

dr hab. inż. Dariusz CZEPIŻAK, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Konstrukcji Budowlanych
e-mail: dariusz.czepizak@pwr.edu.pl

Wrocław, dn. 08.12.2025

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Macieja Adama Dybizbańskiego

pt. „Zastosowanie jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma”

1. Podstawa formalnoprawna opracowania recenzji

Podstawą formalną sporządzenia recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej, prof. dr hab. inż. Jacka Pielecha, z dnia 8 października 2025 roku, z prośbą o zrecenzowanie rozprawy doktorskiej.

Podstawą prawną wykonania recenzji są:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późniejszymi zmianami.
- Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik, Rada Doskonałości Naukowej 2022 r.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Adama Dybizbańskiego pt. *„Zastosowanie jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma”*. Pracę przygotowano w Politechnice Poznańskiej na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu w Instytucie Budownictwa, pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Katarzyny Rzeszut, która pełniła funkcję Promotora w przewodzie doktorskim.

3. Informacje ogólne o rozprawie doktorskiej

Rozprawa została przedłożona do recenzji w formie zwartego, dwustronnie zadrukowanego raportu w formacie A4, w twardej oprawie, napisanego w języku polskim i liczącego 192 strony. Sposób jej wydania jest estetyczny. W pracy zamieszczono 107 rysunków, 26 tablic, 52 wzory i formuły matematyczne. Składa się ona ze spisu oznaczeń, streszczenia, wstępu, 7 rozdziałów, spisu tablic, spisu ilustracji, bibliografii, która liczy 192

pozycje oraz załącznika A o długości 8 stron z wynikami pomiarów geometrii przekroju poprzecznego badanych belek.

Układ rozprawy jest logiczny i zrozumiały, charakterystyczny dla prac naukowych. Tytuł pracy, jak i tytuły poszczególnych rozdziałów i podrozdziałów odpowiadają treściom w nich zawartym. Rozdziały 1, 3, 4, 5 i 6, kończą się podsumowaniem najważniejszych wniosków. Rozdział 7 zawiera wnioski końcowe.

W **rozdziale 1** zawarto przegląd literatury dotyczącej konstrukcji stalowych cienkościennych, ze szczególnym naciskiem na teorie Własowa i Jonssona, które opisują zjawiska globalnej i dystorsyjnej utraty stateczności. Omówiono mechanizmy dystorsji przekroju poprzecznego i lokalnych deformacji ścianek (teoria von Karmana) oraz metody wzmacniania konstrukcji kompozytami CFRP. Zanalizowano także stan wiedzy na temat klejonych połączeń stal-CFRP, ich modeli analitycznych i numerycznych, w tym Modelu Strefy Kohezyjnej (CZM).

W **rozdziale 2** opisano motywację badań, sformułowano problemy badawcze oraz przedstawiono cel i tezę pracy. Dokonano pełnego opisu materiałów, geometrii próbek, wariantów wzmocnienia oraz programu badań laboratoryjnych i numerycznych. Zaprezentowano również szczegółową aparaturę zastosowaną w testach połączeń klejonych i belek cienkościennych.

W **rozdziale 3** zawarto badania właściwości stali, pilotażowe testy podwójnych połączeń zakładkowych oraz zasadnicze badania pojedynczych połączeń zakładkowych o różnych długościach zakładu. Przeanalizowano nośność, odkształcenia, przebieg zniszczenia oraz dominujące mechanizmy uszkodzeń (adhezyjne, kohezyjne, delaminacja). Wyniki stanowią podstawę do kalibracji modeli numerycznych i oceny wytrzymałości wzmocnienia stal-klej-CFRP.

W **rozdziale 4** przedstawiono pełnoskalowe badania belek sigma w schemacie czteropunktowego zginania dla elementów niewzmocnionych i wzmocnionych trzema wariantami aplikacji tkaniny. Omówiono przygotowanie próbek, metody pomiarowe, wpływ warunków podparcia na deplanację oraz analizę ugięć, przemieszczeń i postaci zniszczenia. Wyniki wykazały znaczący wpływ wzmocnienia na ograniczenie dystorsji i zwiększenie nośności, szczególnie dla przekroju $\Sigma 200 \times 70 \times 2$.

