

Analiza deformacji układów węzłowych rusztowań budowlanych

Michał Pieńko¹

¹ *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: m.pienko@pollub.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono tematykę związaną z rusztowaniami budowlanymi i ich niewrażliwym punktem jakim jest węzeł. Rusztowanie jest konstrukcją wielokrotnego użytku, które może podlegać różnorodnym formom obciążenia, w zależności od przeznaczenia. Połączenia elementów w rusztowania nie są połączeniami stałymi i jednoznaczными. Wielootworowe rozety umożliwiają połączenie maksymalnie ośmiu elementów, które mogą podlegać dowolnym obciążeniom. Właściwe zaprojektowanie konstrukcji rusztowania wymaga wiedzy na temat sposobu uzyskiwania połączeń pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcji oraz zachowania połączenia pod wpływem obciążenia. Różnorodność obciążeń jak również forma węzła sprawia, iż właściwe określenie granicznych wartości obciążenia i dopuszczalnych odkształceń niezagrożających użytkownikowi konstrukcji wymaga prześledzenia form deformacji poszczególnych układów węzłowych. W pracy przeanalizowane zostaną węzły jednoelementowe poddane każdemu rodzajowi obciążenia (siła normalna, tnąca oraz moment zginający), co będzie stanowić podstawę do dalszych badań węzła z większą liczbą elementów. W pracy przedstawione zostaną autorskie rozwiązania umożliwiające obciążanie węzła na ogólnodostępnych maszynach wytrzymałościowych.

Słowa kluczowe: rusztowanie modułowe, deformacja węzła, odkształcenia plastyczne, kontakt.

1. Wprowadzenie

Rusztowania modułowe są rusztowaniami, znajdującymi coraz szersze zastosowanie zarówno podczas wznoszenia obiektów jak również ich remontów. Ze względu na możliwość optymalnego dostosowania się do gabarytów konstrukcji, rusztowania modułowe wypierają z rynku rusztowania standardowe w postaci ramek, ustawianych bezpośrednio na sobie czy też rusztowania rurowe. Połączenia uzyskiwane poprzez wbicie klina w rozetę w znacznym stopniu skracają czas montażu rusztowania, co w wielu przypadkach ma kluczowe znaczenie w procesie inwestycyjnym. W rusztowaniach typowych zmiana modułu wysokości wynoszącego dwa metry wymaga zastosowania dodatkowych elementów w postaci krótszych ramek. Elementy te są elementami nietypowymi często niedostępnymi u dostawców. W przypadku rusztowań modułowych można w sposób płynny regulować wysokość rusztowania w półmetrowym module. Nie zwiększa to liczby jak również różnorodności elementów. Problem pojawia się w przypadku rusztowań daleko odbiegających od wytycznych zawartych w dokumentacji technicznej systemu rusztowania. Tego typu konstrukcje, zgodnie z obowiązującymi przepisami wymagają przeprowadzenia obliczeń statycznych, potwierdzających zachowanie nośności i stabilności konstrukcji [3]. Właściwe zaprojektowanie rusztowania wymaga jednak zamodelowania połączenia, a więc określenia rodzaju pracy połączenia pomiędzy poszczególnymi elementami [2]. W rusztowaniach występują połączenia, których nie można zakwalifikować ani jako sztywnych ani przegubowych, lecz należy je traktować jako podatne. Właściwe określenie parametrów podatności połączenia wymaga prześledzenia form odkształcenia węzła pod wpływem różnorodnych obciążeń. Węzeł, rozpatrywanego rusztowania modułowego, umożliwia połączenie maksymalnie ośmiu elementów, z którego każdy może być poddany dowolnemu obciążeniu. Standardowe maszyny wytrzymałościowe nie umożliwiają obciążenia węzła ośmioma niezależnymi siłami. Dlatego też w artykule

