

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Pieńko „Dobór kryteriów oceny nośności węzłów rusztowań budowlanych”

1. Podstawa formalna

Podstawę formalną niniejszej recenzji stanowi pismo Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Bogusława Szmigina z dnia 25 czerwca 2018 roku oraz umowa zawarta pomiędzy Politechniką Lubelską a recenzentem. Podstawę prawną niniejszej recenzji stanowi ustawa z dnia 18 marca 2011 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw” (Dz. U. 2011 nr 84 poz. 455) z późniejszymi zmianami, jak również Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2011 nr 204 poz. 1200).

2. Treść pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Pieńko pt. „Dobór kryteriów oceny nośności węzłów rusztowań budowlanych” liczy 158 stron i napisana jest w języku polskim. Na początku pracy przedstawiony jest spis treści oraz wykaz najważniejszych symboli i oznaczeń. Recenzowana rozprawa składa się z pięciu ponumerowanych części: wstępu [1], przeglądu literatury [2], badań laboratoryjnych [3], analiz numerycznych [4], podsumowania i wniosków ogólnych [5]. Następnie zamieszczone jest zestawienie pozycji bibliograficznych, streszczenie w języku polskim oraz streszczenie w języku angielskim. Rozprawa zawiera 131 rysunków i 10 tabel.

Celem rozprawy jest badanie zachowania mechanicznego połączenia elementów składowych systemu modułowego rusztowań budowlanych. Rusztowanie budowlane jest przeznaczone do prowadzenia robót budowlanych lub podtrzymywania elementów budowlanych podczas realizacji procesów technologicznych do czasu osiągnięcia przez elementy założonych właściwości funkcjonalnych i użytkowych. Przenoszenie ciężaru podpieranych elementów oraz obciążeń pomostów roboczych obejmuje również różne oddziaływania wynikające z obecności pracowników i wykonywania na rusztowaniach robót, ze stosowania narzędzi i sprzętu oraz w tym transportu podczas dostarczania materiałów do realizacji budowy. Bezpieczeństwo wykonywania zadań budowlanych, a szczególnie zdrowie i życie osób znajdujących się na rusztowaniu jest wyznacznikiem wymagań jakie muszą być spełnione. W rozprawie rozpatrywane są warunki konstrukcyjne rusztowania budowlanego. Przedmiotem badań jest węzeł rusztowania. Postawionym zadaniem jest sprawdzenie nośności węzła przez określenie kryteriów wytrzymałościowych. Badanie i wyznaczanie nośności węzła dokonywane jest metodami eksperymentalnymi z wykonywaniem pomiarów wielkości fizycznych i metodami analizy numerycznej z modelowaniem komputerowym i wykonywaniem obliczeń stanu mechanicznego węzła. Zjawiska deformacji i zniszczenia badane są przez realizację prób laboratoryjnych oraz symulacji komputerowych. Badania eksperymentalne i numeryczne obejmują również pomiarzenie i obliczenie właściwości materiału konstrukcyjnego. Stosowane są statyczne testy rozciągania na próbkach dla określania

wytrzymałościowych właściwości metali. Okresowy montaż i demontaż rusztowania z punktu widzenia powtarzalnego użytkowania jest uwzględniony w numerycznej części badań. Dla cyfrowego modelu węzła rusztowania zdefiniowano programy obciążenia wielokrotnie zmiennego i analizowano ich wpływ na nośność węzła.

W pierwszym rozdziale przedstawiono tematykę rozprawy określając zadania w projektowaniu rusztowań budowlanych jako konstrukcji inżynierskich. Na tle całego układu rusztowania wyszczególniono zadanie analizy węzła rusztowania. Następnie pokazano węzeł rusztowania systemowego z grupy rusztowań modułowych o charakterystycznej rozecie i charakterystycznym klinie służących do przyłączenia rygla lub stężenia do słupka lub do stojaka jako pionowych elementów rusztowania. W tym krótkim rozdziale wypunktowano cele rozprawy oraz odpowiadający im zakres prac badawczych.

Rozdział 2, zatytułowany „Problematyka rusztowań w literaturze” jest przeglądem literatury i pokazaniem stanu wiedzy o rusztowaniach. Przegląd rozpoczyna się od części dotyczącej norm PN-EN z zakresu rusztowań, deskowań, tymczasowych urządzeń i konstrukcji budowlanych. Omówienie kolejnych norm stanowi wprowadzenie i sformułowanie problematyki rozprawy oraz przygotowanie do realizacji eksperymentów laboratoryjnych. W drugim podrozdziale zebrano przykłady z literatury stosowania metod laboratoryjnych dla przestrzennego stanu naprężenia. W dalszej kolejności przedstawiono przykłady badań węzłów stalowych konstrukcji prętowych na trwale ze sobą połączonych, w tym przypadek dla regałów magazynowych oraz badania w wysokich temperaturach. Następna grupą publikacji przedstawianą w przeglądzie literatury są prace opisujące i wyjaśniające przyczyny i skutki katastrof rusztowań podkreślające znaczenie bezpieczeństwa takich konstrukcji. Badania obiektów pełnowymiarowych, różnych systemów rusztowań, a także rusztowań z różnorodnych materiałów zostały podane w następnym podrozdziale, a badania przeprowadzone dla wyodrębnionych fragmentów rusztowań lub pojedynczych ich układów zostały osobno zestawione, natomiast w obu tych grupach przedstawiono liczbowe wartości odnośnie wyników badawczych odpowiednie do wyników stanowiących przedmiot badań niniejszej rozprawy. Dalsza grupa pozycji literatury to prace z tematyki badań węzłów rusztowań. Przedstawione wyniki charakteryzujące węzeł dla rusztowań rurowo-złączkowych i modułowych również dają podstawę do dokonania porównania. W ostatniej grupie zestawiono inne pozycje zawierające wyniki obejmujące zagadnienia montażu, zakotwienia rusztowania, specyfiki obciążenia wiatrem, monitorowania, kontroli stanu rusztowania na budowie, luzów eksploatacyjnych i imperfekcji. Osobno przedstawione są publikacje prezentujące wyniki analiz numerycznych z przykładami analizy całego rusztowania, jak i jego części, węzła czy zakotwienia. Rozdział dotyczący przeglądu literatury jest zakończony podsumowaniem, które odróżnia dotychczasowe wyniki badawcze od zakresu badań rozprawy i wskazuje na sposoby znajdujące zastosowanie dla osiągnięcia własnych rezultatów.

