

Badania numeryczne nośności węzłów w modułowym systemie rusztowań budowlanych

Michał Pieńko

*Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Mechaniki Budowli,
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: m.pienko@pollub.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono numeryczną analizę węzła, występującego w rusztowaniach modułowych, wykorzystywanych do prac budowlanych. Celem tej analizy było określenie nośności węzła na podstawie badań numerycznych. Tego typu analiza jest metodą alternatywną w stosunku do tradycyjnych metod, polegających na badaniach laboratoryjnych przeprowadzanych na stanowiskach specjalnie przystosowanych do tego typu badań.

Słowa kluczowe: węzeł rusztowania, nośność węzła, rozkład naprężeń, koncentracja naprężeń.

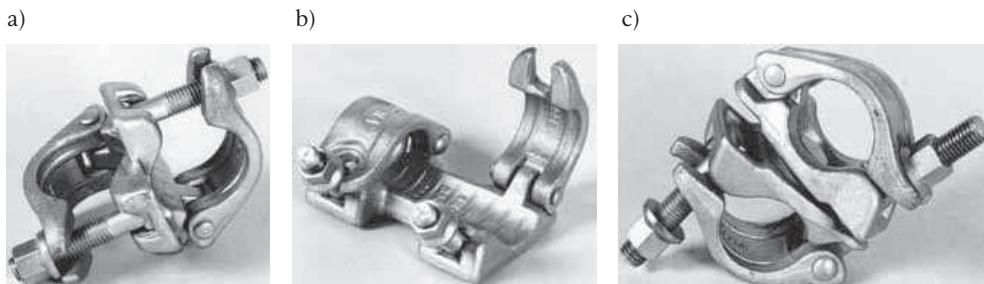
1. Wprowadzenie

Coraz bardziej skomplikowane obiekty inżynierskie wymagają opracowania specjalnych technologii, umożliwiających ich wznoszenie i konserwację. Jednym z nieodzownych elementów podczas wznoszenia obiektów stają się rusztowania, przybierające często bardzo skomplikowane kształty. Producenci rusztowań w celu zaspokojenia rynku wytwarzają systemy uniwersalne, umożliwiające dostosowanie rusztowania do każdego rodzaju obiektów. Wytwarzają systemy, w których węzły umożliwiają połączenie jak największej liczby elementów pod dowolnym kątem. W wyniku rozwoju technicznego powstają nowe typy połączeń, które nie zostały poddane dokładnej analizie wytrzymałościowej.

W obowiązujących normach ujęte zostały tylko typowe węzły, występujące w każdym rodzaju rusztowania (Rys. 1). Każda z firm produkujących rusztowania opracowuje własne rodzaje węzłów, przez co trudno jest znormalizować metody określania nośności poszczególnych połączeń. W celu zbadania, jakie naprężenia panują w poszczególnych elementach, wchodzących w skład węzła, należałoby opracować stanowiska laboratoryjne dostosowane do poszczególnych rodzajów węzłów [1]. Inną metodą jest metoda analizy komputerowej, która wymaga mniejszych nakładów finansowych niż prace laboratoryjne i umożliwia obciążanie węzła w dowolny sposób.

Przedstawione złącza wytwarzane przez poszczególnych producentów, różnią się między sobą jedynie wyglądem z zachowaniem takiego samego charakteru pracy, opartego głównie na tarciu pomiędzy złączem a powierzchnią rury. Coraz rzadziej stosuje się połączenia wymagające śrub, ponieważ skręcanie jest bardzo pracochłonnym procesem podczas wznoszenia konstrukcji rusztowania. Śruby zastępowane są klinami, które wymagają tylko jednego uderzenia młotkiem lub

połączeniami zatraskowymi automatycznie blokującymi się w sposób grawitacyjny lub za pomocą wzajemnego oddziaływania specjalnego układu sprężyn.

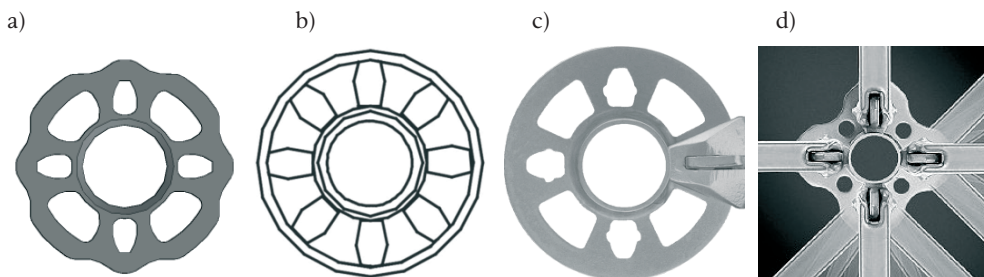


Rys. 1. Złącza podstawowe: a) złącze krzyżowe; b) złącze wzdłużne; c) złącze obrotowe.
Fig. 1. Basic joints: a) cross joint, b) elongated joint, c) rotational joint.

