

dr hab. inż. Jacek Szafran
Katedra Mechaniki Konstrukcji
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
Politechnika Łódzka, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź
email: jacek.szafran@p.lodz.pl

RECENZJA DYSTERTACJI DOKTORSKIEJ
mgr inż. Ilony Szewczak
**„ANALIZA EFEKTYWNOŚCI WZMACNIANIA STALOWYCH BELEK
CIENKOŚCIENNYCH TYPU SIGMA KOMPOZYTAMI CFRP”**

1. Podstawa formalna

Podstawę formalną niniejszej recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport, prof. dr hab. inż. Wojciecha Franusa z dnia 28 stycznia 2020 r., a także umowa o dzieło nr WB-2020/01/01 zawarta tego samego dnia pomiędzy Politechniką Lubelską a Recenzentem. Podstawę prawną niniejszej recenzji stanowi ustawa z dnia 18. marca 2011 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw” (Dz. U. 2011 nr 84 poz. 455) z późniejszymi zmianami, jak również Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22. września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2011 nr 204 poz. 1200).

2. Zawartość dysertacji

Dysertacja doktorska mgr inż. Ilony Szewczak nt. „*Analizy efektywności wzmocnienia stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP*” została napisana w języku polskim pod kierunkiem dr hab. inż. Katarzyny Rzeszut. Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów, streszczenia (w języku polskim i angielskim), spisu literatury, zestawienia ważniejszych oznaczeń i skrótów wykorzystanych w pracy oraz podziękowań. Sama rozprawa zajmuje 146 stron. W pracy zacytowano łącznie 140 pozycji, z czego 5 stanowią publikacje doktorantki, a 7 przedmiotowe normy do projektowania. Zgodnie z informacjami zamieszczonymi na str. 2 (Podziękowania) badania i analizy zamieszczone w dysertacji były częściowo sponsorowane przez firmę Blachy Pruszyński Sp. z o.o. oraz Sika Poland Sp. z o.o. Można zatem sądzić, że realizacja tematu rozprawy doktorskiej nastąpiła w ramach współpracy z przemysłem, co należy do dobrej i pozytywnie odbieranej praktyki w naukach technicznych.

Kolejność rozdziałów i podrozdziałów ma logiczny układ i odzwierciedla proces myślowy przyświecający Doktorantce przy rozwiązywaniu problemów naukowych na poszczególnych etapach recenzowanej pracy.

Rozdział pierwszy zawiera podstawowe informacje dotyczące stalowych elementów cienkościennych profilowanych na zimno tj. definicję, zakres zastosowania oraz wybrane zagadnienia dotyczące ich analizy. Ponadto w tej części pracy omówiono podstawowe kwestie dotyczące materiałów kompozytowych, podkreślając ich zalety i wady w kontekście wzmocnienia konstrukcji stalowych. Należy podkreślić fakt skrupulatnego podania przez

Autorkę wszystkich istotnych informacji potrzebnych w analizie wyników właściwych pracy, opisanych w późniejszych rozdziałach.

Rozdział drugi stanowi przegląd literatury w zakresie aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie badań stalowych elementów cienkościennych oraz wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennych taśmami kompozytowymi CFRP. Ta część pracy miała na celu prezentację obecnego stanu wiedzy nad badanym przez Doktorantkę tematem i trzeba uznać, że wykonana została w sposób usystematyzowany i rzetelny. Rozdział ten podzielono na cztery podrozdziały dotyczące:

- wzmacniania konstrukcji stalowych przy użyciu CFRP,
- badania stalowych konstrukcji cienkościennych,
- wzmacniania stalowych konstrukcji cienkościennych przy użyciu materiałów CFRP,
- długości zakotwienia taśm CFRP.

Informacje wymienione w poszczególnych podrozdziałach w sposób ścisły związane są z późniejszymi badaniami laboratoryjnymi nad wzmocnionymi przekrojami cienkościennymi typu sigma. Zatem dobór zarówno pozycji literaturowych, jak i konkretnej tematyki należy uznać za bardzo praktyczny i tym samym uzasadniony.

