

Dr hab. inż. Mirosław Broniewicz, prof. PB  
Katedra Konstrukcji Budowlanych  
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok  
m.broniewicz@pb.edu.pl  
+48 601 920 601

Białystok, 17.10.2021 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Krzysztofa Lenia  
**OCENA WŁAŚCIWOŚCI STRUKTURALNYCH ROZCIĄGANYCH POŁĄCZEŃ  
KOŁNIERZOWYCH METODĄ SKŁADNIKOWĄ**

### 1. PODSTAWA FORMALNA RECENZJI

Recenzja została wykonana na prośbę przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria i Lądowa i Transport Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego, przekazaną w formie pisma z dnia 15.07.2021 r.

### 2. PODSTAWA PRAWNA RECENZJI

Podstawą prawną wykonania recenzji jest Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t. j. Dz.U. z 2017 r., poz. 1789 ze zm.) w zw. z art. 179 ust. 2 i 3 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 ze zm.).

### 3. PRZEDMIOT RECENZJI

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pod tytułem „OCENA WŁAŚCIWOŚCI STRUKTURALNYCH ROZCIĄGANYCH POŁĄCZEŃ KOŁNIERZOWYCH

**METODĄ SKŁADNIKOWĄ**", wykonana na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej przez mgr inż. Dariusza Krzysztofa Lenia. Promotorem niniejszej rozprawy jest dr hab. inż. Lucjan Ślęczka, prof. PRz.

Jako podstawę oceny przygotowanej rozprawy doktorskiej przyjęto następujące kryteria:

- Wybór przedmiotu badań.
- Poprawność sformułowanego celu i tezy pracy.
- Zasadność przyjętej metodyki badań.
- Odpowiedniość układu pracy i porządku treści pracy.
- Istotność rozprawy, jej oryginalność i przydatność praktyczna.
- Uwagi do pracy.
- Wnioski końcowe.

#### 4. WYBÓR PRZEDMIOTU BADAŃ

Wybór przez Autora problematyki oceny właściwości strukturalnych rozciąganych połączeń kołnierzowych metodą składnikową jako przedmiotu badań należy uznać za w pełni uzasadnione, a sformułowanie tematu jako trafne.

Kształtowniki o przekrojach zamkniętych, jako nowoczesne, łatwe w stosowaniu, a jednocześnie przyjazne środowisku elementy stalowe, wykorzystuje się w szerokim zakresie zastosowań. W budownictwie stosuje się je w konstrukcjach stałych i tymczasowych, w elementach głównych i drugorzędnych w szerokich granicach wymiarowych. Szczególnie korzystne zastosowanie znajdują te kształtowniki w budownictwie komunikacyjnym (mosty, estakady, kładki dla pieszych), w budownictwie komunalnym (hale wystawowe i dworcowe), w budownictwie sportowym (trybuny, stadiony). Rury okrągłe znajdują główne zastosowanie w obiektach, w których dominującym obciążeniem jest parcie wiatru lub wody. Są to obiekty takie jak mosty, wieże, maszty. We wspomnianych konstrukcjach często spotykane są połączenia śrubowe z wykorzystaniem kołnierzy okrągłych, szczególnie

w przypadku połączeń słupów. Tego typu połączenia były przedmiotem wielu badań w ciągu ostatnich trzech dekad. Dzięki nim zaproponowano lub udoskonalono metody projektowe przy użyciu podejść eksperymentalnych, analitycznych lub numerycznych, co doprowadziło do powstania różnych wytycznych dotyczących projektowania takich połączeń. Pozwalają one na ogół na wyznaczenie nośności śrub przy rozciąganiu oraz nośności blach czołowych przy zginaniu w stanach sprężystym i sprężysto-plastycznym pracy złącza. Ocena pozostałych właściwości połączeń, jak stanu granicznego rozwarcia styku czy sztywności początkowej, jest zagadnieniem, jak dotąd, nierozwiązanym.

Poza tym, Eurokod 3 część 1.8 (dotycząca projektowania połączeń) nie podaje wytycznych projektowych dla rozciąganych połączeń kołnierzowych rur, co stwarza trudności dla inżynierów praktyków, którzy mają do czynienia z takimi połączeniami.

Obszar badawczy recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy problematyki oceny nośności doczołowych połączeń śrubowych z blachą kołnierzową kształtowników zamkniętych o przekroju kołowym. Połączenia tego typu stają się obecnie coraz bardziej popularne, ponieważ stanowią ekonomiczne rozwiązanie łączenia stalowych konstrukcji rurowych, zapewniając łatwy i szybki montaż oraz atrakcyjny kształt złącza.