W rozdziale 3 Autor rozprawy opisuje badania laboratoryjne. Przedstawiony jest cel i zakres testów laboratoryjnych analizujących zachowanie węzła rusztowania z pojedynczym rygłem. Poszczególne próby eksperymentalne dotyczą sześciu przypadków obciążenia, w których każdy odpowiada poszczególnym trzem siłom i trzem momentom przestrzennego stanu sił dla pręta przyrządkowego. Oprócz testów węzła rusztowania, zakres badań laboratoryjnych zawiera wykonanie prób rozciągania dla wyznaczenia właściwości materiałów, z których są wykonane elementy węzła.

Wyznaczenie właściwości materiałowych przeprowadzono dla próbek przygotowanych z materiału pionowych stojaków (fragmenty rur), z materiałów rozety, klina i głowicy rygla (próbki płaskie do testu rozciągania wycięte z tych elementów). W pierwszej kolejności badano materiał rury stojaka. Opisano sposób przygotowania próbek, przeprowadzenie badania laboratoryjnego oraz dokonane pomiary i wyniki uzyskane z maszyny wytrzymałościowej oraz z wykorzystaniem tensometrów elektrooporowych. Wyznaczono moduł sprężystości, granice plastyczności i granice wytrzymałości oraz wykresy zależności siła-przemieszczenie oraz naprężenie-odkształcenie. Badanie przeprowadzono na pięciu próbkach. Następnie przedstawiono badania dla materiału klina w takim samym zakresie pomiarów i wyników. Analogiczne postępowanie i przeprowadzenie badania zastosowano dla materiału rozety i głowicy rygla, lecz ze względu na małe wymiary wyciętych próbek oraz wykonanie głowicy rygla w postaci odlewu

przebieg próby i uzyskanie wyników miały odrębny charakter. Zasadnicze próby laboratoryjne przeprowadzane były dla węzła rusztowania. Pierwszym etapem badań laboratoryjnych było przyjęcie metody badania i przygotowanie stanowiska do realizacji obciążenia w maszynie wytrzymałościowej. Autor przedstawia uchwyty umożliwiające zamocowanie elementów węzła oraz przyłożenie obciążenia po uchwyceniu fragmentu rury rygła w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Uchwyt wykorzystywany jest w dwóch różnych wersjach dla sztywnych obejm oraz obejm z podwójnym przegubem i elementem dystansowym. W dalszej części rozdziału przedstawione są badania węzła, oddzielnie realizowane dla każdego rodzaju z sześciu form obciążenia, odpowiadających działaniu w ryglu: siły normalnej, sił poprzecznych wzdłuż obu osi prostopadłych do osi rygła, momentu skręcającego oraz momentów zginających w obu płaszczyznach. Dla każdej z form obciążenia przedstawione jest stanowisko, przebieg próby oraz forma zniszczenia. Zgodnie z wymogami normy badanie przeprowadzono na pięciu próbkach. Wyniki są zobrazowane wykresami zależności siła-przemieszczenie stanowiącymi odczyty pomiarowe z maszyny wytrzymałościowej. W kolejnym podrozdziale przedstawiona jest analiza wyników badań laboratoryjnych. Przedstawiono opracowany algorytm i przygotowano program obliczeniowy do wyznaczania funkcji aproksymujących krzywe opisujące dokonane pomiary, a następnie przeprowadzono obliczenia nośności rusztowań budowlanych według reguł zawartych w normach dla prowadzenia badań. Odrębną częścią analizy wyników było określenie sztywności węzła przeprowadzone kilka metodami, wyznaczenie sztywności dla poszczególnych form obciążenia oraz zaszeregowanie węzła do jednej z trzech kategorii: połączenia sztywnego, połączenia przegubowego lub półsztywnego. Na końcu rozdziału prezentującego badania laboratoryjne zamieszczone jest podsumowanie testów laboratoryjnych oraz podane są osiągnięte rezultaty.

Rozdział 4 zawiera opis analiz numerycznych obciążania węzła rusztowania, z zastosowaniem wyznaczonych wcześniej w badaniach laboratoryjnych parametrów materiałowych dla poszczególnych elementów węzła. Na początku Autor wskazuje na obliczenia numeryczne rusztowań dla całej ich konstrukcji z zastosowaniem modeli prętowych stosowane dla określenia stateczności konstrukcji wykonywane w przypadkach ich projektowania, natomiast następnie zajmuje się symulacjami dla węzła z pojedynczym rygłem. Przedstawienie modelu przygotowanego do przeprowadzenia obliczeń za pomocą metody elementów skończonych jest dokonane poprzez omówienie poszczególnych etapów budowy modelu. Na początku zaprezentowana jest geometria trójwymiarowego, bryłowego modelu i przystosowanie jej do potrzeb wykonywania analiz. Następnie dla określenia danych o materiałach przedstawione są symulacje numeryczne testów rozciągania odpowiadające wykonanym testom laboratoryjnym na próbkach wyciętych z rury, klina, rozety i głowicy. Przedstawione są wykresy naprężenie-odkształcenie, bez podania danych definiujących model fizyczny materiału. Kolejnym elementem budowy modelu jest tworzenie siatki elementów, której powstanie dla każdego z elementów modelu węzła jest szczegółowo wyjaśnione. Kolejnym zagadnieniem dla definiowania modelu cyfrowego węzła jest określenie połączenia i kontaktu pomiędzy elementami węzła z zastosowaniem ośmiu par powierzchni z oddziaływaniem kontaktu z tarciem lub pełnego połączenia powierzchni. Opis budowy modelu zakończony jest podaniem nieliniowej charakterystyki analizy, aczkolwiek typ analizy nie jest wymieniony. Po przedstawieniu modelu obliczeniowego w rozprawie następuje prezentacja analiz i wyników symulacji numerycznych. Jako pierwsze przedstawiane są obliczenia rusztowania w postaci platformy roboczej, a następnie analizy dla trzech form obciążenia węzła rusztowania momentem zginającym M_z , siłą poprzeczną V_z i siłą podłużną N_x określonymi w odniesieniu do elementu rygła. Kolejną część analiz dotyczy symulacji numerycznej cyklicznego obciążania i odciążania analizowanego układu mechanicznego w czterech postaciach obciążenia, wbiciem klina oraz trzem wymienionym powyżej formom obciążenia. Analizy z wielokrotnym obciążaniem węzła zostały wykorzystane do definiowania kryterium określającego możliwość ponownego użytkowania rygła. W ostatniej części czwartego rozdziału przeznaczonej dla podsumowania analiz numerycznych formułowane są wskazania sprawowania kontroli stanu rusztowania i poziomu wyężenia elementów rusztowania dla ponownej eksploatacji.