W rozdziale trzecim Autorka opisuje genezę tematu pracy, tezy oraz prezentuje cel i zakres rozprawy. Bardzo przekonująco zostały zaprezentowane powody wyboru tematu pracy. Doktorantka podkreśliła, że w literaturze przedmiotu można wymienić tylko kilka (i to pochodzących z poprzednich dekad) opracowań dotyczących pracy belek wykonanych z pojedynczego profilu typu sigma i stąd jej decyzja by obecny stan wiedzy poszerzyć. Wydaje się to być powodem ze wszech miar słusznym. Jeszcze ważniejszy, w moim przekonaniu, jest pomysł połączenia wyników badań laboratoryjnych z praktyką inżynierską. W pracy podano przykład zrealizowanego wzmocnienia belek profilowanych na zimno taśmami CFRP przymocowanymi do dolnej półki profilu tj. półki rozciąganej. Doktorantka sugeruje, że ten rodzaj wzmocnienia został zrealizowany na podstawie doświadczeń zdobytych przy wzmacnianiu konstrukcji betonowych. Trudno się z tym wnioskiem nie zgodzić.

Bardzo słusznym wydaje się być stwierdzenie, że brak jest precyzyjnych wytycznych do projektowania wzmocnień konstrukcji stalowych przy użyciu taśm CFRP i tym samym istnieje duża potrzeba uzupełnienia tej luki w literaturze technicznej.

Trzeba jednoznacznie stwierdzić, że powody, dla których Doktorantka zajęła się tym właśnie tematem są bardzo dobrze uzasadnione. W moim przekonaniu najbardziej istotnym jest aspekt praktyczny pracy. Zwłaszcza, że praca doktorska dotyczy dyscypliny „inżynieria lądowa i transport” (dawna „budownictwo”) a wiadomo powszechnie, że innowacje w tej dziedzinie są szczególnie pożądane i doceniane.

W rozdziale czwartym zamieszczono przegląd literatury dotyczący nowoczesnych i tradycyjnych metod pomiarowych wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych. Zwrócono w nim uwagę przede wszystkim na metody pomiarowe wykorzystane podczas późniejszych eksperymentów laboratoryjnych. Biorąc pod uwagę skrupulatność w opisie można stwierdzić, że rozdział ten może służyć jako swego rodzaju kompendium wiedzy na temat nowoczesnych metod pomiarowych w badaniach laboratoryjnych elementów konstrukcji budowlanych.

W rozdziale piątym Doktorantka przedstawia program i metodykę badań eksperymentalnych. W moim przekonaniu prezentacja całości prac laboratoryjnych jest czytelna, i co najważniejsze, bardzo dobrze przygotowana. W obserwacji kolejnych kroków pomaga schemat blokowy przedstawiający metodykę badań. Uzupełnieniem jest także schemat programu badań laboratoryjnych z graficznym przedstawieniem rodzaju badanych belek, rodzajem i miejscem umieszczenia wzmocnienia, a także ilością tych elementów (razem są to 23 belki).

W rozdziałach szóstym, siódmym i ósmym pracy zaprezentowano trzy części badań laboratoryjnych wraz z ich wynikami i wnioskami. Opisano badania materiałowe próbek stalowych wyciętych z badanych belek, badania pilotażowe (w skład, których wchodziły testy laboratoryjne składające się z sześciu belek wykonanych z profili sigma 140x70x2,5, ze czego cztery wzmocnione taśmami CFRP), badania właściwe (trzyetapowe).

Sposób przeprowadzenia badań pilotażowych należy zaliczyć do atutów pracy. W szczególności na pochwałę zasługuje krytyczne podejście do uzyskanych wyników (np. ograniczenie prawidłowości wyników od obciążenia zewnętrznego równego 18 kN), ale także potwierdzenie słuszności wyboru tematyki badawczej i późniejszą poprawę budowy stanowiska badawczego.

Pierwszy etap badań dotyczył 11 belek $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ z trzema sposobami wzmocnienia – taśma CFRP przyklejona do półki górnej, dolnej i do środka. Drugi etap to 6 belek $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ z taśmami stalowymi umieszczonymi w sposób identyczny jak w etapie pierwszym. Etap trzeci to zmiana profili na bardziej krępe – $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$ z dwoma sposobami wzmocnienia (taśma CFRP przymocowana do półki górnej i dolnej). Plan badawczy należy uznać za dobrze przygotowany, rzetelnie uzasadniony, a same eksperymenty za potrzebne i słuszne.

