

dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: piwicki@pg.edu.pl

Gdańsk, 14.06.2021

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgra inż. Adriana Szpyrki
pt. „Nośność niespawanych węzłów typu N kratownic stalowych
z rur kwadratowych”.

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo z dnia 19 marca 2021, Pana prof. dra hab. inż. Tomasza Siwowskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. Adriana Szpyrki pt. „Nośność niespawanych węzłów typu N kratownic stalowych z rur kwadratowych”, wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Jerzego K. Szlendaka, prof. PB.

2. Tematyka i zakres rozprawy

Rozwój metod wytwarzania z wykorzystaniem wyspecjalizowanego oprogramowania stwarza nowe możliwości automatyzacji wykonania i unifikacja, co powoduje z kolei redukcję kosztów. Recenzowana rozprawa dotyczy ważnego problemu inżynierskiego, jakim jest zastosowanie połączeń klucz-zamek wynikających z zastosowania nowoczesnych technologii produkcyjnych do węzłów kratownic dachowych. W pracy badano nośność węzła dźwigara kratowego, którego pasy wykonano z kształtowników RK (rur kwadratowych), a skratowanie z profili PO (pręt okrągły). Elementy kratownicy to węzły typu klucz-zamek, które nie wymagają spawania.

Zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych na zmodyfikowanym przez Autora stanowisku badawczym. Zaproponowano teoretyczną ocenę nośności węzłów za pomocą metody składnikowej. Wyniki badań doświadczalnych zostały zweryfikowane odpowiednimi analizami numerycznymi wykonanymi przy użyciu programu komputerowego ABAQUS, bazującego na *Metodzie Elementów Skończonych*.

Rozprawa została napisana w języku polskim, liczy 163 stron formatu A4 i składa się z siedmiu numerowanych rozdziałów. Na początku podano spis najważniejszych skrótów i symboli użytych w pracy. Pracę uzupełniają: bibliografia, streszczenia w języku polskim

i angielskim. Rozprawa zawiera 104 wzory, 147 rysunków, 12 tablic oraz 119 pozycji literatury w kolejności alfabetycznej. Rysunki i tablice są numerowane w ramach rozdziałów.

Rozdział pierwszy obejmuje wstęp o objętości 4 stron zawierający wprowadzenie do tematyki badawczej. Opisano w nim na podstawie literatury badane zagadnienia i omówiono znaczenie podjętej tematyki. Podano ogólne informacje na temat obecnie stosowanych węzłów w konstrukcjach stalowych, połączeń elementów oraz sposobu ich wykonania. Opisano nowe technologie i ich możliwości, wpływające na czas i koszty wytwarzania konstrukcji stalowych.

W **rozdziale drugim** na 2 stronach zaprezentowano przedmiot, cel i zakres rozprawy oraz sformułowano tezy pracy, że istnieje sposób ukształtowania węzła typu N kratownicy z kształtowników zamkniętych RK bez blach węzłowych tak, aby możliwe było przeniesienie sił działających w prętach skratowania bez spawania ich do pasa. Tezę uzupełnia stwierdzenie, że węzeł taki posiadałby nośność nie mniejszą niż tradycyjne węzły spawane oraz, że istnieje metoda, która umożliwi obliczenie nośności takich węzłów.

W **rozdziale trzecim** (28 stron) omówiono aktualny stan wiedzy, przedstawiono studia literatury z zakresu kształtowania i obliczania niestandardowych węzłów konstrukcji stalowych. Przedstawiono połączenia stosowane obecnie w konstrukcjach drugorzędnych, połączenia wykonywane przy użyciu nowoczesnych technologii, rozwiązania opatentowane, a także węzły klucz-zamek, mające zastosowanie w dźwigarach kratowych.

Rozdział czwarty (26 stron) poświęcono przedstawieniu badań doświadczalnych węzłów. Przedstawiono stanowisko badawcze wykonane według projektu Autora. Opisano badania laboratoryjne materiałów, z jakich wykonano poszczególne elementy węzła. Podano przebieg oraz wyniki badań eksperymentalnych. Zaobserwowane podczas badań mechanizmy zniszczenia były podstawą to analiz teoretycznych i numerycznych zniszczenia węzłów.

Rozdział piąty zatytułowany „Oszacowanie nośności niespawanych węzłów N RK klucz-zamek” o objętości 28 stron zawiera opis konstrukcji oraz szczegóły techniczne innowacyjnego niespawanego węzła N z rur kwadratowych (RK) typu klucz-zamek w zastosowaniu do kratownic stalowych. W rozdziale opisano teoretyczne modele zniszczenia węzła i procedurę obliczania jego nośności. Porównano otrzymane z badań nośności rzeczywiste z teoretycznymi w celu potwierdzenia poprawności proponowanych procedur obliczeniowych nośności takich węzłów.

