

Prof. dr hab. inż. Marian Giżejowski, prof. zw. PW
Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej
al. Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa
e-mail: m.gizejowski@il.pw.edu.pl

Warszawa, 15.10.2021 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Ostrowskiego pt. *Zdolność do obrotu śrubowych węzłów doczołowych konstrukcji stalowych*

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. Tomasz Siwowski, z dnia 15 lipca 2021 roku).

2. Zawartość rozprawy doktorskiej

Rozprawa obejmuje 202 strony komputeropisu, z tego 171 stron to część podstawowa rozprawy, do której dołączono spis rysunków i tabel części podstawowej (10 stron) oraz 5 załączników (20 stron). Rozprawa zawiera spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń oraz numerowane części od 1 do 18, z których 10 to zwyczajowe rozdziały części podstawowej, zaś pozostałe części od 11 do 18 to literatura oraz załączniki. W rozprawie nie zauważyłem streszczeń w językach polskim i angielskim. Numeracja poszczególnych części rozprawy odbiega od typowego schematu, w którym bibliografia oraz spisy rysunków i tablic nie stanowią numerowanej części pracy, a załączniki są wydzielone i mają inną numerację. Należy nadmienić, że zbitka słów „*śrubowych węzłów doczołowych konstrukcji stalowych*”, zawarta w tytule rozprawy, może sugerować, że *doczołowy* określa *konstrukcje*, a nie *węzły*. Czytelnik mniej zorientowany mógłby błędnie zrozumieć, że chodzi o „*śrubowe węzły*” w „*doczołowych konstrukcjach stalowych*”. Zdaniem recenzenta, tytuł rozprawy: ***Zdolność do obrotu śrubowych, doczołowych węzłów konstrukcji stalowych*** definiowałby przedmiot rozprawy w sposób bardziej precyzyjny.

Rozdział 1: *Wstęp*, o objętości 9 stron, w tym 2 rysunki i jedna tabela, zawiera wprowadzenie do tematyki związanej z odkształcalnością węzłów konstrukcji stalowych oraz definicją zależności moment-obrót węzła. Podkreślono powiązanie zagadnień osiąganą przez węzły stalowe zdolności do obrotu z klasyfikacją przekroju prętów łączonych w węzłach. Na tym tle omówiono istotę i znaczenie charakterystyki moment-obrót węzła oraz parametru opisującego zdolność węzła do obrotu, w odniesieniu do konstrukcji stalowych o zróżnicowanej klasie przekroju prętów łączonych w węzłach podatnych (odkształcalnych).

Rozdział 2: *Stan wiedzy o zdolności węzłów do obrotu*, o objętości 48 stron (w tym 41 rysunków i 6 tabel), zawiera przegląd literatury odnoszący się do tematyki odkształcalności części składowych węzłów konstrukcji stalowych, a także zagadnień modelowania węzła

z wykorzystaniem metody składnikowej, w odniesieniu do podstawowych parametrów zintegrowanej charakterystyki moment-obrót, jakimi są sztywność początkowa oraz nośność obliczeniowa. Wskazano, że zdolność do obrotu węzłów nie ma procedury obliczeniowej zdefiniowanej *explicite* w europejskiej normalizacji projektowania. W eurokodach konstrukcyjnych wskazano jedynie kryteria, których spełnienie, w odniesieniu do wybranych rozwiązań konstrukcyjnych węzłów, pozwala na zakwalifikowanie ich do grupy węzłów o pełnej zdolności do obrotu. Węzły o pełnej zdolności do obrotu nie ograniczają zdolności konstrukcji stalowej do plastycznej redystrybucji sił przekrojowych wówczas, że pręty konstrukcji charakteryzują się przekrojami klasy 1. Omówiono efekt dźwigni występujący w śrubowych węzłach doczołowych oraz wpływ grubości blach czołowych na mechanizm odkształcenia oraz stan graniczny węzła. Przedstawiono różne podejścia do analitycznego sposobu modelowania charakterystyki moment-obrót oraz wyznaczania podstawowych parametrów tej charakterystyki, a następnie klasyfikację węzłów przyjętą w stalowych eurokodach konstrukcyjnych. Na tym tle omówiono modele zniszczenia węzłów z blachami czołowymi oraz istniejące w literaturze definicje osiąganą przez węzły doczołowe zdolności do obrotu. Rys. 2.38 wskazuje, że dotychczasowy wysiłek badaczy skierowany był na zdefiniowanie obliczeniowego stanu granicznego nośności węzła. Na rys. 2.38 a) przedstawiono eurokodowy model obliczeniowy węzłów rzeczywistych, o składnikach cechujących się „umiarkowanie” zróżnicowaną odkształcalnością. Obliczeniową nośność plastyczną węzła $M_{j,pl}$ zdefiniowano na poziomie niższym niż eksperymentalnie wyznaczona nośność graniczna $M_{j,ult}$ (z uwagi na brak konsekwencji oznaczeń w rozprawie, tutaj oraz dalej zastosowano oznaczenia własne), a nośność sprężystą $M_{j,el}$ jako ułamek nośności plastycznej. To podejście pozwoliło na zdefiniowanie eurokodowej, obliczeniowej charakterystyki węzła, którą zobrazowano na rys. 2.38 a) linią ciągłą do poziomu $M_{j,pl}$, a następnie linią przerywaną do punktu odpowiadającego obliczeniowej zdolności węzła do obrotu (przecięcie obliczeniowej nośności plastycznej z krzywą opisującą pograniczną charakterystykę moment-obrót). Na rys. 2.38 b) pokazano model obliczeniowy odpowiadający rzeczywistemu przebiegowi charakterystyki moment-obrót z badań eksperymentalnych, a więc zrealizowanych na fizycznych modelach węzłów o składnikach z „umiarkowanie” zróżnicowaną odkształcalnością. Zdolność węzła do obrotu jest w tym wypadku definiowana w punkcie granicznym charakterystyki moment-obrót, po przekroczeniu którego węzeł traci zdolność do dalszej odkształcalności i przenoszenia momentu.

Na zakończenie rozdziału 2, Autor podjął dyskusję dotyczącą definiowania zdolności węzła do obrotu. Słusznie stwierdził, że omówione wyżej podejścia dotyczą jedynie węzłów, których składniki mają zróżnicowaną odkształcalność, ale na poziomie „umiarkowanym”, (por. rys. 1.1 a). Gdy składniki śrubowych węzłów doczołowych charakteryzują się bardzo zróżnicowaną odkształcalnością, m. in. „słabe” śruby i „mocne” blachy lub „mocne” śruby i „słabe” blachy, por. rys. 1.1 b), c), to rzeczywiste charakterystyki moment-obrót węzła są odmienne niż charakterystyka pokazana na rys. 2.38. Stosowanie, w tych wypadkach eurokodowego modelu analitycznego wiąże się z brakiem możliwości zintegrowania obliczeniowej charakterystyki moment-obrót z obliczeniową zdolnością węzła do obrotu. Autor przedstawił własną koncepcję wyznaczania obliczeniowej zdolności węzła do obrotu,

powiązaną w opisie charakterystyki moment-obrót, jako takiego punktu tej charakterystyki, który odpowiada maksymalnej wartości siły w rozciągającym łączniku połączenia śrubowego równej $F_d=0,9F_{u,mean}$, gdzie $F_{u,mean}$ jest uśrednioną wartością nośności śruby, definiowaną w punkcie granicznym eksperymentalnie wyznaczonej charakterystyki F- Δ śruby. Koncepcję tę przedstawił Autor na rys. 2.41. Obliczeniowa nośność węzła $M_{j,pl}$ definiowana jest jako nośność odpowiadająca obliczeniowej nośności śruby $F_d=0,9F_{u,mean}$ w punkcie charakterystyki węzła, w którym definiowana jest sztywność stycznej $S_{j,d}$ oraz zdolność do obrotu $\phi_{j,d}$. Przedstawiona autorska koncepcja budowy obliczeniowej charakterystyki węzła, po wprowadzeniu dodatkowego parametru dotyczącego obliczeniowej nośności sprężystej $M_{j,el}$, miałyby przewagę nad koncepcją przyjętą do budowy eurokodowego modelu obliczeniowego, gdyż pozwoliłaby na uwzględnienie bardzo różnych sytuacji projektowych. Dotyczą one zarówno węzłów o dużej odkształcalności (duże deformacje giętne blach czołowych i małe wydłużenia łączników śrubowych), jak też węzłów o małej odkształcalności (małe deformacje giętne blach czołowych i relatywnie duże wydłużenie śrub, stowarzyszone z ich nośnością $F_d=0,9F_{u,mean}$).