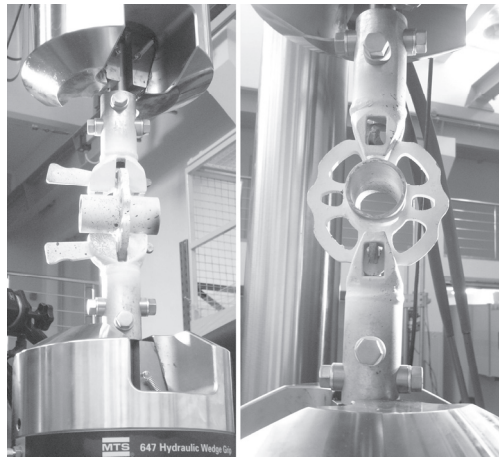
przedstawione zostaną badania węzła jednoelementowego poddanego różnorodnym obciążeniom. Prześledzenie deformacji węzła będzie podstawą do stworzenia modelu numerycznego, odwzorowującego pracę węzła. Model numeryczny umożliwi obciążeniu węzła w dowolnej konfiguracji obciążenia oraz liczby elementów. Głównymi elementami tworzącymi węzeł są: rura stojaka, talerzyk, głównie stężenia lub rygła oraz klin. Ze względu na liczne wyokrąglenia i skomplikowaną formę głowni prześledzenie form zniszczenia węzła wskaże newralgiczne miejsca, które należy z jak największą dokładnością zamodelować w trakcie analiz numerycznych a które można zaniedbać. Takie podejście umożliwi zoptymalizowanie rozmiarów siatki elementów skończonych a co za tym idzie skrócenie czasu obliczeń z jednoczesnym zachowaniem dokładności. Jest to odmienne podejście do problemu w stosunku do istniejących publikacji ([1],[4]) traktujących o konstrukcji rusztowania jako całości i jej stabilności.

2. Przetworzenie stanowisk badawczych

Ze względu na gabaryty jak również złożoność węzła przeprowadzenie badań laboratoryjnych musiało zostać poprzedzone opracowaniem specjalnych uchwytów, umożliwiających przyłożenie obciążenia. Każdy rodzaj obciążenia wymagał opracowania innego rodzaju uchwytu. Zaproponowane rozwiązania są rozwiązaniami autorskimi.

2.1. Stanowisko do badania pracy węzła przy rozciąganiu rygła

Najprostszym z rozpatrywanych układów obciążenia jest węzeł poddany rozciąganiu rygła. W przypadku tego typu obciążenia jedynym problemem była średnica rury rygła. Ponieważ maszyna wytrzymałościowa nie była przystosowana do normatywnej średnicy rury rusztowania, zastosowano trzpienie przykręcane bezpośrednio do rury, mające znacznie większą nośność w stosunku do obciążeń (Rys.1). Średnica jak również grubość ścianki jest określona w normie dotyczącej rusztowań[3]. Zastosowanie śrub oraz wyokrąglonych podkładek umożliwia wielokrotne wykorzystanie tych samych trzpieni w szeregu badań. Śruby te są wkręcane bezpośrednio w trzpień a przekazanie obciążenia następuje zarówno poprzez tarcie jak i powierzchnie styku śruby i rury rygła.

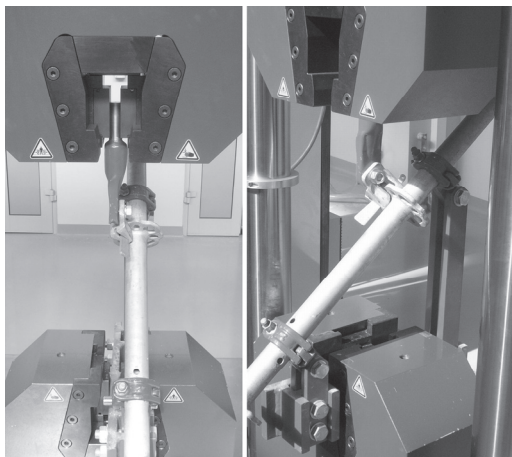


Rys. 1. Uchwyt zastosowany w przypadku rozciągania rygła

2.2. Stanowisko do badania pracy węzła przy rozciąganiu stężenia

Największe problemy napotkano podczas projektowania uchwytu, umożliwiającego obciążenie węzła ze stężeniem. Stężenie znajduje się na pewnym mimośrodku, co skomplikowało formę uchwytu (Rys. 2). Uchwyt musiał umożliwiać przyłożenie obciążenia w maszynie wytrzymałościowej, służącej do osiowego rozciągania próbek. Dodatkowo musiał być na tyle masywny, ażeby nie uległ znacznym odkształceniom pod wpływem