W rozdziale 5 przedstawiono podsumowanie badań i wnioski końcowe, w których podkreślono przydatność wyników badań laboratoryjnych i analiz numerycznych dla oceny zachowania węzła rozpatrywanego systemu modułowego z połączeniem wykonanym za pomocą rozety, głowicy oraz klina. Zastosowane metody i uzyskane wyniki zostały zaproponowane dla badania innych systemów rusztowań.

Spis literatury liczy 99 pozycji bibliograficznych, w tym 6 pozycji, w których Autor rozprawy jest współautorem. Jedna z tych pozycji dotyczy patentu dla stanowiska do badań odkształceń elementów poziomych obciążonych równomiernie.

3. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska obejmuje tematykę rusztowań budowlanych. Rusztowania budowlane należące do grupy urządzeń technicznych nie stanowią bezpośrednio stałych obiektów budowlanych i odróżniają się stosunkowo krótszym i tymczasowym charakterem użytkowania. Rusztowania podlegają regularnie procesom montowania i demontowania, są wielokrotnie stosowane na czas wykonywania budowy, remontu jako miejsce wykonywania robót, na czas podpierania elementów budynków w trakcie przygotowania i osiągnięcia zaprojektowanego stanu. Rusztowania nie stanowią części składowej obiektu budowlanego, a przy swojej odrębności są konstrukcjami. Aspekt przenoszenia obciążeń, sprawdzanie bezpiecznego zachowania mechanicznego rusztowania łączy metody projektowania i badania konstrukcji rusztowań i konstrukcji budowlanych. Badanie i projektowanie konstrukcji zawiera analizy dotyczące całego układu, poszczególnych jego elementów oraz węzłów jako miejsc połączenia pomiędzy elementami, a także podpór czy zakotwień. Przedmiotem badań rozprawy jest węzeł rusztowania. Jest to węzeł rusztowania modułowego. Połączenie pomiędzy elementami w węźle jest połączeniem uzyskiwanym za pomocą klina. W pracy wyznaczana jest charakterystyka węzła dla opisu jego zachowania pod wpływem obciążenia.

Układ rozprawy odzwierciedla dwie perspektywy rozpatrywania badania węzła rusztowania budowlanego. Pierwsza skala obserwacji i opisu zachowania węzła rusztowania dotyczy pojedynczego węzła wyodrębnionego z całej struktury rusztowania. Perspektywa druga to zakres ogólny kompletnego rusztowania w pełnym wymiarze i układzie. Wybrany węzeł obejmuje miejsce połączenia podstawowego pionowego elementu rusztowania rury stojaka oraz podstawowego poziomego elementu rury rygla oraz jego okolicy w odległości kilkunastu centymetrów. Uwaga została skupiona na fragmencie o łącznych wymiarach około połowy metra. Dla takiego obiektu badań została dostosowana metodyka badania zachowania węzła. Wymiar przedmiotu badań ma znaczenie dla sposobu realizacji badań doświadczalnych i eksperymentów numerycznych. Możliwość zmieszczenia i umieszczenia przedmiotu badań w stanowisku maszyny wytrzymałościowej wyraźnie odróżnia sposób przygotowania i wykonywania prób obciążania od przeprowadzania ich w innych znanych dla rusztowań skalach przestrzennych. Badania pola rusztowania lub sąsiednich pól można przeprowadzić wewnątrz pomieszczeń laboratorium badawczego, natomiast dla kolejnych skali wymiarowych prowadzenie badania doświadczalnego odbywa się w warunkach polowych. Układ kilku pól rusztowania lub platformy podlega pomiarom w ramach przygotowanego stanowiska zewnętrznego. Miejscem wykonywania badań dla całego rusztowania jest bezpośrednio teren budowy. Do rusztowania oraz warunków wykonywania obiektu budowlanego lub innego wykorzystywania systemów rusztowań dopasowany jest program badawczy. Analogicznie do badań laboratoryjnych, badania zachowania rusztowania budowlanego różnią się w zakresie analiz numerycznych. Dwie metody badań zastosowane i opisane przez Autora w rozprawie wzajemnie uzupełniają postawiony cel opisu zjawisk zachodzących w węźle rusztowania budowlanego. W treści rozprawy Autor przedstawia zastosowane metody, dokonuje opisu przygotowania i przeprowadzenia badania oraz rezultaty wraz z ich interpretacją w dwóch rozdziałach rozprawy zatytułowanych: „Badania laboratoryjne” i „Analizy numeryczne”. Pomimo realizacji głównego wątku wyznaczonego przez tytuł poszczególnego rozdziału zagadnienia numeryczne podejmowane są w już rozdziale dotyczącym pomiarów eksperymentalnych i wzajemnie, w rozdziale dotyczącym symulacji komputerowych włączone

