

Szczecin, 10.02.2021 r.

dr hab. inż. Tomasz Wróblewski, prof. ZUT  
Katedra Teorii Konstrukcji  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
Tel.: +48 91 449 4625, e-mail: Tomasz.Wroblewski@zut.edu.pl

## RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Kaweckiego**

**pt. „*Stany graniczne nośności wielośrubowych  
styków doczołowych dźwigarów spawanych*”**

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Aleksander Kozłowski

### SPIS TREŚCI

1.	PODSTAWA OPRACOWANIA RECENZJI .....	2
2.	OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY .....	2
3.	OCENA ROZPRAWY .....	6
3.1.	OCENA DOBORU TEMATU I NAUKOWEJ WARTOŚCI ROZPRAWY .....	6
3.2.	UWAGI KRYTYCZNE .....	8
3.3.	UWAGI SZCZEGÓŁOWE, W TYM REDAKCYJNE .....	11
4.	PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY .....	13

## 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo z dnia 14 grudnia 2020 r. skierowane do mnie przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego zawierające prośbę o ocenę rozprawy. Pismo przygotowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny z dnia 9 grudnia 2020 r.

Podstawę prawną opracowania recenzji stanowią:

- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669),
- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. poz. 261).

## 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Pawła Kaweckiego pt. „*Stany graniczne nośności wielośrubowych styków doczołowych dźwigarów spawanych*” przygotowana w Katedrze Konstrukcji Budowlanych na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej. Promotorem pracy jest Pan prof. dr hab. inż. Aleksander Kozłowski.

Oceniana praca została przedstawiona w wersji drukowanej. Liczy łącznie 294 strony z czego 200 stron stanowi główna część pracy a pozostałe 94 strony stanowią dodatkowe załączniki. Opracowanie składa się z 8 numerowanych rozdziałów poprzedzonych spisem treści oraz wykazem podstawowych oznaczeń. Uzupełnienie stanowią dwa załączniki A i B. Spis Literatury obejmuje łącznie 84 pozycje z czego 26 pozycji stanowią normy oraz wytyczne projektowania. Część główna pracy zawiera 130 rysunków, 57 tabel oraz 33 wzory.

Rozdział 1 liczący 4 strony zawiera dwustronicowe streszczenie pracy w języku polskim oraz angielskim. Określono w nim w zwięzły sposób cel, przedmiot oraz zakres opracowania. Przedstawiono stosowane metody badawcze oraz główne osiągnięcia pracy.

Rozdział 2 liczący 2 strony stanowi wstęp do pracy. Rozdział 2.1 w sposób bardziej szczegółowy niż w streszczeniu przedstawia cel, przedmiot i zakres pracy. W rozdziale 2.2 przedstawiono dwie tezy a w rozdziale 2.3 omówiono pokrótce metodykę stosowaną podczas prac nad rozprawą.

Rozdział 3 zaprezentowany na 46 stronach stanowi omówienie stanu wiedzy na temat połączeń doczołowych stosowanych od ponad pół wieku w budowlanych konstrukcjach stalowych. Na początku przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne projektowane indywidualnie jak również typowe połączenia projektowane z wykorzystaniem katalogów i wytycznych np. DAST. Dalej pokrótce omówiono oraz zestawiono w formie tabelarycznej prowadzone przez innych badaczy badania doświadczalne doczołowych połączeń śrubowych. Zwracano szczególną uwagę na liczbę szeregów śrub oraz liczbę śrub w szeregu. Część z omawianych prac oprócz wyników badań doświadczalnych zawierała również informacje na temat analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Analizie poddano opracowania z szerokiego zakresu czasowego zaczynając od roku 1964 a kończąc na pracach z roku 2017, czyli z okresu ponad 50 lat. Dalej omówiono kryteria osiągnięcia stanu granicznego nośności przez śruby oraz przez blachę czołową. Założono, że dla pozostałych elementów połączenia tj. blach środkowych, pasów oraz połączeń spawanych warunki nośności będą zachowane. W rozdziale 3.4 dokonano przeglądu metod stosowanych do weryfikacji nośności doczołowych połączeń śrubowych, zaczynając od historycznej metody naprężeń dopuszczalnych a na metodzie składnikowej kończąc. W podsumowaniu rozdziału trzeciego zauważono, że obliczenia prowadzone metodą składnikową przedstawioną w Eurokodzie 3 prowadzą do zbyt optymistycznej oceny nośności styków szczególnie w odniesieniu do styków belek o dużej wysokości z wieloma szeregami śrub.