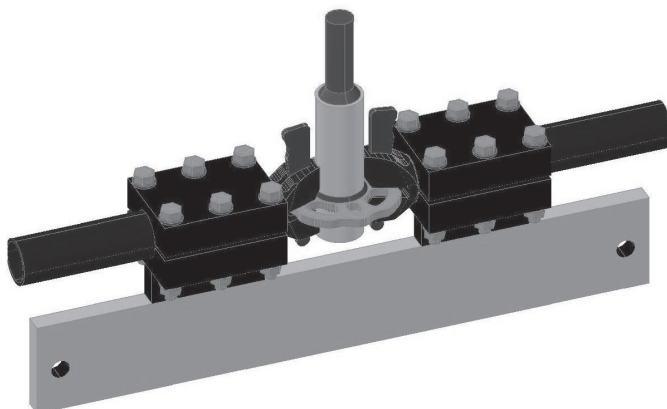
obciążania właściwego elementu oraz nie powodował odkształceń szczęk maszyny wytrzymałościowej. Stężenie, oprócz tego, że pracuje na mimośrodzie, to dodatkowo oddziałuje na węzeł pod kątem zależnym od rozmiaru pola rusztowania. Ze względu na ograniczenia gabarytu uchwytu jako wzorcowe pole przyjęto pole o szerokości 2,57m i dla takiego pola ustawiono kąt pomiędzy stężeniem a rurą stojaka. Stężenie przekazuje obciążenie na węzeł za pośrednictwem nitu w specjalnie zaprasowanej rurze, dlatego też w stężeniu może występować tylko siła normalna.



Rys. 2. Uchwyt zastosowany w przypadku rozciągania stężenia

2.3. Stanowisko do badania pracy węzła przy ścinaniu rygła

Uzyskanie czystego ścinania na maszynie wytrzymałościowej służącej do osiowego rozciągania jest praktycznie niemożliwe. Zawsze będziemy mieli do czynienia ze zginaniem. W celu zminimalizowania wpływu zginania na formę odkształcenia pod wpływem ścinania w zaproponowanym uchwycie zminimalizowano ramię działania siły poprzez maksymalne usztywnienie uchwytu (Rys. 3). W masywnym stalowym bloku wyfrezowano wyokrąglenie ściśle przylegające do rury rygła. Blok jest skręcany sześcioma śrubami w taki sposób, że rygiel nie ma możliwości jakiegokolwiek ruchu. Stalowe bloki zostały przyspawane do płaskownika o grubości 20mm, który jest montowany bezpośrednio w uchwycie maszyny. Ze względu na znaczne siły niszczące węzeł poprzez jego ścinanie nie możliwe było zastosowanie trzpieni ze śrubami.

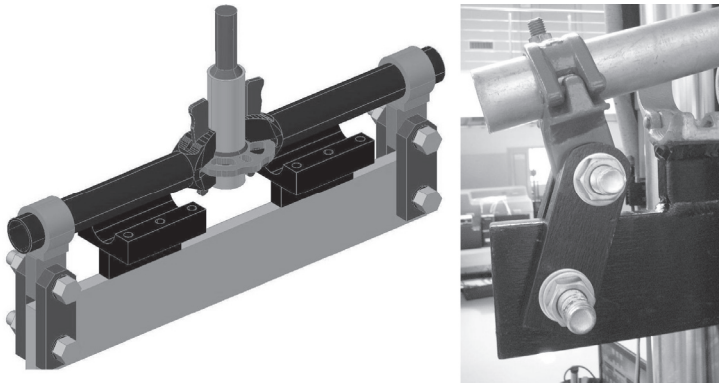


Rys. 3. Uchwyt zastosowany w przypadku ścinania rygła

Dodatkowo układ został „obrócony”. Siła tnąca nie jest przykładana do rygła a do rury stojaka. Ten zabieg wymusił zastosowanie trzpienia bezpośrednio przyspawanego do rury stojaka. Ponieważ stanowisko badawcze umożliwia również skręcanie, zamiana miejscami elementów w uchwycie umożliwi również przyłożenie skręcania w ryglu z wykorzystaniem tego samego uchwytu.

2.4. Stanowisko do badania pracy węzła podczas zginania rygła

Dość nietypowe rozwiązanie zastosowano w celu uzyskania zginania w ryglu. Ponieważ rygiel może ulegać zginaniu konieczne było opracowanie uchwytu, w którym za pomocą osiowego rozciągania uzyskane będzie zginanie. Zgodnie z zasadami mechaniki zginanie uzyskano poprzez zastosowanie ramienia działania siły (Rys. 4). Ponieważ węzeł poddany zginaniu ulega znacznym odkształceniom konieczne było zastosowanie podwójnych przegubów, umożliwiających znaczne odkształcenie. W przypadku zginania również mamy do czynienia z częściowym ścinaniem węzła, jednak wpływ ścinania jest znikomo mały.



