

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, 3.06.2021 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriana SZPYRKI pt. *Nośność niespawanych węzłów typu N kratownic stalowych z rur kwadratowych*

1. Podstawa opracowania

Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 17 lutego 2021 roku (pismo przewodniczącego prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego z dnia 19 lutego 2021 roku).

2. Zawartość rozprawy doktorskiej

Rozprawa zawarta jest na 160 stronach, w tym strona tytułowa, podziękowanie, spis treści, spis najważniejszych skrótów i symboli, tekst podstawowy złożony z 7 rozdziałów, bibliografia zawierająca 119 pozycji (bez podziału na literaturę oraz normy i wytyczne). Nienumerowane strony, na końcu rozprawy, dotyczą streszczenia w językach polskim i angielskim. Załączono płytę CD z elektroniczną wersją rozprawy.

Rozdział 1: Wprowadzenie, o objętości 4 stron (w tym 2 rysunki), zawiera informacje dotyczące tradycyjnych technik łączenia elementów konstrukcji stalowych, na których tle omówiono nowoczesne sposoby kształtowania węzłów, nie wymagające stosowania łączników, tzw. węzły typu *klucz-zamek*. Następnie przedstawiono nowe technologie wytwarzania, takie jak cięcie, topienie i spiekanie laserowe oraz drukowanie 3D detali połączeń konstrukcyjnych. Na zakończenie omówiono zastosowanie nowych technik wytwarzania w celu innowacyjnego kształtowania rozwiązań konstrukcyjnych węzłów kratownic stalowych. Zdaniem recenzenta, zbyt mało miejsca poświęcono we wprowadzeniu zagadnieniom kształtowania węzłów, porównaniu tradycyjnych oraz innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych węzłów, podania przykładów wraz z oceną zalet i wad, jako punkt wyjścia do zdefiniowania celu i zakresu badań naukowych podjętych w rozprawie.

Rozdział 2: Teza, cel i zakres pracy, o objętości 2 stron, rozpoczyna się od sformułowania tezy pracy w dwóch aspektach: 1) możliwości innowacyjnego ukształtowania węzła typu N kratownicy z kształtowników zamkniętych, bez zastosowania blach węzłowych i bez spawania prętów skratowania do pasa, w celu uzyskania nośności nie mniejszej niż w wypadku węzłów spawanych oraz 2) możliwości opracowania modeli analitycznego i numerycznego do wiarygodnej oceny nośności węzłów ukształtowanych bez blach węzłowych i bez spawania.

Omówiono zakres rozprawy oraz zawartość poszczególnych rozdziałów. Zdefiniowano problem naukowy, który dotyczy opracowania metod oceny nośności innowacyjnego węzła N RK klucz-zamek, ukształtowanego bez blach węzłowych i bez spawania oraz wykonanego nowoczesnymi technikami cięcia laserowego.

Rozdział 3: Analiza stanu wiedzy, o objętości 28 stron (w tym 37 rysunków), zawiera omówienie aktualnego stanu wiedzy w zakresie kształtowania spawanych węzłów stalowych konstrukcji przekryć, węzłów typu klucz-zamek w połączeniach belek ze słupami konstrukcji stalowych (regaly magazynowe z kształtowników giętych, konstrukcje słupowo-ryglowe z kształtowników, konstrukcje kratownic stalowych z węzłami typu T i N). Uwzględniono rozwiązania chronione patentami oraz omówiono zastosowanie metody składnikowej do oceny nośności na podstawie linii załomów. Na zakończenie omówiono węzły klucz-zamek typu N pierwszej generacji, w zastosowaniu do kratownic z rur kwadratowych. Rozdział kończy się podsumowaniem, co ułatwia czytelnikowi ocenę zakresu oraz zasadności badań podjętych przez Autora w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Rozdział 4: Badania doświadczalne, o objętości 25 stron (w tym 37 rysunków i 4 tabele), jest pierwszym z zasadniczych rozdziałów pracy. Zawiera informacje dotyczące celu i zakresu badań doświadczalnych. Zdaniem recenzenta należało szerzej omówić samą koncepcję rozważanego węzła oraz wyjaśnić na czym polegało udoskonalenie metodyki badań w odniesieniu do badań wcześniej zrealizowanych. Samo stwierdzenie, że przy planowaniu badań eksperymentalnych na potrzeby opiniowanej rozprawy doktorskiej skorzystano z doświadczeń zdobytych w badaniach węzłów omówionych w rozdziale 3 jest zdaniem recenzenta niewystarczające.