Rozdział 4 jest najobszerniejszym rozdziałem pracy. Na 54 stronach przedstawiono zrealizowane w bardzo dużym zakresie badania doświadczalne. Przedmiotem badań były styki doczołowe wysokich blachownic z wieloma szeregami śrub oraz w zależności od badanego połączenia z dwiema, czterema lub sześcioma śrubami w szeregach przylegających do rozciąganego pasa dźwigara. Łącznie badaniu poddano cztery styki. Wysokość przekroju dwóch z badanych blachownic wynosiła 1500 mm (blachownice W1-1 i W2-1) a dwóch kolejnych 1000 mm (blachownice W3-1 oraz W3-2). Wszystkie badane elementy wykonano ze stali S355J2+N. Stosowano śruby M20 klasy 10.9 HV. Wymiary blach czołowych dobrano tak, aby w obrębie rozciąganego pasa blachownic możliwe było zastosowanie zewnętrznego szeregu śrub. Początkowa większa grubość blach wynosząca w zależności od belki 20 lub 25 mm zapewniała możliwość późniejszego frezowania do grubości odpowiednio 16 i 20 mm

zapewniającego uzyskanie możliwie płaskiej i gładkiej powierzchni. Styki doczołowe badano na specjalnie w tym celu zaprojektowanym stanowisku badawczym mocowanym do płyty wielkich sił Wydziałowego Laboratorium Badań Konstrukcji na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej. W trakcie badań dokonywano pomiaru wszystkich kluczowych wielkości tj. sił, odkształceń, rozwarcia styku, przemieszczeń, poślizgów itp. Przebieg badań rejestrowano z wykorzystaniem kamer oraz aparatów cyfrowych w tym również kamer pozwalających na rejestrację procesów szybkozmiennych. Stosowano obciążenie statyczne wprowadzane za pomocą układu dwóch siłowników hydraulicznych. Badanie prowadzono aż do zniszczenia. Oprócz badań pełnowymiarowych połączeń doczołowych, prowadzono również badania materiałowe pozwalające na określenie rzeczywistej relacji naprężenie-odkształcenie zarówno dla stali, z której wykonano blachownice jak również dla stali, z której wykonane były badane śruby. Określano również rzeczywistą nośność śrub na rozciąganie. Wyniki badań prezentowano głównie w formie graficznej w postaci wykresów obrazujących zmianę wybranych parametrów np. sił, naprężeń, przemieszczeń w funkcji momentu zginającego obciążającego badane połączenie doczołowe. Rozdział podsumowano wnioskami wskazując na konieczność rozszerzenia zakresu badań o dodatkowe elementy badawcze. Kolejne eksperymenty ze względów ekonomicznych zdecydowano się przeprowadzić z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Rozdział 5 liczący 22 strony poświęcono na przedstawienie modeli MES wcześniej przebadanych styków doczołowych. Analizy prowadzono z zastosowaniem systemu ABAQUS, który jest programem ogólnego przeznaczenia o modularnej budowie. Do analiz wykorzystywano moduł ABAQUS/CAE w zakresie modelowania oraz moduł ABAQUS/Standard pozwalający na przeprowadzenie analiz statycznych z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej, brzegowej oraz geometrycznej. Przyjęta technika modelowania zakładała opracowanie modelu przestrzennego z wykorzystaniem ośmiowęzłowych, sześciennych elementów bryłowych z liniową funkcją kształtu i zredukowanym całkowaniem oznaczonych w bibliotece programu symbolem C3D8R. Jedynie w obszarze spoin, które również modelowane były elementami przestrzennymi, stosowano inny rodzaj elementu tj. dziesięciowęzłowe, czworościenne elementy z kwadratową funkcją kształtu oznaczone symbolem C3D10. Modelując połączenie wykorzystywano zasadę symetrii modelu w płaszczyźnie Y-Z tj. w płaszczyźnie średnika blachownicy. Zabieg ten pozwolił ograniczyć rozmiar modelu, który był bardzo rozbudowany ze względu na zastosowane gęste siatkowanie. Należy zauważyć, że śruby łącznie z podkładkami i nakrętkami podobnie jak pozostałe elementy konstrukcji modelowane były z zastosowaniem elementów objętościowych.