Rozdział szósty (46 stron) zawiera opis modelu i wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych. Opisano model materiałowy, a także dokonano walidacji modelu numerycznego wykorzystując wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych. Na

podstawie literatury opracowano kryteria szacowania nośności węzłów za pomocą wyników analiz numerycznych i przedyskutowano ich przydatność. Obliczenia wykonano za pomocą programu ABAQUS.

Rozdziały od trzeciego do szóstego są zakończone odrębnymi podsumowaniami omawianych zagadnień, natomiast **rozdział siódmy** (4 strony) zawiera podsumowanie całej pracy i prowadzonych badań oraz ocenę uzyskanych wyników, wnioski oraz kierunki dalszych badań. Przedstawiono argumenty potwierdzające poprawność postawionych tez pracy doktorskiej.

Ostatnia część pracy to bibliografia. Pracę uzupełniają streszczenia w języku polskim i w języku angielskim.

3. Ocena rozprawy

Głównym celem rozprawy było ustalenie nośności zaproponowanych innowacyjnych rozwiązań węzłów. Postawiono tezę, że jest możliwe ukształtowanie węzła typu N kratownicy z kształtowników zamkniętych RK bez blach węzłowych i bez spawania ich do pasa oraz, że nośność tych konstrukcji nie jest mniejsza niż tradycyjne węzły spawane, a także opracowano metodę obliczania nośności takich węzłów. Koncepcja badanego węzła kratownicy jest nowatorska, o czym świadczy fakt, że na przedstawiony w rozprawie węzeł udzielony został patent (nr P.424969). Pewnym mankamentem jest to, że opis koncepcji węzła pojawia się dopiero w rozdziale 5., a nie wcześniej, na przykład w rozdziale 4. Dopiero w opisie modelu MES podano szczegółowy schemat i budowę badanego węzła.

Wysoko należy ocenić zastosowane w pracy narzędzia badawcze. Do osiągnięcia zamierzonego celu i udowodnienia tezy rozprawy doktorskiej zostały wykonane badania doświadczalne, obliczenia teoretyczne i zaawansowane analizy numeryczne.

Rozwiązanie postawionego problemu zostało przeprowadzone na podstawie wyników doświadczeń niespawanych węzłów kratownic, które zostały wykonane na specjalnie przystosowanym stanowisku badawczym zaprojektowanym przez Autora rozprawy. Eksperymenty przeprowadzono w Laboratorium Konstrukcji Budowlanych Politechniki Białostockiej. Badania te obejmowały szeroką gamę geometrii konstrukcji, co pozwoliło na wyciągnięcie ogólnych wniosków dotyczących proponowanego typu węzła. Badania węzłów kratownic zostały uzupełnione o testy próbek materiału i określenie właściwości mechanicznych stali. Wyniki dla każdego węzła ukazano za pomocą dwóch wykresów, z których pierwszy dotyczy przemieszczenia ścianki górnej i dolnej pasa pod wpływem siły ściskającej N, obciążającej słupek, natomiast drugi przedstawia przemieszczenia ścianki

dolnej pasa, spowodowanego naciskiem bloku kotwiącego pod wpływem siły rozciągającej F , obciążającej krzyżulec. Przemieszczenia mierzono za pomocą czujników indukcyjnych oraz za pomocą systemu Aramis firmy GOM. Krzywe odciążenie–przemieszczenie przedstawione na wykresach umożliwiły wyznaczenie końca zachowania się sprężystego węzła oraz moment, w jakim pojawiają uplastycznienia w węźle. Powstaje pytanie czy proces działania siłowników zapewniał stałą proporcję sił w elementach również w momencie występowania uplastycznień w węzłach? W obciążeniu niszczącym może się zmieniać sztywność węzła w zależności od mechanizmu zniszczenia, co może powodować zmianę proporcji sił w prętach.

Wyniki doświadczeń posłużyły do walidacji zaproponowanych w pracy modeli teoretycznych służących do oceny nośności węzłów na podstawie metody składnikowej bazującej na analizie różnych mechanizmów zniszczenia. Zaproponowano dziewięć mechanizmów utraty nośności węzła:

1. zniszczenie obciążonej przez słupki ścianki górnej i dolnej pasa;
2. zniszczenie ścianki dolnej pasa przez blok kotwiący;
3. zniszczenie ścianek bocznych pasa;
4. ścięcie ścianek czołowych pasa oraz zębów bloku kotwiącego przez słupki pomiędzy wycięciami szczelinowymi;
5. ścięcie ścianki dolnej pasa w obszarze kontaktu z blokiem kotwiącym;
6. zniszczenie wycięć w pasie pod wpływem docisku „zębów” bloków kotwiących;
7. zniszczenie części słupka wewnątrz rury pasa pomiędzy górną i dolną jej ścianką;
8. ścięcie „zębów” bloków kotwiących;
9. zniszczenie krzyżulca.