W **rozdziale 5** przedstawiono analizy numeryczne (MES) połączeń klejonych, mające na celu wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych wzmocnienia kompozytowego. Opracowano i zweryfikowano modele podwójnego połączenia zakładkowego do symulacji zniszczenia kohezyjnego oraz dwa modele pojedynczego połączenia zakładkowego do odtworzenia mechanizmów zerwania tkaniny i zniszczenia adhezyjnego. Model zniszczenia adhezyjnego wymagał zastosowania korygujących parametrów redukcyjnych α i β do zbliżenia numerycznego mechanizmu kohezyjnego do zaobserwowanego w laboratorium mechanizmu adhezyjnego.

W **rozdziale 6** przedstawiono model MES pełnowymiarowych belek $\Sigma 200 \times 70 \times 2$, w którym wzmocnienie CFRP typu 1 (uznane za optymalne) zamodelowano za pomocą dyskretnych sprężyn nieliniowych. W wyniku analizy numerycznej wykazano, że wzmocnienie znacząco redukuje odkształcenia (szczególnie plastyczne w newralgicznych obszarach)



i naprężenia w porównaniu do belki referencyjnej, co potwierdza jego efektywność. Model ten, pomimo uproszczeń, wykazał dobrą zgodność z wynikami laboratoryjnymi w zakresie siły niszczącej i jakościowej postaci deformacji.

W **rozdziale 7** zestawiono najważniejsze wyniki potwierdzające tezę o skuteczności odcinkowego zamknięcia przekroju tkaniną CFRP jako metody wzmacniania belek sigma. Wskazano, że wzmocnienie istotnie redukuje dystorsję i zwiększa nośność, szczególnie dla profilu $\Sigma 200 \times 70 \times 2$, oraz zidentyfikowano optymalny wariant aplikacji (typ 1). Przedstawiono także oryginalny wkład pracy oraz kierunki dalszych badań.

4. Ocena naukowej wartości pracy

Ocena spójności tytułu z treścią rozprawy

Tytuł rozprawy doktorskiej dobrze i precyzyjnie odpowiada jej zawartości. Treść pracy obejmuje zarówno analizę stanu wiedzy w zakresie cienkościennych kształtowników stalowych typu sigma, kompozytów CFRP oraz połączeń klejonych, jak i szczegółowe badania laboratoryjne belek stalowych wzmocnionych jednokierunkową tkaniną z włókien węglowych. Uzupełnieniem pracy są modele numeryczne połączeń klejonych i belek wzmocnionych, służące ocenie wpływu wzmocnienia na nośność, sztywność i mechanizm zniszczenia, czyli dokładnie tych aspektów, które implikuje tytuł rozprawy.

Ocena doboru bibliografii

Rozprawa opiera się na szerokim (192 pozycje) i poprawnie dobranym piśmiennictwie, obejmującym zarówno klasyczne pozycje z mechaniki cienkościennych prętów stalowych, jak i aktualne artykuły naukowe oraz normy projektowe istotne dla cienkościennych kształtowników typu sigma i ich utraty stateczności. Przegląd literatury w rozdziale 1 jest przejrzyste uporządkowany według bloków tematycznych (cienkościenne kształtowniki stalowe, mechanika belek cienkościennych, kompozyty CFRP, połączenia klejone stal-CFRP), co pozwala jednoznacznie zidentyfikować lukę badawczą oraz uzasadnić cel i tezę rozprawy. Z punktu widzenia aktualności i kompletności należy uznać, że zastosowane piśmiennictwo jest wystarczająco szerokie, reprezentatywne dla współczesnego stanu wiedzy i poprawnie wykorzystane w całej rozprawie.