Zasadniczą część dysertacji kończy rozdział ósmy w całości poświęcony analizom numerycznym. Testy komputerowe zostały przeprowadzone dla modeli odpowiadającym laboratoryjnym badaniom pilotażowym oraz trzem etapom badań właściwych. Kluczowe dla tej części pracy wydaje się być dokonanie walidacji i weryfikacji modeli obliczeniowych w kontekście różnych rodzajów elementów skończonych, rozmiarów siatki MES oraz warunków brzegowych. Korzystając z analizy nieliniowej z wykorzystaniem iteracyjnej metody Netwona-Raphsona przeprowadzono również (dla niektórych modeli) testy w kontekście wpływu długości zakotwienia taśm CFRP na stan przemieszczeń i odkształceń. Należy zauważyć, że przeprowadzone testy numeryczne doskonale uzupełniają część badań laboratoryjnych i pozwalają na wykorzystanie uzyskanych wyników w przypadku innych belek typu sigma (o zwiększonym/zmniejszonym przekroju poprzecznym, zwiększonej/zmniejszonej długości). Mają zatem bezsprzecznie walory praktyczne, a było to jednym z celów rozprawy.

Dysertację doktorską zamyka rozdział dziewiąty poświęcony podsumowaniu badań i wyciągnięciu z nich wniosków.

Podsumowując należy podkreślić, że rozprawa napisana jest poprawnie, w sposób przejrzysty, językiem prostym i zrozumiałym, a układ rozdziałów i podrozdziałów umożliwia śledzenie procesu analizy, dedukcji i syntezy prowadzącej Doktorantkę do wniosków i konkluzji zawartych w recenzowanej pracy. Cały program badawczy należy ocenić pozytywnie. Kolejność wykonywania poszczególnych etapów programu wydaje się być bardzo logiczna i tym samym prawidłowa. Daje to również podstawy do stwierdzenia, że wyniki uzyskane przez Autorkę są godne zaufania.

Pewien niedosyt pozostawia brak zwrócenia większej uwagi na szczegóły badań, które w mojej opinii mają istotne znaczenie. Do wad pracy również można zaliczyć część edycyjną rozprawy, błędy językowe i stylistyczne. Nie obniżają jednak one walorów naukowo-dydaktycznych dysertacji. Szczegółowe uwagi dotyczące powyższych zastrzeżeń zamieszczono w punkcie 4 niniejszej recenzji.

3. Ocena doboru tematu i naukowej wartości rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej podjęto bardzo aktualny problem badawczy dotyczący wzmocniania profili cienkościennych typu sigma taśmami kompozytowymi i taśmami stalowymi. Powody zainteresowania tym tematem, przeprowadzenia odpowiednich badań zostały w sposób wystraszający udokumentowane i uzasadnione. Szczególnie istotne w moim

przekonaniu są aspekty praktyczne – wykorzystanie w/w elementów do wzmocnienia istniejących konstrukcji.

Pewne moje wątpliwości budzi sposób zapisania tez pracy doktorskiej. W brzmieniu oryginalnym mają one następującą postać:

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 o przekroju typu sigma.*

Sądzę, że na tak postawione tezy można dość łatwo sformułować odpowiedzi bez przeprowadzenia szczegółowych badań. Znając właściwości kompozytów CFRP można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że poprawią one nośność belek stalowych typu sigma. Natomiast bardzo zasadnym byłoby pytanie o ile wzrośnie nośność belek wzmocnionych w taki właśnie sposób. To samo dotyczy umiejscowienia taśm na wysokości przekroju – można sądzić, że wybór miejsca wzmocnienia wpływa na pole odkształceń i przemieszczenia wzmocnionych belek (fakt szeroko opisywany w literaturze naukowej dotyczącej wzmocnień konstrukcji). Trudno natomiast jest jednoznacznie określić jaki jest wpływ (np. wyrażony procentowo) miejsca ułożenia wzmocnienia na wyniki odkształceń i przemieszczeń.

