

Warszawa, 8.11.2021 r.

Dr hab. inż. Anna Barszcz
Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej
al. Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa
e-mail: a.barszcz@il.pw.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Damiana Kukli pt.

Stalowe konstrukcje ramowe w wybranych sytuacjach wyjątkowych

1. Podstawa opracowania

Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 14 lipca 2021 roku (pismo przewodniczącego prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego z dnia 15 lipca 2021 roku).

2. Zawartość rozprawy doktorskiej

Rozprawa zawarta jest na 258 stronach i obejmuje spis treści, wykaz podstawowych oznaczeń, 9 rozdziałów, bibliografię ze 140 pozycjami (bez podziału na literaturę oraz normy i wytyczne), załączniki i streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1: Brak tytułu rozdziału. Składa się z 3 podrozdziałów (*Wstęp, Problem naukowy, cel pracy oraz Tezy i zakres pracy*) o objętości 4 stron. W pierwszym podrozdziale zamieszczono krótką charakterystykę zachowania się konstrukcji ramowych w warunkach uszkodzenia bądź zniszczenia jednego z głównych elementów nośnych oraz przyczyny wzrostu zainteresowania naukowców „katastrofą postępującą”. Następnie zdefiniowano problem naukowy i scharakteryzowano zjawisko „katastrofy postępującej”, zwrócono uwagę na złożoność zagadnienia odporności konstrukcji stalowych na ten rodzaj sytuacji wyjątkowej i niedostateczne jego opracowania zarówno w normach projektowych jak i w literaturze naukowej. Wymieniono też tematykę, która zdaniem Autora powinna być podjęta w ramach rozwiązania postawionego problemu. Na zakończenie sformułowano tezę pracy jako możliwość takiego ukształtowania śrubowych nieuźebrowanych węzłów doczołowych, aby zapewniły one odporność konstrukcji ramowych na wystąpienie wybranych sytuacji wyjątkowych. Wymieniono szereg czynności, które wykonano celem udowodnienia tej tezy, informując, że ich szczegółowy opis zawiera się w kolejnych rozdziałach dysertacji.

Główny nacisk w pracy położono na analizy zachowania się płaskich układów ramowych ze śrubowymi węzłami doczołowymi w sytuacjach wyjątkowych. W celu walidacji opracowanych modeli numerycznych przewidziano wykonanie badań doświadczalnych węzłów w układzie belka-słup-belka.

Rozdział 2: Analiza tematu, o objętości 46 stron (w tym 17 rysunków i 3 tablice), zawiera omówienie aktualnego stanu wiedzy w zakresie normalizacji projektowania konstrukcji w sytuacjach wyjątkowych i przegląd opublikowanych prac badawczych z podziałem na prace dotyczące badań doświadczalnych i analiz numerycznych. Ta część pracy została potraktowana dość szczegółowo. W części normatywnej odniesiono się zarówno do zapisów w eurokodach jak i w przepisach wprowadzonych w Stanach Zjednoczonych. Przegląd artykułów przeprowadzono w grupach tematycznych: badania doświadczalne węzłów, podzespołów ramowych i ram oraz analizy numeryczne tychże. Taki podział, utrzymany konsekwentnie w całej pracy, w tym rozdziale utrudnia zdaniem recenzenta ocenę zakresu i złożoności prac badawczych niektórych zespołów autorskich. Na zakończenie krótko scharakteryzowano różne formy zniszczenia konstrukcji ramowych. W podsumowaniu uzasadniono wybór węzłów podatnych jako optymalny w sytuacji zagrożenia katastrofą i zauważono brak precyzyjnych wskazań projektowych w eurokodach, a także brak kompleksowych opracowań w przywołanej literaturze. Na zakończenie zwrócono uwagę na złożoność zagadnienia, jednak stwierdzono, że zastosowanie metody elementów skończonych walidowanej wynikami badań doświadczalnych stwarza możliwości dokładnego odwzorowania zachowania się konstrukcji, co jest zdaniem recenzenta stwierdzeniem zbyt optymistycznym. Należy jednak dodać, że sama idea przeprowadzenia takiej analizy na pewno poszerza zakres oceny rzeczywistego zachowania się konstrukcji ramowej w sytuacji wyjątkowej.

Szczegółowo omówione zostały poszczególne pozycje literatury, natomiast wnioski są dość ogólne. Zdaniem recenzenta przydałoby się wskazanie celowości dokonanego wyboru rodzajów konstrukcji ramowych, zmienności ich parametrów oraz metod analizy, szczególnie, że kolejny rozdział rozpoczyna się opisem badań doświadczalnych, a zagadnienia wyboru nie są już podejmowane.

Rozdział 3: Badania doświadczalne, o objętości 27 stron (w tym 38 rysunków i 3 tablice), jest pierwszym z zasadniczych rozdziałów pracy. Zawiera on opis własnych badań doświadczalnych 6 węzłów doczołowych oraz wyniki badań 2 węzłów w podukładach ramowych, które zostały przeprowadzone na Politechnice Warszawskiej we współpracy z Politechniką Rzeszowską i stanowiły niejako inspirację do podjęcia dalszych prac w tym obszarze przez Autora rozprawy.

Po krótkim wstępie zawierającym charakterystykę badanych węzłów, zamieszczono program badań własnych, a następnie opisy elementów badawczych, stanowiska badawczego i aparatury pomiarowej. Badania węzłów poprzedzono badaniami właściwości mechanicznych stali i śrub, przedstawionymi dość szczegółowo. Znaczącą część rozdziału stanowią opisy przebiegu badań poszczególnych próbek i ich wyniki opatrzone komentarzem. Dla 3 próbek węzłów z blachami wpuszczonymi i 3 z blachami wystającymi, o grubości blach 10 mm, 15 mm i 20 mm, pokazano na wykresach zależności między siłą przykładaną do górnej powierzchni słupa a jego przemieszczeniem pionowym, charakterystykę moment-obrót węzłów i rozkłady odkształceń w elementach próbki (belce lewej, belce prawej i słupie). Zamieszczono też po 3 fotografie: widoku próbki przed zniszczeniem oraz widoków węzła i słupa po badaniu. Tę część rozdziału zakończono analizą wyników badań własnych.

W następnej kolejności porównano wyniki badań węzłów z blachą czołową o grubości 10 mm z wynikami otrzymanymi dla takich samych węzłów badanych wcześniej w podkładzie ramowym. W podsumowaniu stwierdzono dużą zgodność wyników. Wnioski i sugestie do dalszych badań są dość oczywiste. Nośność węzła na zginanie zależy głównie od rodzaju blachy czołowej (wpuszczona czy wystająca), a nośności na rozciąganie - od grubości tej blachy. O całkowitym zniszczeniu węzła decyduje nośność śrub.

Rozdział 4: Budowa i walidacja modelu numerycznego, o objętości 14 stron (w tym 18 rysunków i 2 tablice), poświęcony jest modelowaniu numerycznemu zbadanych elementów za pomocą oprogramowania Abaqus i walidacji zbudowanych modeli z wykorzystaniem wyników z badań doświadczalnych.

Z dostępnych w programie Abaqus modeli materiału wybrano model z uszkodzeniem plastycznym, aby umożliwić modelowanie zniszczenia elementów siatki MES. Przeprowadzono walidację hierarchiczną uzyskując dobrą zgodność w odniesieniu do wartości maksymalnej siły i nieco gorszą przy porównaniu całkowitych wydłużeń zarówno próbek do statycznej próby rozciągania, jak i śrub.

Kolejnej walidacji poddano modele numeryczne zbudowane dla odwzorowania wyizolowanych fragmentów konstrukcji – słup z dołączonymi obustronnie belkami. Do budowy modelu wykorzystano elementy bryłowe (ośmiowęzłowe elementy sześciennie) ze zredukowanym całkowaniem, które pozwalają na uwzględnienie nieliniowości geometrycznej i materiałowej oraz symulację dużych odkształceń i pęknięć. Do obliczeń zastosowano metodę Explicit dynamic z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej. Brak wyjaśnienia dlaczego zastosowano Explicit dynamic, a nie Implicit dynamic. Opisano modelowanie warunków brzegowych, warunków kontaktu między powierzchniami i modelowanie łącznika śrubowego oraz przedstawiono sposób siatkowania. Wyniki walidacji zilustrowano rysunkami analogicznymi do wykresów i zdjęć zamieszczonych w poprzednim rozdziale przy prezentacji wyników badań doświadczalnych (z pominięciem zależności moment – obrót). Dodatkowo maksymalne wartości sił i przemieszczeń porównano w tablicach.

Można przyjąć, że modele numeryczne prawidłowo odwzorowują elementy doświadczalne, co uzasadnia ich wykorzystanie w dalszej analizie – parametrycznej.

Rozdział 5: Numeryczna analiza parametryczna, o objętości 13 stron (w tym 19 rysunków i 2 tablice), poświęcony jest wykorzystaniu zwalidowanych modeli numerycznych węzłów do oceny wpływu niektórych parametrów węzłów na ich zdolność obrotową i ciągliwość. Badano różne konfiguracje i grubości blachy czołowej oraz różne średnice, klasy i liczbę szeregów śrub. Otrzymane z symulacji wyniki porównano między sobą i z wynikami badań doświadczalnych na wykresach zależności między obciążeniem i przemieszczeniem pionowym słupa węzła. Zdaniem recenzenta istotnym byłoby też porównanie z wynikami obliczeń MES, które w poprzednim rozdziale przedstawiono dla węzłów badanych doświadczalnie. Pokazano też wykresy warstwiczne odkształceń plastycznych w węzłach w momencie zniszczenia. Zmienność konfiguracji blachy czołowej w postaci wysunięcia jej powyżej ściskanego lub rozciąganego pasa belki dała wyniki takie same jak dla węzłów z blachą wpuszczoną w pierwszym przypadku i dla węzłów z blachą obustronnie wystającą w drugim. Wyniki takie są oczywiste, więc tę symulację zdaniem recenzenta można było pominąć. Kolejna symulacja dotyczyła węzłów o innych grubościach blachy czołowej niż

przyjęte w badaniach doświadczalnych. Wybrano dwie grubości mniejsze od najcieńszej blachy zastosowanej w eksperymencie i jedną nieco większą. Celem badania było sprawdzenie, czy zmniejszenie grubości blachy spowoduje zwiększenie zdolności obrotowej i wpłynie na sposób zniszczenia węzła. W przypadku zmian dotyczących śrub przeprowadzono obliczenia dla modelu węzła ze śrubami o większej średnicy, a następnie dla węzła ze śrubami o wyższej klasie. Otrzymano spodziewany wzrost zarówno nośności jak i zdolności obrotowej. Ostatnia symulacja dotyczyła wprowadzenia dodatkowego szeregu śrub w połowie wysokości belek, celem zbadania, czy w wyjątkowej sytuacji projektowej nie włączy się on do współpracy przy przenoszeniu obciążeń. Rozdział zakończono tabelarycznymi podsumowaniami otrzymanych wyników symulacji numerycznych i porównaniem ich z wynikami badań doświadczalnych oraz wyborem optymalnej grubości blachy czołowej i średnicy śrub.

Rozdział 6: Analiza numeryczna podkonstrukcji ramowych, o objętości 8 stron (w tym 12 rysunków), ma budowę podobną do Rozdziału 4, ale dotyczy podukładów ramowych. Opisano sposób modelowania ram. W zasadzie był on podobny do zastosowanego przy modelowaniu węzłów. Różnice wynikały z różnych wielkości konstrukcji. Ze względu na znaczne rozmiary tego modelu zastosowano dwa rodzaje elementów skończonych. W belkach, w obszarach poddanych mniejszym naprężeniom i odkształceniom, wprowadzono zamiast bryłowych elementy powłokowe. Porównano otrzymane z obliczeń krzywe obciążenie pionowe – przemieszczenie pionowe z wynikami badań doświadczalnych zamieszczonymi w Rozdziale 3. Dla węzłów przy słupach środkowym i skrajnym zestawiono też obok siebie odkształcenia: w postaci warstwicy z programu Abaqus i zdjęć z badań eksperymentalnych. Stwierdzono zadowalającą zgodność porównywanych wyników.

Rozdział 7: Analiza numeryczna odporności konstrukcji ramowych, o objętości 63 stron (w tym 81 rysunków i 16 tablic), jest najdłuższym i najistotniejszym rozdziałem pracy. Po stwierdzeniu poprawności modeli numerycznych MES dla próbek w postaci „wiosełek”, użytych w próbie rozciągania, modeli doświadczalnych do badania węzłów i całych podkonstrukcji ramowych, zdobyte doświadczenie wykorzystano do budowy modeli ram w celu badania ich odporności na wybrane oddziaływania wyjątkowe. Uwzględniono dwa sposoby zaistnienia sytuacji wyjątkowej: nagle zniszczenie słupa podczas uderzenia pojazdu lub wybuchu i pożar w pobliżu słupa. W pierwszym przypadku nagle usunięto utwierdzenie słupa na jego dolnym końcu, a w drugim zastosowano współczynnik redukujący granicę sprężystości w zależności od temperatury, co przełożono na wartość tego współczynnika w funkcji czasu trwania całkowitej degradacji funkcji nośnej słupa i zasymulowano redukcją w czasie wartości reakcji pionowej w usuwanym węźle słupa.

Do analizy wybrano płaskie ramy stalowe trzykondygnacyjne: dwu-, trzy- i czterotraktowe. Każda rama rozpatrywana była w sześciu wariantach różniących się zastosowanym węzłem. Konfiguracja węzłów odpowiadała tej z badań doświadczalnych. Przy uwzględnieniu dwóch sposobów utraty słupa otrzymano 36 przypadków analizy.

Przedstawiono uwarunkowania dotyczące analizy układów ramowych, która w odróżnieniu od poprzednich quasi statycznych obliczeń węzłów i podukładów musiała mieć charakter dynamiczny. To pociągało za sobą przekształcenia obciążeń grawitacyjnych w odpowiadające im masy, określenia przyspieszenia i uwzględnienia tłumienia oraz zastosowania

odpowiedniego kroku czasowego. Zdefiniowano warunki brzegowe i zmodyfikowano, ze względu na dynamiczny charakter analizy, model materiału.

Szczegółowe wyniki analizy ram przedstawiono dla wybranych węzłów różniących się grubością blachy czołowej. I tak dla ram dwutraktowych były to węzły z blachami o grubości 10 mm, dla ram trójtraktowych o grubości 15 mm i dla ram czterotraktowych o grubości 20 mm. Dla każdego typu rami zamieszczono wyniki z 4 analiz numerycznych: dla rami o węzłach z blachą wpuszczoną i wystającą oraz przy nagłym i stopniowym usunięciu słupa. Pokazano zależności w funkcji czasu takich wielkości jak momenty zginające i reakcje pionowe w podstawach słupów oraz przemieszczenia pionowe usuwanego słupa i poziome węzłów rami. Dla węzłów sporządzono też wykresy kątów obrotu i sił osiowych. Część ilustracyjna obejmuje mapy przemieszczeń pionowych rami - w trakcie analizy i w chwili jej zakończenia – w przypadku węzłów z blachą wpuszczoną oraz - pionowych i poziomych przy końcu analizy - dla węzłów z blachą wystającą. Pokazano też mapy odkształceń węzłów nad parterem i na najwyższej kondygnacji. Na zakończenie opisu każdego rodzaju rami zebrano w 4 tablice wyniki dla wszystkich grubości blach czołowych, skomentowano je oraz wyciągnięto wnioski. Podsumowanie całego rozdziału dotyczy porównania kątów obrotu i sił osiowych w węzłach, otrzymanych z badań doświadczalnych i obliczeń programem Abaqus, które to porównania są miarodajne tylko dla ram z blachą wystającą, gdyż we wszystkich ramach z węzłami z blachą wpuszczoną trakty sąsiadujące z usuniętym słupem uległy zniszczeniu. Z wyjątkiem rami dwutraktowej, wartości sił i obrotów z obliczeń były mniejsze od otrzymanych w doświadczeniach, co sytuuje je po stronie bezpiecznej. W przypadku sił podłużnych odniesiono się jeszcze do wartości obliczonej ze wzoru zaproponowanego w raporcie grupy WG6.T2 z 2020 r.

W świetle zaprezentowanych wcześniej badań, w zasadzie wykluczających węzły z blachą wpuszczoną jako zdolne do przeniesienia obciążeń pojawiających się w sytuacjach wyjątkowych, prezentacja wyników ich analiz ma charakter raczej ilustracyjny i nie wnosi nowych informacji na temat możliwości ich zastosowania w celu mitygowania ryzyka katastrofy postępującej.

Rozdział 8: *Propozycje modyfikacji węzłów*, o objętości 7 stron (w tym 12 rysunków i 1 tablica), zawiera opisy trzech sposobów zwiększenia nośności i zdolności do obrotu przez rozbudowanie badanych węzłów za pomocą dodatkowych elementów. W pierwszym przypadku zastosowano ceowniki zamocowane w poziomie pasa ulegającego rozciąganiu w sytuacji wyjątkowej. W drugim przypadku ten pas wzmocniony jest obustronnymi siodelkami, a w trzecim zamocowano do niego dodatkowy pierścień. Są to propozycje Autora, dla których już uzyskano zgłoszenia wynalazków. W odniesieniu do węzła z blachą wystającą o grubości 15 mm pokazano i omówiono wyniki analiz numerycznych modeli węzłów z tymi wzmocnieniami oraz porównano je z wynikami badań doświadczalnych węzła bez modyfikacji. Uzyskano znaczący wzrost wartości pionowej siły obciążającej i pionowego przemieszczenia. Zniszczenie węzłów wzmocnionych nie następowało w wyniku zerwania śrub, ale rozerwania środka belki.

Rozdział 9: *Podsumowanie, wnioski, zalecenia i kierunki dalszych prac*, o objętości 5 stron, zgodnie z tytułami podrozdziałów zawiera syntetyczny opis całej rozprawy oraz rozbudowane wnioski z badań doświadczalnych, analiz parametrycznych i analiz odporności płaskich konstrukcji ramowych. Stwierdzono, że istnieje taki sposób ukształtowania połączeń

doczołowych, który zapewni jej odporność na wystąpienie sytuacji wyjątkowej. Sformułowano zalecenia co do kształtowania węzłów jak i wyboru procedury projektowej oraz ukazano szerokie możliwości dalszych badań.

W ocenie recenzenta w rozprawie osiągnięto zamierzony cel.

Załączniki: o objętości 48 stron zawierające 144 rysunki. Zamieszczono w nich **Wyniki analiz numerycznych układów ramowych** z podziałem na ramy dwu-, trzy- i czterotraktowe. Są to zestawienia takich samych wyników jak pokazane w Rozdziale 7, ale dla ram z węzłami o pozostałych grubościach blachy czołowej (po dwie grubości dla każdej geometrii ramy), z uwzględnieniem dwóch konfiguracji blachy czołowej i dwóch sposobów usunięcia słupa.

3. Ogólna ocena rozprawy

3.1. Tematyka

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki odporności konstrukcji na zmianę charakteru jej pracy w sytuacjach wyjątkowych. Zainteresowanie tą tematyką aktualnie wzrasta w związku z rozwojem budownictwa i powstawaniem coraz wyższych i bardziej skomplikowanych budowli oraz pojawieniem się nowych zagrożeń o charakterze wyjątkowym. Badania ukierunkowane są na analizę przyczyn zaistniałych katastrof oraz na ocenę zdolności przetrwania projektowanych konstrukcji w sytuacjach wyjątkowych, szczególnie związanych z nagłą utratą nośności słupa. Obserwuje się dużą różnorodność prac związanych z tą tematyką i kształtowanie się nowych metod badawczych. Główny nacisk położony jest na badania doświadczalne i ich wykorzystanie do walidacji modeli numerycznych, szczególnie węzłów. Z kolei modele numeryczne opracowywane są z wykorzystaniem najnowszych badań zdarzeń wyzwających mechanizm zawalenia konstrukcji i ukierunkowane są na lepsze poznanie zjawisk dynamicznych z tym związanych. Niestety aktualny stan normalizacji nie daje projektantom precyzyjnych wskazówek jak postępować w takich nietypowych sytuacjach i wymaga dopracowania, co jest przedmiotem aktualnych badań. Zagadnienia poruszone w rozprawie mieszczą się bez wątpienia w nurcie aktualnych zagadnień badawczych i są ważne z punktu widzenia rozwoju kompleksowych metod oceny zachowania się stalowych konstrukcji ramowych z nieuźebrowanymi śrubowymi węzłami doczołowymi. W pracy zaprezentowano aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki objętej rozprawą, w tym badań doświadczalnych, numerycznych modeli obliczeniowych i strategii projektowych, uwzględniając literaturę naukowo-techniczną oraz normy i wytyczne projektowania. Przeprowadzono badania doświadczalne. Zbudowano modele numeryczne badanych elementów i porównano wyniki otrzymane z symulacji numerycznych z wynikami doświadczalnymi. Uzyskanie zadawalającej zgodności tych wyników pozwoliło na przeprowadzenie analiz parametrycznych i budowę modeli numerycznych do analizy odporności na zawalenie całych konstrukcji. Wnioski z przeprowadzonych badań pozwoliły na zaproponowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych poprawiających odporność węzłów na zjawiska występujące w wybranych sytuacjach wyjątkowych. W podsumowaniu sformułowano wnioski i zalecenia projektowe oraz wskazano kierunki dalszych badań.

3.2. Ocena wartości naukowej

Materiał zawarty w rozprawie jest obszerny i wartościowy. Ułożony jest logicznie zgodnie z regułą „od szczegółu do ogółu” - począwszy od badań właściwości stali, węzłów i podkonstrukcji ramowych, przez wykonanie modeli numerycznych wszystkich zbadanych typów elementów i ich walidację, do modeli całych konstrukcji i przeprowadzonych na nich symulacji. W ten sposób osiągnięto jeden z założonych celów rozprawy – kompleksowość podejścia do zagadnienia zachowania się stalowych konstrukcji ramowych w warunkach sytuacji wyjątkowych. Badaniami objęto konstrukcje z węzłami śrubowymi doczołowymi. Zdaniem recenzenta wskazane by było wyraźniejsze zaznaczenie różnic między badaniami zrealizowanym przez Autora, a przywołanymi wcześniej w przeglądzie literatury przedmiotu.

Autor zaprojektował i przeprowadził badania doświadczalne, a także zaprezentował wyniki wcześniejszych badań. Opracował modele numeryczne odwzorowujące zbadane elementy i przeprowadził wieloaspektowe porównania wyników z badań doświadczalnych i analiz numerycznych. Zwalidowane modele numeryczne wykorzystał do przeprowadzenia analiz parametrycznych i opracował modele numeryczne oraz przeprowadził obliczenia odporności na dwie sytuacje katastrofalne trzech rodzajów konstrukcji ramowych o zróżnicowanych typach węzłów doczołowych. W dobrym stopniu opanował współczesne narzędzia i techniki badawcze. Warty podkreślenia efektem tych badań jest opracowanie rozwiązań konstrukcyjnych modyfikujących węzły w celu zwiększenia ich nośności i zdolności obrotowej.

Problematyka naukowa została określona prawidłowo. Obejmuje swym zakresem zagadnienia związane z badaniami doświadczalnymi i symulacjami numerycznymi w odniesieniu do oceny nośności i zdolności do obrotu węzłów doczołowych z blachą wpuszczoną i wystającą oraz oceny zdolności konstrukcji z tymi węzłami do powstrzymania postępującej katastrofy. Przyjęte cele badawcze zostały osiągnięte, a teza rozprawy udowodniona wynikami dociekań naukowych.

3.3. Ocena strony formalnej

Rozprawa nie budzi zastrzeżeń od strony układu treści, który sprawia wrażenie przemyślanego. Konsekwentnie zachowywano we wszystkich rozdziałach tę samą kolejność prezentowania. Każdy rozdział zawierający wyniki dociekań naukowych zakończony jest podsumowaniem i wnioskami z analiz i badań w nim przedstawionych. Język i terminologia naukowo-techniczna nie zawsze są precyzyjne, ale zauważone usterki nie obniżają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy. Niestety komfort czytania ze zrozumieniem obniżają błędy językowe (stylistyczne, składniowe, gramatyczne i ortograficzne), ale nie one stanowią o zawartości merytorycznej pracy z zakresu budownictwa. Niektóre z nich wymieniono w uwagach.

4. Uwagi do rozprawy

4.1 Uwagi ogólne

a) W rozprawie często użyte jest pojęcie „model zniszczenia” w sytuacji osiągnięcia przez węzeł zdolności do obrotu, czyli całkowitego zniszczenia węzła. W metodzie składnikowej nośność węzła kojarzona jest z utratą nośności któregoś ze składników węzła, przy czym utrata nośności składnika nie zawsze oznacza całkowitą destrukcję węzła. Jeśli w węźle

pojawią się odkształcenia plastyczne, co w przypadku części modelowanych króćcem teowym prowadzi do powstania przegubów plastycznych, ta sytuacja oznacza osiągnięcie nośności węzła i w tym kontekście rozpatrywane są indywidualne lub mieszane modele zniszczenia wymienione w eurokodzie PN-EU 1993-1-8. Tymczasem węzeł może jeszcze przenosić obciążenia przy jednoczesnym obrocie w przegubach plastycznych, aż do chwili zerwania śrub lub blach i ta sytuacja jest rozpatrywana jako model zniszczenia w rozprawie. Wskazane by było doprecyzowanie pojęcia „model zniszczenia” w ujęciu zastosowanym w rozprawie w odniesieniu do przyjętego w eurokodzie.

b) Badania doświadczalne zarówno węzłów jak i podukładów ramowych miały charakter statyczny i taki sam rodzaj analizy zastosowano w obliczeniach numerycznych modeli odwzorowujących elementy doświadczalne. Natomiast do analizy odporności układów ramowych zastosowano analizę dynamiczną, ze względu na nagły charakter obciążenia konstrukcji w sytuacji wyjątkowej. Zmianę parametrów mechanicznych stali wynikającą z dynamicznego charakteru obciążenia zastosowano do blach czołowych i śrub na podstawie danych z literatury. Przydałaby się w tym miejscu dyskusja na ile w tym konkretnym przypadku statyczny charakter badań doświadczalnych węzłów i podukładów ramowych odzwierciedla ich zachowanie się w sytuacji dynamicznej, a w przyszłości może nawet podjęcie badań doświadczalnych z uwzględnieniem efektów dynamicznych.

c) Jak już wspomniano wyżej jakość tekstu, skądinąd logicznie skomponowanego, obniżają kolokwializmy, zły szyk wyrazów w zdaniach, czy też błędy stylistyczne. Oprócz licznych literówek, które zdarzają się w każdym tekście, niestety pojawiają się i błędy ortograficzne dotyczące pisania łącznego *nie* z przymiotnikami i partykuły *by* np. w wyrazach *mogłoby*, *byłoby*. Występują też niepoprawne sformułowania w rodzaju: *zastosowanie jest decydujące o dalszej pracy; przyczynek nad dalszym rozwojem; rozwój nad tematem, pracą, zagadnieniem; przyszłość nad postępem; połączono do pasa*. Pojawia się też dość powszechny błąd używania rzeczownika *ilość* zamiast *liczba* w połączeniu z rzeczami policzalnymi oraz *przy pomocy* zamiast *za pomocą* w odniesieniu do przedmiotów lub pojęć.

4.2 Uwagi szczegółowe

W uwagach szczegółowych podano jedynie niektóre usterki tekstu, zarówno redakcyjne jak i o charakterze merytorycznym. Nie powtarzano uwag poczynionych wyżej.

Str. 5, w. 5 od dołu

Między podrozdziałami 3.6 i 3.8 brakuje podrozdziału 3.7.

Str. 10, w. 9 od dołu

Powinno być „prędkość”, chociażby dla ujednolicenia nazewnictwa (tak jest w kolejnym wierszu), ale również ze względu na różnicowanie pojęć *prędkość* i *szybkość* w terminologii fizycznej i technicznej.

Str. 14, w. 11 od dołu i następne

Walidacji nie wykonuje się „z wynikami badań doświadczalnych”. Jest ona procesem bardziej złożonym i obejmuje ogół czynności służących do oceny czy model numeryczny pozwala przeprowadzić obliczenia dające zaplanowane wyniki. Samo sprawdzenie poprawności

można nazwać weryfikacją, a jeżeli już walidacją, to raczej na podstawie wyników badań doświadczalnych.

Str. 15, w. 11 od dołu

Nie podano zasięgu czego dotyczy ograniczenie.

Str. 17, w. 3 od góry i następne

Przy określeniach klas konsekwencji „konsekwencje” powinny być w liczbie mnogiej.

Powinno też być „... obciążenie P ... współczynnikiem, tj. w proponowanym podejściu nie zawarto ...”

Str. 25, w. 10 od góry i następne

Sformułowanie „... analiza ... dotyczy określenia odkształceń w prętach i połączeniach, aby zapewnić ich wytrzymałość ...” jest niezrozumiałe. Samo określenie odkształceń nie zapewni wytrzymałości elementom. W drugiej części zdania w ocenie stanu granicznego pojawiają się granice odkształceń, co jest już lepszym sformułowaniem. W kolejnym zdaniu natomiast fragment „... konstrukcja pozostaje w obrębie tej granicy odkształcenia” też jest zbyt kolokwialne i jeżeli już pozostawać w obrębie to granic.

Str. 25, w. 12 od dołu i następne

Wrażliwość na tempo odkształcenia nie jest parametrem materiału. Raczej właściwości (parametry) materiału są wrażliwe na tempo odkształcenia.

Str. 25, w. 3 od dołu

Niezrozumiałe zdanie „Strategia ta promuje rozprzestrzenianie się awarii po początkowym uszkodzeniu części konstrukcji, od pozostałej konstrukcji, zwanej granicami segmentu.”

Str. 25, w. 10 od góry

Powinno być „ $M_{Ed,el}$ ”

Str. 28, w. 12 od dołu i następne

W tekście wymiennie pojawiają się nazwy *rzqd* i *szereg* śrub. Lepsze by było ujednolicenie i stosowanie określenia *szereg* przyjętego w eurokodzie.

Str. 29, w. 20 od dołu

Niezrozumiały fragment „ ... siły zginające śrubę zwiększają się przy mniejszym obrocie połączenia spowodowaną dystorsją pasów słupa z poziomą wysoką sztywnością środnika słupa.”

Str. 34, w. 10 od góry

Niezrozumiałe sformułowanie „... ciągle zerwanie przekroju belki ...”

Str. 46, w. 2 od góry

Wątpliwości budzi sformułowanie *w układzie mieszanym* w zdaniu: „Zaprezentowano pięć konfiguracji śrub w połączeniu w układzie mieszanym z uźebrowanym środkiem słupa.”

Str. 46, w. 15 od dołu

Analizy nie są poddawane dużym odkształceniom. Może być natomiast analiza dużych odkształceń.

Str. 56, w. 17 od dołu

To, że węzły powinny mieć „silne połączenie” może wynikać zarówno z analizy statycznej, jak i dynamicznej. Porównanie może wykazać, według której analizy powinno to połączenie być silniejsze.

Str. 57, w. 5 od dołu

Przy jednym z typów zawalenia występuje nazwa „placek” a dalej „naleśnik”. Lepiej zastosować jedną nazwę, przy czym ta druga jest dosłowniejszym tłumaczeniem z języka angielskiego.

Str. 61

We wstępie do rozdziału dotyczącego badań przydałoby się uzasadnienie wyboru elementów badawczych w odniesieniu do wcześniej opisanych innych badań. W niektórych z nich konfiguracja węzłów była podobna, więc wskazane by było uwypuklenie różnic. Czytelnikowi zainteresowanemu takim porównaniem pomogłoby dopisanie DOI do pozycji zamieszczonych w spisie publikacji.

Wstęp ogranicza się do opisu badań własnych, pomijając zamieszczone w tym rozdziale inne badania, wykorzystywane potem do walidacji modeli numerycznych.

Str. 62

Długości rygli w opisie nie zgadzają się z wymiarami podanymi na Rys. 3.5.

Str. 62

Opis Rys. 3.3 c) też powinien być w języku polskim.

Str. 69, 86 i 87

W podpisach do Rys. 3.12 , na Rys. 3.37 i Rys. 3.38 występuje zły odnośnik do spisu literatury.

Str. 71, 73, 75, 77, 79 i 81

Śledzenie wyników badań ułatwiłoby ujednolicenie kolorystyczne krzywych na Rys. 3.13 i następnych im odpowiadających (3.16, 3.19, 3.22, 3.25, 3.28).