Na wstępie omówiono badania materiałowe oraz przedstawiono wyniki tych badań, podając wartości średnie granicy plastyczności oraz odchylenie standardowe uzyskane z 3 prób w każdej z serii badań. Właściwe badania dotyczyły zachowania się węzłów pod obciążeniem przekazywanym przez siłowniki na pręty, a za ich pośrednictwem na węzły. Omówiono stanowisko badawcze, realizowaną historię obciążenia i sam przebieg doświadczeń. Koncepcję badań i jej praktyczne wdrożenie oceniam pozytywnie. Autor pokonał trudności związane z realizacją sposobu obciążenia węzła, który zapewnił zachowanie równowagi sił odpowiadającej realnemu ustrojowi kratowemu. Wyniki przedstawiono na wykresach w formie pomierzonych przemieszczeń ścianek pasa od obciążenia przekazywanego przez słupki. Przebieg przemieszczeń ścianek w funkcji obciążenia ma na ogół charakter nieliniowy, przy czym można wyróżnić 3 obszary: obszar sprężystego zachowania się węzła, z początkowym modułem stycznej K_{el} , obszar krzywoliniowej charakterystyki w strefie przejściowej, gdy ujawniają się załomy plastyczne, a następnie zakres sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem geometrycznym, gdzie zależność jest praktycznie liniowa, ale z modułem stycznej K_{har} mniejszym niż moduł początkowy K_{el} . Wykres otrzymany eksperymentalnie przybliżano wykresem dwuliniowym, pomijając obszar przejściowy. Przecięcie się stycznych do wykresu w fazach obciążenia i odciążenia, które następowało na tym samym poziomie obciążenia przekazywanego z pręta skratowania na pas, uznano za nośność sprężystą $N_{el,exp}$. Nośność $N_{el,exp}$ odpowiadającą obciążeniu w punkcie przecięcia stycznych można porównywać z nośnością definiowaną obliczeniowo jako nośność najslabszego ogniwa

w analitycznym modelu eurokodowej metody składnikowej. Walidację modelu numerycznego można wówczas przeprowadzić na podstawie oceny wiarygodności odtworzenia ścieżki równowagi otrzymanej z badań eksperymentalnych, przyjmując cechy geometryczne badanego węzła oraz właściwości mechaniczne materiału na podstawie wartości średnich z badań inwentaryzacyjnych geometrii węzła i badań materiałowych. Uważam, że używany przez Autora termin „nośność sprężysta” nie jest uzasadniony i lepszym określeniem jest „umowna nośność sprężysta”, gdyż w chwili osiągnięcia poziomu obciążenia odpowiadającego umownej nośności sprężystej występują lokalne odkształcenia plastyczne, których nie można zaobserwować na wykresie ścieżki równowagi ścianki pasa w cyklu obciążenie-odciążenie. Autor nie przeprowadził pomiarów dotyczących mapowania pola odkształceń w ściance pasa i nie przedstawił wyników w postaci map ewolucji naprężeń. Formy deformacji ścianek przedstawione na przykładzie elementów próbnych po badaniach, w szczególności na podstawie widoku węzła po rozcięciu w charakterystycznych przekrojach wykorzystano w rozprawie do oceny wiarygodności zbudowanego modelu numerycznego.

Rozdział kończy się podsumowaniem. W podsumowaniu Autor stwierdza, że „nośności uzyskane w badaniach doświadczalnych posłużą do weryfikacji propozycji jej oszacowania za pomocą modeli teoretycznych”. Należy wyraźnie rozróżnić weryfikację od walidacji modelu obliczeniowego. Weryfikację modelu analitycznego metody składnikowej można przeprowadzić przez porównanie nośności wyznaczonej tą metodą z umowną nośnością sprężystą wyznaczoną na podstawie ścieżek równowagi z symulacji numerycznej przebiegu badań eksperymentalnych. Walidację modelu numerycznego można natomiast przeprowadzić na podstawie oceny stopnia zgodności ścieżek równowagi uzyskanych doświadczalnie i numerycznie, a także na podstawie oceny stopnia zbieżności wartości umownej nośności sprężystej wyznaczonej na podstawie ścieżek równowagi z badań doświadczalnych oraz z symulacji numerycznych, posiłkując się tą samą koncepcją dwuliniowej aproksymacji ścieżki równowagi.

Rozdział 5: Oszacowanie nośności niespawanych węzłów N RK klucz-zamek, o objętości 28 stron (w tym 19 rysunków i 5 tabel), jest drugim z kolei zasadniczym rozdziałem pracy. Rozdział rozpoczyna się od omówienia koncepcji innowacyjnego węzła typu N RK klucz-zamek II generacji, różniącego się pod względem konstrukcyjno-materiałowym od rozwiązania N RK generacji I, opisanego w rozdziale 3 (podrozdział 3.7.2). Należy zwrócić uwagę na fakt, że koncepcja węzła N RK generacji II, przedstawiona w rozprawie, jest kolejnym etapem badań, które zapoczątkowane zostały pod kierunkiem promotora rozprawy w ramach projektów badawczo-rozwojowych w Politechnice Białostockiej, m.in. realizowanego w latach 2009-2012 grantu NCBR pt. *Kratownice i ramownice stalowe o węzłach kształtowanych laserowo w formie klucz-zamek nie wymagających spawania*. W rozdziale 4 przedstawiono badania doświadczalne węzła generacji II, ale nie podano szczegółów rozwiązania konstrukcyjnego tego węzła, co nastąpiło dopiero w omawianym rozdziale 5. Studiowanie rozprawy jest więc utrudnione i wynika z faktu, że w trakcie studiowania rozdziału dotyczącego badań doświadczalnych czytelnik nie zna szczegółów technicznych badanego węzła i nie jest świadomy różnic między rozwiązaniami węzła N RK

generacji II i opracowanego wcześniej węzła N RK generacji I. Recenzent uważa, że podrozdział 5.1 powinien być przeniesiony do rozdziału 4 (jako podrozdział 4.1).