## 5. CEL I TEZA PRACY

Autor sformułował **tezę rozprawy**, jako:

„Siła powstająca w pojedynczej śrubie złącza kołnierzowego (z uwzględnieniem efektu dźwigni) oraz sztywność początkowa takiego styku przy działaniu siły podłużnej mogą zostać wyznaczone za pomocą modeli mechanicznych”.

W celu udowodnienia przedstawionej tezy rozprawy Autor określił:

1. **Merytoryczny cel** pracy, jako ocenę słabo rozpoznanych właściwości strukturalnych nieuźebrowanych, rozciąganych połączeń kołnierzowych kształtowników zamkniętych o przekroju kołowym przy zastosowaniu metody składnikowej.
2. **Praktyczny cel** pracy, jako opracowanie procedury umożliwiającej oszacowanie siły w śrubie w stanie granicznym rozwarcia styku oraz sztywności początkowej

połączenia doczołowego rur okrągłych obciążonego siłą podłużną.

## 6. OMÓWIENIE TREŚCI ROZPRAWY

Rozprawa doktorska, będąca przedmiotem recenzji została przedstawiona w formie monografii naukowej obejmującej:

- 178 stron tekstu zasadniczego,
- 32 tabele i 103 rysunki ponumerowane, podpisane i umieszczone w tekście zasadniczym,
- literaturę, obejmującą 73 krajowe i zagraniczne pozycje bibliograficzne (w tym 42 w języku angielskim, 11 w języku niemieckim), w tym 4 współautorskie artykuły Autora rozprawy napisane w języku polskim i angielskim oraz 16 norm,
- streszczenie rozprawy w języku polskim,
- streszczenie rozprawy w języku angielskim,
- załączniki obejmujące inwentaryzację geometryczną badanych elementów (1 rysunek, 36 tabel), wyniki analizy numerycznej połączeń niesprężonych (11 rysunków), wyniki analizy numerycznej połączeń sprężonych (11 rysunków), charakterystykę techniczną czujnika CL 20 do pomiaru sił wywieranych przez śruby.

Rozprawa składa się z sześciu zasadniczych części oraz wstępu i podsumowania. Wszystkie części rozprawy stanowią logiczną całość, tzn. kolejne rozdziały stopniowo wprowadzają czytelnika do tematyki rozprawy i kierują go do jej finału oraz wzajemnie się uzupełniają.

**Rozdział 1** zawiera wprowadzenie, określa wagę i uzasadnienie podjęcia tematu.

**Rozdział 2** przedstawia analizę wiedzy dostępnej w literaturze, dotyczącej badań eksperymentalnych, analitycznych i numerycznych w zakresie nośności i odkształcalności połączeń doczołowych kształtowników zamkniętych o przekroju kołowym oraz przybliżenie podstaw teoretycznych ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień odnoszących się do nośności śrub i blach czołowych oraz oceny możliwych form zniszczenia takich połączeń. W ramach tego rozdziału opisano badania

doświadczalne oraz numeryczne analizy MES połączeń doczołowych z rur z blachami pełnymi oraz blachami kotnierzowymi. Badania omówiono w sposób chronologiczny ułożony według kolejności wydarzeń i ich następstwa w czasie.

Na wstępie Doktorant przedstawił szandarowe dla omawianego zagadnienia badania przeprowadzone przez Igarashiego na Uniwersytecie w Osace, które przyjęto za podstawę procedury obliczeniowej tego typu połączeń w poradniku CiDECT dotyczącym projektowania konstrukcji stalowych z rur o przekroju kołowym. Badania dotyczyły połączeń doczołowych wzmocnionych i niewzmocnionych i obejmowały analizę nośności granicznej zgodnie z hipotezą wytrzymałościowa Coulomba-Treski.

Następnie, Doktorant odniósł się do badań Kato i Hirose, którzy zastosowali odmienne podejście szacowania nośności tego typu połączeń, oparte na metodzie linii załomów plastycznych podczas uplastycznienia blachy czołowej.

W dalszej części tego rozdziału zostały przedstawione badania Agreskova i Bjornbak-Hansena, którzy zaproponowali uproszczoną procedurę pozwalającą na obliczenie nośności tego typu połączeń, badania Cao i Bela, którzy po raz pierwszy stworzyli zweryfikowany doświadczalnie model numeryczny MES, a także, przeprowadzone na Uniwersytecie w Liege, badania Van-Longa z 2011 roku w ramach realizacji programu europejskiego poświęconego połączeniom śrubowym kształtowników o przekrojach zamkniętych oraz obszerne, najnowsze badania prof. Maëla Couchaux wraz z zespołem uwzględniające w analizie numerycznej strefy kontaktu między łbem śruby i blachą kotnierza oraz trzpieniem śruby i ścianką otworu na śrubę.