Nieliniowy model materiału opracowano z wykorzystaniem wyników prowadzonych wcześniej badań doświadczalnych. W miejscach, w których było to konieczne definiowano możliwość wystąpienia kontaktu pomiędzy płaszczyznami modelu. Wyniki analiz numerycznych porównano z wynikami badań doświadczalnych. Porównania dokonano w zakresie sił w poszczególnych szeregach śrub, naprężeń normalnych w pasach oraz średniku blachownic oraz kąta rozwarcia styku. Wszystkie wielkości analizowano w funkcji momentu zginającego połączenie. Przeprowadzona walidacja modeli numerycznych wypadła pomyślnie co pozwoliło na przejście do kolejnego rozdziału pracy.

Rozdział 6 poświęcono na przedstawienie wyników analiz parametrycznych modeli MES opracowanych wg wytycznych przedstawionych w rozdziale 5, które jak wykazała przeprowadzona walidacja zapewniają wysoką zgodność z wynikami badań doświadczalnych. Rozdział liczy 32 strony. Oprócz czterech wcześniejszych modeli numerycznych opracowano kolejnych 51 modeli w tym: 25 dla styku W2, 14 dla styku W1 oraz 12 dla styku W3. Analizy prowadzono między innymi celem ustalenia wpływu liczby uwzględnianych szeregów śrub na nośność połączenia. Wyniki analiz numerycznych odnoszono do rezultatów uzyskiwanych z zastosowaniem metody składnikowej wg PN-EN 1993-1-8. Do innych zmienianych parametrów zaliczyć można grubość blach czołowych, gatunek stali z jakiego wykonana jest blacha, stopień sprężenia śrub, poziom dopuszczalnych naprężeń w śrubach, obecność zewnętrznego szeregu śrub oraz ewentualna obecność pionowych lub poziomych żeber usztywniających rejon połączenia. Większość rezultatów przedstawiano w formie tabelarycznej. Rozdział podsumowano obszernymi wnioskami.

Rozdział 7 rozpoczęto od przedstawienia niedoskonałości metody składnikowej w odniesieniu do oceny nośności połączeń o znacznej wysokości z wieloma szeregami śrub i wieloma śrubami w szeregu. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz rozbudowanych parametrycznych analiz modeli MES, Doktorant zaproponował dwie metody korekty. Zmodyfikowana metoda składnikowa MCM zakłada redukcję nośności króćców teowych w szeregach od 1. do 3. oraz przyjmowanie nośności pozostałych szeregów na podstawie liniowej redukcji nośności szeregu 3. Drugą propozycją to metoda sztywności i obrotu SRM, która zakłada rozdzielenie sił na poszczególne szeregi śrub w zależności od sztywności i odległości od osi pasa ściskanego. Porównanie wyników uzyskanych w wyniku analizy MES oraz wg metody składnikowej w tym z uwzględnieniem dwóch metod jej korekty przedstawiono w formie tabelarycznej. Wykazano, że metoda składnikowa po korekcie pozwala na poprawne wyznaczenie nośności połączenia zapewniając tym samym oczekiwany poziom bezpieczeństwa. Obydwie metody dawały stosunkowo zbliżone wyniki. Jako metodę

preferowaną do dalszego stosowania wskazano metodę MCM jako nieznacznie dokładniejszą oraz łatwiejszą do interpretacji i zastosowania. Na końcu rozdziału, którego objętość to 14 stron, zamieszczono zwarte podsumowanie oraz zalecenia projektowe.