Rys. 4. Uchwyt zastosowany w przypadku zginania rygła

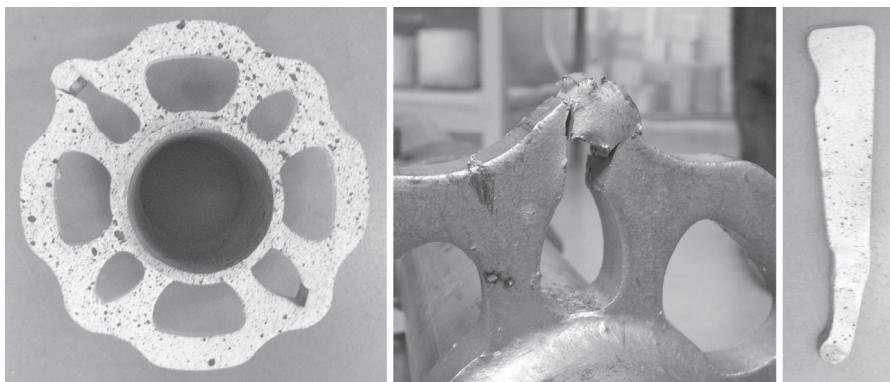
3. Analiza deformacji węzłów

Po wykonaniu uchwytów, umożliwiających obciążenie węzła, wykonano podstawowe badania mające na celu przeanalizowanie zachowania samego węzła jak również nowatorskich uchwytów. Wykonano pojedyncze próby, w wyniku których dokonano pewnych modernizacji uchwytów w celu zminimalizowania błędów, wykrytych podczas pierwszych prób. W badaniach laboratoryjnych, z wykorzystaniem poprawionych uchwytów, uzyskano formy zniszczenia, które zauważono podczas normalnej pracy rusztowań. Należy pamiętać iż w przedstawionym artykule rozpatrywany jest węzeł a nie konstrukcja rusztowania jako całość. Celem było prześledzenie zachowania niewrażliwego punktu rusztowania modułowego jakim jest węzeł. W badaniach laboratoryjnych przeprowadzono analizę węzłów fabrycznie nowych, nie posiadających oznak użytkowania.

3.1. Deformacje węzła z rozciągniętym rygłem

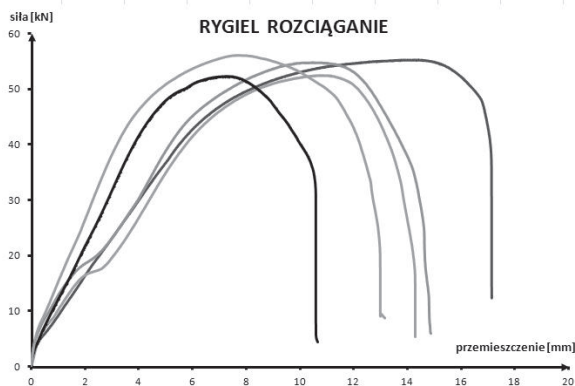
Pierwszym węzłem poddanym obciążeniu był węzeł z rygłem, do którego przyłożono siłę rozciągającą. Już wstępne oględziny rusztowań wskazywały iż najbardziej wyężonym elementem w przypadku rozciągania rygła jest klin oraz talerzyk. W rzeczywistych konstrukcjach zaobserwowano trwałe zmiany w postaci miejscowego uplastycznienia stali w miejscu styku. Już podczas wbijania klina następuje minimalne odkształcenie w miejscu bezpośredniego przekazania obciążenia. Badania laboratoryjne potwierdziły fakt iż podczas rozciągania zniszczeniu ulega talerzyk. Forma zniszczenia ma postać ścięcia talerzyka poprzez klin (Rys. 5). Trwałym odkształceniom uległa głownia rygła w miejscu bezpośredniego oddziaływania klina, jak również sam klin. W przypadku modelowania numerycznego konieczne jest właściwe zamodelowanie miejsca styku klina i talerzyka oraz

właściwe określenie początkowej powierzchni oddziaływania pomiędzy tymi dwoma elementami. Nie zauważono widocznych zmian w obrębie zaproponowanych trzpieni przykręcanych do rury rygla.