Dużą uwagę Doktorant poświęcił polskim badaniom tego typu połączeń, zarówno z blachą pełną, jak i kotnierzową, przeprowadzonym przez dr inż. Jana Łagunę. Porównując stany granicznych nośności śrub i nośności blachy czołowej, wyprowadził on wzory na minimalną grubość blachy czołowej w wypadku zarówno jej uplastycznienia na całym obwodzie, jak i lokalnego uplastycznienia się wokół najbardziej wyężonych śrub.

W ostatniej części rozdziału poświęconego omówieniu dotychczasowych badań Autor przeanalizował prace badawcze dotyczące oceny nośności połączeń doczołowych rur, które za model obliczeniowy przyjęły wyodrębniony króciec kątowy tzw. L-stub. Były to najnowsze badania przeprowadzone głównie przez Petersena w

2013 roku, Seidela w 2001 roku oraz Couchau w 2010 roku. Wszyscy oni zajmowali się różnymi formami utraty nośności wydzielonego styku kąтового wykorzystując analizę sprężystą i plastyczną oraz przedstawiając wzory na nośność graniczną połączenia w zależności od rozpatrywanego modelu zniszczenia.

W ostatnim punkcie tego rozdziału Doktorant omówił zagadnienia dotyczące projektowania połączeń doczołowych przedstawione w normach przedmiotowych PN-EN 1993-1-8 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów oraz PN-EN 1993-3-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty. Zwrócił uwagę na metodę składnikową, która została przyjęta w tych normach za podstawę obliczeń analitycznych oraz brak odpowiednich procedur projektowych dla połączeń doczołowych elementów rurowych.

W podsumowaniu rozdziału 2 Autor wskazał, że porównanie przeprowadzonych dotychczas badań doświadczalnych połączeń z ich analizą numeryczną wykazuje dobrą zgodność otrzymanych wyników, co potwierdza słuszność oceny nośności tego rodzaju połączeń przy użyciu modeli numerycznych. Ponadto sformułował drugą, ważną dla późniejszych swoich rozważań opinię, że dotychczas przeprowadzone badania połączeń doczołowych rur okrągłych skupiały się głównie na wyznaczeniu nośności granicznej połączeń, natomiast nie rozpoznano w nich zagadnień związanych z oceną stanu granicznego rozwarcia styku oraz wyczerpujący sposób zagadnień związanych z określeniem wartości sił w śrubach, co ma duże znaczenie przy projektowaniu konstrukcji stalowych masztów i wież kratowych.

**Rozdział 3** przedstawia tezę pracy, cel i zakres pracy, opis zawartości rozprawy oraz hipotezę badawczą, opartą na związku przyczynowym między wartościami sił w śrubach doczołowego złącza kołnierzowego rur okrągłych, obciążonego siłą podłużną oraz sztywności początkowej a modelem mechanicznym takiego połączenia zbudowanym zgodnie z zasadami metody składnikowej.

**Rozdział 4** został dedykowany opisowi badań doświadczalnych służących pozyskaniu danych do obliczeń numerycznych oraz ich walidacji. Badania dotyczyły dwóch rodzajów elementów próbnych, z blachą kołnierzową oraz z blachą pełną. Elementy badawcze dobrano w taki sposób, aby parametrami zmiennymi były liczba i właściwości mechaniczne łączników oraz grubość i średnica kołnierzy, a także

rozstaw łączników, co pozwoliło na uzyskanie różnych postaci zniszczenia złącza. Przedstawiono metodykę dokonywania pomiarów, szczegóły konstrukcyjne stanowiska oraz sposób realizowania obciążenia. Zamieszczono wyniki badań materiałowych, opisano przebieg i wyniki badań doświadczalnych.

W **Rozdziale 5** Doktorant przedstawił model numeryczny analizowanych połączeń. Zaprezentował w nim szczegóły modelowania części składowych połączenia, sposób jego obciążania, przebieg walidacji modelu numerycznego oraz porównanie wyników otrzymanych z obliczeń numerycznych i badań doświadczalnych. Przyjęty model obejmował wycinek wydzielonego króćca teowego rzeczywistego połączenia użytego do badań doświadczalnych. Uwzględniając wyniki doświadczalne zbudowano modele materiałowe blach czołowych oraz łączników. Porównano wyniki obliczeń otrzymanych za pomocą modeli numerycznych z rezultatami badań doświadczalnych.