Ocena celu pracy

Główny cel pracy doktorskiej został szeroko opisany na stronie 52 rozprawy i można go streścić następująco: Celem pracy doktorskiej jest kompleksowe rozpoznanie nośności i pracy konstrukcyjnej cienkościennych stalowych belek typu sigma, giętych na zimno i wzmacnianych tkaninami CFRP, traktowanych jako elementy poddawane nowej, klejonej metodzie domykania przekroju i podnoszenia nośności elementów TWCFS. Ten cel jest z naukowego punktu widzenia bardzo wartościowy i dobrze wpisuje się w kluczowe kierunki rozwoju inżynierii konstrukcji stalowych:

- **Identyfikacja luki badawczej:** Wzmocnienie konstrukcji kompozytami CFRP jest obszarem intensywnych badań, zwłaszcza w kontekście zwiększania nośności belek i słupów. Jednak, jak zauważono w rozdziale 1.5, tylko niewielka liczba publikacji dotyczy



wzmacniania cienkościennych monosymetrycznych elementów stalowych, w szczególności o przekroju typu sigma, a jeszcze mniej odnosi się do problemu przeciwdziałania dystorsji przekroju. Cel pracy wypełnia zatem bardzo konkretną i krytyczną lukę badawczą, koncentrując się na elemencie (profil sigma) i zjawisku dystorsyjnej utraty stateczności, które są słabo reprezentowane w literaturze, mimo ich powszechnego zastosowania w budownictwie.

- **Zastosowanie innowacyjnej metody wzmocnienia:** Dotychczasowe metody wzmacniania opierały się głównie na naklejaniu taśm CFRP wzdłuż osi pręta, co miało na celu zwiększenie sztywności giętnej i kontrolę nad zwichrzeniem lub wyboczeniem lokalnym. Innowacja tej pracy polega na naklejaniu tkaniny w kierunku poprzecznym na ustalonym odcinku w celu utworzenia przekroju zamkniętego, co ma bezpośrednio zwiększyć sztywność lokalną przekroju i odporność na dystorsję. Jest to fundamentalna zmiana w strategii wzmacniania, odchodząca od tradycyjnego zwiększania sztywności osiowej na rzecz poprawy stabilności przekroju poprzecznego.
- **Podążanie za współczesnymi trendami:** Praca jest zbieżna z nowoczesnymi kierunkami rozwoju analizy konstrukcji cienkościennych, które dążą do lepszego zrozumienia i kontroli złożonych zjawisk utraty stateczności. Badania, takie jak te prowadzone przez Schafera, podkreślają, że postęp w projektowaniu elementów cienkościennych wymaga zaawansowanej analizy ich zachowania (jak np. Generalized Beam Theory – GBT lub Direct Strength Method – DSM), szczególnie w przypadku złożonych geometrii. Propozycja nowej, skutecznej metody modyfikacji rozwoju dystorsji jest bezpośrednią odpowiedzią na te wyzwania.

Podsumowując, cel rozprawy jest wysoce relewantny i nowatorski w kontekście współczesnych badań. Wypełnia on istotną lukę w zastosowaniu kompozytów CFRP do specyficznych, monosymetrycznych przekrojów cienkościennych i oferuje inżyniersko praktyczne (zwłaszcza typ 1) oraz mechanicznie uzasadnione rozwiązanie problemu utraty stateczności, którego inne metody (np. wzmocnienie wzdłużne) nie były w stanie skutecznie kontrolować.

Ocena zastosowanych metod badawczych

Zastosowane w rozprawie metody badawcze obejmują kompletny, logicznie zaprojektowany ciąg działań: od przeglądu literatury i identyfikacji luki badawczej, poprzez badania doświadczalne, aż po zaawansowane analizy numeryczne. Autor wyraźnie rozdziela trzy ścieżki badawcze: badania materiałowe stali S350GD, badania połączeń klejonych stal–klej–tkanina oraz pełnoskalowe badania belek cienkościennych typu sigma, a następnie dla każdej z nich opracowuje odpowiadające im modele numeryczne w programie Abaqus, co zapewnia spójność metodyczną całej pracy.