są treści, a zwłaszcza wyniki z przeprowadzonych testów. Przygotowanie i przeprowadzenie analizy pojedynczego węzła zostało przedstawione w rozprawie w odniesieniu do ogólnej problematyki projektowania i użytkowania rusztowań budowlanych. Autor szeroko przedstawia różne zagadnienia dotyczące rusztowań i poświęca osobny rozdział dla dokonania ich przeglądu. Rozdział ten poprzedza wymienione powyżej dwa rozdziały, zajmuje objętościowo taką samą część rozprawy jak każdy z nich. Razem trzy rozdziały wypełniają rozprawę. Przegląd jest przeglądem literatury problematyki rusztowań, przedstawiającym stan wiedzy i badań. Autor wykazał się znajomością warunków wykonywania i sposobów projektowania rusztowań budowlanych. Dokonuje wyboru i przedstawia uzasadnienie dla podjęcia zagadnienia postawionego do rozwiązania w rozprawie. Wyróżnia własny, oryginalny zakres badań.

Odróżnienie odrębnego obszaru badań Autora ma także dodatkowy aspekt. Tematyka rusztowań budowlanych stanowi od wielu lat przedmiot prac zespołu naukowo-badawczego Politechniki Lubelskiej. Badania te dotyczyły całych rusztowań, ich części składowych lub wyodrębnionych części. Dotyczyły różnych zachowań mechanicznych, problemów statycznych i dynamicznych. W badaniach stosowane były różne metody badawcze. Dokonywano pomiarów w laboratorium badawczym jak i w warunkach terenowych. Prace badawcze dotyczące rusztowań wykonywane były przed czasem przystąpienia Autora do rozprawy, a część z nich prowadzona była przy Jego uczestnictwie. Zarówno w części rozprawy dotyczącej przeglądu literatury, jak i podczas prezentowania wyników badań laboratoryjnych i numerycznych Autor rozprawy odwołuje się do tematyki, zakresu i wyników oraz do publikacji zespołu. W kilku publikacjach jest współautorem. Rusztowania stanowią tematykę w której zespół, jak i sam Autor rozprawy uzyskali wiedzę i doświadczenie dla układu rusztowania jako całości podczas wykonywania szeregu projektów badawczych, dokonywania pomiarów dla setek rzeczywistych przypadków na terenie całego kraju. Ogólna problematyka i badania zespołu stanowią tło na którym Autor rozprawy przedstawia własne badania pojedynczego węzła rusztowania. Wyodrębnienie przedmiotu badań dotyczy typu systemu modułowego rusztowania oraz rodzaju zastosowanego połączenia elementów.

4. Ocena rozprawy

Badanie nośności węzła rusztowania zostało przeprowadzone za pomocą prób laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych. W obydwu tych zakresach badań Autor dokonał przygotowania własnego stanowiska badawczego.

Przed wykonywaniem serii testów obciążenia węzła przez przykładanie do niego różnych form obciążenia za pomocą maszyny wytrzymałościowej opracowano dodatkowe własne wyposażenie umożliwiające umieszczenie badanych próbek w maszynie wytrzymałościowej. Autor zaproponował i własnoręcznie wykonał uchwyt, w którym umieszcza się węzeł. Autor zadbał o uniwersalność uchwytu oznaczającą możliwość dokonywania zarówno obciążenia odpowiadającego różnym siłom, jak i obciążenia momentami. Końcówki fragmentu rury stojaka lub rygła rusztowania mocuje się na dwa sposoby. W jednym przypadku masywne obejmy ograniczają całkowicie ruch umieszczanego elementu. W drugim przypadku obejmy i element dystansowy umożliwiają realizację podpory obrotowej i przesuwnej. Dla obydwóch sposobów umocowania węzła zostało przeprowadzonych szereg wstępnych prób wraz z dokonywaniem modyfikacji proponowanego dla uchwytu rozwiązania z powodu dostosowania sztywności oraz występującej formy zniszczenia. Prace te stanowiły studium przypadków dla skonstruowania stanowiska badawczego. Osiągnięciem Autora jest stworzenie uchwytu dla węzła rusztowania. Warto zaznaczyć, że rozwiązanie uchwytu i stanowiska badawczego umożliwia przeprowadzenie testów także na innych rodzajach węzłów rusztowania.

Istotne dla wyników było badanie właściwości materiałów, z których wykonane są elementy składowe węzła. Przeprowadzone zostały próby rozciągania dla płaskich próbek wykonanych z materiału klina, rozety i głowicy, a materiał rury stojaka został zbadany na fragmencie rury umieszczonej w maszynie wytrzymałościowej. Próbkę wyciętą z materiału rygła miały zróżnicowane wymiary.

Wartości modułu sprężystości, granicy plastyczności i granicy wytrzymałości różniły się, a zwłaszcza parametry dla materiału głowicy, która wytworzona została w postaci odlewu. Autor wyznaczył związki fizyczne w postaci zależności naprężenia i odkształcenia oraz wykazał potrzebę osobnego ich stosowania dla każdej części połączenia w węźle.