W moim przekonaniu, wspierając się wskazówkami podanymi w monografii „*Metodologia ogólna*” autorstwa Jerzego Apanowicza, uwzględniając również cele poznania naukowego, dla którego przeprowadzono badania, pytania problemowe jako tezy mogą być w tej sytuacji bardziej efektywne i przydatne. Proponuję tym samym przedstawienie głównych tez pracy w formie pytań problemowych, tj.:

1. O ile wzrośnie nośność stalowych belek cienkościennych o przekroju typu sigma w przypadku wzmocnienia ich kompozytami CFRP?
2. Jaki jest wpływ umiejscowienia wzmocnienia z taśm CFRP na wysokości przekroju cienkościennego na pole odkształceń i przemieszczeń stalowych belek cienkościennych o przekroju typu sigma?

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć naukowych Autorki można zaliczyć:

1. Rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy w zakresie wzmocniania belek stalowych taśmami kompozytowymi, co pozwoliło na poprawne określenie planu badań i jego późniejszej realizacji.
2. Opracowanie programu badań eksperymentalnych, przygotowanie stanowisk i przeprowadzenie testów laboratoryjnych obejmujących zarówno badania materiałowe jak i zasadnicze badania niszczące belek o profilach typu sigma wzmocnianych w różny sposób.
3. Opracowanie modeli komputerowych po uprzedniej ich weryfikacji i walidacji, które mogą posłużyć jako przykładowe w analizie innych, rzeczywistych elementów konstrukcyjnych.

Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia Doktorantki oraz fakt, że tezy pracy zostały obronione, pozytywnie oceniam naukową wartość recenzowanej rozprawy.

4. Uwagi krytyczne

Podczas lektury i analizy wyników przedstawionych w recenzowanej rozprawie doktorskiej nasuwają się pewne pytania i uwagi krytyczne.

3.1. Ogólne uwagi merytoryczne

- 1) W mojej opinii w pracy znajdują się dużo niejasności w tematyce doboru długości taśm wzmacniających (zarówno z kompozytu CFRP jak i taśm stalowych).

Doktorantka w części wstępnej dysertacji (w *podrozdziale 2.4. Długość zakotwienia taśm CFRP*) dużo uwagi poświęca na wskazanie istotności prawidłowego doboru długości taśm, a w szczególności długości ich zakotwienia. Ponadto, w pracy poświęcono cały podrozdział (*8.4. Analiza wpływu długości zakotwienia taśm CFRP*) w kontekście analiz numerycznych, udowadniając tym samym, że ten aspekt badań jest bardzo ważny. Trudno natomiast nie odnieść wrażenia, że w części dotyczącej samych badań kwestia ta jest opisana w sposób enigmatyczny. Należy w tym miejscu prześledzić poszczególne części pracy, w których padają informacje na w/w temat.

I tak, w opisie etapu badań pilotażowych (podrozdział 6.2.2, strona 54) dla belek o rozstawie podpór 2,20 m odczytać można, że „...całkowita długość taśmy wynosiła 207,5 cm...”, natomiast „...długość zakotwienia taśmy przyjęto taką samą dla wszystkich belek, równą 75 mm, liczoną od skrajnych punktów przyłożenia siły...”.

W przypadku pierwszego etapu badań właściwych dla belek o rozstawie podpór 2,70 m (podrozdział 7.2.1. Zakres badań, strona 68) podano jedynie, że „...długość taśmy CFRP wynosiła 175 cm...”.

Dla drugiego etapu badań właściwych, gdzie przedmiotem testów były profile typu sigma (o tej samej długości i rozstawie podpór) wzmacniane taśmami stalowymi znajdujemy (podrozdział 7.3.1. Zakres badań, strona 84) informację, że „...długość taśmy stalowej 175 cm...”

W trzecim etapie badań testowano bardziej krępe przekroje sigma wzmacnianie taśmami CFRP dla schematów statycznych identycznych jak w etapie drugim. Na temat długości elementów wzmacniających Doktorantka napisała jedynie, że „...długość taśmy CFRP 207,5 cm...” (podrozdział 7.5.1. Zakres badań, strona 98).