**Rozdział 6** przedstawia analizę parametryczną wpływu 11 wyspecyfikowanych parametrów na zachowania się połączeń kotnierzowych. Analizę zastosowano w odniesieniu do trzech grup połączeń, różniących się stopniem szczegółowości modelu MES. Ze względu na szczególną efektywność i możliwość opisywania nieliniowych modeli obiektu badań, a także możliwość weryfikacji modelu liniowego, przyjęto plan Hartleya o oznaczeniu PS/DS-P:Ha6 przy obszarze zmienności na hipersześcianie. Plan ten należy do planów statycznych, zdeterminowanych dla trzech poziomów zmienności wielkości wejściowych, w którym stosuje się pięć różnych wartości dla każdej wielkości wejściowej. Umożliwił on Doktorantowi uzyskanie modelu matematycznego badanego procesu w postaci wielomianu drugiego stopnia, wygodnej do analizy matematycznej i badań modelowych. Przedstawiono wyniki analizy parametrycznej oraz wyznaczono wielomian aproksymacyjny pozwalający na określenie wpływu wyszczególnionych parametrów na wartość współczynnika efektu dźwigni.

**Rozdział 7** liczy 27 stron i zawiera zasadniczą część pracy poświęconą budowie modelu składnikowego opartego na wyodrębnionym króćcu kątowym, w którym wydzielone składniki połączenia kotnierzowego reprezentowane są przez zastępcze modele sprężynowe o określonej sztywności. Doktorant przedstawił charakterystyki sztywnościowe poszczególnych części modelu mechanicznego

połączenia kołnierzewego, który pozwala zarówno na określenie sił w śrubach oraz sztywności początkowej styku. W dalszej części przeprowadzono weryfikację opracowanego modelu mechanicznego przy wykorzystaniu metody elementów skończonych w odniesieniu zarówno do wartości współczynnika efektu dźwigni jak i sztywności początkowej połączenia.

**Rozdział 8** zawiera podsumowanie i wnioski z całej pracy oraz kierunki przyszłych prac badawczych. Autor przedstawił efekty uzyskane w rozprawie, ocenił poprawność otrzymanych wyników, zwrócił uwagę na stosunkowo dużą dokładność stworzonego modelu obliczeniowego i jego uniwersalność w zastosowaniu zarówno do połączeń sprężanych jak i niesprężanych. W tej części pracy Doktorant wskazał na potencjalne korzyści wynikające z zastosowania opracowanych przez niego narzędzi obliczeniowych

## 6. OGÓLNA OCENA DYSERTACJI

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest ocena nośności połączeń kołnierzowych kształtowników zamkniętych o przekroju kołowym przy zastosowaniu metody składnikowej. Temat rozprawy, jej zakres oraz przewidywane cele dobrze wiążą się z zagadnieniami praktycznymi i naukowymi podejmowanymi obecnie w dziedzinie budownictwa stalowego w Polsce i na świecie. Zagadnienie jest potraktowane całościowo, tzn. zawiera część teoretyczną, przegląd literatury, badania laboratoryjne, modelowanie numeryczne oraz procedurę analityczną. Według recenzenta jest to prawidłowe ujęcie badanego zagadnienia i efektywna próba zrozumienia zjawiska wpływu efektu dźwigni na wielkość siły w łącznikach oraz na sztywność początkową rozciąganego połączenia kołnierzewego rur okrągłych na łączniki mechaniczne.

Zasadniczą wartość merytoryczną pracy stanowi analiza MES połączeń rurowych z blachą kołnierzową oraz blachą pełną, przeprowadzona na podstawie walidowanych doświadczalnie modeli numerycznych oraz opracowanie modelu mechanicznego połączenia kołnierzewego przy wykorzystaniu metody składnikowej, pozwalającego na określenie sił w łącznikach oraz sztywności początkowej złącza. Modele numeryczne zostały utworzone poprawnie, z uwzględnieniem miejsc



koncentracji naprężeń i powierzchni kontaktu. Poziom zagęszczenia siatki MES przy doborze bryłowego elementu skończonego o kwadratowych funkcjach kształtu pozwolił na poprawne utworzenie mapy naprężeń w modelu.

Walidacja wykazała zbieżność krzywych doświadczalnych i krzywych otrzymanych numerycznie w zakresie przed- i pokrytycznym. Porównanie wyników nośności i współczynnika efektu dźwigni wypada pomyślnie.

Następnie przeprowadzona została analiza parametryczna połączeń kołnierzowych. Do wyznaczenia wartości badanych parametrów poprawnie zastosowano plan badań Hartleya. Analiza parametryczna pozwoliła na uzyskanie wielomianu szacującego nośność połączenia oraz wyciągnięcie wniosków dotyczących sposobu badania połączeń będących tematem pracy doktorskiej.