Rozdział 3: Cel, zakres i tezy pracy, o objętości jednej strony zawiera:

3.1. Opis dotyczący metodologii wyznaczania zdolności do obrotu śrubowych, doczołowych węzłów konstrukcji stalowych, wykorzystującej do tego celu badania doświadczalne w skali technicznej, zwalidowany model numeryczny MES i parametryczne analizy numeryczne węzłów o różnej konfiguracji składników, do wyznaczenia przebiegu charakterystyki moment-obrót (według planu eksperymentu różnicującego parametry konstrukcyjne wpływające na zachowanie się węzła).

3.2. Opis celu i zakresu rozprawy.

Na podstawie przyjętej metodologii, można byłoby wyznaczyć parametry charakterystyki moment-obrót węzła $M_{j,el}$, $M_{j,pl}$, $S_{j,ini}$, $S_{j,d}$ oraz $\phi_{j,d}$ jako funkcje przyjętych w planie eksperymentu parametrów konstrukcyjnych węzła. Opis celu i zakresu rozprawy jest zbyt lakoniczny i nie podkreśla naukowego charakteru badań. Brak jest szerszego omówienia założeń wyjściowych. Zdaniem recenzenta punkty 3.1 oraz 3.2 należałoby połączyć i w sposób czytelny przedstawić cel naukowy badań oraz zakres badań służących do realizacji nakreślonego celu naukowego rozprawy.

Rozdział 3 kończy się sformułowaniem tezy rozprawy o następującej treści: *Zaawansowane modelowanie MES umożliwia uzyskanie ilościowej oceny zdolności do obrotu węzłów, z uwzględnieniem rzeczywistej odkształcalności poszczególnych składników węzła*. Doktorska rozprawa naukowa nie wymaga jawnego formułowania tezy, ale jej sformułowanie jest wartością dodaną, gdyż mobilizuje Autora do wnikliwego prowadzenia badań w celu udowodnienia tezy.

Rozdział 4: Metoda obliczania zdolności do obrotu, o objętości 2 stron, zawiera opis metodologii obliczania zdolności do obrotu śrubowych, doczołowych węzłów konstrukcji stalowych, opis zakresu badań doświadczalnych realizowanych hierarchicznie w celu uzyskania wyników do walidacji modelu numerycznego, lakoniczny opis zakresu walidacji

numerycznego modelu MES, a także opis analizy czynnikowej (parametrów konstrukcyjnych różnicujących geometrię węzłów i użyty materiał) do sporządzenia planu eksperymentu w celu wyznaczenia funkcji opisującej zdolność do obrotu śrubowych, doczołowych węzłów typu rygiel-słup w konfiguracji jednostronnej.

Zdaniem recenzenta, rozdziały 3 i 4 należałoby połączyć, gdyż dotyczą celu, zakresu i metodologii badań naukowych realizowanych w rozprawie.

Rozdział 5: *Wieloetapowa walidacja hierarchiczna modelu obliczeniowego*, o objętości 59 stron (w tym 100 rysunków i 3 tabele), jest jednym z dwóch zasadniczych rozdziałów pracy. Na wstępie przedstawiono zagadnienia związane z wyborem hierarchii zadań koniecznych do realizacji badań. Uwzględniając cel naukowy badań, poprawnie zdefiniowano 4 etapy hierarchicznie realizowanych badań doświadczalnych i etapowej walidacji skończonego elementowego modelu numerycznego: I. badania materiałowe elementów węzła, II. badania charakterystyki zintegrowanego elementu złącznego śruba-podkładka-nakrętka, III. badania króćców teowych jako wydzielonego składnika węzła oraz IV. badania węzłów w układzie ramy portalowej. Następnie przedstawiono organizację badań doświadczalnych poszczególnych etapów, przebieg i wyniki potrzebne do walidacji modelu numerycznego.

W etapie I zrealizowano badania materiałowe próbek pobranych z kształtowników, blach czołowych oraz łączników śrubowych zastosowanych w konstrukcji badanej w etapie 4. Na podstawie badań doświadczalnych, zidentyfikowano uśrednione miary inżynierskie relacji konstytutywnych σ - ε materiałów użytych do wykonania elementów konstrukcji (węzłów i prętów). Badania zrealizowano bardzo starannie, wykazując małe „rozproszenie” wyników, co uwiarygodnia zrealizowany proces walidacji modelu numerycznego. Otrzymane doświadczalnie miary inżynierskie relacji konstytutywnych przekształcono następnie w miary obiektywne, tzw. *true stress-strain*, które wykorzystano do walidacji modelu numerycznego na podstawie wirtualnej symulacji materiałowych badań doświadczalnych. Symulacje numeryczne przeprowadzono w dwóch wariantach (modele z zastosowaniem powłokowych oraz bryłowych elementów skończonych) i z zastosowaniem materiałowych modeli *true stress-strain* wyznaczonych na podstawie wyników badań doświadczalnych. Porównanie relacji F- ε (gdzie $\varepsilon = \Delta/L_0$, Δ – wydłużenie odcinka bazy pomiarowej, L_0 – odległość między skrajnymi punktami bazy pomiarowej) z badań doświadczalnych oraz z symulacji numerycznych z zastosowaniem obu typów elementów skończonych wykazało dużą zgodność wyników.

W etapie II zrealizowano badania zintegrowanego elementu złącznego śruba-podkładka-nakrętka z uwzględnieniem śrub o różnej długości L (na rys. 5.8, który dotyczy oznaczenia wymiarów łącznika śrubowego, brak oznaczenia L; czy L oznacza odległość między punktami A i B łba śruby i nakrętki jak na rys. 5.23?). Autor na wstępie podaje, że wykonano 11 prób osiowego rozciągania elementów złącznych śruba-podkładka-nakrętka. W opisie badań pojawiają się nieścisłości. Podano, że z serii SAF badanych elementów złącznych wybrano wyniki odnoszące się do próbek SAF9, SAF10 i SAF11 (brak wyjaśnienia oznaczeń; czy 9, 10 i 11 odnosi się do wymiaru łącznika, czy też jest to numer próbki?). Jaka jest relacja między próbkami SAF9, SAF 10 i SAF 11 oraz HV1, HV2 i HV3? Dlaczego

zróznicowano liczbę prób: SAF (3 próbki) oraz HV (5 próbek)? Dlaczego w tab. 5.3 podano wyniki odnoszące się tylko do serii HV? Ogólna liczba prób rozciągania elementu złącznego śruba-podkładka-nakrętka to 15 w serii HV, a nie 11 jak podano na początku? Na rys. 5.22 c) brakuje krzywej doświadczalnej odnoszącej się do próby HV2C, której parametry ujęto w tab. 5.3. Czy przy wyznaczeniu średniej wartości siły granicznej w śrubie elementu złącznego brano pod uwagę wyniki próby HV1C? Przebieg doświadczalnej krzywej F-ε w tej próbie znacznie odbiega od pozostałych krzywych HV1x, zarówno pod względem osiągniętej siły granicznej, jak również odpowiadającego mu odkształcenia. Przytoczone niejasności utrudniają śledzenie rozważań odnoszących się do walidacji numerycznego modelu elementu złącznego śruba-podkładka-nakrętka.