Rozdział 8 poświęcono na przedstawienie wniosków końcowych. Odniesiono się do osiągnięcia zakładanego celu pracy oraz udowodnienia stawianych tez, przedstawiono szereg szczegółowych wniosków płynących z przeprowadzonych badań i analiz a także wskazano kierunki dalszych badań.

Rozprawę uzupełniono o dwa załączniki oznaczone jako A i B zawierające odpowiednio obliczenia charakterystycznej nośności połączeń wg metody składnikowej oraz uzupełniające wyniki badań materiałowych.

### **3. Ocena rozprawy**

#### **3.1. Ocena doboru tematu i naukowej wartości rozprawy**

Styki doczołowe elementów stalowych są często stosowane w konstrukcjach zarówno jako połączenie elementów zginanych jak i rozciąganych. Połączenia doczołowe spawanych blachownic, w tym również blachownic o znacznych wysokościach, coraz częściej zastępują pracochłonne w montażu sprężane połączenia zakładkowe. Związane jest to z postępem technologicznym usuwającym problemy z uzyskaniem wymaganej precyzji wykonania konstrukcji. Połączenia takie stosowane są między innymi w odpowiedzialnych obiektach o znaczeniu strategicznym np. w przemyśle wydobywczym czy energetycznym. Niestety, wytyczne projektowania zawarte w Eurokodzie 3 nie są doskonałe, szczególnie w zakresie styków wieloszeregowych z większą niż dwie liczbą śrub w szeregach. W związku z powyższym tematykę rozprawy uważam za niezwykle istotną zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Stanowi ona cenne rozszerzenie i uzupełnienie stanu wiedzy w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

Jako główny cel pracy Doktorant przyjął zbadanie rozkładu sił wewnętrznych w połączeniach doczołowych, wieloszeregowych oraz opracowanie zasad kształtowania i wymiarowania takich połączeń z wykorzystaniem metody składnikowej. Zakres przeprowadzonych badań i analiz jest bardzo obszerny i w pełni wystarczający do osiągnięcia założonego celu pracy jak również do udowodnienia postawionych dwóch tez. Przyjęta metodyka pracy zakładająca przeprowadzenie serii badań doświadczalnych na pełnowymiarowych elementach stalowych a następnie prowadzenie dalszych analiz z wykorzystaniem MES jest właściwa i dostosowana do charakteru rozprawy.

Na pochwałę zasługuje przedstawiony w rozdziale trzecim szeroki przegląd badań doświadczalnych realizowanych przez innych badaczy zestawiony w zwartej tabelarycznej formie – patrz Tabele 3.1 i 3.2. Podobne zestawienie pokazano podczas przeglądu metod obliczeń zginanych doczołowych połączeń śrubowych – Tabela 3.5. Powyższe świadczy o dużej wnikliwości i dociekliwości Doktoranta.

Najobszerniejszy czwarty rozdział pracy stanowi raport z przeprowadzonych badań doświadczalnych. Zakres zrealizowanych doświadczeń jest imponujący. Świadczy on o dużym zaangażowaniu i doświadczeniu Doktoranta. Kolejność działań, wybrane rozwiązania badawcze, metody wprowadzenia obciążenia i dokonywania pomiarów nie budzą wątpliwości. Na szczególne uznanie zasługuje zaplanowany i skutecznie zrealizowany sposób pomiaru sił rozciągających w śrubach. Wykorzystano w tym celu tensometry wklejane w otwór wcześniej wywiercony w śrubie. Wymagało to ogromnej precyzji i cierpliwości. Weryfikację poprawności pomiaru prowadzono z wykorzystaniem specjalnie w tym celu wykonanego jarzma zapewniającego możliwość wprowadzenia odpowiedniej siły sprężającej oraz dokonanie optycznego pomiaru odkształceń. Wnioski z przeprowadzonych badań pełnowymiarowych połączeń doczołowych słusznie wskazały na potrzebę rozszerzenia zakresu analiz, tym razem z wykorzystaniem modeli numerycznych MES, które pozwolą na określenie wielkości niemożliwych do ustalenia w trakcie badań doświadczalnych np. sił docisku blach czołowych.