Zasadniczym dokonaniem w ramach badań laboratoryjnych jest przeprowadzenie prób obciążenia węzła. Autor przeprowadził próby obciążania dla sześciu form obciążenia odpowiadające siłom i momentom działającym w prętach pryzmatycznych. Dla każdej formy obciążenia dokonał pomiarów siły i przemieszczeń dla pięciu niezależnych prób i przy zmianie wszystkich elementów węzła. Autor wykonał testy, stwierdził, który z elementów węzła ulega trwałym deformacjom plastycznym i określił formę zniszczenia. Uzyskał wykresy siła-przemieszczenie, które stanowiły podstawę do obliczeń. Opracował własne algorytmy obliczeniowe do wyznaczania funkcji aproksymacji na podstawie wartości wielkości pomierzonych podczas eksperymentów laboratoryjnych oraz do przebiegu funkcji określających wpływ parametrów na wyniki symulacji numerycznych. Obliczył nośności węzła oraz jego sztywności. Wykonanie eksperymentów laboratoryjnych dla węzłów zostało zakończone osiągnięciem zamierzonego celu. Przyjęta przez Autora metodologia badania węzła z połączeniem klinowym umożliwiła wyznaczenie jego właściwości i doprowadziła do określenia przez Autora rodzaju obciążeń, dla których nośność i sztywność mają największe wartości, czyli wyznaczenia charakteru zachowania połączenia, w tym zaszeregowanie do typu półsztywnego lub przegubowego.

W badaniach na drodze eksperymentów komputerowych Autor zrealizował najpierw symulacje numeryczne odpowiadające próbom laboratoryjnym, a następnie przeprowadził obliczenia dla przypadków wielokrotnego obciążenia węzła.

Na uwagę zasługuje umiejętność przygotowania modeli obliczeniowych dla obliczeń metodą elementów skończonych. Autor sprawnie posługuje się narzędziami do tworzenia modelu geometrii, generowania siatki elementów. Proces opracowania trójwymiarowego modelu złącza dokonany jest z precyzyjnym odzwierciedleniem kształtu. Utworzony model 3D oraz możliwości wizualizacji wielokrotnie stosowane w rozprawie odpowiadają aktualnym formom dokumentowania elementów budowlanych w postaci obiektów cyfrowych. Jednocześnie Autor przeprowadza operacje uproszczenia kształtu dla wyokrąglenia i krzywizn geometrii właściwe dla generacji siatki. Warto podkreślić również rezultat dyskretyzacji poszczególnych części węzła, jak i brył na które zostały podzielone, uzyskany przez Autora podczas modelowania powierzchni kontaktu. Następnym wyróżniającym elementem w eksperymentach komputerowych jest stosowanie zaawansowanych modeli numerycznych z szeregiem czynników nieliniowych charakterystyk fizycznego zachowania materiału i konstrukcji, w tym zwłaszcza modelowania kontaktu łączącego wzajemnie prostopadle oddziaływanie powierzchni kontaktowych oraz oddziaływanie w kierunkach poślizgu na tych powierzchniach opisywane zróżnicowanymi wartościami współczynników tarcia. Autor stosuje szereg wariantów i dokonuje analizy parametrycznej, podkreślając znaczenie oddziaływania pomiędzy płaszczyznami w złączu klinowym. Stanowi to bardzo dobrą podstawę do rejestracji i obserwacji luzów i poślizgów pomiędzy składowymi elementami węzła rusztowania. Osiągnięciem Autora jest opracowanie modelu obliczeniowego, który służyć może następnym, licznym analizom oraz stanowi podstawę do wykonania symulacji numerycznych zachowania innych węzłów oraz różnych typów i systemów rusztowania.

W badaniach z wielokrotnym obciążeniem analizowano wpływ wbicia klina i przykładania obciążenia realizowanego przez cykliczne obciążanie i odciążanie węzła. W wyniku analiz rezultatów Autor wykazał, że wielokrotne przykładanie oddziaływania doprowadza do powstania luzów dla klina oraz wyznaczył poziom dopuszczalnych obciążeń umożliwiających wielokrotne użytkowanie rusztowania chroniący przed poluzowaniem klina. Wykazał także, że zachowanie węzła różni się przy przeciwnych zwrotach działania obciążenia, co stanowi zagrożenie występowania luzów dla klina i utraty połączenia. Na podstawie symulacji numerycznych z obciążeniem wielokrotnym Autor zaproponował oryginalny, praktyczny sposób sprawdzenia stanu połączenia w węźle. Określił postępowanie wyznaczające przydatność do dalszego użytkowania lub do wyłączenia elementu z eksploatacji.

Autor rozprawy wykazał znajomość metod laboratoryjnych i metod numerycznych zastosowanych do analizy nośności węzła. Wymienić również należy, iż wykonanie badań z zastosowaniem każdej z tych metod wymagało pracochłonnego przygotowania stanowiska laboratoryjnego, a z drugiej strony również pracochłonnego przygotowania modelu numerycznego. Na podkreślenie zasługuje połączenie w badaniach metod eksperymentalnych i metod komputerowych, co wynika również z właściwej proporcji udziału w badaniach obydwóch rodzajów metod badawczych. W sposób swobodny Autor interpretuje i przekształca obserwacje eksperymentalne i numeryczne. Na uwagę zwraca podjęcie i zbadanie klinowego połączenia elementów w węźle rusztowania, dla którego określono metodykę postępowania oraz opracowano stanowisko do badań w maszynie wytrzymałościowej i wyznaczono sposób modelowania do przeprowadzenia symulacji numerycznych. Uzyskane rezultaty potwierdzają rozwiązanie postawionego w rozprawie problemu naukowego.

W ocenie należy podkreślić staranność edycji treści rozprawy. Zgromadzony materiał jest dobrze opracowany technicznie, a rysunki czytelnie ilustrują przedstawiane zagadnienia i wyniki. Posługiwanie się na rysunkach przestrzennymi modelami cyfrowymi złącza lub jego części znacznie ułatwia wizualny odbiór koncepcji i wyników rozwiązań.