W części rozprawy odnoszącej się do budowy modelu numerycznego elementu złącznego, Autor przedstawił dwa sposoby modelowania części gwintowanej trzpienia śruby, mianowicie sposób 1, polegający na wiernym odtworzeniu geometrii gwintu (przedstawiony w omawianym rozdziale) oraz sposób 2, uproszczony, w którym pomija się modelowanie geometrii gwintu, zastępując odcinek gwintowany częścią niegwintowaną o odpowiednio dobranych parametrach (omawiany w następnym rozdziale). Zdaniem recenzenta oba sposoby powinny być testowane i omawiane równocześnie tak, aby w drugim etapie walidacji hierarchicznej można było ocenić wiarygodność obu modeli numerycznych. Kryterium pozytywnej walidacji obu modeli polegałoby: a) w wypadku sposobu 1 modelowania łącznika, na poszukiwaniu możliwie najlepszego dopasowania wyników symulacji MES do wyników uzyskanych w badaniach doświadczalnych, b) w wypadku sposobu 2 - możliwie najlepszego dopasowania wyników z zastosowaniem tego modelu do uzyskanych z modelowania sposobem 1. W etapie drugim walidacji zrealizowano symulacje MES jedynie z zastosowaniem sposobu 1 oraz bryłowych elementów skończonych 3D i powłokowych elementów skończonych 2D. Wykorzystano symetrię elementu złącznego. Stwierdzono bardzo dobrą zgodność wyników uzyskanych z badań doświadczalnych i analiz numerycznych 3D i 2D, w całym technicznie ważnym zakresie odkształceń. W pracy przedstawiono porównania odnoszące się do elementów złącznych SAF9, SAF10 i SAF11. Brak porównań odnoszących się do serii HV1, HV2 i HV3.

W etapie III zrealizowano badania doświadczalne złączy doczołowych, w odniesieniu do próby rozciągania 12. króćców teowych:

- 3 króćce wykonano z kształtownika walcowanego HEA 240 ze stali S235 (H01) oraz taką samą liczbę króćców wykonano z kształtownika ze stali S355 (B01);
- 3. króćce wykonano ze spawanych blach o grubości 12 mm ze stali S235 (SP02) oraz taką samą liczbę wykonano ze spawanych blach o grubości 20 mm ze stali S355 (SP01).

Dokonywano pomiaru deformacji złączy oraz sił w łącznikach śrubowych. Podano szczegóły modelu numerycznego, z uwzględnieniem sposobów 1 oraz 2 modelowania gwintowanego odcinka trzpienia śruby, a także szczegółów odtworzenia lokalnych efektów kontaktu między elementami złączy. Porównanie wyników symulacji oraz wyników uzyskanych z badań doświadczalnych wykazało bardzo dobrą zgodność w wypadku króćców teowych z kształtownika walcowanego ze stali S235 (H01) i spawanych z blachami czołowymi

o grubości 12 mm ze stali S235 (SP02). Gorszą zgodność uzyskano w wypadku króćców z kształtownika walcowanego ze stali S355 (B01) oraz króćców spawanych z blach o grubości 20 mm ze stali S355 (SP01). Autor podjął próbę wyjaśnienia rozbieżności. Przedstawił rozkłady naprężeń w łączniku śrubowym oraz dokonał walidacji modelu numerycznego uwzględniającego sposób 2 modelowania części gwintowanej trzpienia śruby, w odniesieniu do złącza doczołowego B01. Brakuje wyjaśnienia dotyczącego wyboru złącza B01 do walidacji uwzględniającej sposób 2 modelowania śruby. Jak wykazano w badaniach etapu II, walidacja modelu złącza B01 z uwzględnieniem sposobu 1 (z odtworzeniem geometrii części gwintowanej trzpienia) nie była zadowalająca. Nie przedstawiono walidacji modeli numerycznych złączy H01 oraz SP02 z uwzględnieniem sposobu 2 (z zastępczą średnicą/długością odcinka niegwintowanego, zastępującego część gwintowaną).

Należy podkreślić, że sposób 2 ma walory praktycznego wykorzystania w szerszym zakresie niż sposób 1. Z tego też względu, sposób 2 został wykorzystany przez Autora w analizach parametrycznych, w kolejnym rozdziale. Podejście z uwzględnieniem sposobu 2 oceniam bardzo pozytywnie, gdyż jest ono ważnym elementem hierarchicznej walidacji z uwzględnieniem możliwych uproszczeń modeli numerycznych. Szkoda, że Autor nie poświęcił więcej miejsca temu zagadnieniu i nie przedstawił wyników symulacji numerycznych pokazujących jak dobór parametrów opisujących zastępczy odcinek niegwintowanej części trzpienia śruby wpływa na wyniki symulacji złączy H01 oraz SP02.

Na zakończenie rozdziału 5, przedstawiono badania doświadczalne i walidację etapu IV, które dotyczą 2. ram portalowych (RH, RB). Badane ramy miały węzły doczołowe, w założeniu charakteryzujące się dwoma różnymi modelami zniszczenia. Przedstawiony na wstępie opis ram badanych doświadczalnie jest zbyt ubogi, gdyż brakuje podania istotnych szczegółów konstrukcyjnych, a także nie przedstawiono szkicu węzłów obu badanych ram, z podaniem wymiarów. Opisano sposób wyznaczenia kąta obrotu węzła na podstawie kątów obrotu rygla i słupa, ale nie podano jak wyznaczono kąty składowe i jak kontrolowano pomiary realizowane za pomocą czujników przemieszczeń i inklinometrów. Nie wspomniano o pomiarze sił w łącznikach śrubowych węzła, ale recenzent zakłada, że dokonywano pomiaru w sposób przedstawiony na rys. 5.29. Wykorzystując wnioski ze wcześniejszych etapów walidacji, zbudowano model numeryczny badanych ram i przeprowadzono symulację numeryczną w celu wirtualnego odtworzenia przebiegu badań doświadczalnych. Wyniki przedstawiono w formie porównania ścieżek równowagi węzła (zależności obciążenie-obrót), uzyskanych z symulacji numerycznych oraz z badań doświadczalnych. Pokazano zależności siła w śrubie – obrót węzła. Na wykresach odnoszących się do ścieżek równowagi węzła zaznaczono obroty odpowiadające osiągnięciu punktu granicznego (punktu odpowiadającego osiągniętej przez węzeł zdolności do obrotu). Pokazano też przebieg momentu zginającego wzdłuż długości rygla (rys. 5.98) oraz słupa (rys. 5.99), w wybranym punkcie numerycznej ścieżki równowagi ramy RB. Pojawia się pytanie dotyczące wyznaczenia momentu zginającego w węźle na podstawie wyników uzyskanych z badań doświadczalnych, np. stosując równania równowagi z wykorzystaniem pomiarów odkształceń dokonywanych tensometrami elektrooporowymi. Znając doświadczalnie wyznaczoną charakterystykę moment-obrót węzła można ją porównać z charakterystyką uzyskaną z symulacji

numerycznych. Przedstawiony przez Autora zakres walidacji etapu IV ma węższy zakres niż w etapach I-III. Brakuje szerszych analiz odnoszących się do ramy RH oraz mechanizmów niszczenia węzłów obu ram, mając na uwadze założenie początkowe, że węzły ram RH i RB charakteryzują się różnymi modelami zniszczenia. Konkluzja zamieszczona na końcu rozdziału, że *wyniki IV etapu walidacji w pełni potwierdzają wiarygodność wyników* (powinno być *potwierdzają wiarygodność modelu numerycznego*) jest zasadna, gdyż Autor z pewnością zrealizował większą liczbę porównań niż te, które zostały zamieszczone w rozprawie. Należy podkreślić, że opracowany model numeryczny ma solidne podstawy naukowe, co potwierdziły etapy I-IV walidacji i mimo zbyt ubogiego omówienia wyników walidacji etapu IV, recenzent ocenia wysoko zrealizowany program badań doświadczalnych i walidację modelu numerycznego, uzasadniając wykorzystanie opracowanego modelu do analiz parametrycznych.

Rozdział 6: Wyznaczenie zdolności do obrotu węzłów, o objętości 32 stron (w tym 45 rysunków i 5 tabel) nawiązuje bezpośrednio do tytułu rozprawy i jest drugim zasadniczym rozdziałem pracy. Na wstępie Autor przedstawił analizę czynnikową, dotyczącą zidentyfikowania tych parametrów śrubowych węzłów doczołowych, które zostały uwzględnione jako różnicujące rozwiązania konstrukcyjne. Na wstępie uwzględniono węzły z blachą czołową zlicowaną o ustalonych parametrach dotyczących średnicy śruby ($d=20$ mm, kl. 10.9) i zastosowanej stali (S235) w dwóch sytuacjach projektowych: węzłów bezżebrowych (punkty DP_i planu eksperymentu) oraz węzłów z uźbrowaniem poprzecznym słupa, umiejscowionym na wysokości pasów rygła (punkty DP_{iWR} planu eksperymentu). Różnicowano wartości parametrów, które w sposób istotny wpływają na sztywność, nośność i zdolność do obrotu. Przyjętymi parametrami były: grubość blachy czołowej t_p , rozstaw łączników „w” w linii śrub w rzędzie, odległość c_{g1} osi śrub od krawędzi blachy, wysokość przekroju rygła h_b oraz wysokość przekroju słupa h_c . Plan wirtualnego eksperymentu, przedstawiony w tab. 6.2, zrealizowano dla trzech różnych parametrów każdego z uwzględnianych czynników. Zakres zmienności parametrów: t_p (12-20 mm), w (132-200 mm), c_{g1} (60-120 mm), h_b (290-490 mm) oraz h_c (300-500 mm). W odniesieniu do każdej z 27 realizacji planu wirtualnego eksperymentu zbudowano skończenie-elementowy model węzła i zaimplementowano ten model do programu komputerowego w celu wykonania analiz numerycznych. Wyniki analizy przedstawiono w postaci zależności moment-obrót, uwzględniając przedgraniczy i pograniczny zakres ścieżki równowagi węzła. Wyznaczono punkty graniczne ścieżek, odpowiadające poszukiwanej zdolności węzła do obrotu, a także zbudowano zależności siły w śrubie najbardziej wyętej przy rozciąganiu w funkcji kąta obrotu węzła. Pokazano jak uzyskiwana zdolność węzła do obrotu koresponduje z siłą rozciągającą w najbardziej wyętej śrubie. Ważniejszymi spostrzeżeniami z przeprowadzonych analiz są następujące (rys. 6.6 i tab. 6.2):

1. Przebieg krzywych moment-obrót węzła oraz uzyskiwana zdolność węzła do obrotu istotnie zależy od wartości parametrów węzła i konkretnej realizacji planu eksperymentu (niezależnie od tego, czy węzeł jest bez żeber poprzecznych słupa czy też z tego typu żebrami); węzły o mniejszych grubościach blach czołowych, w stosunku do średnicy łącznika

śrubowego, mają generalnie większą ciągliwość (pierwszy model zniszczenia), co jest szczególnie korzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa ram stężonych.

2. Do budowy modelu analitycznego uzyskiwanej przez węzeł zdolności do obrotu należy brać pod uwagę dwie populacje węzłów, DP_i oraz DP_{iWR} , gdyż zauważono istotne różnice w wartościach uzyskiwanych zdolności do obrotu przez węzły w obu populacjach; różnice w wartościach uzyskiwanej przez węzeł zdolności do obrotu dochodzą do 45% w wypadku węzłów charakteryzujących się małą ciągliwością (kruche zniszczenie poprzedzone prawie liniową zależnością moment-obrót).

3. Zdolność węzła DP_i do obrotu odpowiada sile w śrubie odpowiadającej albo punktowi granicznemu albo punktowi na części opadającej charakterystyki siła w śrubie – obrót węzła, ale bardzo blisko maksymalnej wartości siły w śrubie najbardziej wyiężonej; zakładając, że zasada ta obowiązuje również w grupie węzłów DP_{iWR} , wyniki badań Autora mają istotne znaczenie praktyczne i potwierdzają słuszność założenia przyjętego na wstępie rozprawy, że zdolność węzła do obrotu można definiować bezpiecznie jako punkt na ścieżce równowagi, który odpowiada maksymalnej sile w najbardziej wyiężonej śrubie rozciąganej.

Szczegółowa analiza wyników pozwoliła na stwierdzenie, że zmienność parametru „w” wpływa w sposób mało istotny na zmianę charakterystyki węzła oraz osiąganą zdolności do obrotu. W kolejnym etapie zbudowano więc plan eksperymentu przy założeniu stałych wartości $w=150$ mm oraz $h_c=300$ mm. Wyniki analizy potwierdziły, że spełnienie eurokodowego kryterium ciągliwości $\frac{t}{0,36d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \leq 1$, co zachodzi dla blach czołowych o grubości mniejszej niż 15 mm, węzły wykazują się ciągliwością wymaganą do plastycznej redystrybucji sił przekrojowych w układach statycznie niewyznaczalnych. W wypadku węzłów doczołowych z blachą czołową zlicowaną o grubości 12 mm ciągliwość węzłów doczołowych jest na poziomie co najmniej 60 mrad, W wypadku dużych obrotów, o wartości co najmniej 120 mrad, zachodzi niebezpieczeństwo zniszczenia w wyniku przeciągnięcia łba śruby przez otwór w blasze. W wypadku blach niespełniających kryterium eurokodowego, niebezpieczeństwo tego typu nie zachodzi. Gdy blachy są jedynie nieco grubsze niż te, które spełniają kryterium eurokodowe, ciągliwość na poziomie 60 mrad jest możliwa do osiągnięcia tylko wówczas, gdy odległość c_{g1} jest o większej wartości niż 75 mm, wysokość przekroju belki h_b zaś jest mniejsza od wysokości przekroju słupa h_c . W wypadku zastosowania blach znacznie grubszych, np. 20 mm, nie ma możliwości osiągnięcia zdolności do obrotu rzędu 60 mrad. Należy jednak dodać, że w wypadku górnej granicy zmienności parametru c_{g1} (=90 mm) i dolnej granicy zmienności parametru h_b (=240 mm) uzyskano zdolność do obrotu jedynie nieco niższą niż 60 mrad. W wypadku blach grubych, nie spełniających eurokodowego kryterium ciągliwości węzła w sposób zdecydowany (w analizowanym wypadku o 35%), może ujawnić się mechanizm zniszczenia niekorzystny z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji, mianowicie zerwanie śrub. Zaobserwowane zjawiska zostały poprawnie zidentyfikowane przez Autora, który zaproponował zawężenie zakresu zmienności grubości blach od 15 mm do 20 mm oraz zakresu zmienności parametru c_{g1} od 60 mm do 80 mm.

Końcowe analizy służące do analitycznego opisu osiągniętej przez węzły zdolności do obrotu przeprowadzono z uwzględnieniem planu eksperymentu przedstawionego w tab. 6.4. Do wyznaczenia relacji moment-obrót węzłów, o zdefiniowanej w tab. 6.4 kombinacji parametrów, zastosowano zwalidowany model numeryczny (wyniki na rys. 6.29), wyznaczając punkty graniczne odpowiadające zdolności do obrotu ϕ_u możliwej do osiągnięcia przy wzrastającym obciążeniu. Następnie, relacje uzyskane z symulacji numerycznych zmodyfikowano tak, by końcowy punkt wykresów moment-obrót odpowiadał obliczeniowej zdolności do obrotu ϕ_{ud} (wyniki na rys. 6.30), przy sile równej $F_d=0,9F_{u,mean}$ w śrubie rozciąganej, najbardziej wytężonej. Uzyskiwane przez węzły kąty obrotu mieszczą się w przedziale od kilku mrad do 60 mrad.

Na podstawie omówionych analiz i wartości liczbowych obliczeniowej zdolności węzłów do obrotu (realizacje ujęte zostały w planie eksperymentu według tab. 6.4) zaproponowano, aby obliczeniową zdolność węzła do obrotu szacować ze wzoru opisanego funkcją należącą do klasy funkcji będących iloczynem czynników potęgowych. Określenie takiej funkcji jako wielomianu potęgowego nie jest poprawne. Wielomian jest sumą składników. Zaproponowana funkcja jest iloczynem czynników, stałej „A” oraz parametrów uwzględnianych w planie eksperymentu (t_p , w , c_{g1} , h_b , h_c). Czynniki są funkcjami potęgowymi, przy czym potęgi (α , β , γ , ε , ξ) są poszukiwanymi liczbami rzeczywistymi. Nieznana stała i nieznane potęgi wyznaczone zostały z wykorzystaniem oprogramowania do nieliniowej optymalizacji. Parametry geometryczne podstawia się do zaproponowanego wzoru w [mm], ale w wyniku nakazanych działań matematycznych otrzymuje się zdolność do obrotu w rad. W związku z powyższym, stała „A” powinna mieć miano [$\text{mm}^{-(\alpha+\beta+\gamma+\varepsilon+\xi)}$ rad], które nie ma sensu fizycznego. We wzorach empirycznych wykorzystuje się na ogół zmienne bezwymiarowe, a więc w analizowanym przypadku, parametry (t_p , w , c_{g1} , h_b , h_c) można byłoby odnieść do ich wartości referencyjnych ($t_{p,ref}$, w_{ref} , $c_{g1,ref}$, $h_{b,ref}$, $h_{c,ref}$) tak, a stała „A” miała miano kąta obrotu. Wartości referencyjne parametrów można byłoby odnosić do węzła, którego zdolność do obrotu jest najbliższa wartości referencyjnej 60 mrad. W wypadku węzłów analizowanych w rozprawie jest to wartość odniesiona do realizacji DP₁₃ planu eksperymentu. Wzór (6.4) miałby wówczas postać:

$$\phi_{ud} = A \left(\frac{t_p}{15} \right)^\alpha \left(\frac{w}{160} \right)^\beta \left(\frac{c_{g1}}{80} \right)^\gamma \left(\frac{h_b}{230} \right)^\varepsilon \left(\frac{h_c}{500} \right)^\xi,$$

w którym stała „A” jest referencyjną wartością zdolności do obrotu $\phi_{ud,ref}$ odniesioną do zdolności do obrotu śrubowych węzłów doczołowych z blachami zlicowanymi.

Autor przedstawił następnie próbę oszacowania wartości momentu granicznego M_{ud} , odpowiadającego zdolności węzła do obrotu ϕ_{ud} , stosując funkcję będącą iloczynem czynników potęgowych, a więc o podobnej budowie jak funkcji przyjętej do oszacowania obrotu granicznego ϕ_{ud} . Szkoda, że Autor nie przedstawił dokładności oszacowania momentu granicznego M_{ud} za pomocą zaproponowanej funkcji, np. w podobny sposób jak oceniono dokładność predykcji granicznego kąta obrotu ϕ_{ud} (rys. 6.31). Zgodność oszacowania predykcji ϕ_{ud} i M_{ud} byłaby potwierdzeniem właściwego doboru funkcji oraz

faktu, że uwzględniono wszystkie parametry istotnie wpływające na przebieg zależności moment-obrót śrubowych węzłów doczołowych z blachami zlicowanymi.

Na zakończenie rozdziału (str. 156-160), podjęto próbę odtworzenia otrzymanych numerycznie krzywych moment-obrót za pomocą wzoru Morrisa (6.8) oraz funkcji będącej iloczynem czynników potęgowych (o podobnej budowie jak funkcji przyjętej do oszacowania obrotu ϕ_{ud} i momentu M_{ud}). Modelowanie odniesiono do wszystkich realizacji węzłów ujętych w planie eksperymentu. Krzywe przedstawione na rys. 6.32-6.45 powinny być odniesione do granicy ich ważności, więc wartości kąta obrotu $\phi = \phi_{ud}$ z kolumny 7 w tab. 6.5, co pozwoliłoby na ocenę dokładności oszacowania wartości momentu i kąta obrotu w chwili osiągnięcia obliczeniowej zdolności węzła do obrotu. Przedstawione analizy i porównania potwierdziły, że przyjęte funkcje aproksymujące wykazują niezadowalającą zgodność z wynikami numerycznymi. Wniosek wyciągnięty przez Autora na podstawie wyników przedstawionych na rys. 6.32-6.45, że *poprawę zbieżności można uzyskać przez zastosowanie innej funkcji aproksymującej krzywą rotacji $M - \phi$...* jest oczywisty i można być sformułowany na podstawie wizualnej oceny przebiegu numerycznie wyznaczonych funkcji $M - \phi$ (rys. 6.30). Bardziej obiecującym podejściem byłoby zastosowanie wzoru o podobnej budowie, jak eurokodowy wzór opisujący dwuodcinkową zależność $M - \phi$, z liniowym zakresem do chwili osiągnięcia obliczeniowej wartości sprężystego obrotu $\phi = \phi_{el}$ (gdzie $M = M_{el}$ oraz $S = S_{j,ini}$) oraz nieliniowym zakresem do chwili osiągnięcia obliczeniowej wartości granicznego obrotu $\phi = \phi_{ud}$ (gdzie $M = M_{ud}$ oraz $S = S_{j,ud}$). Parametry tej charakterystyki miałyby budowę wzoru (6.4), co stworzyłoby możliwość przejścia granicznego od charakterystyki nieliniowej węzła ciągłego do charakterystyki liniowej węzła o małej ciągłości, gdy $\phi_{ud} \rightarrow \phi_{el}$, $M_{ud} \rightarrow M_{el}$ oraz $S_{j,ud} \rightarrow S_{j,ini}$.

Rozdziały 7, 8 i 9: Wytyczne projektowania, Wnioski oraz Podsumowanie, o objętości jednej strony każdy (w tym jeden rysunek), zawierają syntetyczne omówienie zakresu badań zrealizowanych w rozprawie. Zdaniem recenzenta, rozdziały 7-8 należałoby połączyć w jeden rozdział pod tytułem *Uwagi końcowe*, a treści szczegółowe wydzielić podpunktami. Przedstawiono wnioski z analiz i studiów dotyczących zarysowanego na wstępie celu naukowego i sformułowanej tezy, w odniesieniu do racjonalnego kształtowania i obliczania śrubowych węzłów doczołowych. Teza została w pełni udowodniona wynikami badań zrealizowanych w rozprawie. Autor poprawnie definiuje i rozróżnia osiąganą zdolność węzła do obrotu oraz zdolność do obrotu wymaganą do redystrybucji sił przekrojowych w konstrukcji. Na podkreślenie zasługuje autorska definicja obliczeniowej wartości kąta obrotu węzła, jako miary jego zdolności do odkształcania, kontrolowanej przez osiągnięcie siły granicznej w najbardziej wyężonej śrubie ulegającej rozciąganiu. Sformułowane przez Autora wytyczne projektowania są precyzyjne i celnie nakierowane na te problemy, z którymi borykają się praktycy.