Złożony charakter rozpatrywanego zagadnienia zdeterminował przyjętą procedurę badawczą obejmującą badania eksperymentalne oraz analizy numeryczne 3D uwzględniające nieliniowości geometryczne i materiałowe elementów i łączników. Autor rozprawy wykazał ogólną wiedzę teoretyczną w uprawianej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na szczególną uwagę zasługuje rozdział dotyczący podstaw teoretycznych. Został zaprezentowany z dużym zrozumieniem zagadnień dotyczących oceny nośności granicznej rozciąganych połączeń doczołowych kształtowników o przekrojach zamkniętych. Ponadto, nowatorskim elementem recenzowanej pracy, jest opracowany przez Autora model badawczy połączenia który, uwzględniając przyjęte na wstępie parametry połączeń, pozwolił na ekonomiczne przeprowadzenie badań doświadczalnych w skali naturalnej i umożliwił znaczne skrócenie czasu analizy numerycznej.

Pomimo zachowania wymaganej formy pracy i przedstawienia dużej liczby danych naukowych, struktura pracy jest przejrzysta i w sposób obrazowy ukazuje zastosowaną metodykę naukową. Czytelnik, zagłębiając się w treść pracy, nie gubi ścieżki jaką podążał Doktorant w swoich rozważaniach naukowych i nie jest zmuszony samodzielnie dociekać realizacji zamierzonego celu pracy oraz . Zagłębiając się w treść pracy nie musi odkrywać efektów jej realizacji, potwierdzających sformułowaną tezę pracy. Układ pracy jest wyjątkowo przejrzysty, a sama praca jest niezwykle starannie zredagowana, napisana poprawnym językiem, z rysunkami

wysokiej jakości i obszerną bibliografią, zawierającą najważniejsze dane literaturowe dotyczące badanych połączeń. Rozprawa zawiera ogromny materiał faktograficzny, co zasadniczo nie sprzyja przejrzystości i łatwości czytania, niemniej Doktorant poradził sobie bardzo dobrze z przedstawieniem wykonanych badań doświadczalnych oraz obliczeń numerycznych.

Można zauważyć, że praca obejmuje znacznie szersze zagadnienie niż zastosowanie metody składnikowej do określenia podstawowych właściwości strukturalnych połączeń kołnierzowych. W wyniku jej realizacji uzyskano różne modele zniszczenia połączeń obejmujące głównie zerwanie śrub, uplastycznienie zginanego kołnierza oraz interakcję obu tych zjawisk, w zależności nie tylko od wielkości parametrów geometrycznych złącza (grubość i średnica zewnętrzna kołnierza, rozmieszczenie śrub) oraz liczby i wytrzymałości łączników, lecz także od rodzaju blach czołowych (kołnierzowa, pełna), których to wpływ na postać zniszczenia połączeń, jak można było się spodziewać, jest znaczący. Zdaniem Recenzenta to jest bardzo ważne osiągnięcie Autora pracy.

Lektura rozprawy potwierdza, że Doktorant posiadał umiejętność w posługiwaniu się nowoczesnymi metodami obliczeń. Na szczególne podkreślenie zasługuje również bardzo staranna walidacja modelu MES w odniesieniu zarówno do danych materiałowych, jak i zastosowanych łączników. Dla każdego, kto zajmował się obliczeniami numerycznymi jest jasne, że stanowi to podstawę oceny wiarygodności uzyskanych wyników. Doktorant radzi sobie również bardzo dobrze z fizyczną analizą otrzymanych wyników i porównaniem z otrzymanymi danymi doświadczalnymi.

Pochwalić także należy realizację złożonego programu badawczego oraz wysoką biegłość Autora w posługiwaniu się narzędziami obliczeniowymi.

W punkcie 5.3. Autor przedstawia 4 wnioski z przeprowadzonych obliczeń numerycznych, które zdaniem Recenzenta są ogólne i powszechnie akceptowalne. Recenzent spodziewałby się bardziej szczegółowej analizy otrzymanych wartościowych wyników przeprowadzonych badań numerycznych.

W opisie badań doświadczalnych brak jest pogłębionej oceny otrzymanych wyników. Spostrzeżenia i zależności będące wynikiem eksperymentu najlepiej umieścić w tablicy w celu określenia, który czynnik ma największy wpływ na

zmiennosc wyników. Ze wzgledu na niewielki zakres zmian wartosci parametrów zagrozeniem jest mozliwosc wystapienia fragmentarycznosc zebranych informacji oraz mozliwosc skonstruowania blednego modelu w przypadku pominięcia istniejących, wspólnych zależności analizowanych czynników.

Pewne wątpliwości może też budzić przedstawione w pracy porównanie wyników badań doświadczalnych z nośnościami wyznaczonymi na podstawie stosowanych obecnie procedur obliczeniowych. Autor stwierdza, że różnice wyników są znaczne, a same badania doświadczalne zostały potraktowane jako służące jedynie walidacji modelu numerycznego.