5. Uwagi krytyczne

1. Sądząc z tytułu samej rozprawy można oczekiwać, iż jest ona poświęcona ogółowi węzłów rusztowań budowlanych. Tymczasem pole zainteresowań Autora stanowią rusztowania wybranego systemu modułowego, a rozprawa nie dotyczy ogółu węzłów, lecz wybranego pojedynczego połączenia. Specyfika połączenia klinowego istotnie wpływa na sposób prowadzenia badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych i zakres rozprawy. Rozważania dotyczące kryteriów oceny nośności prowadzone są w odniesieniu połączenia klinowego dla rusztowania modułowego. Dotycząc w większości rozwiązań metalowych, zagadnienia zachowania rusztowań bywają rozwiązywane inaczej w zależności od rodzaju rusztowania i połączenia w węźle.
2. Rozważanie zachowania połączenia klinowego elementów w węźle uwzględnia wykonywanie złącza przez umieszczenie oraz zamocowanie klina na etapie składania rusztowania. Zamocowanie klina odbywa się przez jego wbicie. Zaleca się wbicie klina przez uderzenie młotkiem o masie 500 g. W badaniach zarówno w części laboratoryjnej jak i w części numerycznej wbicie klina poprzedza przyłożenie obciążenia do węzła. W części laboratoryjnej jest to dosyć ogólnie rozumiana czynność zapewniająca scalenie węzła i wyeliminowanie wzajemnego ruchu stojaka i rygla. Autor rozprawy zwraca uwagę na ogólność określenia, porównując do doprecyzowanego przypadku dla dokręcania nakrętek w połączeniu śrubowym, z zastosowaniem klucza dynamometrycznego i zadanej wartości momentu. W analizach numerycznych wbicie klina jest szerzej brane pod uwagę. Przeprowadzona jest również analiza wpływu wbicia klina definiowana przez głębokość jego wbicia. W rozprawie podawana jest wartość tego zagłębienia. Nie jest określony sposób i miejsce zdefiniowania tego oddziaływania, a przedstawione na Rys. 4.24 i 4.25 podpory wskazują na przeciąganie klina zamiast wbijania, co razem ze znaczeniem wielkości wbicia oraz oddziaływaniem powierzchni kontaktu wymaga bardziej szczegółowego wyjaśnienia. Druga uwaga odnosząca się do uwzględnienia wbijania klina dotyczy charakteru oddziaływania statycznego lub dynamicznego. W żadnym przypadku przy uwzględnianiu oddziaływań w analizach numerycznych, a zwłaszcza dla wbijania klina, nie ma zdefiniowania typu analizy i określenia kroku obliczeniowego oraz podania zastosowanej metody rozwiązania. Sama nazwa oraz sposób przeprowadzania wbijania klina podczas montażu węzła rusztowania związane są z uderzeniem. W rozprawie w rozważaniu kryteriów oceny nośności nie jest podejmowana analiza dynamicznego charakteru oddziaływań.

3. Badania zachowania węzła rusztowania obejmowały pełny zakres oddziaływania obciążenia do utraty nośności. Czy stosowano kryterium ograniczenia wielkości przemieszczeń wynikające z warunków użytkowania węzłów rusztowania, bądź wynikające z przebiegu eksperymentów laboratoryjnych, związane z zakresem działania stosowanej maszyny wytrzymałościowej ? W badaniach laboratoryjnych materiał podlegał deformacjom sprężystym i plastycznym, a obserwacja skutków obciążenia dotyczyła charakteru deformacji trwałych i zniszczenia elementów węzła. Zniszczenie rozpoznawane zostało w testach laboratoryjnych w wybranych przypadkach formy obciążenia przez pęknięcie występujące we fragmentach rozety lub głowicy. W analizach numerycznych zastosowano nieliniowe związki fizyczne w zakresie sprężystym oraz plastycznym. Towarzyszące nieliniowości fizycznej materiału geometrycznie nieliniowe sformułowanie zagadnienia deformacji pozwalało na duże przemieszczenia i duże odkształcenia. Dane określone dla czterech modeli materiału zastosowanych dla rury stojaka, rozety, głowicy rygla i klina, pomimo zakresu osi odkształceń na wykresach do wartości 6%, 7%, 8% i 12%, wskazują możliwość nieograniczonego przyrostu odkształceń trwałych. Brak jest wprowadzenia kryterium zniszczenia materiału w modelowaniu zachowania elementów stalowych. Wprowadzenie kryterium zniszczenia doprowadza do istnienia ograniczenia dla odkształceń trwałych, a osiągnięcie wartości krytycznej wyznacza utratę ciągłości struktury materiału. Brak kryterium zniszczenia w modelu materiału przekłada się na brak informacji o wystąpieniu i rozwoju pęknięcia, które to zniszczenie rozpoznawane było w badaniach laboratoryjnych.
4. Zachowanie materiału konstrukcyjnego zwłaszcza podlegające trwałym odkształceniom plastycznym rozpatrywane jest w procesie obciążania i odciążania. Faza obciążania jest podstawowym przedmiotem zainteresowania, szczególnie dla zagadnień projektowania układu konstrukcyjnego. Czy faza odciążania stanowi w rozprawie również przedmiot analizy ? Założenia odnośnie odciążenia są inaczej stosowane w części badań eksperymentalnych i w części badań numerycznych. W rozdziale opisującym testy laboratoryjne Autor zapisał, iż brak odciążenia zarówno na początku jak i na końcu realizacji próby w stanowisku laboratoryjnym. Odciążenie początkowe ma techniczne znaczenie dla przeprowadzania badania za pomocą maszyny wytrzymałościowej, a przedstawienie wyników pomiarowych na wykresach bez efektów zaburzeń na początku przyłożenia siły i w trakcie jej wzrostu wymaga wyjaśnienia. Drugim elementem jest nieobecność ścieżki odciążenia na wykresach wyników pomiarowych przy wyznaczaniu nośności węzła z zastosowaniem zależności zawartych w normie, gdzie obliczanie nośności zawiera porównanie pól E_{ul} określonego przez odciążenie oraz pola E_{lo} określonego dla obciążania. W pracy jedynie na Rys. 3.43 przez znaki równoległości na linii początkowej i ukośnej interpretuje się przebieg odciążenia. Przy opisaniu wyznaczania sztywności węzła w trakcie odciążania według trzeciej metody zadeklarowany jest brak wykonywania odciążeń w ramach prób laboratoryjnych oraz zapowiedź określenia sztywności przy odciążaniu na podstawie analiz numerycznych, ale brak jest w tamtym rozdziale opisu dotyczącego sztywności. Odciążenia brak w pierwszej grupie symulacji numerycznych. Odciążenia są reprezentowane na wykresach charakteryzujących wielokrotne obciążenie węzła, ale ich analiza nie jest przedstawiona.
5. Deformacja jest istotną charakterystyką zachowania oraz wynikiem obliczeń w symulacjach numerycznych. Dla zaprezentowania zachowania węzła rusztowania w wyniku obciążania w rozprawie przedstawiane są funkcje zależności siły od przemieszczenia w wybranych punktach, które nie charakteryzują deformacji węzła. Zwłaszcza w przypadku posługiwania się siłami i przemieszczeniami pomierzonymi dla tłoka maszyny wytrzymałościowej, pozyskiwana jest globalna miara zachowania układu, nie odzwierciedlająca zachowania poszczególnych elementów węzła i zmian lokalnych w ramach elementów. Autor rozprawy zamieszcza fotografie przedstawiające stan części składowych węzła po wykonaniu eksperymentu oraz po ich wyjęciu ze stanowiska badawczego. W ten sposób dokumentuje stan deformacji po przeprowadzeniu testów laboratoryjnych. Na podstawie zakresu trwałych odkształceń i zniszczeń dokonuje oceny węzła.