Program badań doświadczalnych jest rozbudowany i dobrze ukierunkowany na weryfikację postawionej tezy. Obejmuje on statyczne próby rozciągania stali (dwie grubości blach) zgodnie z wymaganiami normowymi, 65 prób połączeń klejonych (5 podwójnych połączeń zakładkowych DLJ i 60 pojedynczych SLJ) oraz 16 pełnoskalowych testów belek



stalowych w schemacie czteropunktowego zginania, w tym 4 belek referencyjnych i 12 belek wzmocnionych. W przypadku belek analizowane są dwa przekroje ($\Sigma 200 \times 70 \times 2$ i $\Sigma 140 \times 70 \times 2.5$), trzy warianty rozmieszczenia wzmocnień z tkaniny CFRP oraz dwa schematy podparcia (z dopuszczeniem i z całkowitym zablokowaniem deplanacji przekroju), co pozwala na ilościową ocenę wpływu zarówno geometrii przekroju, jak i warunków podporowych na efektywność wzmocnienia. Zastosowanie czujników LVDT oraz systemu ARAMIS 6M do pomiaru przemieszczeń i pól odkształceń dodatkowo podnosi wiarygodność wyników eksperymentalnych.

Analizy numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych stanowią istotne uzupełnienie badań doświadczalnych. Dla połączeń klejonych opracowano trzy modele: dla połączenia DLJ (zniszczenie kohezyjne w kleju) oraz dwa modele SLJ opisujące odpowiednio zniszczenie adhezyjne na styku stal–klej i zerwanie tkaniny CFRP, przy wykorzystaniu modeli strefy kohezyjnej (CZM) oraz kryterium Hashina dla materiałów anizotropowych. Wszystkie modele poddano analizie wrażliwości na gęstość siatki MES oraz zweryfikowano poprzez porównanie krzywych siła–przemieszczenie i form zniszczenia z wynikami badań laboratoryjnych, uzyskując dobrą zgodność ilościową i jakościową. Analogicznie, dla belek cienkościennych opracowano modele powłokowe (S4R) z wiernym odwzorowaniem warunków podparcia i obciążenia, zweryfikowane na podstawie wyników pełnoskalowych testów, które następnie wykorzystano do analiz rozkładów naprężeń, odkształceń oraz deformacji dystorsyjnych.

Z punktu widzenia oceny metodycznej należy podkreślić kilka istotnych zalet podejścia badawczego. Po pierwsze, połączenie szerokiego programu badań eksperymentalnych z zaawansowanym modelowaniem numerycznym zapewnia możliwość wzajemnej weryfikacji wyników i znacząco zwiększa wiarygodność wniosków. Po drugie, wybór pełnoskalowych badań belek o rzeczywistych wymiarach oraz zastosowanie standardowych materiałów (stal ocynkowana, komercyjna tkanina i klej) powoduje, że uzyskane rezultaty mają wysoki potencjał aplikacyjny. Po trzecie, zróżnicowanie parametrów (wysokość przekroju, warianty wzmocnienia, warunki podparcia, parametry połączenia klejonego) umożliwia identyfikację najbardziej efektywnego sposobu wzmacniania (typ 1) oraz ilościową ocenę wpływu geometrii i układu wzmocnień na ograniczenie dystorsji.

Podsumowując, zastosowane metody badawcze należy ocenić bardzo wysoko. Program badań jest kompletny, spójny z celem i tezami rozprawy, poprawnie zaplanowany i rzetelnie zrealizowany, a zastosowane nowoczesne narzędzia pomiarowe (mikroskopia skaningowa, system cyfrowej korelacji obrazu ARAMIS 6M do bezkontaktowego pomiaru deformacji oraz skaner 3D Artec Leo do inwentaryzacji imperfekcji geometrycznych) oraz modele numeryczne reprezentują aktualny, wysoki poziom współczesnej mechaniki konstrukcji cienkościennych i połączeń klejonych. Metodyka w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawie doktorskiej i stanowi solidną podstawę do formułowania uogólnionych wniosków naukowych dotyczących wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma tkaninami CFRP.