Należy także zauważyć, że zastosowane połączenia elementów są połączeniami podatnymi. Stąd, jak to również stwierdza Autor w swojej pracy, istotne jest aby w wypadku numerycznej analizy układów kratowych z kształtowników zamkniętych uwzględnić sztywność połączeń, co pozwoliłoby na bardziej realne odwzorowanie zachowania się całej konstrukcji.

Na zakończenie ogólnej oceny merytorycznej należy również zaznaczyć, że mgr inż. Dariusz Krzysztof Leń opublikował częściowo wyniki swojej rozprawy w czasopiśmie krajowym, potwierdzając w ten sposób słuszność wybranego zagadnienia naukowego i wartość otrzymanych rezultatów badawczych.

## 7. WALORY ROZPRAWY I JEJ PRZYDATNOŚĆ PRAKTYCZNA

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczny i praktyczny. Autor opracował model mechaniczny rozciąganych połączeń kołnierzowych rur o przekroju kołowym wykorzystując metodę składnikową. Umożliwia ona wyznaczenie wartości siły w śrubie dla połączeń sprężonych i niesprężonych oraz oszacowanie sztywności początkowej połączeń kołnierzowych. Doktorant dokonał obszernych badań literaturowych wskazując na nierozpoznane w nich zagadnienia dotyczące określania wartości sił w śrubach oraz nieuwzględniające istotnego, z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji, stanu granicznego rozwarcia blach.

Jako najważniejsze oryginalne osiągnięcia przedstawione przez mgr inż. Dariusza Krzysztofa Lenia w recenzowanej rozprawie doktorskiej należy uznać:

- Opracowanie koncepcji badań, dających możliwość osiągnięcia celów

sformułowanych w rozprawie.

- Stworzenie modelu numerycznego połączenia, walidowanego wynikami badań doświadczalnych.
- Identyfikacja i ocena mierzalnych parametrów wpływających na nośność połączenia i opracowanie modelu matematycznego umożliwiającego obliczeniowe określenie jego głównych cech strukturalnych.
- Zastosowanie autorskiego modelu mechanicznego rozciąganych połączeń kołnierzowych rur okrągłych, zbudowanego na podstawie metody składnikowej, pozwalającego określić sztywność początkową oraz siły w śrubach dla sprężystej pracy złącza.

Zaproponowana metoda określania nośności połączeń kołnierzowych rur o przekroju kołowym pozwala projektantom w sposób prosty i szybki określić cechy charakterystyczne połączenia i zapewnić bezpieczeństwo użytkowania kratowych konstrukcji rurowych

Wyniki rozprawy przyczynią się do istotnego poszerzenia wiedzy z zakresu stosowania sprężanych i niesprężanych doczołowych, kołnierzowych połączeń rurowych i umożliwią efektywne projektowanie tego typu połączeń wypełniając lukę istniejącą w Eurokodzie 1993-1-8.

## 8. UWAGI SZCZEGÓŁOWE DO TEKSTU ROZPRAWY

Str. 31. Należy zauważyć, że propozycja zawarta w poradniku CIDECT zaadaptowana z badań Igarashiego jest praktyczna i, jak pokazuje dotychczasowa praktyka, bezpieczna w stosowaniu. Stanowi ona, że w przypadku wystąpienia efektu dźwigni przy wyężeniu połączenia na poziomie uplastycznienia materiału rury należy przyjąć maksymalną wartość siły podważającej równą  $1/3$  wytrzymałości śruby. Wówczas do projektowania połączenia należy przyjąć maksymalną siłę w śrubie równą  $67\%$  jej nośności na rozciąganie. Jest to prosty i bezpieczny dla inżynierów sposób projektowania rozciąganych połączeń doczołowych elementów wykonanych z rur.

Str. 40. W porównaniu z innymi procedurami obliczeniowymi przedstawionymi przez

Doktoranta w pracy, propozycja zawarta w raporcie Rockeya z 1970 roku jest zbyt empiryczna i wymaga wielu danych określanych w sposób doświadczalny.

Str. 47. Propozycja sformułowana przez Couchaux w 2010 z kolei jest zbyt teoretyczna i właściwie nieprzydatna projektantom

Str. 70. Większość omówionych badań poświęconych było zachowaniu takiego połączenia w warunkach monotonicznych obciążenia, podczas gdy zachowanie pod obciążeniami cyklicznymi lub powtarzającymi się rzadko było brane pod uwagę, w szczególności do połączeń rur ze stali o wysokiej wytrzymałości.

Str. 78. Jakie wyężenie wstępne śrub osiągnięto w wyniku wprowadzenia niewielkiego sprężenia śrub w celu uzyskania ścisłego przylegania?