W analizach numerycznych obliczane są przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia. Wyniki w postaci map konturowych naprężeń przedstawiane są na widokach trójwymiarowych modeli rury stojaka z rozetą, głowicy rygla i klina wyłącznie dla geometrii modelu nieodkształconego. Forma zdeformowanej postaci węzła rusztowania używana jest jedynie na Rys. 4.24, 4.28 i 4.33 dla celów poglądowych, aby za pomocą przekroju pokazać etapy obciążania. Brak przedstawienia stanu deformacji, geometrii modelu odkształconego. Brak jest również przedstawienia stanu i rozwoju odkształceń, stopnia zaawansowania odkształceń plastycznych, a jedyna informacja o wartości na poziomie 25% zamieszczona jest na Rys. 4.38, który dotyczy zmiany obszaru uplastycznienia dla fragmentu otworu rozety.

6. Zachowanie węzła rusztowania istotnie zależy od rodzaju połączenia pomiędzy elementami składowymi. Pomiędzy stojakiem rusztowania a rygłem, w analizowanym w rozprawie przypadku węzła jest trzeci element występujący w połączeniu. Realizacja montażu rusztowania i praca konstrukcji odbywa się przez klin. Klin jako jedyny łącznik przekazuje oddziaływania poprzez wspólne powierzchnie części głowicy rygla oraz rozety. Klin wyznacza wzajemne położenie głowicy i rozety oraz reguluje oddziaływanie pomiędzy nimi. Połączenie klinowe może wykazywać luz. W rozprawie zagadnienie wzajemnego oddziaływania powierzchni w połączeniu jest brane pod uwagę, a dla modelowania i symulacji komputerowej jest w centrum uwagi Autora. Przyjęte w modelu numerycznym definicje pary powierzchni kontaktowych, dostosowanie geometrii modelu oraz siatki elementów skończonych stanowiły początkowe przygotowanie analizy kontaktu pomiędzy powierzchniami w połączeniu węzła. Następnie wprowadzono modyfikacje modelu obliczeniowego poprzez podcięcie, zmianę geometrycznego kształtu dla klina lub zadanie wstępnego obrotu głowicy rygla. Zwłaszcza jednak dwa rodzaje analizy parametrycznej przy zdefiniowaniu różnych wartości współczynnika tarcia dla powierzchni kontaktowych oraz wartości głębokości wbicia klina pokazują, że Autor rozprawy uznał oddziaływania w połączeniu klinowym za ważne. Każda z wymienionych modyfikacji połączona jest ze stanem na powierzchniach kontaktowych, rzutujących na charakterystykę węzła rusztowania. Wśród wyników przedstawianych w rozprawie brak jest rezultatów charakteryzujących wzajemne przemieszczenia na powierzchniach, aktywny kontakt albo otwarcie pomiędzy powierzchniami, poślizg oraz stan naprężeń normalnych i stycznych. Brak jest wartości liczbowych przemieszczeń i naprężeń, określenia powierzchni wzajemnego kontaktu oraz obrazu ich zmiany podczas przykładania obciążenia. Wartości te rozstrzygają o wzajemnym położeniu głowicy, klina i rozety i wskazują czy występują luzy lub czy występuje utrata połączenia wynikająca z wysunięcia klina.
7. W rozprawie dokonano wyznaczenia i przedstawienia wartości nośności węzła. Wartości nośności węzła stanowiące główny przedmiot zainteresowania w badaniach są jednokrotnie podane w tabeli Tab. 3.3, w punkcie 3.3.8 rozprawy i nie są już wyznaczane, ani stosowane, z wyjątkiem wartości 97,56 kNcm dla danych zakresu obciążenia wielokrotnego na stronie 135. Wartość nośności węzła rusztowania wyrażona zależnościami zawartymi w normie zależy od kilku częściowych współczynników bezpieczeństwa: wynikającego z losowego charakteru oddziaływań oraz związanego z materiałem oraz uzależnionego od właściwości plastycznych węzła, a także wpływów smukłości i utraty stateczności. Czy współczynniki te analizowane były dla badanego przypadku? Nośność nie była wyznaczana poprzez symulacje numeryczne, a nośność obliczona na podstawie wyników pomiarów laboratoryjnych nie służyła do przeprowadzenia porównania i weryfikacji (zobacz Rys. 4.25, 4.30, 4.34). Dokonanie innego możliwego porównania pozwoliłoby na uzupełnienie zbadania wartości nośności węzła. Warto byłoby określić nośności przekroju rury z wykorzystaniem wskaźnika wytrzymałości sprężystej oraz wskaźnika dla pełnego uplastycznienia, które to charakterystyki reprezentują przekrój główny rygla i stojaka. Prowadzenie badania zwłaszcza w części laboratoryjnej i używanie próbek stanowiących fragmenty elementów uzyskanych od producenta wraz z wprowadzeniem na rynek systemu rusztowań modułowych Rotax plus stanowi o możliwości porównania wyznaczonych w rozprawie wartości nośności węzła

z wartościami podawanymi przez producenta w katalogu systemu. Odniesieniem mogą być również wartości nośności przedstawione w literaturze, a przede wszystkim te z nich, których wartości liczbowe Autor przedstawił w przeglądzie literatury w rozdziale 2.