Rys. 5. Forma zniszczenia węzła w przypadku rozciągania rygla.

Przeprowadzając poszczególne badania dokonywano pomiaru wartości przemieszczeń oraz sił przyłożonych do węzła. Na rysunku 6 przedstawiono zależność pomiędzy przemieszczeniem i siłą w przypadku rozciągania rygla. Na wykresie możemy zauważyć iż w początkowym etapie obciążenia wykres jest prostoliniowy a następnie ulega zakrzywieniu. Nie występuje jednak żadne gwałtowne załamanie, które mogłoby oznaczać pęknięcie i utratę nośności. Nie da się więc jednoznacznie ustalić momentu utraty nośności. Konieczne jest opracowanie kryteriów, pozwalających na określenie nośności węzła przy zadanym obciążeniu. W uzyskanym połączeniu mogą występować pewne luzy, powodujące rozbieżności pomiędzy poszczególnymi próbami obciążenia. Rusztowania są konstrukcjami podlegającymi wielokrotnemu użytku, dlatego też konieczne jest opracowanie wytycznych określających czy dany element posiadający nieznaczne odkształcenia trwale może zostać jeszcze raz użyty czy też konieczna jest naprawa.



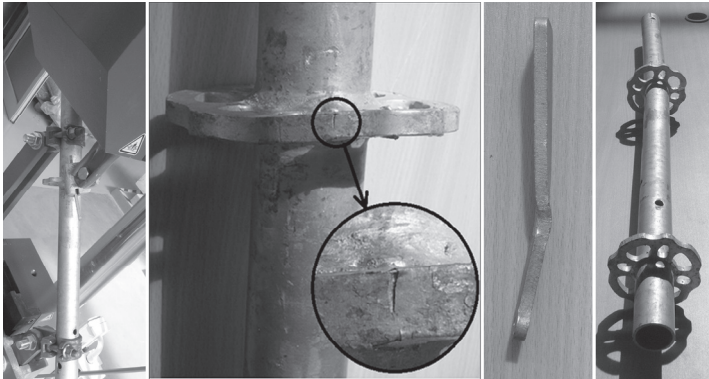
Rys. 6. Wykres zależności siła-przemieszczenie w przypadku rozciągania rygla.

W katalogach producenta graniczna dopuszczalna wartość obciążenia w przypadku siły normalnej wynosi 29.2 kN. Trudno jest jednoznacznie stwierdzić na jakiej podstawie została określona ta wartość. Nie ma również żadnej informacji odnośnie liczby elementów w węźle.

3.2. Deformacja węzła z rozciąganiem stężeniem

Do podobnej formy zniszczenia dochodzi w przypadku węzła z rozciąganiem stężeniem. W przypadku tego typu obciążenia również dochodzi do znacznych odkształceń

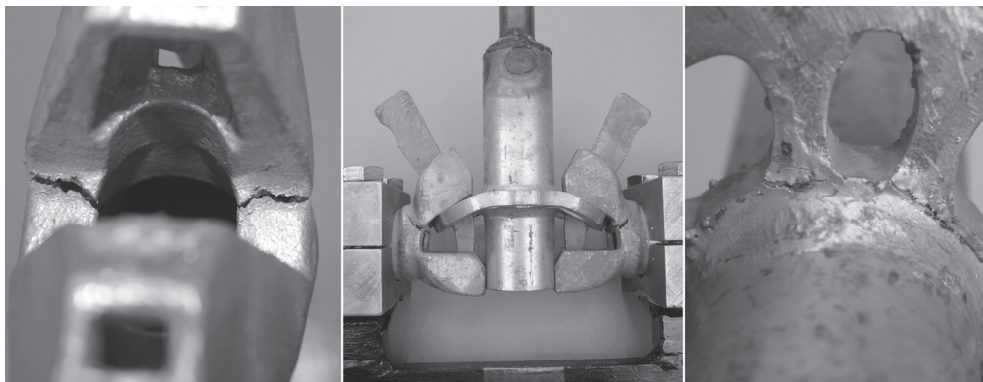
w obrębie bezpośredniego oddziaływania klina na talerzyk. Należy jednak rozpatrzyć aspekt obrotu głowni w wyniku oddziaływania obciążenia. Inne powierzchnie mogą brać udział w przenoszeniu obciążenia. Niewielkie uszkodzenia zostały zaobserwowane również w obrębie płaskiej powierzchni talerzyka (Rys. 7). Klin ulega dużo większym odkształceniom i mają one bardziej rozbudowany charakter. Uzyskane odkształcenia zostały potwierdzone przez osoby, dokonujące przeglądu rusztowań podczas zwrotów elementów wypożyczanych, co może potwierdzać właściwą pracę zastosowanego uchwytu. Ze względu na znaczną długość rury dochodzi również do zniekształcenia rury poprzez odgięcie jej z linii prostej.