Str. 78. Czy szlifowanie blach pozwoliło na uniknięcie deformacji spawalniczych? Czy wykonano pomiary deformacji po szlifowaniu? Dlaczego niektóre blachy w ogóle nie zostały poddane szlifowaniu? Jak wskazują dostępne w literaturze przedmiotu wyniki pomiarów deformacji blach czołowych wskutek wykonywania grubych spoin, pomierzone odkształcenia brzegów mogą wynosić w przypadku np. blach o grubości 15 mm od 1,8 do 3,6 mm, a w przypadku blach o grubości 25 mm nawet do 5 mm.

Str. 79. Dlaczego zastosowano spoiny pachwinowe a nie czołowe z pełnym przetopem? W celu osiągnięcia zamierzonego efektu badań spoina powinna mieć wytrzymałość równą lub wyższą niż łączone elementy. Jaką zastosowano metodę spawalniczą (elektroda otuloną, TIG)? Ma to wpływ na postać zmian strukturalnych w obszarze złącza spawanego oraz powstawanie naprężeń i odkształceń w spawanym elemencie.

Str. 81. Gdzie umieszczono bazę pomiarową do ekstensometru optycznego? Czy uwzględniano w doborze bazy parametry ekstensometru, takie jak rozdzielczość, aby dokonać pomiaru wydłużenia z odpowiednią dokładnością?

Str. 82. Jaka była odległość pomiędzy zaciskami a blachami czołowymi badanych połączeń (np. 500 mm)? Czy była wystarczająco duża aby uniknąć wpływu nierównomiernego rozkładu naprężeń w rurach w pobliżu badanych połączeń pochodzących od mimośrodowego obciążenia złącza wskutek imperfekcji związanych z zamocowaniem elementów badawczych w szczękach maszyny

wytrzymałościowej czy też związanych z imperfekcjami geometrycznymi kształtu elementów? Czy obciążenia działające na elementy badawcze można uznać za doskonale osiowe, zakładając, że te imperfekcje są małe?

Str. 86, Rys. 4.9. Zwiększenie liczby łączników z 2 do 4 powoduje prawie dwukrotne zwiększenie nośności połączenia. Natomiast takiego skutku nie przynosi dalsze zwiększanie liczby łączników np. z 4 do 6. Także zastosowanie śrub o większej wytrzymałości nie powoduje proporcjonalnego zwiększenia wielkości przenieszonego obciążenia.

Str. 96, Rys. 4.21. Tensometry powinny zostać rozmieszczone w taki sposób aby mierzyć odkształcenia w strefach krytycznych, gdzie można by się spodziewać rozwoju stref plastycznych, pęknięć, jak np. na blachach kołnierзовych czy ściankach rury w sąsiedztwie spoin oraz, co jest bardziej skomplikowane, na trzpieniach śrub. Dlaczego nie rozmieszczono tensometrów na blachach kołnierзовych w sąsiedztwie spoiny?

Str. 97, Rys. 4-22. Czym można wytłumaczyć zauważone strefy ściskania w ściankach elementów rurowych złączy rozciąganych na 2 śruby?

Str. 98. Czy w stanie sprężystym zachowania się połączenia mierzono rozwarście złącza w stanie odciążenia?

Str. 99, Tabela 4.5. Z porównania otrzymanych z badań rezultatów wynika, że grubość blachy kołnierza jest najważniejszym parametrem wpływającym na wielkość siły w śrubie, co nie jest jawnie uwidocznione w zaprezentowanych w badaniach literaturowych procedurach analitycznych. Zwiększenie grubości z 10 mm do 25 mm trzykrotnie powiększyło nośność połączenia. Ponadto, widoczne jest (poza propozycją Łaguny) pewne niedoszacowanie nośności określanej na podstawie zaprezentowanych modeli analitycznych, co stanowi bezpieczne podejście dla projektantów.

Str. 105. Jaki rodzaj kontaktu wykorzystano do symulacji powierzchni stykowych?

Str. 106. Jakie rozmiary siatki zastosowano do budowy modelu numerycznego? Czy były one odpowiednie aby wychwycić koncentrację naprężeń i zapewnić dokładność i wiarygodność wyników?

Str. 107. Do symulacji naprężeń wstępnych w śrubach zastosowano niewielkie

przemieszczenie trzpienia śruby. Jaka wartość wstępnej siły sprężającej otrzymano?

Str. 113. Czy obraz rozkładu naprężeń w blachach kotlerowych odpowiadał przebiegowi linii załomów według propozycji Kato i Hirose (1985)? Także przedstawienie map rozkładu naprężeń w łącznikach dostarczyłoby ważnych informacji odnośnie poziomu i rozkładu naprężeń, ich miejsc koncentracji.