8. Wyznaczenie postaci funkcji opisujących relacje siła-przemieszczenie lub moment-kął obrotu przez funkcję liniową i drugą część krzywoliniową opisywaną wielomianem jest dokonane przez analizę lokalnych ekstremów współczynników korelacji dla funkcji zapisanych równaniami (3.10)-(3.12). Autor rozprawy dołożył starania, aby zastosować aparat matematyczny dla wyznaczenia postaci funkcji i współrzędnych punktu pomiędzy prostą, a wielomianem. Brak jest jednak w rozprawie podania wyników liczbowych otrzymanych na podstawie danych pomiarowych badania obciążenia węzła w laboratorium. Punkt przecięcia charakteryzuje liniowo-sprężysty zakres pracy węzła i ma odniesienie do ścieżek odciążenia. Poznanie wartości jego współrzędnych oraz możliwość odniesienia do charakterystycznej i obliczeniowej wartości nośności węzła ma szczególne znaczenie dla przypadków o zróżnicowanych przebiegach (porównanie np. V_z i V_y). Padanie wartości wynikowych stanowi charakterystykę węzła rusztowania.
9. Rozeta na trwale połączona ze słupkiem stojaka rusztowania posiada cztery większe i cztery mniejsze otwory. Umożliwiają one połączenie kilku elementów. W rozprawie przedstawione jest występowanie i znaczenie stężeń dla całej konstrukcji rusztowania, jednak nie jest w ogóle podjęta sytuacja połączenia stężenia pionowego w płaszczyźnie rusztowania do węzła, a zwłaszcza w postaci zastrzału bezpośrednio montowanego za pomocą złącza klinowego. W rozprawie rozpatruje się węzeł z połączeniem pojedynczego rygla, co jest uzasadnione wyeliminowaniem niepożądanych efektów związanych z występowaniem wielu zjawisk. Dla pojedynczego rygla przykładane jest osobno obciążenie w formie odpowiadającej sile przekrojowej przestrzennego pręta przyrządkowego. Badanie nośności elementu nie uwzględnia złożonego stanu, uwzględniającego najbardziej niekorzystne warunki. A zwłaszcza w części numerycznej, zdefiniowanie złożonego stanu jest dostępne. Jakie ograniczenia wynikają z braku bardziej złożonego stanu w węźle?
10. Jednym z wyników badań przedstawianych przez Autora jest podanie sposobu weryfikacji przydatności węzła po wcześniejszym użytkowaniu i możliwości ponownego jego zamontowania w rusztowaniu. W rozprawie przedstawione jest jednolite podejście do oceny nośności przez wskazywanie węzła jako części rusztowania, co do której zastosowane są metody badawcze, przeprowadzone analizy i formułowane wnioski na podstawie uzyskanych wyników. Jednocześnie przygotowanie sposobu dokonywania badań, obserwacja deformacji i zniszczenia realizowana zarówno w badaniach eksperymentalnych jak i numerycznych, prezentowanie wyników badawczych oraz formułowanie wniosków dotyczy poszczególnych elementów składających się na węzeł rusztowania. Jedną z wersji jest konieczność wymiany wszystkich elementów węzła. Sposób weryfikacji przydatności w kolejnym użytkowaniu dotyczy jednak każdego z elementów. Decyzja o dalszym użytkowaniu zrealizowana musi być dla elementu czyli rygla, stojaka rusztowania, klina. Analogicznie przebiega eliminacja z użytkowania przy kolejnym składaniu rusztowania z elementów. Dla zmiany zestawu elementów w węźle przy kolejnym jego składaniu ma znaczenie czy przesłanki do dalszego użytkowania ustalane są przed demontażem czy dla stanu po kolejnym połączeniu elementów węzła. Wskazania odnośnie oceny nośności potrzebują doprecyzowania i odniesienia do poszczególnych elementów węzła.

Powyższe uwagi, nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, nie podważają mojej pozytywnej oceny rozprawy, lecz chciałbym by zapoczątkowały dyskusję naukową oraz pomogły w sformułowaniu dalszych celów aktywności naukowej. Niedoskonałości wynikać mogą z rozległego zakresu badań eksperymentalnych i numerycznych oraz ukierunkowania na zgodność wyników uzyskanych metodami komputerowymi z pomiarami podczas własnych testów laboratoryjnych.

6. Ogólna ocena rozprawy i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Michała Pieńko stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Osiągnięte w pracy wyniki uważam za ważne w dziedzinie budownictwa, w zakresie mechaniki konstrukcji.

Mgr inż. Michał Pieńko wykazał się samodzielnością w rozwiązywaniu problemu naukowego, a jednocześnie współdziałaniem w zespole badawczym, w korzystaniu z publikowanego dorobku naukowego i w końcu redagowaniu rozprawy doktorskiej.

Wobec powyższego wystawiam wniosek:

Rozprawa mgr inż. Michała Pieńko
„Dobór kryteriów oceny nośności węzłów rusztowań budowlanych”
spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

Proszę Dziekana i Radę Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej w Lublinie o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



Adam Glema