Według metody składnikowej węzeł może być uważany za system sprężyn związanych z wymienionymi schematami zniszczenia. Nie jest jasne, jak Autor klasyfikuje połączenia tych mechanizmów. Takie mechanizmy mogą występować niezależnie lub równolegle. Nośność teoretyczną węzła oszacowano na podstawie minimalnej wartości nośności uzyskanej dla poszczególnych składników. Poszczególne mechanizmy zniszczenia zostały kolejno przeanalizowane w celu określenia ich teoretycznej nośności. W niektórych węzłach nośność wyznaczono wyprowadzając własne równania, a w niektórych zostały zaadoptowane wzory normowe. W pracy brakuje oceny zależności obliczonych za pomocą metod normowych. Badany węzeł jest innowacyjny i zastosowanie metod normowych mogło być związane z weryfikacją odpowiednich wzorów w zakresie współczynników wybozeniowych za pomocą analiz numerycznych MES, takich jak liniowa analiza stateczności (LBA).

W pracy obliczono również wartości nośności węzłów uzyskane ze wzorów normowych¹ dla węzłów N RK klasycznych, spawanych. W zależności od analizowanego przypadku uzyskano wyniki od 52% do 64% wyższe niż dla takich węzłów spawanych, co zdaniem Autora wynikało z tego, że w węzłach niespawanych klucz-zamek obciążona była górna i dolna powierzchnia pręta, a więc wg normy obliczana jest nieco inna konstrukcja węzła. Powinno się więc bardziej szczegółowo wyjaśnić opisane różnice, tym bardziej, że stanowią one poparcie jednej z tez pracy.

Kolejnym elementem w pracy było opracowanie modelu numerycznego węzła kratownicy przy użyciu oprogramowania Abaqus. Model numeryczny uwzględniał wszystkie części składowe węzła jako elementy trójwymiarowe. Uwzględnione zostało zjawisko kontaktu pomiędzy elementami węzła. Analizie numerycznej poddano dziewięć węzłów WN1-WN9, które doprowadzono do zniszczenia podczas przeprowadzonych badań doświadczalnych. Opis zastosowanych analiz nie jest precyzyjny. Najpierw stwierdzono, że zastosowano analizę typu *explicit* z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej, a nieco niżej podano, że w nieliniowej analizie numerycznej węzła uwzględniono: nieliniowość materiałową, nieliniowość geometryczną i występowanie kontaktu (strona 107). Siatkę elementów skończonych zbudowano z elementów bryłowych, ośmiowęzłowych sześciątów C3D8R. Swoje zastrzeżenia do opisu analiz MES Recenzent przedstawia w poniższym wykazie uwag krytycznych, pytań i wątpliwości:

- a) W pracy brakuje wyników analizy wpływu siatki MES na rezultaty obliczeń numerycznych, chociaż Autor stwierdził, że przetestowano kilka konfiguracji gęstości siatki i wybrano tę, która wydaje się najbardziej odpowiednia (strona 111).
- b) Szkoda, że nie wykorzystano modelu MES do liniowych analiz stateczności (LBA), które pozwoliłyby zweryfikować zakładane na podstawie norm smukłości elementów węzła.
- c) Zjawisko kontaktu dla całości węzła pomiędzy powierzchniami modelowano jako *general contact* (strona 112). W opisie podano, że kontakt z tarcie jest to *hard contact*, co wydaje się nieprecyzyjne, gdyż *hard kontakt* dotyczy opisu na kierunku normalnym do powierzchni styku.
- d) Stwierdzenie, że pomiędzy nakrętkami a krzyżulcem zastosowano pełny kontakt (*tie*) jest również nieprecyzyjne, gdyż *tie* raczej oznacza stałe połączenie elementów, a nie kontakt (strona 112).
- e) Analizy numeryczne zostały wykonane dla współczynnika tarcia równego 0.15. Czy badano wpływ wartości współczynnika tarcia na nośność węzła? W przypadku

¹ PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1- 8: Projektowanie węzłów.

konstrukcji, która nie jest spawana, a połączenia zależą od systemu zamków pomiędzy elementami należałoby rozpatrzyć różne warianty współczynnika tarcia.