Str. 73

Brak podpisu do Rys. 3.17 c)

Str. 76 w. 9 od dołu

W opisie przebiegu badania, po osiągnięciu wartości siły obciążającej równej 200 kN, zauważono spadek obciążenia. Wykres zależności siła - przemieszczenie z Rys. 3.22 pokazuje w tym obszarze tylko spadek przyrostu obciążenia.

Str. 87, w. 14 od dołu

W podsumowaniu napisano, że wyniki wykazują dużą zgodność natomiast w rozdziale wcześniejszym poszukuje się przyczyn rozbieżności wyników, dotyczących głównie przebiegu zależności moment zginający – siła osiowa. Maksymalne wartości momentu zginającego są zbliżone.

Str. 87, w. 5 od dołu

We wszystkich badanych węzłach zniszczenie węzła nastąpiło w wyniku zerwania co najmniej jednej śruby, co zdaniem Autora rokuje uzyskanie większej nośności węzła przez zmianę jego parametrów. W celu zbadania wpływu tych parametrów zaproponowano analizę zachowania się węzła z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Nie zostały wyselekcjonowane parametry, które mogą wpłynąć na wzrost nośności węzła, chociaż analiza modeli zniszczenia wskazuje, że mogą być nimi tylko średnica i/lub klasa śrub.

Str. 89, Rys. 4.1

Zamieszczono wykres z Podręcznika użytkownika programu Abaqus bez objaśnienia występujących na nim symboli.

Str. 93, Rys. 4.7

Na rys. 4.7 pokazana jest siatka MES chociaż dopiero w następnym rozdziale opisano sposób siatkowania wszystkich elementów węzła.

Str. 111, Rys. 5.16

W opisie zależności zauważa się, co prawda pomijalny, wzrost zdolności obrotowej węzłów P-2 i P-3, natomiast na Rys. 5.16 pionowe przemieszczenie słupa w przypadku tych węzłów są mniejsze od otrzymanych doświadczalnie. Nie zostało sprecyzowane jakie wielkości są porównywane. Być może chodziło o porównanie z wynikami obliczeń numerycznych węzłów wcześniej badanych doświadczalnie.

Str. 114, Tab. 5.2

Współczynniki siły F i przemieszczenia (też można by mu nadać jakiś symbol) dla próbki P-6 są niemiarodajne, ponieważ w czasie badań doświadczalnych węzeł nie osiągnął zdolności do obrotu. W tym przypadku jedynie porównanie z wynikami MES otrzymanymi dla tego węzła pozwoliłoby ocenić wpływ zmiany parametrów węzła na nośność i przemieszczenie. Zresztą takie porównania mogłyby być interesujące również dla pozostałych węzłów.

Str. 188, Rys. 8.4

Na wykresach przedstawiono efekty trzech modyfikacji, więc rysunek ten powinien być zamieszczony w podsumowaniu, a nie w rozdziale dotyczącym pierwszej modyfikacji.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Damiana Kukli pt. *Stalowe konstrukcje ramowe w wybranych sytuacjach wyjątkowych*, która powstała w Politechnice Rzeszowskiej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Aleksandra Kozłowskiego, stwierdzam, że w pracy tej Autor przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując się:

- a) ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu kształtowania połączeń doczołowych w ramowych konstrukcjach stalowych i oceny odporności tych konstrukcji w sytuacjach wyjątkowych związanych z nagłym usunięciem słupa i pożarem w pobliżu słupa,
- b) wiedzą praktyczną z zakresu komputerowego modelowania i nieliniowej analizy statycznej i dynamicznej w zastosowaniu do oceny zachowania się stalowych konstrukcji ramowych i ich węzłów w sytuacjach wyjątkowych,
- c) umiejętnością praktycznego rozwiązywania niestandardowych wymagań konstrukcyjnych węzłów konstrukcji ramowych narażonych na postępującą katastrofę.

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy należy zaliczyć:

- ważność i aktualność podjętego tematu w odniesieniu do konstrukcji stalowych,
- rzetelne rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy w tematyce objętej rozprawą,
- przejrzystość pracy i uporządkowany wywód naukowy,
- właściwy dobór metod badawczych,
- umiejętność przeprowadzenia badań doświadczalnych w odpowiednim standardzie i opracowanie ich wyników,
- umiejętność modelowania numerycznego w zakresie analiz statycznych i dynamicznych,
- innowacyjność rozwiązań o charakterze aplikacyjnym.

Zauważone usterki rozprawy nie mają istotnego wpływu na ocenę jej wartości merytorycznej.

Przedstawiona wyżej pozytywna ocena rozprawy oznacza, że praca spełnia wymagania Ustawy 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). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