Kolejne podrozdziały, od podrozdziału 5.2, poświęcono problematyce oceny nośności węzłów badanych doświadczalnie eurokodową metodą składnikową (z ang. component method). Opisano zaobserwowane podczas badań modele zniszczenia węzłów, wyodrębniając 9 składników węzła. Następnie zdefiniowano parametry geometryczne analitycznych modeli obliczeniowych służących do oceny nośności poszczególnych składników oraz zależności wyjściowe dotyczące warunków równowagi opisujących mechanizmy zniszczenia. Tam, gdzie było to konieczne, przyjęto założenia upraszczające w celu przedstawienia wyników formuł obliczeniowych w formie przyjaznej do praktycznego zastosowania. Na podstawie wyprowadzonych zależności, dokonano oceny nośności węzłów badanych doświadczalnie. Podjęto próbę porównania, pod kątem niezawodnościowym, rozwiązania konstrukcyjnego węzła N RK klucz-zamek rozważanego w rozprawie i odpowiadającego mu rozwiązania węzła spawanego. Wykazano, że węzły N RK klucz-zamek mają znacznie większą nośność niż węzły N RK spawane. Jest to wniosek o istotnym znaczeniu praktycznym, gdyż niezawodność ustroju kratowego wzrasta, gdy nośność węzłów wzrasta. Rozdział kończy się podsumowaniem.

Rozważania przedstawione w rozdziale 5 oceniam bardzo pozytywnie, chociaż ograniczają się tylko do zachowania się węzła w płaszczyźnie ustroju kratowego (z ang. in-plane behaviour). Ponieważ rozważania odnosiły się wyłącznie do zachowania się węzłów w płaszczyźnie ustroju kratowego, pojawia się pytanie, czy Autor brał pod uwagę zagadnienia związane ze stabilnością zachowania się badanego węzła z uwagi na możliwość utraty stateczności kratownicy z płaszczyzny ustroju. Jakie wymogi należałoby spełnić, aby rozważane w rozprawie węzły były w pełni efektywne w przenoszeniu sił zarówno w płaszczyźnie kratownicy, jak również z uwagi na możliwość utraty stateczności z płaszczyzny (z ang. out-of-plane stability).

Rozdział 6: *Oszacowanie nośności węzłów za pomocą analizy numerycznej*, o objętości 46 stron (w tym 52 rysunki i 3 tabele), jest trzecim z kolei zasadniczym rozdziałem rozprawy. Nietrudno zauważyć, że jest to najobszerniejszy rozdział rozprawy. Autor ujmuje bowiem w tym rozdziale złożone zagadnienia walidacji (dot. badania adekwatności wyników z symulacji zachowania się modeli numerycznego i fizycznego) oraz weryfikacji (dot. badania zgodności oszacowania nośności węzłów na podstawie modeli analitycznego i numerycznego oraz podobieństw opisywanych mechanizmów zniszczenia). Recenzent uważa, że bardziej logicznym byłaby inna struktura podziału treści, związana z wyraźnie rozdzielonymi częściami dotyczącymi walidacji i weryfikacji, np. w formie dwóch odrębnych rozdziałów.

Na wstępie omawianego rozdziału 6, Autor dokonuje zwięzłego opisu czynników wpływających na tworzenie modeli numerycznych o zadowalającym stopniu wiarygodności, a także wprowadza dodatkowe wątki odnoszące się do oceny węzłów z punktu widzenia stanu granicznego użyteczności (kryterium dopuszczalnych przemieszczeń) oraz stanu granicznego nośności w ujęciu kryterium Manna-Kendalla. W kolejnych podrozdziałach podano szczegóły dotyczące budowy numerycznego modelu węzła wraz z elementami hierarchicznej walidacji na poszczególnych etapach budowy tego modelu. W pierwszej

kolejności poruszono zagadnienia związane z walidacją modelu stali na podstawie wirtualnego odtworzenia statycznej próby rozciągania. Numeryczny model zachowania się próbki użytej do badań materiałowych dotyczył elementu „wyciętego” z kształtownika użytego do budowy fizycznych modeli węzłów. W modelu numerycznym zbadanej próbki wykorzystano charakterystykę σ - ε stali z badania materiałowego. Odtworzono zachowanie się numerycznego modelu próbki w wirtualnej próbie statycznego rozciągania. Porównanie ścieżek równowagi wirtualnej i realnej oraz mechanizmów zniszczenia próbek pozwoliło na stwierdzenie, że model materiału można przyjmować na podstawie charakterystyki σ - ε z próby jednoosiowego rozciągania pod warunkiem, że w modelu numerycznym stosuje się miarę rzeczywistą naprężeń i odkształceń, odniesioną do ich wartości nominalnych z badań materiałowych na próbkach fizycznych. Sam sposób walidacji modelu materiałowego jest poprawny, ale w opisie zastosowanej metody dyskretyzacji krzywoliniowego wykresu zależności σ - ε z realnej próby jednoosiowego rozciągania (miara inżynierska) brak jest informacji w jaki sposób przeprowadzono dyskretyzację. Dokładność oceny zależy bowiem od liczby punktów przyjętych do dyskretyzacji realnej charakterystyki σ - ε . Jeżeli podział realnej charakterystyki będzie zbyt „rzadki”, w szczególności będzie to charakterystyka dwuliniowa sprężysto-idealnie-plastyczna, to możliwość odtworzenia statycznej próby rozciągania na podstawie wirtualnej symulacji próby rozciągania drastycznie spada. Oczywiście dokładność symulacji zależy też od sposobu dyskretyzacji geometrycznej próbki. Autor przeprowadził analizę sposobu dyskretyzacji z wykorzystaniem elementów bryłowych C3D8R, zagęszczając siatkę tylko w z uwagi na jeden kierunek (por. rys. 6.3). Przy takim sposobie dyskretyzacji, w strefie pomiarowej i niszczenia próbki uzyskano elementy skończone o wymiarze znacznie mniejszym na kierunku przyłożenia obciążenia niż na kierunku prognozowanej linii zerwania próbki. W efekcie model numeryczny pozwolił na poprawne odtworzenie krzywej siła-wydłużenie z realnej próby rozciągania (por. rys. 6.4) w zakresie wznoszącej charakterystyki F - Δ . „Przewężenie” próbki symulowane numerycznie następowało znacznie wcześniej niż w badaniach realnych. Zbliżenie wyników z symulacji zachowania się modelu numerycznego próbki materiałowej, do jej zachowania się rzeczywistego, można byłoby uzyskać w sytuacji bardziej „rafinowanej” dyskretyzacji geometrycznej. Poza tym, z uwagi na brak jednoznaczności w opisie próbek w rozdziałach 4 i 6 (rys. 4.2-4.8 i tab. 4.1 oraz rys. 6.4 i tab. 6.1), recenzent miał wątpliwości odnoszące się do wyznaczonych miar odchylenia Δ , podanych w tab. 6.1.