Ocena omówienia wyników badań

Część rozprawy poświęconą omówieniu wyników badań oceniam jako merytorycznie dojrzałą, dobrze osadzoną w mechanice konstrukcji cienkościennych i zgodną z ogólnie przyjmowanymi standardami w tym zakresie.

Autor konsekwentnie oddziela prezentację danych od ich interpretacji, a następnie w komentarzach tekstowych wyjaśnia obserwowane zjawiska na poziomie mechanizmów materiałowych i konstrukcyjnych. Dobrym przykładem są opisy krzywych siła–przemieszczenie dla połączeń klejonych serii A, B i C, gdzie zwraca się uwagę na dwuetapowy charakter pracy złącza, bardzo duży rozrzut nośności oraz wiąże się ten rozrzut z mieszanymi mechanizmami zniszczenia (adhezyjnym, kohezyjnym, zerwaniem tkaniny) oraz z nieuniknionymi niedokładnościami wykonania próbek. Takie przejście od opisu do interpretacji jest zgodne z zaleceniami dotyczącymi sekcji dyskusji wyników w pracach naukowych, gdzie akcentuje się potrzebę odpowiedzi na pytanie „co te wyniki znaczą, a nie tylko jakie są”.

Omówienie wyników obejmuje nie tylko opis trendów, lecz także ich ilościową ocenę i wskazanie źródeł niepewności. Dla badań połączeń klejonych podano średnie, odchylenia standardowe, wariancje oraz przedziały ufności, a następnie autor komentuje rozrzut wyników oraz jego możliwe przyczyny. W części dotyczącej belek cienkościennych wyniki z pomiarów maszyną wytrzymałościową, czujnikami LVDT i systemem ARAMIS 6M są interpretowane w kontekście form zniszczenia (zwichrzenie, spaczenie przekroju, lokalne wgniecenia) oraz rozkładu przemieszczeń pionowych i poziomych w przekroju. Tego typu powiązanie pól przemieszczeń z mechaniką utraty stateczności jest niewątpliwym atutem pracy.

W rozdziałach poświęconych analizie numerycznej połączeń klejonych oraz belek, autor nie ogranicza się do stwierdzenia zgodności modelu z doświadczeniem, ale wskazuje, dla jakich zakresów obciążeń i wielkości odpowiedzi modele odwzorowują wyniki eksperymentalne poprawnie, a gdzie pojawiają się różnice. W podsumowaniu rozdziału 5 przedstawiono, które modele (CZM dla zniszczenia kohezyjnego, model Hashina dla zerwania tkaniny, model dla zniszczenia adhezyjnego) są wrażliwe na zagęszczenie siatki, a które dają stabilne wyniki, co stanowi dojrzałą dyskusję ograniczeń podejścia numerycznego. Z kolei w rozdziale 6, w podsumowaniu, autor jasno pokazuje, w jaki sposób przyjęte modelowanie wzmocnienia (sprężyny dyskretne) umożliwia uchwycenie efektów redukcji odkształceń i naprężeń, przy zachowaniu akceptowalnego kosztu obliczeniowego.

W części dotyczącej belek cienkościennych szczególnie wartościowe jest przejście od interpretacji wyników do oceny ich praktycznego znaczenia. W podsumowaniu rozdziału 4 oraz w analizie pól przemieszczeń systemu ARAMIS 6M autor wskazuje, że dla profilu $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ wzmocnienie ma istotny wpływ na nośność i przemieszczenia, natomiast dla profilu $\Sigma 140 \times 70 \times 2,5$ efekt ten jest marginalny. Co ważne, wybór wzmocnienia typu 1 jako najbardziej obiecującego uzasadniono nie tylko przyrostem nośności, ale także względami praktycznymi i kosztowymi, czyli powiązano wyniki badań z kryteriami inżynierskimi, co jest w pełni zgodne z zaleceniami, aby w dyskusji wyników podkreślać znaczenie i implikacje praktyczne uzyskanych rezultatów.



Wreszcie, w rozdziałach podsumowujących (3.4, 4.9, 5.4, 6.5) oraz we wnioskach końcowych wyniki cząstkowe są syntetyzowane na poziomie całego programu badawczego, co powiązuje odpowiedź na pytania badawcze z przeglądem literatury i luką badawczą zarysowaną we wstępie.