Str. 136, Tabela 6.4. Wybór planu poliselekcyjnego jakim jest plan Hartleya znacznie zmniejsza liczbę koniecznych prób w stosunku do planu kompletnego. Zdaniem recenzenta, aby określić błędy aproksymacji przyjętej funkcji, w układzie planu powinny wystąpić powtórzenia kombinacji wartości wejściowych.

Str. 145. Poziom istotności stanowi próg, który określa, czy wynik badania można uznać za statystycznie istotny po przeprowadzeniu planowanych badań statystycznych. Jaki przyjęto poziom istotności w przeprowadzonej analizie statystycznej?

Pomimo zgłoszonych uwag, praca napisana jest w sposób właściwy dla tego typu rozpraw naukowych - bardzo starannie pod względem językowym i stylistycznym. Brak jednostek miar w wykazie oznaczeń czy niedostateczna czytelność niektórych rysunków nie obniżają jej wysokiego poziomu edytorskiego. Praca jest cenna zarówno pod względem opracowanej metodyki badań, jak również otrzymanych w wyniku jej realizacji rezultatów.

## 9. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Zaprezentowana praca jest znaczącym wkładem w rozwój nauki w dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport, w zakresie projektowania konstrukcji stalowych z kształtowników zamkniętych. Przedstawione uwagi nie wpływają na wysoki poziom merytoryczny przedstawionej rozprawy doktorskiej. Podstawowym walorem pracy jest spójna i wnikliwa analiza przedstawionego problemu naukowego obejmująca zarówno badania doświadczalne w skali naturalnej, jak i pogłębione studia numeryczne i analityczne.

Sformułowany problem badawczy stanowi odzwierciedlenie braków w analizowanej specjalności naukowej. Jednocześnie jest istotny z praktycznego

punktu widzenia, ze względu na sposób kształtowania połączeń w układach kratowych z kształtowników o przekrojach zamkniętych. W wyniku realizacji pracy doktorskiej problem ten został rozwiązany i w efekcie powstał wymierny rezultat, jakim jest procedura obliczeniowa pozwalająca określić sztywność początkową oraz siłę w śrubie dla sprężystej pracy złącza.

Recenzowana rozprawa jest cennym wkładem teoretycznym i praktycznym w zakresie oceny bezpieczeństwa kolnierzowych połączeń śrubowych rur okrągłych.

Podsumowując niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- wybór tematu rozprawy doktorskiej jest zasadny,
- teza rozprawy została udowodniona, a wyznaczony cel rozprawy osiągnięty,
- praca zawiera oryginalne myśli i sformułowania Autora powstałe w wyniku realizacji pracy naukowo-badawczej, które wnoszą nowe elementy do problematyki naukowej będącej przedmiotem rozprawy,
- praca spełnia formalne, merytoryczne i kwalifikacyjne wymagania stawiane rozprawom doktorskim,
- Doktorant wykazał się znaczącą znajomością problemu naukowego, odpowiednim poziomem wiedzy teoretycznej w reprezentowanej dyscyplinie naukowej oraz umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych.

Recenzowana praca doktorska prezentuje wysoki poziom, biorąc pod uwagę rangę rozwiązywanego problemu oraz zakres i jakość badań. Wyróżnia się oryginalnością zastosowanych metod i narzędzi badawczych, posiada szczególnie walory poznawcze, użytkowe i aplikacyjne, a więc spełnia podstawowe wymagania wyróżnienia pracy. Recenzent pragnie podkreślić, że omawiana praca może służyć jako wzorcowa dla wszystkich tego typu prac naukowych, zarówno pod względem zakresu i jakości badań oraz osiągniętych walorów aplikacyjnych.

Wobec tego wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Dariusza Krzysztofa Lenia pt: „OCENA WŁAŚCIWOŚCI STRUKTURALNYCH ROZCIĄGANÝCH POŁĄCZEŃ KOLNIERZOWYCH METODĄ SKŁADNIKOWĄ.

W odniesieniu do powyżej zawartych stwierdzeń, niniejszym oświadczam, że



rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Dariusza Krzysztofa Lenia pt: „OCENA WŁAŚCIWOŚCI STRUKTURALNYCH ROZCIĄGANYCH POŁĄCZEŃ KOŁNIERZOWYCH METODĄ SKŁADNIKOWĄ” spełnia warunki i wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t. j. Dz.U. z 2017 r., poz. 1789 ze zm.) w zw. z art. 179 ust. 2 i 3 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 ze zm.) oraz stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Przedstawiona rozprawa doktorska potwierdza bardzo dobrą wiedzę teoretyczną mgr inż. Dariusza Krzysztofa Lenia i jego umiejętność do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wobec tego wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Dariusza Krzysztofa Lenia do publicznej obrony przed Komisją Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.

dr hab. inż. Mirosław Broniewicz, prof. PB