Przypuszczam, na podstawie zapisów podanych w dysertacji, że np. dla drugiego etapu badań długość zakotwienia wynosiła 200 mm, czyli zdecydowanie więcej niż dla badań pilotażowych. Niestety nie jestem przekonany czy mam w tym względzie rację, a jednoznacznej odpowiedzi w dysertacji nie odnalazłem. A zatem nasuwają się następujące pytania: - dlaczego Doktorantka uważając (zresztą słusznie), że dobór długości zakotwienia jest sprawą istotną w kontekście wzmacniania belek stalowych nie podała ich konkretnych wartości? – dlaczego zdecydowano się używać elementów wzmacniających o innych długościach, pomimo tego samego rozstawu podpór i sił zewnętrznych? – dlaczego pomimo widocznych różnic w długościach zakotwienia nie wyciągnięto z tego żadnych wniosków w kontekście wyników odkształceń i przemieszczeń testowanych belek?

Moje wątpliwości co do odpowiedniego przeanalizowania zagadnienia długości taśm wzmacniających potęguje jeszcze jeden fakt. Opisując wpływ długości zakotwienia taśm CFRP Doktorantka (w *podrozdziale 2.4. Długość zakotwienia taśm CFRP*) zacytowała pracę doktorską napisaną przez Macieja Kowala z Politechniki Lubelskiej, a której tytuł to „*Wzmacnianie elementów stalowych kompozytami FRP*”. Podano zatem, że „...autor analizował trzy długości zakotwienia taśmy CFRP – 65 mm, 165 mm i 265 mm. Potwierdził on, że prawie wszystkie siły przenoszone z belki stalowej na taśmę CFRP występują w odległości około 70 mm od końca taśmy CFRP, a tylko w przypadku długości zakotwienia równej 265 mm zaobserwował uplastycznienie stali przed odspojeniem taśmy CFRP. Ta długość zakotwienia dała najlepszą wytrzymałość układu wzmocnienia.” Dalej, w tej samej części pracy pada stwierdzenie, że „... w niniejszej dysertacji przyjęto efektywną długość zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 2.1.” Nasuwają się zatem kolejne wątpliwości: - dlaczego nie wykorzystano doświadczeń z w/w cytowanej pracy doktorskiej? – dlaczego, biorąc

pod uwagę, że w tym podrozdziale padają skonkretyzowane wymiary długości zakotwienia, Doktorantka podała jedynie schemat bez żadnych odniesień do wymiarów rzeczywistych w swoich badaniach (zarówno w tej części pracy jak i kolejnych)? – dlaczego długości zakotwienia podane zostały w części dotyczących badań numerycznych, natomiast nie podano tego w przypadku badań laboratoryjnych? Uprzejmie proszę Autorkę do ustosunkowania się do w/w pytań i wątpliwości.

- 2) Poszczególne etapy prac badawczych opisane w rozprawie zawierają elementy prezentacji kolejnych czynności wykonywanych przed badaniami np. przygotowanie powierzchni belek stalowych, sposób ich oczyszczenia, mocowania elementów wzmocnienia itd. Są to informacje bardzo ważne i pożądane, szczególnie dla osób, które chciałyby powtórzyć ten rodzaj badań, bądź też wdrożyć zaproponowane rozwiązanie w rzeczywistych realizacjach budowlanych. Autorka pracy przy opisie prac przygotowawczych podaje informacje na temat kleju użytego do połączenia taśm wzmacniających z elementami belkowymi. W każdym przypadku był to produkt Sikadur®-30.

W opisach tych Doktorantka podaje, że grubość warstwy kleju wynosiła dokładnie 1,3 mm. Informacje tą można analizować z dwóch różnych punktów widzenia: przeprowadzonych badań i ich wyników oraz praktyki budowlanej. Zatem, do tej części w kontekście wyników badań mam następujące wątpliwości:

- w jaki sposób kontrolowano grubość warstwy kleju podczas jego nakładania na całą długość taśm?

- czy biorąc pod uwagę fakt, że podczas badań dochodziło przy pewnej wartości obciążenia zewnętrznego do odklejenia taśm wzmacniających, mogła mieć na to wpływ grubość warstwy kleju ?

- w jaki sposób Autorka zdecydowała, że grubość warstwy kleju to dokładnie 1,3 mm, skoro w Karcie Informacyjnej Produktu zapisano, że grubość warstwy ma mieć nie więcej niż 30 mm?