Potencjał praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

W mojej ocenie potencjał praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań jest bardzo wysoki i ma charakter bezpośrednio aplikacyjny w inżynierii budowlanej w sektorze lekkich konstrukcji stalowych. Kluczowe aspekty praktyczne to:

- **Ekonomiczne i Praktyczne Wzmacnianie Płatwi.** Najbardziej obiecujące rozwiązanie, wzmocnienie typu 1 (naklejone tylko na zagięciach brzegowych półek), jest optymalne pod względem łatwości aplikacji i minimalizacji kosztów. Profile sigma są powszechnie stosowane jako płatwie dachowe. Wzmocnienie typu 1 można wykonać od spodu, bez konieczności demontażu poszycia dachowego, co drastycznie redukuje koszty i czas prac remontowych w istniejących obiektach.
- **Skuteczna Kontrola Dystorsji.** Badania potwierdziły, że nowatorska metoda odcinkowego zamykania przekroju tkaniną CFRP skutecznie zwiększa sztywność lokalną i odporność na deformacje dystorsyjne (szczególnie dla smuklejszego profilu $\Sigma 200 \times 70 \times 2$), co jest kluczowym problemem w elementach cienkościennych. Zdolność do przeciwdziałania otwarciu przekroju jest bezpośrednią korzyścią dla zwiększenia nośności eksploatacyjnej belek, np. w przypadku wzrostu obciążeń.
- **Wymierne Zwiększenie Nośności.** Dla belek $\Sigma 200 \times 70 \times 2$ (etap II), zastosowanie optymalnego wzmocnienia typu 1 zapewniło wzrost nośności o 14%, przy czym najbardziej efektywny typ 3 zwiększył ją o 33%. Te ilościowe dane stanowią bezpośrednią podstawę do projektowania inżynierskiego, umożliwiając świadome decyzje o podniesieniu parametrów konstrukcyjnych belek.
- **Podstawa do Opracowania Wytycznych.** Praca dostarcza unikalnych danych eksperymentalnych dotyczących połączeń klejonych tkaniny z włókna węglowego ze stałą ocynkową, która jest typowym materiałem dla profili cienkościennych, a dla której brakuje badań. Wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych (dla zniszczenia kohezyjnego, adhezyjnego i zerwania tkaniny) stanowi kluczowy wkład w wiedzę niezbędną do opracowania przyszłych wytycznych projektowych dla klejonych wzmocnień CFRP na elementach TWCFS.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawione poniżej uwagi odnośnie do recenzowanej rozprawy nie obniżają jej wartości merytorycznej i jej jednoznacznie pozytywnej oceny. Zamieszczone poniżej sugestie należy traktować jako uwagi o charakterze dyskusyjnym, dające możliwość Doktorantowi zaprezentowania własnego poglądu na poruszane zagadnienia podczas publicznej obrony. Ponadto zostały one podane z nadzieją, że mogą być przydatne i zostaną wykorzystane w trakcie opracowywania publikacji kierowanych do czasopism naukowych z tej tematyki.



5.1. Uwagi merytoryczne

- 1) Str. 21, wzór (1.2). We wzorze zapisano t^2 , a powinno być t^3 .
- 2) Str. 21, wzór (1.6). W ostatniej części wzoru brakuje współrzędnej wycinkowej ω .
- 3) Niekonsekwencje w notacji. W równaniach (1.11) i (1.12) składowe naprężeń od bimomentu oznaczano symbolem B_ω , a w równaniu (1.15) tą samą składową oznaczono symbolem B_T .
- 4) Str. 39, wzór (1.17). We wzorze użyto symbolu a . Tymczasem w spisie oznaczeń obszar jest definiowany jako a_p .
- 5) Str. 140, wzór (6.1) i wartość (6.2) wydają się niepoprawne.
Sztywność sprężyny w klasycznym ujęciu należy określić jako:

$$K_R = \frac{F_{max}}{x_{max}} = \frac{EA\varepsilon_{max}}{L\varepsilon_{max}} = \frac{EA}{L} = \frac{220000 * 0,129 * 50}{168} = 8446 \text{ N/mm}$$

Poprawna wartość K_R stanowi jedynie 1,35% wartości przyjętej w analizach numerycznych w pracy. Wprowadzenie do modelu znacznie mniejszej wartości K_R może istotnie wpłynąć na wyniki analiz.