Modele numeryczne metody elementów skończonych przedstawione w rozdziale piątym wykonano w środowisku ABAQUS. Jest to jeden z częściej wybieranych programów do rozwiązywania złożonych zagadnień w inżynierii lądowej szczególnie jeśli planowane są analizy silnie nieliniowe. Wybór środowiska modelowania uznaję za słuszny i uzasadniony. Stopień złożoności opracowanych modeli MES jest wysoki. W analizach uwzględniono nieliniowości pochodzenia zarówno materiałowego, geometrycznego jak i brzegowego. Porównanie rezultatów badań doświadczalnych i analiz MES wypadło pomyślnie. Zgodność wyników jest wysoka. Doktorant udowodnił, że potrafi skutecznie posługiwać się narzędziem jakim jest program ABAQUS. Wykazał również, że z wykorzystaniem modeli MES możliwe jest określenie naprężeń dociskowych pomiędzy blachami czołowymi co pozwoliło na określenie wartości i położenia sił wypadkowych w strefie ściskanej belki jak również w strefach występowania efektu dźwigni. W podsumowaniu rozdziału piątego zwrócił uwagę na fakt, że normowe obliczenia metodą składnikową nie zapewniają odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa co należy uznać za bardzo cenny wniosek z przeprowadzonych badań.

Rozszerzony program analiz numerycznych omówiony w rozdziale szóstym miał za zadanie umożliwić uogólnienie wniosków dotyczących rozkładu sił wewnętrznych w badanych połączeniach doczołowych. Przyjęty zakres zmienianych parametrów jest szeroki co pozwoliło na osiągnięcie założonego celu. W podsumowaniu przedstawiono wiele ciekawych wniosków z przeprowadzonych analiz. Wykazano między innymi, że rozkład sił między szeregami śrub nie jest proporcjonalny do nośności wyodrębnionych króćców co podważyło założenia stosowane w metodzie składnikowej opisywanej w Eurokodzie 3. Tym samym udowodniono pierwszą z dwóch postawionych tez pracy.

Druga z postawionych tez zakładała, że możliwa jest taka modyfikacja metody składnikowej przedstawionej, która pozwoli na uwzględnienie specyfiki styków belek wysokich w tym styków z wieloma szeregami śrub. W rozdziale siódmym ta teza pracy również została udowodniona. Obydwa zaproponowane sposoby korekty metody składnikowej zapewniły uzyskanie wyników w dużej mierze zgodnych z wynikami przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz numerycznych. Należy to uznać za jedno z kluczowych osiągnięć recenzowanej rozprawy.

Wartość naukową opiniowanej rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Kaweckiego oceniam zdecydowanie pozytywnie. Podsumowanie pracy jest zgodne z rezultatami przeprowadzonych badań i analiz. Wyznaczone kierunki dalszych prac i rozwoju pozwalają stwierdzić, że tematyka poruszana w rozprawie może być z powodzeniem kontynuowana zarówno na drodze eksperymentu fizycznego jak i numerycznego. Założone cele zostały osiągnięte a tezy pracy skutecznie udowodnione. Pewne uwagi krytyczne i dyskusyjne, które nasunęły się podczas lektury przedstawiam w kolejnym punkcie recenzji.

### **3.2. Uwagi krytyczne**

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera jej streszczenie. O ile umieszczenie streszczenia na początku opracowania nie budzi zastrzeżeń, to potraktowanie go jako jednego z rozdziałów uważam za niewłaściwe. Lepszym rozwiązaniem byłoby klasyczne umieszczenie streszczenia pracy na jej końcu poza układem rozdziałów numerowanych.

W rozdziale drugim rozpoczynającym pracę, przed omówieniem jej celów, przedmiotu, zakresu, tezy oraz metodyki powinien znaleźć się krótki podrozdział wprowadzający czytelnika w tematykę poruszaną w rozprawie. Ostatni akapit rozdziału 2.3 opisuje raczej zakres planowanych analiz niż samą metodykę. Pojawiają się w nim symbole połączeń, które nie są nigdzie wcześniej omówione. W obrębie jednego akapitu, niektóre zdania sformułowane w trybie dokonanym inne w trybie niedokonanym, co budzi konsternację czytelnika.