Rys. 7. Forma zniszczenia węzła w przypadku rozciągania stężenia.

3.3. Deformacja węzła pod wpływem siły tnącej

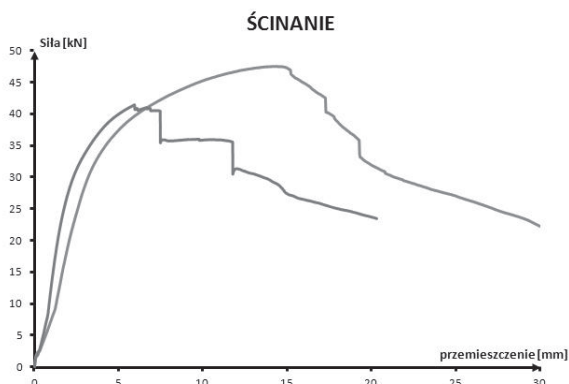
Ciekawych obserwacji dokonano w przypadku przyłożenia do węzła siły tnącej. Przypuszczano iż zniszczeniu ulegnie w głównej mierze talerzyk. Naturalnym zachowaniem może wydawać się sytuacja, gdy pod wpływem ścinania dojdzie do zniszczenia spawu, łączącego talerzyk z rurą stojaka. Tak jednak się nie stało. W głównej mierze zniszczeniu uległy głownie rygli. Jako pierwsze zaczęły pojawiać się pęknięcia w obrębie naroży głowni (Rys. 8). Pod wpływem dalszego obciążenia pęknięcia pojawiły się również w obrębie spawu, ale wystąpiły one znacznie później. Dość nienaturalnym wydaje się być obciążenie w postaci siły tnącej, jednakże z tego typu oddziaływaniem mamy do czynienia w przypadku węzła z ryglem, na którym opiera się podest lub w przypadku gdy rusztowanie jest podwieszane do istniejącej konstrukcji.



Rys. 8. Forma zniszczenia węzła w przypadku siły tnącej.

Przeprowadzone badanie wskazało newralgiczne miejsca w obrębie głowni oraz nasunęło pytanie czy w przypadku większej liczby elementów w jednym węźle nie

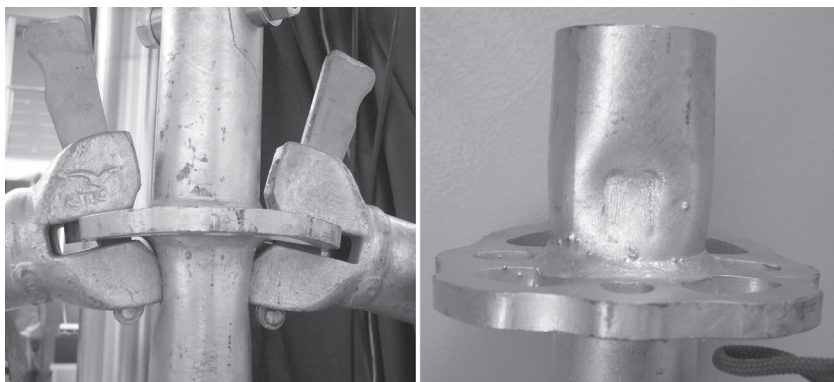
nastąpiłoby ścięcie talerzyka. Ten aspekt zostanie rozważony podczas numerycznego modelowania węzła. W przypadku ścinania otrzymano inny charakter wykresu (Rys.9). Widoczne są momenty w których nastąpiło pęknięcie głównej rygi. Zgodnie z danymi podawanymi przez producenta maksymalna wartość siły tnącej którą może przenieść węzeł wynosi 29.3kN. Również w tym przypadku nie jest podawana liczba elementów w jednym węźle i czy należy podaną nośność zmniejszyć w zależności od konfiguracji węzła.