Doktorantka, w kilku miejscach pracy wskazuje jako jeden z powodów prowadzenia badań aspekty praktyczne. Sądzę zatem, że należy zwrócić większą uwagę na działania, które będą musiały być wykonane przy ewentualnym wdrożeniu wyników badań w praktyce. O ile łatwo jest uzyskać belki, taśmy o określonej długości o tyle uzyskanie grubości warstwy kleju 1,3 mm w warunkach budowlanych może być trudne. Należy więc większą uwagę zwrócić na ten aspekt pracy i wyników, w szczególności kiedy nie podano jednoznacznie jaka może być odchyłka od zaproponowanej grubości przy jednoczesnym wskazaniu, że przy pewnej wielkości obciążenia zewnętrznego dochodzi do odklejenia taśm od wzmacnianego elementu. Może to sugerować, że grubość warstwy kleju powinna być większa, w szczególności biorąc pod uwagę w/w zapisy z Karty Informacyjnej Produktu.

Sądzę, że ewentualna odpowiedź Doktorantki na wszystkie w/w pytania pomoże lepszemu zrozumieniu podjętych decyzji i przeprowadzonych przez nią działań.

- 3) W recenzowanej pracy nie odnotowałem odniesienia do klasycznej teorii wzmacniania konstrukcji stalowych. W moim przekonaniu wskazanie takich informacji nie tylko poprawiłoby walory poznawcze samej pracy, ale także pozwoliłoby Autorce na bardziej krytyczne przyjrzenie się wynikom swoich prac badawczych. Należy w tym miejscu zacytować kilka zdań z klasycznej pozycji polskiej literatury technicznej dotyczącej wzmacniania konstrukcji stalowych, a mianowicie monografię autorstwa *Eugeniusza Masłowskiego i Danuty Spiżewskiej „Wzmacnianie konstrukcji budowlanych”* (Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2002). W kontekście wzmacniania stalowych belek zginanych w monografii tej zapisano, aby:

- przekroje wzmacniające rozmieszczać tak, aby środki ciężkości przekroju podstawowego i przekrojów wzmacniających pokrywały się, czyli aby były ułożone symetrycznie względem osi obojętnej zginania,

- oraz, że efektywność wzmacniania elementów zginanych poprawia się wraz z oddaleniem przekrojów dodanych od osi obojętnej, ponieważ wyraźnie wzrasta moment bezwładności i wskaźnik wytrzymałości przekroju po wzmocnieniu, mimo zastosowania niezbyt dużych przekrojów wzmacniających.

W świetle powyższych zaleceń niezbyt odkrywczym jest zatem następujące stwierdzenie, podane jako część wniosków z pierwszego etapu prac cyt. „...zastosowanie wzmocnienia w środkniku belki ogranicza przemieszczenia pionowe w najmniejszym stopniu...”

Sądzę, że w pracy powinny się znaleźć wnioski (choćby w ograniczonej formie) oparte na wpływie zmiany parametrów geometrycznych przekrojów spowodowane umieszczeniem elementów wzmacniających (m.in. zmiana położenia środka ciężkości, zmiana wartości momentów bezwładności) w kontekście uzyskanych wyników przemieszczeń, odkształceń i deformacji. Wskazałoby to jednoznacznie, że Autorka te zmiany zauważa i bierze pod uwagę.

- 4) W wynikach analiz numerycznych opisanych w podrozdziale 8.5. (Model numeryczny – drugi etap badań) Autorka prezentuje wyniki zależności obciążenie-odkształcenie, obciążenie-przemieszczenie dla belek z drugiego etapu badań (wzmocnionych taśmami stalowymi) porównując je z odpowiednikami z analiz komputerowych. Mam pewne wątpliwości do tej części analiz, a mianowicie:

- parametry materiałowe belek były określone na podstawie wyników z badań laboratoryjnych i jako takie zaimplementowane do analiz numerycznych (granica plastyczności $f_y=418,5$ MPa, moduł Younga $E=201,8$ GPa, współczynnik Poissona $\nu=0,28$),

- parametry mechaniczne stali użyte na taśmy wzmacniające były przyjęte jako nominalne, czyli: granica plastyczności $f_y=235$ MPa, moduł Younga $E=210$ GPa, wytrzymałość na rozciąganie $f_u=410$ MPa, współczynnik Poissona $\nu=0,3$.