Rozdział trzeci z definicji miał przedstawić stan wiedzy na temat metod kształtowania, projektowania, prowadzenia badań doświadczalnych oraz analiz MES stalowych połączeń doczołowych. Zakres poruszanych zagadnień jest zatem bardzo obszerny. Niektóre z nich omawiane są bardzo szczegółowo np. ocena stanu granicznego nośności śrub na rozciąganie, zagadnienie ważne z punktu widzenia planowanych badań doświadczalnych oraz analiz numerycznych, inne z kolei dość ogólnie np. analizy połączeń z wykorzystaniem MES. Biorąc pod uwagę zakres planowanych analiz numerycznych, przegląd metod modelowania połączeń doczołowych z wykorzystaniem MES ze szczególnym uwzględnieniem możliwych technik modelowania śrub powinien być przedstawiony bardziej szczegółowo.

W rozdziale 3.3.1 większa uwaga powinna być zwrócona na używane określenia. W kilku miejscach Doktorant myli wydłużenie wyrażane w mm z bezwymiarowym odkształceniem, patrz np. podpis pod rys. 3.24. Z kolei we fragmencie tekstu opisującego rys. 3.26 mylone jest pojęcie nośności śruby i siły w niej występującej. Podsumowanie rozdziału trzeciego zamieszczone w rozdziale 3.5 jest w rzeczywistości podsumowaniem rozdziału 3.4.

Opracowując obszerny rozdział czwarty Doktorant nie uniknął pewnych potknięć. Określając właściwości materiałowe blach o grubości 16 mm badaniu poddano 5 próbek. Wielkość odkształceń próbki nr 5 wyraźnie odbiega od pozostałych wyników. Jest to prawdopodobnie błąd pomiaru. Wynik powinien zostać odrzucony.

Wnioski na str. 85 dotyczące wpływu ilości materiału zahartowanego w próbkach SM1 do SM3 na ich odkształcenia są zbyt daleko idące biorąc pod uwagę małą liczbę próbek.

Przedstawione na rys. 4.27 wyniki pomiaru odkształceń z wykorzystaniem ekstensometru optycznego obarczone są zbyt dużym błędem pomiarowym na co uwagę zwraca sam Doktorant pisząc o „*falowaniu*” pomiaru. Samo określenie „*falowanie pomiaru*” jest niewłaściwe. W tym samym miejscu, sposób wytłumaczenia występujących odkształceń o wartościach ujemnych jest mało zrozumiały.

Duże wątpliwości budzi rozdział 4.5.1. Analiza jednostek we wzorze (4.6) służącym do określenia wartości odkształceń sprężysto-plastycznych pokazuje, że w liczniku od metrów odejmowane są  $m^3$ . Rys. 4.39 nie zawiera legendy objaśniającej poszczególne krzywe. Brakuje wzoru o numerze (4.4). Zdanie rozpoczynające stronę 101 nie zawiera początku. Odnosi się wrażenie jakby brakowało tutaj fragmentu pracy.

Według rys. 4.42 w wybranych parach śrub pomierzona średnia siła znacznie przekracza nośność śrub określoną wcześniej na poziomie  $F_{t,Ru} = 277$  kN. Tłumaczone jest to zginaniem śruby wywołanym efektem dźwigni. Doktorant zauważył, że to zjawisko może mieć wpływ na wyniki jednak nie poparł tego żadnymi analizami. Zasadnym byłoby przeprowadzenie

eksperymentu (fizycznego lub numerycznego) pozwalającego na ocenę wpływu momentu zginającego na wynik pomiaru siły rozciągającej śrubę.

Na str. 117 Doktorant wspomina o problemach podczas badań styku W3-2, który był badany jako pierwszy. Problemy pojawiły się z powodu zastosowania statycznego systemu sterowania układem hydraulicznym tj. sterowania siłą zamiast systemu kinematycznego tj. sterowania przemieszczeniem zazwyczaj stosowanego podczas badań niszczących. Destabilizacja układu w końcowej fazie testu spowodowana była utratą sztywności badanej konstrukcji a nie tak jak zasugerował Doktorant zjawiskiem rezonansu.