Zamieszczone w dalszych podrozdziałach opisy rodzaju analizy oraz budowy siatki elementów skończonych do modelowania węzła, są zdaniem recenzenta zbyt ogólnikowe. Na podstawie podanych także informacji, nie ma możliwości odtworzenia przez czytelnika ścieżki obliczeniowej zrealizowanej przez Autora w celu potwierdzenia wyników przedstawionych na wykresach i w tabelach. Tytuł podrozdziału 6.2.6 sugeruje, że w rozdziale tym zostanie przedstawiony ostateczny wynik walidacji hierarchicznej numerycznego modelu węzłów. Rozdział nie spełnia oczekiwań zapowiedzianych w tytule, gdyż zasadnicze wyniki odnoszące się do procesu walidacji umieszczono w podrozdziale 6.4. Z kolei tytuł tego podrozdziału nie odnosi się do walidacji, a sugeruje zamieszczenie wyników analiz numerycznych. Struktura i podział treści rozdziału 6 są mało czytelne, co nie ułatwia śledzenia zasadniczego wątku badań, nakreślonego sformułowanymi na wstępie rozprawy тезami i celami naukowymi.

Opisy kryteriów oceny nośności zawarte w podrozdziale 6.3 są zdaniem recenzenta zbędne, gdyż w odniesieniu do kryterium użyteczności dopuszczalnych przemieszczeń można powołać się na odpowiednią pozycję literatury, kryterium zaś Manna-Kendalla jest w rozprawie ograniczone jedynie do przedstawienia opisu zaczerpniętego z powoływanej pozycji literatury i zawartego tamże przykładu. Nie podjęto próby zastosowania omawianego kryterium do oceny nośności węzłów z wykorzystaniem wyników badań doświadczalnych zrealizowanych na potrzeby opiniowanej rozprawy doktorskiej.

Porównanie nośności eksperymentalnej i nośności wyznaczonej na podstawie analiz numerycznych, przedstawione w tabl. 6.2, a także porównanie ścieżek równowagi, dają podstawy do stwierdzenia, że model numeryczny został pozytywnie zwalidowany. Do walidacji wykorzystano wyniki dotyczące nośności i lokalnego przemieszczenia ścianek badanych węzłów, a także formy deformacji zarejestrowane w stanie granicznym. Wniosek dotyczący pozytywnego procesu walidacji został sformułowany na podstawie stwierdzenia, że maksymalna różnica między eksperymentalnie ocenioną nośnością $N_{el,exp}$ i oszacowaniem na podstawie analiz numerycznych $N_{el,FEM}$ wynosi średnio ok. plus/minus 15%. Rozważania poparto analizą podobieństwa deformacji węzłów. Deformacje rejestrowano po badaniach fizycznych modeli węzłów i w analizie numerycznej zachowania się wirtualnych modeli MES. Przedstawiono mapy naprężeń i przemieszczeń. Chociaż w badaniach doświadczalnych nie rejestrowano ewolucji pól odkształcenia ścianek prętów w obrębie węzła, to zamieszczone mapy pozwalają na wyciągnięcie szeregu wniosków praktycznych dotyczących roli poszczególnych składników w procesie obciążenia i niszczenia węzła. Autor dokonuje analizy map naprężeń i przemieszczeń, poprawnie wyciągając wnioski dotyczące mechanizmów deformacji i wyodrębnienia składnika decydującego o zniszczeniu węzła.

Zdaniem recenzenta, w rozdziale 6 brakuje porównania modułów stycznej dwuliniowego wykresu aproksymującego charakterystyki obciążenie-przemieszczenie z eksperymentu i analiz MES. Porównanie nośności w punkcie przecięcia stycznych jest miarodajne, gdy występuje zgodność wartości modułów stycznej z eksperymentu i symulacji MES. W wypadku braku zgodności modułów stycznej, porównywanie nośności jest mało miarodajne, gdyż te same wartości liczbowe w punkcie przecięcia stycznych można otrzymać przy różnych wartościach modułów stycznej do wykresu otrzymanego z eksperymentu i do wykresu otrzymanego z symulacji MES. Z wykresów przedstawionych na rysunkach 6.29, 6.32, 6.34, 6.38, 6.40, 6.44, 6.46, 6.50 i 6.52 wynika, że zgodność charakterystyk obciążenie-przemieszczenie otrzymanych z eksperymentu i analiz MES jest na różnym poziomie dokładności.

W rozdziale 6 nie dokonano weryfikacji oceny nośności $N_{el,FEM}$ wyznaczonej na podstawie analiz MES i $N_{el,CM}$ wyznaczonej analitycznie metodą składnikową. Porównanie średniej wartości parametrów $N_{el,exp}/N_{el,FEM}$ oraz $N_{el,FEM}/N_{el,CM}$ pozwala na wyciągnięcie wniosków odnoszących się do stopnia wiarygodności oceny nośności.

Z przedstawionej niżej tabeli wynika, że opracowany w rozprawie model MES pozwala na zadowalającą ocenę nośności analizowanych węzłów. Model analityczny wykorzystujący metodę składnikową daje oszacowania po stronie bezpiecznej w stosunku do modelu numerycznego.

| Węzeł ^{*)} | Walidacja | | - | Eksperyment vs. MES | MES vs. m. składnikowa |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | - | Weryfikacja | | | |
| | $N_{el,exp}$ [kN] | $N_{el,FEM}$ [kN] | $N_{el,CM}$ [kN] | $N_{el,exp} / N_{el,FEM}$ | $N_{el,FEM} / N_{el,CM}$ |
| WN2 | 123,8 | 124,0 | 88,2 | 1,00 | 1,40 |
| WN4 | 31,0 | 30,9 | 39,4 | 1,00 | 0,78 |
| WN5 | 39,2 | 44,2 | 45,8 | 0,89 | 0,96 |
| WN6 | 58,5 | 50,0 | 55,1 | 1,17 | 0,91 |
| WN7 | 95,0 | 87,1 | 88,2 | 1,09 | 0,99 |
| WN8 | 85,0 | 90,0 | 62,0 | 0,94 | 1,45 |
| WN9 | 106,5 | 120,0 | 122,1 | 0,89 | 0,98 |
| Srednia | | | | 1,00 | 1,07 |
| *) Pominięto węzły WN1, WN3 | | | | | |

Rozdział 7: Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac, o objętości 4 stron, przedstawia syntetyczne wnioski z badań zrealizowanych na potrzeby rozprawy, z potwierdzeniem słuszności tez sformułowanych na wstępie, a także sugerowane kierunki dalszych badań. W opinii recenzenta, przedstawione tezy rozprawy zostały potwierdzone i zamierzony cel rozprawy został osiągnięty.

3. Ogólna ocena rozprawy

3.1. Tematyka

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy aktualnej tematyki oceny nośności węzłów typu klucz-zamek, kształtowanych bez blach węzłowych i spawania prętów. W okresie ostatnich dekad można zaobserwować zauważalny wzrost zainteresowania tego typu węzłami. Znalazły one szerokie zastosowanie w konstrukcjach regałów wysokiego składowania, wykonanych ze stalowych kształtowników giętych. Równolegle podjęto badania związane z kształtowaniem i obliczaniem węzłów typu klucz-zamek w konstrukcjach ze stalowych kształtowników walcowanych. Rozwiązania dostosowane są do automatyzacji procesów wytwarzania z zastosowaniem nowoczesnych technik laserowego cięcia. W wyniku realizacji badań o charakterze badawczo-rozwojowym powstały rozwiązania węzłów typu klucz-zamek chronione patentami. Badania zrealizowane w rozprawie doktorskiej dotyczą rozwiązania konstrukcyjnego węzła N RK, na który Urząd Patentowy RP udzielił zastrzeżenia pod numerem P.424969.

Autor dokonał syntezy aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematyki objętej rozprawą, w tym numerycznych i analitycznych modeli obliczeniowych w odniesieniu do węzłów będących przedmiotem rozważań, uwzględniając literaturę naukowo-techniczną oraz normy i wytyczne projektowania. Przeprowadził obszerne badania doświadczalne, a wyniki badań doświadczalnych wykorzystał do oceny wiarygodności modeli numerycznych. Wyniki otrzymane z symulacji na modelach numerycznych porównano z wynikami uzyskanymi w badaniach na modelach fizycznych. Stwierdzono zadowalającą zgodność wyników odnoszących się do modeli numerycznych odtwarzających zachowanie się modeli fizycznych w badaniach doświadczalnych. Wyniki badań przeprowadzonych na modelach fizycznych oraz analiz wykorzystujących opracowane w rozprawie modele analityczne i numeryczne

pozwoły na wyciągnięcie wniosków o charakterze praktycznym. Sformułowano ponadto szereg zaleceń o charakterze ogólnym i wskazano kierunki dalszych badań.

3.2. Ocena wartości naukowej

Materiał zawarty w rozprawie jest obszerny i wartościowy, ale zdaniem recenzenta zakres badań ujętych w rozprawie nie pozwala na wyciąganie wniosków zbyt ogólnych. Autor zdaje sobie sprawę z tego faktu, stwierdzając m. in. „Wykonane modele numeryczne ... mogą być wykorzystane do dalszych analiz i studiów”. Opracowany w ramach rozprawy model numeryczny wymaga dalszych badań przed jego wykorzystaniem do analiz parametrycznych. Analizy parametryczne umożliwiłyby uzyskanie informacji na temat wpływu różnych czynników na nośność węzła, które nie mogą być szerzej zbadane na modelach fizycznych. Podejście polegające na badaniach doświadczalnych, które są przeprowadzone w węższym zakresie w celu walidacji modelu numerycznego, a następnie wykorzystanie zwalidowanego modelu numerycznego do szerszych analiz parametrycznych lub do tworzenia nowych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych jest obecnie przyjmowane jako standardowe podejście w badaniach naukowych.

Autor zaprojektował i przeprowadził badania doświadczalne, opracował w rozprawie numeryczne i analityczne modele obliczeniowe, dokonał porównania wyników badań doświadczalnych i numerycznych w zakresie ścieżek równowagi i ewolucji mechanizmów deformacji prowadzących do zniszczenia węzła. W dobrym stopniu opanował współczesne narzędzia i techniki badawcze, rozszerzył analizy o nowe elementy i wykazał, że przy ich pomocy można ocenić przydatność nowych rozwiązań technicznych, poszerzających zakres zastosowania węzłów N RK typu klucz-zamek w projektowaniu konstrukcji stalowych.

Podsumowując, problematyka naukowa została określona prawidłowo, obejmuje swym zakresem zagadnienia związane z badaniami doświadczalnymi, symulacjami numerycznymi oraz rozwiązaniami analitycznymi, w odniesieniu zarówno do nośności, jak i form zniszczenia węzłów N RK typu klucz-zamek.

Przyjęte cele badawcze i tezy rozprawy zostały potwierdzone wynikami dociekań naukowych.

3.3. Ocena strony formalnej

Rozprawa nie budzi zasadniczych zastrzeżeń od strony użytego języka oraz terminologii naukowo-technicznej. Zauważone usterki nie obniżają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy. Należy podkreślić, że każdy rozdział zawierający wyniki analiz i dociekań naukowych Autora został opatrzony podsumowaniem. Opracowanie podrozdziałów w formie podsumowania każdego rozdziału uważam za pożądany i niezbędny element rozprawy doktorskiej.

4. Uwagi do rozprawy

Zwrócono uwagę na najważniejsze usterki tekstu, zarówno redakcyjne jak i o charakterze merytorycznym. Uwagi sformułowano do wydzielonych tytułami fragmentów rozprawy doktorskiej, podając tytuł odnoszący się do podziału treści, stronę oraz miejsce występowania omawianego fragmentu tekstu.

Spis najważniejszych skrótów i symboli

Str. 9

Wykaz, o objętości 3 stron, zawiera skróty, które dotyczą odmiennych terminów, np. z ang. SLS oznacza nie tylko selektywne spiekanie laserowe, ale również stan graniczny użyteczności, co w należałoby zaznaczyć.

Granice plastyczności oznaczana się jako f_y . W pracy stosuje się dodatkowe oznaczenia granicy plastyczności, np. f_{y0} – granica plastyczności kształownika pasa (jak podano w wykazie). W tekście samej rozprawy znajdują się jeszcze inne oznaczenia, nie ujęte w wykazie, np. f_{yh} .

Str. 10

Symbole dotyczące nośności węzła kratownicy wymagają bliższego dookreślenia, np. $N_{b,Rd}$ – nośność z uwagi na wyboczenie ściskanych ścianek bocznych kształownika pasa, $N_{el,exp}$ – umowna nośność sprężysta wyznaczona na podstawie eksperymentu, $N_{el,MES}$ – umowna nośność sprężysta wyznaczona na podstawie analiz MES ($N_{el,FEM}$), N_{exp} – nośność graniczna wyznaczona na podstawie eksperymentu ($N_{ult,exp}$), N_{teo} – umowna nośność sprężysta wyznaczona na podstawie modelu teoretycznego ($N_{el,th}$).

W pracy naukowej wykorzystującej symbole z terminologii anglosaskiej, indeksy powinny nawiązywać do tej terminologii, np. „th” od *theoretical*, a nie „teo” od *teoretyczny*, nośność wyznaczona na podstawie analiz MES $N_{el,FEM}$, a nie $N_{el,MES}$, itp.

1. Wprowadzenie

Str. 13, w. 16 od góry

Termin „połączenia klejone”, aczkolwiek stosowany był w początkowym okresie stosowania kleju jako łącznika konstrukcyjnego w budownictwie, został zastąpiony terminem „połączenia klejowe”, podobnie jak „połączenia śrubowe”. Autor w dalszej części rozprawy stosuje poprawnie termin „połączenia klejowe”.

Str. 14, w. 5 od góry

Skróty odnoszące się do kształowników o przekroju zamkniętym dotyczą słownictwa polskiego RK – *rura kwadratowa* (zamiast SHS, z ang. *square hollow section*), RO – *rura okrągła* (zamiast CHS, z ang. *circular hollow section*), PO – *pręt okrągły* (zamiast CSS, z ang. *circular solid section*). Ponieważ w rozprawie stosuje się oznaczenia pochodzące z j. angielskiego, można było i w tym wypadku używać skrótów angielskich, podobnie jak skróty innych terminów umieszczone w wykazie, na początku pracy.

Str. 14, w. 6-8 od góry

Zdanie „Obecnie najbardziej skuteczną formą obniżki kosztów węzłów ... są nowe metody i standardy wykonania ...zagadnienia obejmujące proces technologiczny w wytwórniach ... itd.” wymaga nowej redakcji. *Obniżka kosztów* jest żargonem, chodzi o *obniżenie kosztów*, a formą obniżenia kosztów nie mogą być *zagadnienia obejmujące*.

Str. 14, w. 2 od dołu i dalej na str. 15

Fragment napisano w sposób mało precyzyjny i wymaga przeredagowania. Np. „Obecnie sektor architektoniczny stanowi 3% wszystkich zastosowań AM i najczęściej nie są to produkty używane w rzeczywistych obiektach ...”. Sektor nie może stanowić części zastosowań AM. Zastosowanie technologii AM w konkretnym sektorze może stanowić pewien procent ogólnych zastosowań AM w gospodarce. AM zdefiniowano jako metodę wytwarzania, technologię.

„Szerokie spektrum możliwości, które zapewnia technologia AM oraz ewentualny jej wpływ na zmianę procesu projektowania ... nadal wymagają badań i upowszechnienia ...”. Jakich badań wymaga spektrum możliwości realizacji produktu w technologii AM? Chyba chodzi o poszukiwanie nowych możliwości zastosowań technologii AM w budownictwie.

Zdanie zaczynające się od słów „W wypadku elementów złożonych geometrycznie ...” jest mało precyzyjne. Nie chodzi o *złożenie geometryczne elementów*, a o *elementy o złożonej geometrii*.

Zdanie „Główną przewagą jej zastosowania [zastosowania technologii]... jest szerszy zakres kształtów elementów wykonywanych w jednej części” jest nieprecyzyjne. Przewagą może być możliwość wykonania elementów o zróżnicowanym kształcie.

3. Analiza stanu wiedzy

Str. 19, w. 7 od dołu

Określenie „maszyny numeryczne” należy zastąpić przez „maszyny sterowane numerycznie”.

Str. 22, w. 1-2 od góry i dalej

Zamiast „typu N I generacji” powinno być „typu N RK generacji I”. Dotyczy to też węzłów II generacji.

4. Badania doświadczalne

Str. 45, w. 5 od góry

Zdanie „planowanie badań oparto na doświadczeniach zdobytych podczas badania...” wymaga przeredagowania. Chodzi o doświadczenia zdobyte (wiedzę zdobytą) podczas realizacji programu badań dotyczących węzłów I generacji.

Str. 47, w. 8-9 od góry

Zdanie „... węzły typu N klucz-zamek kratownicy z kształtowników RK, do których przykładano obciążenie ...” wymaga przeredagowania. Siły przykładano do prętów, za pośrednictwem których realizowany był stan obciążenia węzła.

Str. 52, Tabela 4.1 i dalej

Tytuł w nagłówku pierwszej kolumny „Profil” jest niepoprawnie użyty. Nagłówek odnosi się do wyrobu stalowego, a nie profilu. Rury kwadratowe są kształtownikami, zaś pręty okrągłe i blachy wchodzi w skład asortymentu wyrobów hutniczych.

Zmienna \bar{y} dotyczy wartości średniej zmiennych losowych y_i , s dotyczy zaś odchylenia standardowego populacji y_i . W tabeli należy podać konkretnie, np. w odniesieniu do umownej granicy plastyczności powinno być odpowiednio $\bar{R}_{e0.2}$ oraz s_{Re} .

Str. 57, w. 7 pod Tab. 4.3

Zdanie „Na potrzeby badania węzła nośność węzła oszacowano ... Podzielono ją przez dziesięć i w ten sposób uzyskano obciążenia pojedynczego kroku ...” jest nieprecyzyjne. Chodzi o przyrostową realizację programu obciążenia i przyjęcie kroku przyrostu obciążenia (sił przyłożonych do prętów), a nie o dzielenie nośności?

Str. 60, w. 3-5 od góry

Fragment „Zwalidowano wartości przemieszczeń ścianek pasa węzła. Wartości pomierzone w naturze były zgodne z wartościami uzyskanym za pomocą systemu pomiarowego” jest niezrozumiały. O co chodzi ze zgodnością pomiaru w naturze i pomiaru za pomocą systemu pomiarowego? Czy chodzi o pomiar trwałych przemieszczeń ścianek po zrealizowaniu badań?

Str. 69, rys. 4.34

W opisie jest błąd dotyczący numeracji węzła. Chodzi o węzeł WN8.

5. Oszacowanie nośności niespawanych węzłów N RK klucz-zamek

Str. 82, w. 1-3 od dołu i dalej

Wyrażenie „... nośności poszczególnych składników wzoru ..” jest niepoprawne. Nośność nie może dotyczyć składnika wzoru, a jedynie obiektu fizycznego. Każdy składnik wzoru może reprezentować składnik węzła, a więc można mówić o nośności składnika węzła, ale wcześniej należy zdefiniować składniki węzła odpowiadające składnikom wzoru!

Str. 83, Tab. 5.1 i dalej

Należy podać jednostki w rubrykach, gdzie podano wartości liczbowe. Dotyczy również następujących tabel.

Str. 83, wzór (5.22)

Błąd po prawej stronie wzoru – należy usunąć pierwiastek.

Str. 86, wzór (5.35)

Po wzorze należy podać jego rozwiązanie $y = \dots$

Str. 93, w. 5 od góry

Należy podać w jaki sposób wyznacza się współczynnik wyboczeniowy i jak definiuje się smukłość ścianki oraz z jakiej krzywej wyboczeniowej skorzystano. Czy jest to jedna

z eurokodowych krzywych niestateczności ogólnej? Jeżeli tak, to należy podać uzasadnienie stosowania tej konkretnej krzywej.

Str. 98, pod Tab. 5.4

Nośność teoretyczna węzła N_{teo} odnosi się do oszacowania metodą składnikową. Lepiej zastosować indeks dolny odpowiadający nazwie metody oraz konsekwentnie trzymać się skrótów z j. angielskiego, np. $N_{th,CM}$.