Biorąc pod uwagę grubość stalowych taśm wzmacniających (1,5 mm) można sądzić z dużą dozą prawdopodobieństwa, że parametry materiałowe przyjmują wartości wyższe niż te przyjęte do obliczeń numerycznych. W związku z tym można stwierdzić, że efekt w/w wymienionych parametrów był inny w badaniach laboratoryjnych, a inny w analizach numerycznych.

W pracy (podrozdział - 8.5.3 Wnioski) pada sformułowanie, że „...stwierdzono zgodność modelu numerycznego z wynikami drugiego etapu badań laboratoryjnych...” oraz, że „...rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi w programie Abaqus a średnią wartością pomiarów dla danej grupy belek w badaniu laboratoryjnym sięgają maksymalnie 6%...”. W moim przekonaniu zgodność wyników byłaby na jeszcze wyższym poziomie gdyby tylko uwzględnić rzeczywiste parametry materiałowe w analizach numerycznych. Dotyczy to również belek wzmacnianych taśmami z kompozytów CFRP.

Uprzejmie zatem proszę Doktorantkę o odniesienie się do w/w wątpliwości.

3.2. Szczegółowe uwagi merytoryczne

Poniżej podano szczegółowe uwagi i spostrzeżenia przypisane do poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej.

Rozdział pierwszy

- Rys. 1.2 – bardzo słaba jakość, podpisy na rysunku w języku angielskim.

- Zapisano, że „wykorzystanie taśm CFRP daje możliwość uzyskania stosunkowo niskim nakładem finansowym szybkiego i efektywnego podniesienia parametrów wytrzymałościowych konstrukcji”. Informacja ta bez podania z czym taśmy CFRP są porównywane ma charakter raczej handlowo-informacyjny i nie powinna znaleźć się w rozprawie w takiej formie.
- W ostatnim zdaniu tego rozdziału zapisano, że „aktualnie szacuje się, że globalne wykorzystanie CFRP do napraw i wzmocnień obiektów budowlanych wynosi rocznie 3400 ton”. Nie podano żadnego źródła tej informacji. Ponownie można uznać, że informacja ta ma charakter handlowy, a takich w naukowych pracach technicznych należy unikać.

Rozdział drugi

- W pracy podano przykład wzmocnienia stalowych belek zginanych o wymiarach przekroju poprzecznego 1600x80x30 mm (wg pracy Błażejowski W., Gąsior P., Kaleta J., Mażulis J., Rybczyński R.(2011): *Wzmocnienie konstrukcji stalowej materiałami kompozytowymi. Polimery i kompozyty konstrukcyjne. Praca zbiorowa pod redakcją Gabriela Wróbla. Wydawnictwo Logos Press, Cieszyn*) wzmocnionej taśmą CFRP.
Nie podano informacji jakiego rodzaju to był przekrój – skrzynkowy spawany, dwuteownik gorącowalcowany? Zacytowana praca w tym miejscu rozprawy wydaje się być szczególnie przydatna ze względu na podobne wnioski do tych, które Doktorantka wyciągnęła ze swoich badań – zniszczenie warstwy kleju, a nie kompozytu. Wątpliwości budzą wymiary poprzeczne przekroju i brak jednoznacznego podania o jaki przekrój chodzi.
- W opisie prac Łagody i Kowala (str. 26) znajduje się stwierdzenie „... Dużo uwagi poświęcono także badaniom wpływu kształtu zakończenia skleiny na wytrzymałość połączenia stal-taśma CFRP [Łagoda i in. 2013], [Łagoda i in. 2014], [Linghoff i in. 2009], analizując osiem kształtów zakończenia *spoiny* [Łagoda i in. 2013].” O jaką spoinę chodzi? Czy to nie jest błąd językowy?
- W opisie pracy Dinisa i in. (str. 28) znajduje się następujący zapis: „...zawarto analizy numeryczne dotyczące wyboczenia cienkościennych słupów i belek o przekrojach *T* i o przekrojach *kątowych*.” Czy chodzi o kątowniki zimnogięte? Jeśli tak, to warto podać czy równoramienne czy nierównoramienne. Sugeruje się przy zapisywaniu tego typu informacji technicznych, podawanie ich z większą uwagą i skrupulatnością, nawet jeśli zapisy dotyczą badań cudzych.