Na podstawie wniosków z badań zrealizowanych w rozprawie, Autor zdefiniował problemy, które mogą być przedmiotem dalszych studiów i analiz. Sformułowane wnioski praktyczne oceniam bardzo pozytywnie, co nie jest zaskoczeniem, biorąc pod uwagę fakt, że Autor jest czynnym projektantem, z wieloletnim doświadczeniem zawodowym.

3. Ogólna ocena rozprawy

3.1. Tematyka

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy aktualnej tematyki odnoszącej się do zdolności śrubowych węzłów doczołowych do obrotu, na przykładzie węzłów z blachami czołowymi zlicowanymi oraz dwoma rzędami śrub. W dotychczasowych badaniach dotyczących śrubowych węzłów doczołowych skupiono się głównie na zagadnieniach modelowania charakterystyki moment-obrót węzła oraz na ocenie dwóch parametrów tej charakterystyki, jakimi są nośność i sztywność początkowa. Mniej miejsca poświęcono dotychczas zagadnieniom związanym ze zdolnością węzłów do obrotu. Zależności opisujące zachowanie się węzłów zostały wprowadzone do eurokodowych procedur projektowania konstrukcji stalowych, ale nie ujęto tamże ogólnej procedury obliczania granicznej wartości obrotu, jaka jest osiągnięta przez węzły doczołowe. Wskazano jedynie na szczególne przypadki ukształtowania węzłów, w których węzeł można uznać za spełniający wymagania dotyczące projektowania konstrukcji stalowych z uwzględnieniem plastycznej redystrybucji sił przekrojowych.

Autor podjął w rozprawie problematykę oceny zdolności stalowych węzłów doczołowych do odkształcenia w szerszym zakresie, niż ujmują to aktualne normy projektowania, a więc w aspekcie oceny zdolności węzła do odkształcenia, w odniesieniu nie tylko plastycznej redystrybucji sił, ale ogólniej – jako zdolność do obrotu węzła, która może ograniczać sprężystą dystrybucję sił (węzły o małej odkształcalności) lub sprężysto-plastyczną redystrybucję (węzły o większej ciągliwości). Jest to bardzo ważna problematyka, szczególnie w odniesieniu do ram stężonych, w których dobór ciągliwości węzłów oraz sztywności tężników decyduje o bezpieczeństwie zaprojektowanej konstrukcji. Zagadnienie doboru sztywności tężnika w ramach stężonych jest obecnie jednym z rozwijanych kierunków badań, ale jak na razie bez jawnego uwzględnienia zjawisk związanych z odkształcalnością węzłów. Badania zrealizowane w recenzowanej rozprawie doktorskiej stanowią istotne uzupełnienie badań dotyczących ramowych ustrojów stężonych.

Autor dokonał syntezy aktualnego stanu wiedzy w zakresie badań doświadczalnych, a także numerycznych i analitycznych modeli obliczeniowych węzłów stalowych konstrukcji szkieletowych, na podstawie literatury i norm projektowania. Kandydat do stopnia doktora przeprowadził obszerne badania doświadczalne w ujęciu czteroetapowej, hierarchicznej walidacji numerycznych modeli obliczeniowych, z rejestracją przemieszczeń, obrotów oraz odkształceń w elementach składowych. Wyniki badań doświadczalnych wykorzystał do walidacji zaproponowanych modeli numerycznych. Wyniki z zaawansowanych badań doświadczalnych, dotyczących zachowania się materiału elementów składowych węzła doczołowego, elementów składowych węzła oraz układu ramowego z węzłami doczołowymi, posłużyły do walidacji modeli numerycznych. W zaawansowanych analizach numerycznych GMNA Autor posługiwał się zwalidowanymi hierarchicznie modelami materiału łączników mechanicznych i blach czołowych oraz uproszczonym, bezgwintowym modelem śruby, umożliwiającym poprawną ocenę stanów granicznych nośności i odkształcalności węzła. Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań i analiz numerycznych zaproponowano wzór

analityczny dotyczący obliczeniowego kryterium szacowania osiąganego przez węzeł obrotu, który ma interpretację fizyczną, związaną z osiągnięciem siły granicznej w najbardziej wyciężonej śrubie ulegającej rozciąganiu.

3.2. Ocena wartości naukowej

Autor wykazał się umiejętnością zaprojektowania i przeprowadzenia badań naukowych. W bardzo dobrym stopniu opanował współczesne narzędzia i techniki badawcze, rozszerzył analizy o nowe elementy i wykazał, że przy ich pomocy można przeprowadzić kompleksowe badania w zakresie oceny zdolności do obrotu śrubowych węzłów doczołowych z blachami zlicowanymi. Analizy numeryczne dotyczyły idealnej geometrii króćców i ram próbnych wykonanych w skali technicznej. Zdaniem recenzenta można było pokusić się o dokonanie pomiaru odstępstwa geometrycznego blach czołowych i elementów ram próbnych od stanu idealnego, co umożliwiłoby przeprowadzenie analiz numerycznych na podstawie mapowania nieidealnej geometrii blach czołowych i oceny wpływu imperfekcji geometrycznych na dystrybucję naprężeń w śrubach, redystrybucję naprężeń w blachach i na ujawnienie się formy zniszczenia. Zadaniem znacznie trudniejszym byłoby podjęcie próby oceny wpływu wstępnych naprężeń technologicznych, będących wynikiem procesu spawania blach czołowych na uplastycznienie i proces redystrybucji naprężeń w elementach składowych węzła.

Podsumowując, problematyka naukowa została określona prawidłowo, obejmuje w sposób wyczerpujący zagadnienia związane z badaniami doświadczalnymi, symulacjami numerycznymi oraz rozwiązaniami analitycznymi w odniesieniu do podstawowego celu rozprawy, jakim jest zdolność do obrotu węzłów stalowych ze zlicowanymi blachami czołowymi. Autor podjął próbę analitycznego opisu charakterystyki węzła, z zamierzeniem wprowadzenia do modelu kryterium osiąganego przez węzeł zdolności do obrotu. Cele badawcze rozprawy w zakresie oceny zdolności do obrotu węzłów doczołowych z blachami zlicowanymi zostały osiągnięte, a teza potwierdzona wynikami szczegółowych dociekań naukowych.

3.3. Ocena strony formalnej

Przedstawiona w rozprawie analiza i synteza aktualnego stanu wiedzy zasługuje na szczególne podkreślenie, jest przeprowadzona w sposób odpowiadający właściwemu prowadzeniu badań naukowych, a także przedstawia dotychczasowe wyniki badań i wypływające z nich wnioski w sposób przejrzysty i ilustrowany dużą liczbą rysunków, tabel oraz wykresów. Autor sprecyzował kolejne kroki w osiągnięciu założonego celu, a poszczególne zadania badawcze rozwiązywał sukcesywnie.

Podział treści na rozdziały nie jest jednak najszcześniejszy. Obok rozdziałów jedno- lub kilkustronicowych, są rozdziały kilkudziesięciostronicowe. Struktura podziału treści nie zadowala recenzenta, ale należy podkreślić, że poszczególne rozdziały przedstawiają wyniki logicznie usystematyzowanych badań i dociekań naukowych.

Pożądanym elementem każdej rozprawy naukowej jest to, aby ważne rozdziały rozprawy miały podsumowanie, w którym Autor przedstawia zakres zrealizowanych badań oraz wnioski z przedstawionych studiów i analiz. Jest to element rozprawy świadczący o dojrzałości naukowej badacza. Niestety, w recenzowanej rozprawie tylko niektóre podrozdziały są opatrzone podsumowaniem. Podsumowaniom nie nadano jednak rangi numerowanego podrozdziału.

4. Uwagi do rozprawy

4.1 Uwaga ogólna

Modele numeryczne króćców oraz ram z węzłami doczołowymi zbudowano przy założeniu, że są one wolne od naprężeń wstępnych technologicznych i montażowych, a geometria jest idealna (brak wycięć i dystorsji blach czołowych w stanie przed obciążeniem). Założenia dotyczące budowy idealnego modelu numerycznego powinny być wyartykułowane w rozprawie w sposób bardziej wyraźny, jako założenie do budowy modeli numerycznych.

