badaniach pilotażowych rzeczywiście odwzorowywał obciążenie równomiernie rozłożone.

W pkt.8.2.1. Autorka informuje, że w przeprowadzonych analizach numerycznych przyjęte zostały *„warunki identyczne jak dla belek badanych w laboratorium”*. Jest to stwierdzenie zbyt ogólne i niejednoznaczne. Budując modele numeryczne można odwzorować warunki laboratoryjne, ale nadal nie wiadomo, o jakie warunki chodzi. W następnym zdaniu jest informacja o przyjęciu sprężysto-plastycznego modelu materiału ze wzmocnieniem i że zrobiono to na podstawie badań wytrzymałościowych. Niestety, ani w rozdziale dotyczącym badań materiałowych ani dotyczącym analiz numerycznych nie ma żadnych szczegółów dotyczących parametrów modelu materiałowego. Następnie Autorka pisze, że współczynnik Poissona i moduł Kirchhoffa dla taśm CFRP uzyskano na *„podstawie własnych badań laboratoryjnych i danych producenta”*, odsyłając czytelnika do pkt. 6.1.2. Tam z kolei jest lakoniczna informacja, że *„Na podstawie badań materiałowych określono*



współczynnik Poissona ..... i moduł Young'a ....”, nie wspominają kto i jak te badania przeprowadził.

Autorka opisując analizy numeryczne wspomina o prowadzonym procesie weryfikacji i walidacji modeli numerycznych, zawsze używając określeń walidacja i weryfikacja łącznie. Wobec powyższego nie wiadomo jakie procedury rozumiane są jako weryfikacja a jakie jako walidacja. Nie wynika to też z treści całego rozdziału 8 dotyczącego analiz numerycznych.

Na podstawie pilotażowych badań numerycznych Autorka stwierdziła, że modele zbudowane z elementów powłokowych, z kinematycznymi warunkami brzegowymi, wykazują najlepszą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych. Analizowane były również podpory zbudowane z nieodkształcalnych elementów powłokowych. Z kolei w rozdziale 8.3, dotyczącym pierwszego etapu badań numerycznych, pojawia się nowe rozwiązanie podparcia widełkowego, wykonane z nieodkształcalnych elementów powłokowych, z usztywnieniem przekroju podporowego w formie ceownika. Brakuje jednak informacji dlaczego w modelach właściwych wprowadzono zmiany w stosunku do badań pilotażowych i czy był to dalszy ciąg procesu walidacji.

## B. Uwagi redakcyjne

Praca jest bardzo dobrze napisana i zilustrowana. Drobne usterki gramatyczne i edytorskie zaznaczono w wersji cyfrowej pracy oraz wymieniono w poniższym zestawieniu:

- str. 6 – jak należy rozumieć określenie *nośność układu wzmocnienia*?
- str. 36 – Autorka pisze, że „...sformułowano dwie główne tezy...”; czy były inne tezy?
- str. 49 – rys. 3.5, ze schematu blokowego nie wynika czy różnią się modele I etapu badań od modeli III etapu badań;
- str. 53 – w podporach badanych belek zastosowano *połączenia śrubowe*, brakuje odniesienia do rys. 6.5 (na następnej stronie), z którego wynika jakie rozwiązanie zastosowano;  
fotografia na rys. 6.4a) jest nieostra;
- str. 56 – jak należy rozumieć sformułowanie „pozwoлиło na uzyskanie najbardziej korzystnych wyników” ?? pod jakim względem korzystnych?? to sformułowanie wymaga przeredagowania;
- str. 68 – czy podane w Tabeli 7.1 charakterystyki, to są charakterystyki geometryczne?

- str. 110 – w ostatnim akapicie jest mowa o *najwyższej wartości obciążenia*; brakuje informacji jakiego obciążenia: przyłożonego, niszczącego?
- str. 112 – błędny tytuł Tabeli 8.1; nie można podsumować wykonanych modeli, można zrobić ich zestawienie, a podsumowanie dopiero później, na podstawie zestawienia;
- str. 128 – błędny tytuł Tabeli 8.2, w tabeli przedstawione są wartości odkształceń przekroju w zależności od położenia taśmy wzmacniającej; na podstawie tabeli można wyciągnąć wnioski dotyczące wpływu położenia taśmy i je skomentować;

Na rys. 7.19 a) i b), 7.20 a) i b) oraz 7.24 a) i b) zastosowano różną skalę na osi poziomej. W analizach porównawczych zaleca się stosowanie tej samej skali.

Cytowanie literatury poprzez podawanie nazwiska autora i daty wydania jest bardzo dobrą i efektywną metodą, jednakże Autorka rozprawy w wielu miejscach pominęła rok wydania, co przy większej liczbie prac tego samego autora wprowadza dezinformację.

W pracy brakuje tabelarycznego zestawienia liczby wszystkich rodzajów testowanych belek, a opisy umieszczone na początku poszczególnych etapów badań są niejednolite. I tak, zgodnie z tekstem rozprawy, w pierwszym etapie przebadano jedenaście belek, w drugim sześć i w trzecim również sześć, czyli z powyższego można by wyciągnąć wniosek, że przebadano sześć belek o wysokości 200 mm wzmocnionych taśmą stalową i sześć belek o wysokości 140 mm wzmocnionych taśmą CFRP. Rzeczywiście przebadano 6 belek wzmocnionych taśmą stalową ale tylko 4 belki o wysokości 140 mm wzmocnione taśmą CFRP, gdyż dwie belki tzw. małe były niewzmocnione czyli referencyjne. Analogicznie, w przypadku belek wysokich wzmocnionych taśmą CFRP przebadano dziewięć belek wzmocnionych i dwie bez wzmocnienia (referencyjne). Tylko w drugim przypadku liczba podanych belek (sześć) odpowiada liczbie belek wzmocnionych taśmą stalową, gdyż w tym przypadku korzystano z wyników badań belek referencyjnych z pierwszego etapu.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter doświadczalno-analityczny i aplikacyjny. Autorka podjęła się rozwiązania aktualnego zagadnienia naukowego, dotyczącego uzupełnienia wiedzy w zakresie wpływu zastosowania taśm CFRP na ograniczenie przemieszczeń i odkształceń zginanych cienkościennych belek stalowych o przekroju typu sigma.



Z zadania tego Autorka wywiązała się dobrze, gdyż jej praca zakończona jest bardzo istotnymi z punktu widzenia praktyki inżynierskiej wnioskami. Z treści rozprawy wynika, że Autorka:

- właściwie sprecyzowała cel i przyjęte tezy rozprawy oraz konsekwentnie ten cel zrealizowała,
- dobrze zna ogół aktualnych zagadnień objętych zakresem rozprawy w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa i transport,
- zawarła w rozprawie elementy oryginalne wzbogacające aktualny stan wiedzy o analizowanym zagadnieniu,
- wykazuje dobry stopień przygotowania naukowego, umiejętność poprawnego i samodzielnego prowadzenia badań naukowych i ich interpretacji.

Przedstawione fakty świadczą o tym, że rozprawa doktorska mgr inż. Ilony Szewczak pt.: *„Analiza efektywności wzmocnienia stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP”* spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku *„O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki”*.

Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Ilony Szewczak do publicznej obrony wykonanej rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Naukowej *Inżynieria Lądowa i Transport* Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej.



dr hab. inż. Elżbieta Urbańska-Galewska, prof. PG

Gdańsk, 17 kwiecień 2020 r.