Opis modeli numerycznych MES przedstawiony w rozdziale piątym jest zdecydowanie zbyt skromny. Brakuje w nim odpowiedzi na kilka ważnych pytań. Jako podstawowy element skończony wykorzystywany podczas modelowania przyjęto element C3D8R (ośmiowęzłowy, liniowy, prostopadłościenny ze zredukowanym całkowaniem). Wadą tego rodzaju elementu jest konieczność stosowania co najmniej trzech lub czterech elementów na grubości płyty, jeśli będzie ona poddawana zginaniu. Czy zastosowano taką gęstość dyskretyzacji? Czy rozważano zastosowanie innych elementów np. elementu C3D8I, który pozwala na osiągnięcie dobrych rezultatów nawet przy zastosowaniu jednego elementu na grubości płyty poddanej zginaniu? Czy testowano wpływ gęstości dyskretyzacji na uzyskiwane wyniki? Czy możliwe było uzyskanie rezultatów o zbliżonej dokładności z zastosowaniem mniejszej liczby elementów, co przełożyłoby się na krótszy czas obliczeń? W rozdziale brakuje również szczegółowych informacji na temat warunków brzegowych i sposobu wprowadzenia obciążenia. Jedyne zdanie na ten temat brzmi: „*Modele obliczeniowe 3D zostały zbudowane jako belki wspornikowe utwierdzone w sześciu stopniach swobody i obciążone monumentem zginającym na końcu swobodnym*”. Zdanie jest nieprecyzyjne i nie poparte chociażby najprostszym szkicem czy zrzutem ekranu z programu ABAQUS pokazującym model obliczeniowy. Niejasny jest również sposób definicji kontaktu. Stosowane w pracy określenie „*tarcie typu tangential behaviour*” jest niepoprawne. Czy zastanawiano się nad opracowaniem uproszczonego modelu śruby z wykorzystaniem elementów belkowych, powierzchniowych czy też bogatej biblioteki tzw. konektorów dostępnych w bibliotece ABAQUS? Biorąc pod uwagę planowany obszerny zakres analiz numerycznych oraz fakt, że na ich podstawie wyciągane są dalej wnioski kluczowe dla realizacji celu i udowodnienia tez pracy, uważam, że rozdział 5.1 powinien być napisany z większą starannością.

### 3.3. Uwagi szczegółowe, w tym redakcyjne

Praca ogólnie napisana jest poprawną polszczyzną. Zdarzają się jednak fragmenty stylistycznie niepoprawne. Na przykład na str. 31 przeczytać możemy: „*Wiele programów komputerowych, wspomagających tworzenie dokumentacji warsztatowej posługuje się katalogami tworząc analogiczne, w stosunku do prezentowanych w katalogach połączeń, makra implementowane do konstrukcji projektowanego obiektu.*” Z kolei na str. 169 przeczytać możemy: „*Modele dodatkowe zostały stworzone w celu weryfikacji podstawowych typów połączeń pod względem ich zróżnicowania*”. Zdania są niezrozumiałe.

Formatowanie tekstu na ogół jest właściwe. Brakuje jednak kontroli tzw. sierot, czyli spójników na końcach wersów. Brakuje rozróżnienia pomiędzy myślnikiem „-” a łącznikiem „,-”. Znaki te stosowane są wymiennie a zasady używania spacji w ich otoczeniu nie są przestrzegane. Problem z używaniem spacji dotyczy również zapisu wielkości fizycznych. Bardzo często brakuje spacji pomiędzy znakiem równości a symbolem wielkości, jej wartością i jednostką np.  $t_p=16\text{mm}$ . Przykłady takich błędów podano na końcu recenzji. W nagłówkach stron zamiast pełnego tytułu pracy powtarzanego na każdej stronie rozprawy powinien raczej znaleźć się tytuł rozdziału.