Rozdział piąty

- W podrozdziale 5.1 zapisano, że „...prowadzono badania materiałowe i pełnoskalowe...”. Czy za eksperymenty prowadzone w pełnej skali można uznać laboratoryjne badania belek o długości całkowitej równej 3,0 m i rozstawie podpór równym 2,20 m oraz 2,70 m? W moim przekonaniu przeprowadzone badania nie mieszczą się w definicji badań pełnoskalowych. Proszę o ustosunkowanie się do tej opinii.
- Z czego wynika zmiana rozstawu podpór? W jednej serii badań część belek wystających poza podpory to 40 cm (badania pilotażowe), natomiast w części zasadniczej testów wymiar ten to 15 cm? Czy ma na to wpływ realizacja sposobu obciążenia belek?

Rozdział szósty

- W podrozdziale 6.1.2 zapisano, że dla taśm z włókien węglowych CFRP Sika CarboDur S o grubości 1,2 mm i szerokości 50 mm „... na podstawie badań materiałowych określono współczynnik Poissona i moduł Young'a...” Czy takie badania faktycznie były przeprowadzone w trakcie prac laboratoryjnych? Jeśli tak, to dlaczego nie podano żadnych szczegółów tych badań?

Rozdział siódmy

- We wstępie do rozdziału 7 zapisano, że „...efektem obserwacji poczynionych podczas pilotażowych testów laboratoryjnych było opracowanie programu badań właściwych...” oraz, że „...podstawowe modyfikacje dotyczyły zmiany schematu statycznego, sposobu przyłożenia obciążenia oraz metody pomiaru przemieszczeń...”. Na czym polegała zmiana schematu statycznego?
- Zwraca się uwagę, że mechanizm zniszczenia (strona 84) to co innego niż forma (postać) zniszczenia. W związku z tym w mojej ocenie można porównywać formy z formami a mechanizmy z mechanizmami.

3.3. Uwagi dotyczące redakcji rozprawy

W mojej ocenie strona edycyjna pracy mogłaby być na wyższym poziomie. Do najczęściej występujących błędów edycyjnych należą: pozostawianie dużych pustych miejsc na poszczególnych kartach pracy, słaba jakość umieszczanych rysunków, brak spisu rysunków i tabel a także bardzo złożone tytuły rysunków (w niektórych przypadkach). W pracy pojawiają się również błędy językowe.

Odnoszę również wrażenie, że całą rozprawę można by napisać w sposób bardziej syntetyczny i jednocześnie ułatwiający jej czytanie. Jako radę, którą Doktorantka być może zechce wykorzystać w przyszłych swych działaniach naukowych dodam, że warto poświęcić odpowiednio dużo wysiłku na poprawne opisanie swych analiz. Poprawią one łatwość zrozumienia wykazanych w nich problemów. Poza tym warto zauważyć, że osoby oceniające z reguły widzą tylko końcowy wynik wszystkich prac badawczych w postaci raportu czy dysertacji. Można stwierdzić, że widzą tylko „produkt końcowy”. Jakość tego „produktu” sugeruje niejako również to jak autor podchodzi(ł) do samych prac badawczych. Im lepszy, poprawnie ułożony tekst samej pracy, uzupełniony dobrej jakości zdjęciami i rysunkami, wynikami, które są faktycznie kluczowe, tym większe zaufanie do danych w tej pracy przedstawionych. Tym samym, zachęcam Doktorantkę do zapoznania się z pracą na w/w temat autorstwa Tomislava Hengla i Michaela Goulda o tytule „*Rules of thumb for writing research articles*”.

4. Wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Ilony Szewczak, pomimo kilku w/w uwag krytycznych stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego. Praca wnosi znaczący wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie „inżynieria lądowa i transport”, dawna „budownictwo” i ma duże znaczenie praktyczne. Doktorantka wykazała się wystarczającą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki, a także bardzo dobrą umiejętnością planowania i prowadzenia badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych. Świadczy to o jej dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Ilony Szewczak pt. „Analiza efektywności wzmacniania stalowych belek cienkościennych typu sigma kompozytami CFRP”, spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w wytycznych zawartych w ustawie. W związku z tym stawiam

**wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą
Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Wydziału Budownictwa i
Architektury Politechniki Lubelskiej.**

Jacek Szefran