4.2 Uwagi szczegółowe

O ile strona merytoryczna rozprawy nie budzi zastrzeżeń, tekst ma wiele usterek związanych ze stylem, formą gramatyczną, stosowaną terminologią oraz licznymi literówkami lub brakami łączników zdania. W odniesieniu do terminologii, m. in.: zamiast *profil* powinno być *kształtownik*, zamiast *półka dwuteownika walcowanego* powinno być *pas kształtownika walcowanego*, zamiast *krzywa rotacji $M - \phi$* powinno być *krzywa moment-obrót $M - \phi$* , zamiast *zdolność rotacyjna węzłów* powinno być *zdolność do obrotu*, zamiast *powierzchnia odpowiedzi kąta obrotu $M - \phi$* powinno być *zależność (krzywa) moment-obrót $M - \phi$* , zamiast *plastyczność przekroju* powinno być *zdolność przekroju do osiągnięcia nośności odpowiadającej przegubowi plastycznemu*, itd., tam, gdzie zasadne, zamiast *połączenie* powinno być *węzeł* (i odwrotnie), itp. **W uwagach szczegółowych niżej podano jedynie niektóre, zauważone przez recenzenta, usterki tekstu.**

Str. 26, wzory (2.13)-(2.18), a także dalej

a) Nie wszystkie symbole są wyjaśnione.

b) Oznaczenia są mylące, np. w (2.17) zamiast $\Delta \cdot l_b$ powinno być Δl_b , A_b nie może być wydłużeniem śruby, gdyż w (2.18) oznacza pole przekroju poprzecznego niegwintowanej części trzpienia.

Str. 26, w. 21 od dołu

Czy w zdaniu „Anna M. ... dokonała szerokiej analizy plastyczności i zachowania króćców stalowych” chodzi o dokonanie szerokiej analizy teorii plastyczności, czy też o niesprężyste zachowanie się króćców teowych?

Str. 28, w. 9-12 od dołu, a także dalej

O co chodzi w zdaniu „Na podstawie obserwacji doświadczalnych oraz wyników wykonanych w oparciu metodę elementów skończonych opracowano uproszczony model dwuwymiarowej belki do oceny odpowiedzi na deformację poszczególnych króćców stalowych”? Czy można wykonać wyniki w oparciu o metodę? Nie umiem wyobrazić sobie belki dwuwymiarowej? Co kryje się pod pojęciem *odpowiedź na deformację*? Unikałbym stosowania zwrotu *w oparciu* (przywołując wskazanie śp. Profesora Zbigniewa Kączkowskiego!).

Str. 40, w. 9-12 od dołu

Opis „... modele miały być alternatywą dla ograniczonych modeli dwuliniowych, które nie mogły sobie poradzić z ciągłą zmianą sztywności przejściowej (sztywności stycznej S_t), czyli w obszarze tzw. kolana” jest żargonem, a definicja sztywności stycznej błędna. Nie chodzi tu bowiem o obszar „kolana”, a o zmianę charakterystyki zachowania się węzła, chodzi o strefę przejścia ze stanu liniowego zachowania węzła do stanu nieliniowego. Model wieloodcinkowy, pokazany na rys. 2.19c ciągłą linią „łamaną” (złożoną z odcinków prostej) przybliża krzywą doświadczalną „od dołu” (krzywą doświadczalną zobrazowano na rys. 2.19c linią przerywaną) Sztywność S_t jest odcinkową sztywnością siecznej, a nie odcinkową sztywnością stycznej. Krzywą moment-obrót można również przybliżyć „od góry”, wówczas model wieloodcinkowy będzie zbudowany z odcinków prostej, których położenie opisane będzie odcinkową sztywnością stycznej.

Str. 41, wzór (2.50), także inne wzory

Drugi składnik prawej strony wzoru jest zapisany błędnie. Przyjmując we wzorze (2.48) „n” jako liczbę nieparzystą i ograniczając się do pierwszych 3 wyrazów szeregu powinniśmy otrzymać wzór (2.50)!

Str. 47, w. 4-5 od góry, także dalej

Autor stosuje terminologię *przegub* i *utwierdzenie* do opisu konwencjonalnych modeli węzła ze względu na obrót. Termin *utwierdzenie* dotyczy raczej rodzaju podparcia węzła (np. wspornik jest utwierdzony na jednym końcu, na drugim zaś ma swobodę obrotu). Jeżeli chodzi o modele węzła w ujęciu mechaniki budowli, to mówimy o węzłach przegubowych oraz węzłach sztywnych. Gdy obroty węzła sztywnego są zablokowane to węzeł jest utwierdzony, a jeżeli wszystkie pręty są przegubowo połączone w węźle, to węzeł jest przegubem.

Str. 68, w. 5-6 pod tytułem podrozdziału 4.5

„... dokonano obliczeń węzłów...”? Oblicza się wartości parametrów charakterystyki węzła lub wyznacza się przebieg charakterystyki moment-obrót węzła. Węzłów się nie oblicza!

Str. 73, w. 2 od góry, także dalej

„... w odkształconym przekroju A”? Chyba chodzi o odkształconą próbkę, której pole przekroju poprzecznego w stanie nieobciążonym wynosi A!

Str. 73-74, wzory (5.1)-(5.11) i wyjaśnienia do wzorów

Materiał nie może mieć dwóch granic plastyczności, f_y oraz $R_{p0,01}$? Moduł styczny E_y nie jest zdefiniowany na rys. 5.3, a ze wzoru (5.9) wynika, że jest to zastępczy moduł siecznej? Brak wyjaśnienia niektórych symboli.

Str. 74-75, punkty 2 i 3

Punkt 2 podrozdziału 5.2 powołuje się na krzywe naprężenie-odkształcenie w punkcie 1, ale punktu tego nie ma! W punkcie 3 podane jest przekształcenie miar inżynierskich w miary obiektywne, ale w dalszej części punktu 3 podano model z normy EN 1993-1-14, który jest modelem odnoszącym się do miar inżynierskich. Trudno zorientować się jakiemu celowi służą treści przedstawione w tym podrozdziale.

Str. 77, rys. 5.5, także dalej

Jednostką naprężenia w układzie SI jest N/mm^2 , ale Autor stosuje jednostki kN/cm^2 . Rys. 5.5 podaje charakterystykę naprężenie-odkształcenie śrub, a na kolejnych rysunkach - wyniki badań materiałowych blach i kształtowników. Cechy wytrzymałościowe odczytane z wykresów są dziesięć razy mniejsze niż wartości podawane w normach. Czytelnik zastanawia się - dlaczego odstąpiono od stosowania legalnych jednostek układu SI?

Str. 91-92, rys. 5.28 i 5.29

W tekście najpierw omawia się rozmieszczenie tensometrów (rys. 5.29), a dopiero później omówione zostały próbki teowe (5.28). Logicznym byłoby umieścić najpierw rys. 5.29 z numeracją 5.28, a za nim rys. 5.28 z numeracją 5.29.

Str. 94 dół i 95 góra

„Proces ten stanowi ok. 15% wartości całkowitego odkształcenia ...”? O co tu chodzi? Przecież proces nie może stanowić wartości odkształcenia!

Str. 97, w. 2 i 7 pod rys. 5.38 i dalej

a) „Modele MES obciążano tą samą metodą jak w badaniach laboratoryjnych”? Metodą nie można obciążyć modelu! Obciążenie można w analizie numerycznej realizować w ten sam sposób jaki stosowano w badaniach doświadczalnych.

b) Wydłużenie Δ [mm] nie jest odkształceniem ϵ [mm/mm]!

Str. 107, wiersz 2 od dołu

Naprężenia zastępcze to naprężenia Hubera-Misesa, a nie Misesa! Dbalność o polski wkład do światowej wiedzy z zakresu wytrzymałości materiałów jest podstawowym obowiązkiem

każdego z krajowych badaczy, co na każdym kroku podkreślał przywoływany już wcześniej śp. Profesor Zbigniew Kączkowski.

Str. 111, w. 1-4 nad rys. 5.70

a) „... zastosowano powierzchnie gwintowaną o długości 10 mm ...”? Wycinek powierzchni, jak sama nazwa wskazuje, ma dwa wymiary. Chodzi tu o powierzchnię gwintowaną na odcinku 10 mm długości trzpienia śruby.

b) „... zredukowano powierzchnię przekroju części gwintowanej śruby do wartości, dla której promień wynosi $r=8,7$ mm”? Promień powinien odnosić się do zredukowanego pola przekroju. Chodzi więc o zredukowane pole przekroju trzpienia śruby do wartości πr^2 , gdzie $r=8,7$ mm!

Str. 137, rys. 6.6, także dalej

Osie układu współrzędnych oznaczono błędnie jako M_u (oś rzędnych) i ϕ_u (oś odciętych), zamiast M (oś rzędnych) i ϕ (oś odciętych). Osiągana przez węzeł zdolność do obrotu ϕ_u oraz odpowiadający jej moment M_u są szczególnymi punktami charakterystyki węzła moment-obrót, a więc punkty te nie mogą być zależnością moment-obrót węzła!

Str. 137, tabl. 6.2

Ostatnie dwie kolumny dotyczą zdolności do obrotu ϕ_u wyrażonej w [mrad], a nie momentowi M_u .

Str. 140, w. 3-4 poniżej rys. 6.12

„... krzywa odpowiedzi układów bez żeber w całym zakresie analizowanych przypadków ma tendencję do zróżnicowanej zbieżności z krzywą odpowiedzi dla węzłów z elementami usztywniającymi”? O co tu chodzi? Czy chodzi o pary krzywych moment-obrót, odnoszące się do realizacji DP_i oraz DP_{iWR} (przy tym samy wskaźniku „i” oraz przyjęciu $w=135$ mm)?

Str. 141, w. 10-11 od góry, także dalej w odniesieniu do modelu zniszczenia

„Punkt konstrukcyjny DP_3 charakteryzuje się większą sztywnością ...”? Punkty nie mogą charakteryzować się sztywnością. Taką właściwość mają tylko elementy konstrukcji lub konstrukcje!

Str. 142, w. 4-5 od dołu

„Rozkład i postać linii plastyczności blachy czołowej pokrywa się ze sposobem zniszczenia ...”? Rozkład i postać linii plastyczności nie może pokrywać się ze sposobem zniszczenia. Chodzi o postać formujących się w blasze czołowej linii załomów, prowadzący w konsekwencji do dużych deformacji plastycznych i zniszczenia węzła.

Str. 142, rys. 6.14 i dalej

Opisy na rysunkach, które prezentują mapy deformacji lub mapy naprężenia są nieczytelne!

Str. 143, w. 2-3 od dołu, także w innych miejscach

„... blacha czołowa, pomimo, że w analizowanym punkcie posiada grubość ...”? Blacha może mieć grubość lub inną właściwość. Tylko ludzie mogą posiadać.

Str. 143, podpis pod rys. 6.17

Zdolność do obrotu węzła oznaczonego DP7 w planie eksperymentu jest większa niż 71,01 mrad (por. $\phi_u=118,36$ mrad w tab. 6.2)? Oznaczenia są mylące, gdyż obrót graniczny jest oznaczany raz przez ϕ_u , innym razem przez ϕ_{uc} ?

Str. 144, podpisy pod rys. 6.19 i 6.21

Nie chodzi tutaj o styk słupa (styk to połączenie dwóch współliniowych odcinków w celu zapewnienia ciągłości elementu). Tutaj chodzi o powierzchnię blachy czołowej od strony pasa słupa!

Str. 145, w. 1 od dołu

„Porównując rozkłady sił w śrubie punktów projektowych DP8 i DP3 ...” Punkty projektowe nie mają śrub, śruby występują w węzłach! Oznaczenia są mylące, gdyż realizacje planu eksperymentu oznaczono jako DP₈ i DP₃? W rozprawie naukowej należy unikać posługiwania się żargonem. W tekście rozdziału 6 „żargon goni żargon”!

Str. 146, w. 14-15 od dołu

„Rozbieżność pomiędzy osiągnięciem maksymalnej nośności na obrót ...”? Nie ma maksymalnej nośności. Nośność jest pojęciem precyzyjnie zdefiniowanym i odpowiada maksimum charakterystyki lub innej umownej wartości na ścieżce równowagi. Nie ma nośności na obrót. Jest nośność przy zginaniu, rozciąganiu, itd.

Str. 141, w. 3 od góry

Akapit rozpoczyna inne zadanie badawcze niż ujęte do tego miejsca w podrozdziale 6.2.3. Recenzent uważa, że fragment podrozdziału 6.2.3 rozpoczynający się od ww. akapitu powinien być wydzielony z podrozdziału, z odrębną numeracją jako podrozdział 6.2.4.

Str. 152, podrozdział 6.2.4

Uwzględniając ww. uwagę, rozdział miałby numerację 6.2.5. Tytuł tego podrozdziału jest niewłaściwy, gdyż nie odpowiada jego treści. W rozdziale poprzedzającym konstruowano już plany eksperymentu wirtualnego. Wyróżnikiem tego rozdziału jest: a) analiza numeryczna osiąganego przez węzeł zdolności do obrotu w odniesieniu do zawężonego zakresu zmian parametrów przyjmowanych w planie eksperymentu, b) opracowanie analitycznego sposobu szacowania osiąganego przez węzeł zdolności do obrotu, który uwzględni wpływ różnych parametrów geometrycznych.

4.3. Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa ma usterki stylistyczne, gramatyczne i terminologiczne, ale nie mają one istotnego wpływu na ocenę merytoryczną rozprawy.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Krzysztofa Ostrowskiego, zatytułowaną *Zdolność do obrotu śrubowych węzłów doczołowych konstrukcji stalowych*, która powstała w Politechnice Rzeszowskiej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Aleksandra Kozłowskiego, stwierdzam, że Autor przedstawił w pracy oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując się:

a) Ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu:

– kształtowania śrubowych węzłów doczołowych w konstrukcjach stalowych oraz oceny stanów granicznych nośności i zdolności węzłów do obrotu w zakresie szerszym niż przyjęto w eurokodach konstrukcyjnych,

– zaawansowanych badań doświadczalnych, prowadzonych etapami i równolegle z sukcesywną walidacją modelu numerycznego, wykorzystując, na każdym następnym etapie badań, doświadczenia zdobyte w etapach wcześniejszych,

– metodologii badań naukowych, która wykorzystuje procedury hierarchicznej walidacji modeli obliczeniowych, z uwzględnieniem efektów kontaktu i tarcia między elementami składowymi węzła.

b) Wiedzą praktyczną z zakresu komputerowego modelowania i zaawansowanej analizy GMNA w zastosowaniu do deterministycznej oceny nośności i odkształcalności śrubowych węzłów doczołowych z blachami zlicowanymi.

Przedstawiony w rozprawie problem naukowy mieści się w nurcie aktualnej tematyki w odniesieniu do konstrukcji stalowych, ma walory innowacyjnych analiz i badań o charakterze teoretycznym i aplikacyjnym. Autor rozpoznał aktualny stan wiedzy w tematyce objętej rozprawą, sformułował problem badawczy oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań w zakresie odpowiednim do nakreślonego celu rozprawy, a także w zakresie zastosowanej metodologii badań i sposobu wnioskowania.

Przedstawiona wyżej ocena rozprawy oznacza, że praca spełnia standardowe 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 przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Rzeszowskiej.