Str. 103, w. 6 od dołu

Trudno zorientować się co oznaczają „... poszczególne powierzchnie poszczególnych części węzła”. W naukach technicznych nie jest wskazane stosowanie zbyt ogólnego poziomu ogólności.

Str. 103, w. 1 od dołu i dalej str. 104

Zdanie zaczynające się od „Za pomocą ...” jest niezrozumiałe i wymaga przeredagowania. Chyba chodzi po prostu o walidację modelu zachowania stali, czyli wirtualnego odtworzenia charakterystyki $F-\Delta$ „wioselka”, przy zadawaniu historii obciążenia jak w badaniach materiałowych oraz po przyjęciu nominalnej charakterystyki $\sigma-\varepsilon$ wyznaczonej z badań materiałowych? Jak aproksymowano nominalną charakterystykę $\sigma-\varepsilon$ z badań materiałowych?

Str. 105, rys. 6.3

Czy zbadano jaki jest wpływ sposobu dyskretyzacji na ocenę wydłużalności próbki wirtualnej? Przyjęty sposób dyskretyzacji nie pozwala na poprawne odtworzenie charakterystyki $F-\Delta$ w zakresie wydłużenia odpowiadającego „przewężeniu” próbki.

Str. 106, tekst przed wzorem (6.3) i tab. 6.1

Siłę oznaczono na wykresach przez F , a nie N . Jaki jest cel zmiany oznaczeń w ramach tego samego podrozdziału? Jeżeli są to dwa różne pojęcia, jak wyznaczano N ? Na rys. 6.4 odnoszącym się do próbki H podano, że została „wycięta” z profilu RK 100x3; tu chodzi o kształtownik; profil to kształt a nie nazwa wyrobu.

Poza tym, oznaczenia nie są konsekwentnie konstruowane. Lepiej oznaczać $F_{ult,FEM}$, zamiast $N_{ut,MES}$ oraz $F_{ult,exp}$ zamiast $N_{ut,Ex}$. Na osi poziomej rys. 6.4 występuje wydłużalność Δ , a w tab. 6.1 wydłużalność definiowana jest przez L ? Jak wyznaczano L ? Czy jest to długość bazy pomiarowej próbki po wydłużeniu w chwili inicjacji „przewężenia” próbki? Jak wygląda ocena dokładności parametru dotyczącego wydłużalności na granicy zerwania próbki?

Wzór (6.3) dotyczy miary dokładności Δ_N . Czy ujęta w tab. 6.1 miara Δ_L opisana jest analogicznym wzorem?

Str. 108, tekst pod rys. 6.5

Jak dokonano „podziału poszczególnych części bryłowych węzła na mniejsze regiony”? Czy chodzi o bryłowe elementy skończone C3D8R? Jak je dzielono? Czy chodzi raczej

o dyskretyzację części węzła z użyciem bryłowych elementów skończonych C3D8R? Opisy powinny być precyzyjne, nie dające pola do domysłów i spekulacji.

Str. 111, w. 1-2 od dołu

Informacja zbyt ogólna. W tym miejscu należałoby przedstawić analizę wpływu gęstości siatki dyskretyzacyjnej na ścieżkę równowagi przykładowego węzła.

Str. 113, podrozdział 6.2.6

Tytuł podrozdziału nie jest adekwatny do zawartych w nim treści. Autor ocenił nośność węzłów pod względem ilościowym, ale nie dokonał analizy ilościowej ścieżek równowagi z badań doświadczalnych oraz symulacji MES. Celem walidacji jest ocena wyników pod względem ilościowym, a dopełnieniem jest porównanie form deformacji węzłów w procesie niszczących badań węzłów. Zdanie „Jako dopełnienie walidacji modelu węzła dokonano oceny wyników pod względem ilościowym” sugeruje, że inne czynniki walidacji są istotniejsze od oceny ilościowej. Oceny ilościowa i jakościowa są równie ważne w procesie walidacji modelu numerycznego.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Adriana SZPYRKI pt. *Nośność niespawanych węzłów typu N kratownic stalowych z rur kwadratowych*, która powstała w Politechnice Rzeszowskiej pod kierunkiem dra hab. inż. Jerzego Szlendaka stwierdzam, że w pracy tej Autor przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując się:

a) Ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu oceny różnych czynników wpływających na nośność węzłów N RK typu klucz-zamek, w tym występujących form zniszczenia, ocenianych na podstawie badań doświadczalnych.

b) Wiedzą praktyczną z zakresu komputerowego modelowania i zaawansowanej analizy GMNA w zastosowaniu do deterministycznej oceny wiarygodności modelowania zachowania się węzłów z wykorzystaniem numerycznych modeli MES,

Przedstawiony w rozprawie problem naukowy mieści się w nurcie aktualnej tematyki w odniesieniu do współczesnych konstrukcji stalowych, ma walory innowacyjnych analiz i badań o charakterze teoretycznym i aplikacyjnym. Autor rozpoznał aktualny stan wiedzy w tematyce objętej rozprawą, sformułował szczegółowe problemy badawcze oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań w zakresie odpowiednim do nakreślonego celu i sformułowanych tez rozprawy, a także w zakresie zastosowanej metodologii badań i sposobu wnioskowania. Wyniki uzyskane w ramach przygotowanej rozprawy doktorskiej stanowią podstawę do dalszych badań, zmierzających do opracowania modelu numerycznego do analiz MES kolejnych generacji węzłów typu klucz-zamek, bez konieczności realizacji kosztownego programu badań doświadczalnych w skali technicznej.

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.