- 6) Rozdział 3.1. Badania próbek stali S350GD. W kontekście badań naukowych i porównań z wartością referencyjną $E = 210 \text{ GPa}$ sensowne jest, aby w metodyce jednoznacznie doprecyzować, czy grubość próbek mierzono z powłoką cynkową czy bez, oraz czy uzyskany E , f_y , f_u interpretujemy jako parametry stali konstrukcyjnej, czy jako charakterystyki układu stal + ocynk.
- 7) Rozdział 3.2. Nie podano procedury, która gwarantowałaby osiągnięcie z góry zaprojektowanej, powtarzalnej grubości spoiny klejowej (np. 0,5 mm). Rys. 3.17 przedstawia duży rozrzut grubości kleju od 0,3 mm do 1,0 mm. Czy to nie będzie powodować problemów w praktycznych zastosowaniach, gdzie jeszcze trudniej kontrolować grubość warstwy kleju? Dlatego ważnym wydaje się opracowanie procedury aplikowania powtarzalnej grubości warstwy.
- 8) Rozdział 4. Co autor rozumie przez częściowe zablokowanie deplanacji? Brakuje miary stopnia zablokowania. W takiej sytuacji trudno odtworzyć warunki badania przez niezależny ośrodek.
- 9) Na str. 87 i rys. 4.1 pokazano w jaki sposób zablokowano deplanację, ale niestety podczas badań nie mierzono deplanacji na podporach, aby potwierdzić, iż wynosi ona 0. Należy zauważyć, że połączenie cierne wykonane z elementów drewnianych niekoniecznie całkowicie blokuje deplanację.
- 10) Rozdział 4.7. Nie podano informacji, jaką dokładność przy pomiarach, wyrażoną w [mm], zapewniał system ARAMIS 6M.
- 11) Rys. 4.31, 4.32. Dlaczego linia czerwona jest urwana? Brak komentarza na ten temat.
- 12) Rozdział 4. Autor nie porównuje wyników pomiarów za pomocą systemu ARAMIS 6M i LVDT. Jaka była zbieżność pomiaru obu metod?

- 13) Rozdział 5.3.1. W modelu numerycznym wprowadzono parametry korekcyjne $\alpha=0,01$ i $\beta=0,2$. Redukcje są duże i wymagają lepszego, ilościowego uzasadnienia oraz analizy wrażliwości.
- 14) Str. 139, rys. 6.1. Z analizy rysunku wynika, że mamy do czynienia ze schematem geometrycznie zmiennym, gdyż istnieje swoboda przemieszczeń wszystkich punktów w kierunku $U1=UX$. Ponadto obie podpory belki mają zablokowane $U3=UZ$ i $UR2=RY$. Skoro zablokowane jest $U3$ na obu podporach to belka nie zachowuje się jak swobodnie podparta. Natomiast jeśli blokujemy $UR2$ to belka na obu końcach ma zablokowany obrót wokół osi Y i nie odpowiada to warunkom podparcia widelkowego. Moim zdaniem, aby zasymulować podpory belki swobodnie podpartej należy przyjąć następujące warunki podparcia: podpora lewa – UX, UY, UZ, RZ , podpora prawa - UX, UY, RZ .
- 15) Str. 142. Autor napisał: „Przedstawione zależności wskazują na większą sztywność modeli numerycznych” Czy nie wynika to z faktu, że model numeryczny ma zablokowanych więcej stopni swobody niż to konieczne, aby odwzorować modele badane doświadczalnie?
- 16) Dla każdej serii belek (RBH, SBHT1, SBHT2, SBHT3, RBL, SBLT1, SBLT2, SBLT3) przebadano tylko po dwa elementy w dodatku każdy z innymi warunkami brzegowymi (etap I, II). Oznacza to, że nie ma serii statystycznej pozwalającej ocenić rozrzut wyników. Przy tak małej liczbie próbek belek badanych w jednej konfiguracji wyniki mają charakter raczej demonstracyjny niż statystycznie reprezentatywny. Jednakże częściowo usprawiedliwiam autora, gdyż wykonanie badań elementów pełnoskalowych jest kosztowne. Natomiast w ramach liczby belek, którymi dysponował autor, można było zmniejszyć różnorodność modeli, zwiększając liczbę powtórzeń wybranych modeli do trzech, aby mieć szansę na określenie rozrzutu badanych parametrów.