Rys. 9. Wykres zależności siła-przemieszczenie w przypadku siły tnącej.

3.4. Deformacja węzła pod wpływem zginania

Kolejną rozpatrywaną formą obciążenia było zginanie węzła. W przypadku zginania zniszczenie miało postać znacznego odkształcenia talerzyka, jak również rozległych wgnieceń rury w strefie docisku główki do rur (Rys. 10). Zaprojektowany uchwyt zadziałał prawidłowo, pozwalając na zbliżenie końców rur do siebie. W wyniku tego typu oddziaływania doszło również do znacznych zmian w obrębie klina oraz talerzyka. Tak jak w przypadku rozciągania, doszło do trwałego odkształcenia klina i talerzyka w obrębie bezpośredniego oddziaływania elementów na siebie. Siły użyte do zniszczenia połączenia są dziesięciokrotnie mniejsze niż w przypadku węzła z obciążeniem siłą tnącą.



Rys. 10. Forma zniszczenia węzła w przypadku zginania.

4. Podsumowanie

W pracy dokonano analizy pracy statycznej węzła rusztowania modułowego przy różnych obciążeniach na podstawie badań laboratoryjnych. Każde z obciążeń w zasadzie powodowało zupełnie inną formę uszkodzenia. Do znacznych uszkodzeń doszło w przypadku przyłożenia siły rozciągającej w ryglu oraz w przypadku ścinania. Uszkodzenia

zaistniałe w wyniku przyłożonych obciążeń jednoznacznie eliminują dany element z dalszego użytkowania. Graniczne wartości obciążeń podawane przez producentów nie zostały uzależnione od liczby elementów w jednym węźle. Ponieważ rusztowania są wielokrotnie użytkowane w różnorodnych konfiguracjach, konieczne jest określenie poduszczanych obciążeń nie mających wpływu na wielokrotne bezpieczne użytkowanie rusztowania jako całości konstrukcji.

Jak wcześniej napisano w pracy zbadano węzły, w których obciążenia przykładno do pojedynczych elementów. W rzeczywistych konstrukcjach będzie dochodziło do nałożenia się wpływów obciążeń, dlatego kolejnym etapem badań będzie utworzenie modeli numerycznych, zweryfikowanych na podstawie badań, i badania numeryczne pracy układów, łączących kilka elementów, poddanych zestawom obciążeń. Dzięki badaniom laboratoryjnym możliwe będzie zoptymalizowanie modelu numerycznego w taki sposób, ażeby dokładnie odwzorowywał zachowanie węzła pod wpływem dowolnego obciążenia. Stworzenie modelu numerycznego umożliwi przeprowadzenie symulacji węzła wieloelementowego bez konieczności niszczenia elementów.

Literatura

- 1 Liu H, Chen Z, Wang X, Zhou T. Theoretical Analysis and Experimental Research on Stability Behavior of Structural Steel Tube and Coupler Falsework with X-Bracing, *International Journal in Advance Steel Construction*, vol. 6, 4 pp. 949-962, 2010.
- 2 Pieńko, M. and Błazik-Borowa, E., Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes, *Engineering Structures*, vol 48, pp. 1-9, 2013.
- 3 PN-EN 18211-1:2007 Temporary works equipment – Part1: Scaffolds – Performance requirements and general design.
- 4 Whitaker SM, Graves RJ, James M, McCann P. Safety with access scaffolds: Development of a prototype decision aid based on accident analysis, *Journal of Safety Research*, vol 34, pp 249–261, 2003.

The analysis of the deformation of node in a modular scaffolding system

Michał Pieńko¹

¹ Department of Structure Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: m.pienko@pollub.pl

Abstract: The paper deals with the deformation of the weakest point of the modular scaffolding systems, which is the node. Scaffoldings are reusable constructions which can have various forms of the load, depending on the destination. The connections between the elements of scaffolding are not permanent and obvious. The multi-hole rosette allows to connect up to eight components, each of which can be loaded in another way. The proper design of scaffolding structures requires knowledge of the behavior of nodes under the load. Every kind of a one-piece load was analyzed in the study (normal force, cutting and bending moment), which will provide the basis for further studies with a larger number of elements. This paper presents original solutions that allow to load the node in the testing machine.

Keywords: modular scaffoldings, plastic deformations, scaffoldings nodes, contact.