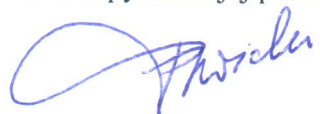
- f) W opisie warunków brzegowych (strona 113) podano, że zablokowano możliwość przesuwu pasa wzdłuż osi „y” oraz „x” (z płaszczyzny), dodatkowo zablokowano końce pasa w kierunku osi „z” (rys. 6.14). Na rys. 6.14 pokazano obciążenie w formie siły skupionej wzdłuż osi „y”, co jest sprzeczne z opisem warunków brzegowych, bo w doświadczeniu węzeł obciążano siłownikami, czyli stosując wymuszenia kinematyczne a nie siły. Możliwe, że obciążenie w modelu MES realizowano jako przemieszczenie podpory, ale to nie zostało wyjaśnione.
- g) W analizach MES nie podano, jak ustalano proporcję sił F do N oraz jak przykładano obciążenie: siły skupione czy obciążenie na krawędzi profili?
- h) W modelach MES nie badano luzów w połączeniach, a do oceny węzłów zastosowano kryterium dopuszczalnych przemieszczeń. Jak uwzględnić w kryterium dopuszczalnych przemieszczeń luzy w połączeniach?
- i) Co oznacza zmienna „U” we wzorze 6.9?
- j) Na rysunkach z wynikami MES brakuje skali na mapach naprężeń lub przemieszczeń, na przykład na rys. 6.25, 6.28 itd.
- k) Na wykresach siła – przemieszczenie osobno rysowano siłę w słupku – N i osobno siłę w krzyżulcu – F . Czy nie powinno się przedstawić zależności obciążenia od przemieszczenia? Czy proporcja sił F/N była taka sama w czasie obciążania węzła?
- l) Z czego wynika inne położenie nakrętki na krzyżulcu na rys. 6.25 i 6.35?
- m) Dziwi stwierdzenie Autora, że na podstawie przyjętego kryterium dopuszczalnych przemieszczeń C1 oszacowano nośność poszczególnych węzłów.
- n) Węzły i kratownice dachowe są zwykle wykonane z pewnymi niedokładnościami – imperfekcjami. Jakie imperfekcje (kształt i amplituda) powinny być brane pod uwagę w analizach nośności węzłów badanych w pracy? W badaniach analizowane mechanizmy zniszczenia w płaszczyźnie kratownicy. W rzeczywistych kratownicach dachowych występują różne niedoskonałości, jak na przykład imperfekcje lokalne, globalne, skrętne, przechyłowe. W pracy brakuje symulacji nośności węzłów w ujęciu przestrzennym z imperfekcjami. To zagadnienie może to być przedmiotem dalszych badań.
- o) W przypadku różnych obciążeń kratownic może się pojawić inny układ sił, w tym również siły ze zmiennym znakiem. Czy proponowane rozwiązania węzłów są odporne na takie zmiany rozkładu sił wewnętrznych?

W pracy opisano dwa kryteria do oceny nośności węzłów: kryterium dopuszczalnych przemieszczeń (C1) oraz kryterium Manna–Kenalla (MK). Kryteria te umożliwiają weryfikację ich nośności węzłów na podstawie analizy numerycznej. Pierwsze kryterium zastosowano do porównania nośności wg obliczeń numerycznych z wynikami badań doświadczalnych, drugie kryterium ma być przedmiotem dalszych badań. W pracy tego kryterium nie zastosowano.

Teoretyczna metoda składnikowa, przeprowadzone badania doświadczalne oraz analizy numeryczne umożliwiły ocenę nośności węzłów klucz-zamek wykonywanych bez konieczności spawania. Wyniki badań przeprowadzonych w pracy przyczyniają się do zwiększenia wiedzy o pracy węzłów wykonywanych bez spawania i z pewnością przybliżają zastosowanie węzłów typu klucz-zamek w praktyce. Połączenie wyżej wymienionych obszarów badawczych powoduje, że praca jest kompletna. Zarówno obliczenia teoretyczne i numeryczne, jak i badania doświadczalne potwierdzają słuszność stawianej tezy dotyczącej kształtowania węzła typu N kratownicy z kształtowników zamkniętych RK bez blach węzłowych i bez spawania ich do pasa tak, aby posiadały nośność nie mniejszą niż tradycyjne węzły spawane.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy. Wnioski z przeprowadzonych badań mogą być bezpośrednio wykorzystane do projektowania niespawanych węzłów typu N kratownic stalowych z rur kwadratowych. Niezależnie od zamieszczonych uwag krytycznych lub dyskusyjnych należy stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Szpyrki zawiera istotne wartości poznawcze w zakresie badań doświadczalnych, metod projektowania i analiz numerycznych nośności niespawanych węzłów typu N stalowych kratownic. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Adriana Szpyrki do jej publicznej obrony.



dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni