

Dr hab. inż. **Monika Matuszkiewicz**, prof. PK
Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin
e-mail: monika.matuszkiewicz@tu.koszalin.pl

Koszalin, dnia 20-10-2021 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Krzysztofa Ostrowskiego

pt.:

„Zdolność do obrotu śrubowych węzłów doczołowych konstrukcji stalowych”

1. Podstawa i przedmiot opracowania recenzji

Podstawę opracowania stanowi uchwała Rady Dyscypliny *Inżynieria Lądowa i Transport* na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej z dnia 14 lipca 2021 roku (Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny *Inżynieria Lądowa i Transport*, prof. dr. hab. inż. Tomasza Siwowskiego, z dnia 15 lipca 2021 roku).

2. Ocena tematyki rozprawy doktorskiej

Tematyka rozprawy wpisuje się w dosyć popularny w ostatniej dekadzie nurt problematyki badawczej, związanej z zaawansowaną analizą konstrukcji, w której oprócz informacji dotyczących zachowania elementów konstrukcji typu belki, słupy, uwzględnia się również charakterystyki podatnościowe węzłów.

Na wzrost zainteresowania tą tematyką wpłynął w dużym stopniu rozwój profesjonalnego oprogramowania do projektowania konstrukcji, umożliwiające analizę konstrukcji w zakresie sprężysto-plastycznym. W odniesieniu do węzłów chodzi tu o uwzględnienie pełnej nieliniowej charakterystyki $M-\Phi$ w obliczeniach. Pozyskanie takich charakterystyk jest możliwe drogą eksperymentalną, przy czym z uwagi na dużą liczbę zmiennych czynników związanych z konstrukcją konkretnych rodzajów węzłów, które mają wpływ na funkcję kształtu zależności $M-\Phi$, nie można takich charakterystyk uogólnić. Ze względu na kosztowność i pracochłonność niszczących badań eksperymentalnych, od lat badacze podejmują próby analitycznego opisu zachowania węzłów.

Procedury analityczne opisane w eurokodzie 1993-1-8 dotyczą tzw. metody składnikowej i pozwalają na ilościową ocenę nośności obliczeniowej i sztywności początkowej węzłów. Trzecia charakterystyka węzłów podatnych – ilościowa ocena zdolności do obrotu węzłów - w dalszym ciągu wymaga badań, których rezultatem może być opracowanie wytycznych przydatnych do celów projektowych.

Można zatem uznać, że podjęty przez doktoranta temat badań, mający na celu opracowanie metodologii wyznaczania zdolności do obrotu wybranych węzłów doczołowych konstrukcji stalowych, z wykorzystaniem zaawansowanych analiz MES, jest uzasadniony i potrzebny z praktycznego punktu widzenia.

Teza rozprawy doktorskiej, przedstawiona na str. 66., brzmi:

„Zaawansowane modelowanie MES umożliwia uzyskanie ilościowej oceny zdolności do obrotu węzłów, z uwzględnieniem rzeczywistej odkształcalności poszczególnych składników węzła”.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Dysertacja jest dosyć obszerna i obejmuje 202 strony, w tym: 157 stron tekstu podstawowego, 2 strony wykazu ważniejszych oznaczeń, wykaz literatury (126 pozycji), 9 stron spisu rysunków, których w pracy zamieszczono 230, 1 strona spisu tabel (17 tabel) i 19 stron załączników.

Pierwszy, wstępny rozdział (9 stron) stanowi wprowadzenie w tematykę pracy. Autor zwięźle przedstawił dotychczasowe kierunki prac badawczych dotyczących połączeń śrubowych oraz naświetlił problemy związane z prognozowaniem zachowania węzłów. Opisano znaczenie zdolności do obrotu węzłów, wyjaśniono pojęcia osiągalnej i wymaganej zdolności do obrotu.

W rozdziale **drugim** (48 stron) autor przedstawia aktualny stan wiedzy dotyczący tematyki badawczej. Opisano normową procedurę wyznaczania zdolności obrotowej wybranych węzłów, omówiono zjawisko efektu dźwigni. Scharakteryzowano także analityczne modele $M-\Phi$ prognozowania zdolności do obrotu. Przedstawiono klasyfikację węzłów ze względu na sztywność, ze względu na nośność i ze względu na zdolność do obrotu. Opisano szczegółowo tzw. metodę składnikową w modelowaniu zachowania połączeń doczołowych obciążonych momentem zginającym. Scharakteryzowano modele zniszczenia

wyzolowanych króćców teowych. Rozdział kończy się opisem definicji osiągalnej zdolności do obrotu wężła. Przedstawiono tu także autorską definicję osiągalnej zdolności do obrotu wężła. Definicja ta opiera się na analizie powierzchni odpowiedzi kąta obrotu przy użyciu symulacji numerycznej w odniesieniu do maksymalnej wartości siły w śrubie, określonej na podstawie badań laboratoryjnych.

W rozdziale **trzecim** (1 strona) sprecyzowano, co jest przedmiotem rozprawy, wskazano jej cel i sformułowano tezę pracy. Jako główny cel wskazano: „opracowanie metodologii wyznaczania zdolności do obrotu wybranych węzłów doczołowych konstrukcji stalowych przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych, wykorzystanej do uzyskania wyników według planu symulacji numerycznej, opartego na teorii planowania eksperymentu”.

Rozdział **czwarty** rozprawy (2 strony) dotyczy metodologii obliczeń zdolności do obrotu węzłów. Przedstawiono etapy prac badawczych wieloetapowej walidacji hierarchicznej modeli, przeprowadzono analizę czynnikową, w której określono parametry mające wpływ na zachowanie się wężła, a w szczególności na zdolność do obrotu. Ustalono zakres zmienności badanych czynników oraz przyjęto jako czynniki stałe gatunek stali oraz klasę i średnicę śrub. Przyjęto plan eksperymentu numerycznego. Autor pracy wykorzystał teorię planowania eksperymentu, adaptując ją do symulacji numerycznej. Używając zweryfikowanego eksperymentalnie modelu MES doktorant dokonał obliczeń węzłów o wymiarach wynikających z planu eksperymentu. Obliczenia zostały przeprowadzone w programie Ansys, przy użyciu nieliniowej analizy strukturalnej. Funkcję kąta obrotu wężła zdefiniowano w postaci wielomianu potęgowego.

W rozdziale **piątym**, najobszerniejszym (59 stron), zawarto szczegółowy opis przeprowadzonej walidacji hierarchicznej modeli MES w następujących etapach:

I etap – badanie materiału stalowych próbek oraz materiału śrub,

II etap – badanie zestawów śrub (śruba – podkładka – nakrętka),

III etap – badanie doświadczalne króćców teowych,

IV etap – badanie połączenia belki ze słupem – test dwóch ram portalowych z profili walcowanych w skali naturalnej.

Wszystkie etapy zostały bardzo skrupulatnie opisane i zilustrowane – widać tu ogromny nakład pracy doktoranta.

Następny etap pracy został szczegółowo przedstawiony w rozdziale **szóstym** (33 strony). W celu redukcji koniecznych do przeanalizowania przypadków, jakie należy uwzględnić w budowaniu planu eksperymentu numerycznego, zastosowano w pracy analizę czynnikową, w której dokonano podziału na czynniki zmienne zależne i niezależne.

Dokonując wyboru analizowanego dalej przypadku doktorant wyraźnie zaznaczył, że przypadek ten „należy traktować jako studialny i jest jedynie przykładem sposobu postępowania w zaproponowanej procedurze wyznaczania osiągalnej zdolności do obrotu węzłów.

Opisano następnie założenia planu eksperymentu numerycznego dla wybranego węzła w dwóch wariantach: z żebrami usztywniającymi w słupie oraz bez żeber usztywniających.

Do wyznaczenia powierzchni odpowiedzi kąta obrotu węzła autor zdecydował się na przyjęcie planu Hartleya PS/DS.-P:Ha₅ o trójwartościowym podziale czynników zmiennych (- 1; 0; 1). Wyznaczenie funkcji opisującej kąt obrotu wykonano na podstawie zaawansowanej analizy MES wyizolowanego węzła, dla którego powierzchnię odpowiedzi kąta obrotu określa się na podstawie planu eksperymentu numerycznego. Zbudowano odpowiednio model MES z uwzględnieniem dogęszczenia siatki podziału w newralgicznych miejscach. Uwzględniono odpowiednie powierzchnie kontaktowe i warunki brzegowe tych powierzchni. W realizowanym planie badawczym autor wprowadził obciążenie modelu poprzez przyjęcie konkretnej wartości przemieszczenia, którą ustalono iteracyjnie w taki sposób, aby uzyskać maksymalny kąt obrotu węzła.

Dokonano następnie oceny parametrycznej wpływu poszczególnych czynników zmiennych zawartych w planie eksperymentu numerycznego w oparciu o wyniki symulacji numerycznej. Za bardzo cenne uważam tu szczegółowe omówienie uzyskanych różnych modeli deformacji elementów węzła w zależności od przyjętych parametrów zmiennych. Przeprowadzona analiza parametryczna pozwoliła na opracowanie założeń, które ostatecznie przyjęto do planu eksperymentu numerycznego w celu wyznaczenia funkcji statystycznej kąta obrotu.

Model statystyczny osiągalnego kąta obrotu węzła oparto na funkcji wielomianu potęgowego.

W rozdziale **siódmym** (1 strona) autor przedstawił pewne wytyczne projektowe i wnioski sformułowane na podstawie przeprowadzonej analizy parametrycznej. Opisano, jakie parametry związane z kształtowaniem węzłów mają największy wpływ na zdolność do obrotu węzła.

Zaproponowano alternatywną formę oceny zdolności do obrotu wężła, w stosunku do formuł analitycznych – jest to graficzna reprezentacja osiągalnej zdolności do obrotu węzłów, wyznaczona na podstawie symulacji numerycznej (rys. 7.1).

W rozdziale **ósmym** (1 strona) sformułowano ostateczne i najważniejsze wnioski płynące z przeprowadzonych badań, a w rozdziale **dziewiątym** (1 strona) zestawiono oryginalne osiągnięcia autora, związane z badaniami opisanymi w dysertacji.

Rozdział **dziesiąty** (pół strony) dotyczy planowania dalszego rozwoju prac badawczych nad zdolnością do obrotu węzłów.

4. Ocena rozprawy doktorskiej

4.1. Ocena merytoryczna

Zawartość pracy jest zgodna z tytułem. Uważam, że cel pracy został osiągnięty, a postawiona teza udowodniona. Doktorant wykazał się wysokim poziomem wiedzy i umiejętności wykorzystania w przeprowadzonych badaniach zaawansowanych metod numerycznych.

Głównym i oryginalnym osiągnięciem autora jest opracowanie algorytmu wyznaczania zdolności do obrotu węzłów z wykorzystaniem zaawansowanej analizy MES. Zakres prac niezbędnych do uzyskania ostatecznego efektu, czyli ilościowej oceny zdolności do obrotu węzłów obejmuje:

- badania laboratoryjne – wieloetapowa walidacja hierarchiczna modeli MES,
- analizę czynnikową parametrów mających wpływ na zachowanie wężła,
- sporządzenie planu eksperymentu numerycznego z wykorzystaniem teorii planowania eksperymentu,
- wyznaczenie funkcji kąta obrotu.

Ze względu na fakt, że na zachowanie wężła ma wpływ wiele czynników, zamieszczonych wyników badań nie można uogólnić na inne konfiguracje węzłów, natomiast przedstawiona metodologia może w przyszłości być wykorzystana do opracowania katalogów służących do wyznaczania osiągalnej zdolności do obrotu węzłów o różnych konfiguracjach geometrycznych.

Uwagi formalne:

- W pracy zabrakło streszczenia w języku polskim i angielskim,
- Rysunki 2.16 i 2.35 zamieszczone w pracy różnią się jakością i formą od innych rysunków. Jeżeli pochodzą z innego źródła – w tytule rysunku powinno się znaleźć właściwe odniesienie do literatury.

4.2. Uwagi redakcyjne

Praca napisana jest dosyć czytelnie, choć sam styl tekstu ze zdaniami wielokrotnie złożonymi jest męczący w odbiorze.

Uwagi szczegółowe:

- W wielu miejscach pracy autor personifikuje przedmioty martwe, przykłady:
str. 115 – markery posiadające literowe oznaczenia,
str. 117 – króciec teowy posiada usztywnienie,
str. 135 – element posiadał 1 m długości,
str. 162 – aby półka posiadała odpowiednią odporność
słowo „posiada” powinno być w tych przypadkach zastąpione słowem „ma” lub „charakteryzuje się”;
- W przypadku rzeczowników policzalnych powinno się używać słowa „liczba”, natomiast „ilość” dotyczy rzeczowników niepoliczalnych – w pracy w wielu miejscach jest popełniony ten błąd, np.:
str. 87 – ilość zwojów,
str. 91, 162 - ilość próbek,
str. 130 - ilość czynników;
- Niekonsekwentnie w niektórych wzorach ułamki dziesiętne są oznaczone kropką, a nie przecinkiem – np. str. 26 - wzory 2.13 do 2.20, str. 76 – wzory 5.15 do 5.17 i 5.19;
- Tylko niektóre oznaczenia literowe w pracy są pisane kursywą – inne pismem prostym;
- Podpisy pod rysunkami powinny być odseparowane od tekstu głównego;
- Niektóre wzory i objaśnienia do nich są zapisane wyraźnie większą czcionką, niż pozostałe (np. str. 41, 42, 45);
- Na str. 58 brakuje odniesienia do literatury;

Interpunkcja nie jest mocną stroną autora pracy – o ile jeszcze w pierwszych rozdziałach przecinki pojawiają się w miarę tam, gdzie trzeba – w dalszych rozdziałach jest to już zupełnie sprawa przypadkowa.

5. Wniosek końcowy

Na podstawie analizy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Ostrowskiego pt.: *Zdolność do obrotu śrubowych węzłów doczołowych konstrukcji stalowych* stwierdzam, że opiniowana rozprawa stanowi oryginalne dzieło naukowe. Doktorant wykazał się znajomością procedur związanych z przeprowadzeniem badań eksperymentalnych i numerycznych. Poprawnie zinterpretował uzyskane w poszczególnych etapach pracy wyniki badań i sformułował wnioski końcowe istotne z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*, z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami). Wniosuję zatem o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Monika Maliszewska