W rozprawie zamieszczono wiele rysunków, łącznie 130 szt. Większość z nich nie budzi zastrzeżeń, są wartościowe i bardzo szczegółowe. Niektóre jednak powinny zostać dopracowane celem poprawy ich czytelności. Do najczęstszych niedociągnięć należą: zbyt mały rozmiar czcionki np. rys. 3.4, 3.7, 3.19, 4.25, 4.28, 5.7; zbyt cienkie linie np. rys. 3.20, 3.22, 3.24, 3.27; zbyt duża szczegółowość np. rys. 3.7, 3.9, 6.5; zbyt długie, nawet ośmiowersowe podpisy pod rysunkami np. rys. 3.17, 3.18, 3.19. W całej pracy brakuje wypracowanego jednego standardu wykonywania rysunków obejmującego wielkość i krój czcionki, grubości linii a w przypadku wykresów sposobu opisu osi czy legendy. W przypadku wykresów z dużą liczbą krzywych stosowano ich rozróżnienie wyłącznie za pomocą kolorów. W skrajnych przypadkach było to dziesięć ciągłych linii o różnych kolorach trudnych do rozróżnienia np. rys. 3.23, 4.17.

Podobnie jak w przypadku rysunków, również w przypadku tabel nie został wypracowany jeden standard ich przedstawiania obejmujący np. grubość linii czy wielkość czcionki – porównaj Tabele 3.3, 4.5, 6.12, 5.1 czy 7.2. Czcionki często są zbyt małe. W wielu tabelach stosowana jest zbyt duża dokładność – patrz np. Tabele 4.3, 4.4, 4.9 czy 5.2.

Poniżej wymieniono część z dostrzeżonych innych błędów:

- Str. 15        jest *badan*, powinno być zamiast *badan*
- Str. 19        jest  $n_{br} \geq 2$ , powinno być  $n_{br} \geq 2$
- Str. 23        jest *wzdłuż*, powinno być *wzdłuż*
- Str. 30        jest *wystająca*, powinno być *wystającą*
- Str. 35        jest  $h=610$ , IPE300, powinno być  $h = 610$ , IPE 300
- Str. 38        jest  $M=450$  kN, powinno być  $M = 450$  kN
- Str. 38        jest *rozsiw*, powinno być np. *rozrzut*
- Str. 42        jest  $f_{ub} = 620$  MPa,  $f_y = 345$  MPa, powinno być  $f_{ub} = 620$  MPa,  $f_y = 345$  MPa
- Str. 43        jest  $t_p = 0,5d$ , powinno być  $t_p = 0,5d$
- Str. 89        jest *extensometru*, powinno być *ekstensometru*
- Str. 90        jest *pokapują*, powinno być *pokazują*
- Str. 122       jest *zadysponowano*, powinno być np. *zdefiniowano*
- Str. 122       jest 20kN, 165kN, powinno być 20 kN, 165 kN
- Str. 122       jest *Hoeck'a*, powinno być *Hooke'a*
- Str. 147       jest *ranienia*, powinno być *ramienia*
- Str. 152       jest *Szereg*, powinno być *Szeregi*
- Str. 173       jest *ilość*, powinno być *liczba*
- Str. 173       jest *redystrybucje*, powinno być *redystrybucję*

#### 4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgra inż. Pawła Kaweckiego pt. „*Stany graniczne nośności wielośrubowych styków doczołowych dźwigarów spawanych*” stanowi moim zdaniem, wartościowe osiągnięcie naukowe w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Należy podkreślić istotne i wyraźnie zaakcentowane znaczenie praktyczne rozprawy. Autor wykazał się sumiennością, pracowitością i precyzją w planowaniu oraz realizacji złożonych badań doświadczalnych pełnowymiarowych stalowych elementów konstrukcyjnych. Udowodnił umiejętność łączenia praktycznej wiedzy inżynierskiej z wiedzą teoretyczną wymaganą podczas prowadzenia zaawansowanych analiz numerycznych. Ponadto Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki badawczej. Powyższe świadczy o odpowiednim przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia dalszych prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne przedstawione w recenzji nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy, którą oceniam bardzo wysoko. Rozprawę uważam za interesującą zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. **Stwierdzam, że główny cel rozprawy został osiągnięty a postawione tezy udowodnione.**

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że **recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania** przewidziane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r. oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora.

**Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony** przed Radą Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.