5.2. Uwagi redakcyjne i językowe

W dysertacji zauważono drobne uchybienia redakcyjne i językowe, które zdarzają się w każdej pracy doktorskiej, ale nie umniejszają one wartości merytorycznej dzieła np.:

- 1) Kilukrotnie pojawia się fraza „formy niestateczności”. W literaturze przedmiotu najczęściej stosuje się określenie „formy utraty stateczności”
- 2) W zdaniu „Jedną z popularniejszych teorii jest teoria belek Własowa (Własow, 1961) omówiona w podrozdziale 1.2.1.” należy zmienić „omówiona w podrozdziale” na „którą omówiono w podrozdziale”.
- 3) Zamiast „Wykres obrazuje przepływ naprężeń...” poprawna forma powszechnie używana to „Wykres przedstawia...”.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że:

- 1) Autor wykazał się rozległą i aktualną wiedzą teoretyczną z zakresu konstrukcji stalowych, w szczególności cienkościennych profili giętych na zimno i ich wzmacniania kompozytami CFRP, co znajduje odzwierciedlenie w poprawnie przygotowanym przeglądzie literatury, trafnej identyfikacji luki badawczej oraz właściwym sformułowaniu celu i hipotez



badawczych. Uporządkowana struktura części teoretycznej, odwołania do aktualnych norm oraz bogata baza piśmiennictwa potwierdzają dobre opanowanie podstaw dyscypliny i jej współczesnych kierunków rozwoju.

- 2) Rozprawa w pełni potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Autor zaplanował i zrealizował złożony program badań obejmujący analizy teoretyczne, badania doświadczalne elementów cienkościennych oraz modelowanie numeryczne, a także samodzielnie opracował i zinterpretował uzyskane wyniki. Sposób dokumentowania procedur badawczych, krytyczna analiza rozbieżności pomiędzy modelem i eksperymentem oraz umiejętność wskazania ograniczeń stosowanych metod potwierdzają wysoki poziom kompetencji metodologicznych doktoranta. Należy podkreślić spójność pomiędzy kolejnymi etapami badań oraz konsekwentne dążenie do weryfikacji przyjętych założeń, co jest znamienne dla dojrzałej postawy badawczej.
- 3) Przedmiotem rozprawy jest oryginalne ujęcie problemu poprawy nośności i sztywności belek cienkościennych typu sigma poprzez odcinkowe zamknięcie przekroju za pomocą taśm CFRP, ze szczególnym uwzględnieniem deformacji dystorsyjnych. Zaproponowane rozwiązania konstrukcyjne, wyniki badań parametrycznych oraz sformułowane wnioski i rekomendacje projektowe mają charakter oryginalnego wkładu do rozwoju wiedzy w dziedzinie konstrukcji stalowych i mogą stanowić podstawę do dalszych prac nad praktycznymi wytycznymi projektowymi oraz zastosowaniami inżynierskimi.

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska Macieja Adama Dybizbańskiego pt. *„Zastosowanie jednokierunkowej tkaniny z włókna węglowego do wzmacniania cienkościennych belek stalowych typu sigma”* stanowi istotny wkład w rozwój dziedziny wiedzy i **spełnia wymogi stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późniejszymi zmianami. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**

Z poważaniem



dr hab. inż. Dariusz CZEPIŻAK, prof. uczelni