Przedstawione złącza wytwarzane przez poszczególnych producentów, różnią się między sobą jedynie wyglądem z zachowaniem takiego samego charakteru pracy, opartego głównie na tarcu pomiędzy złączem a powierzchnią rury. Coraz rzadziej stosuje się połączenia wymagające śrub, ponieważ skręcanie jest bardzo pracochłonnym procesem podczas wznoszenia konstrukcji rusztowania. Śruby zastępowane są klinami, które wymagają tylko jednego uderzenia młotkiem lub połączeniami zatraskowymi automatycznie blokującymi się w sposób grawitacyjny lub za pomocą wzajemnego oddziaływania specjalnego układu sprężyn.

2. Budowa węzła

W przypadku rusztowań modułowych najbardziej rozpowszechnionym węzłem jest węzeł, którego głównym elementem jest talerzyk. Talerzyk jest elementem wyciętym z blachy o grubości ok. 9 mm (w zależności od producenta), przyspawanym bezpośrednio do rur stojaków w stałych 50 cm odstępach. Talerzyk wyposażony jest w otwory, umożliwiające przyłączenie takich elementów jak rygle i stężenia. Na Rys. 2 przedstawiono talerzyki występujące u poszczególnych producentów rusztowań.



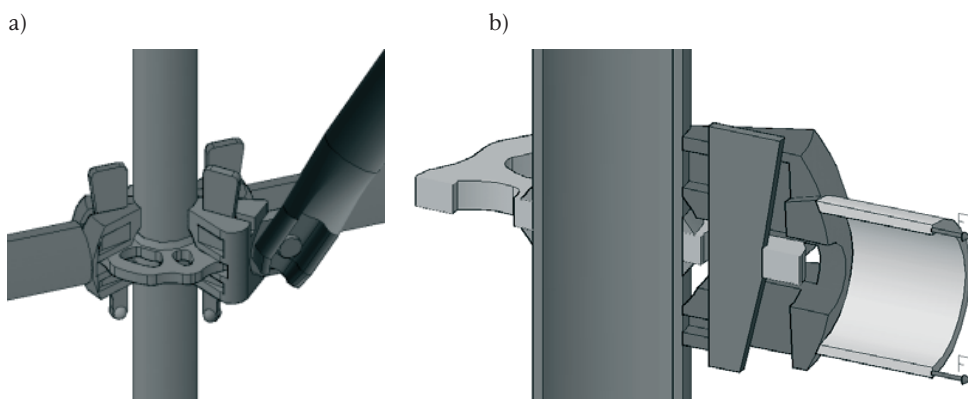
Rys. 2. Talerzyki firmy: a) Altrad Mostostal, b) Harsco Infrastructure (dawny Hunnebeck), c) Layher, d) Peri.

Fig. 2. Rosettes by: a) Altrad Mostostal, b) Harsco Infrastructure (former Hunnebeck), c) Layher, d) Peri.

Ponieważ firma Altrad Mostostal udostępniła niezbędne rysunki techniczne potrzebne do zamodelowania węzłów, jak również elementy wchodzące w skład

węzła, dalsza część opracowania będzie dotyczyła węzła produkowanego przez tą firmę.

Węzeł systemu „Rotax” (Rys. 3) składa się z sześciu podstawowych elementów: rury stojaka, talerzyka, głowni rygła, rury rygła, głowni stężenia oraz klina. Talerzyki wyposażone są w osiem otworów, pozwalających na przyłączenie takiej samej liczby elementów. Występują dwa rodzaje gniazd: cztery duże, pozwalające na montaż elementów w zakresie kąta od 0° do 30° oraz cztery małe otwory, umożliwiające uzyskanie prostokątnej siatki rusztowania. Rygle oraz stężenia na obu swych końcach posiadają profilowane głownie z klinem, zamykającym się na otworze talerzyka poprzez zaklinowanie.



Rys. 3. Węzeł systemu „Rotax”: a) widok całego węzła, b) przekrój.

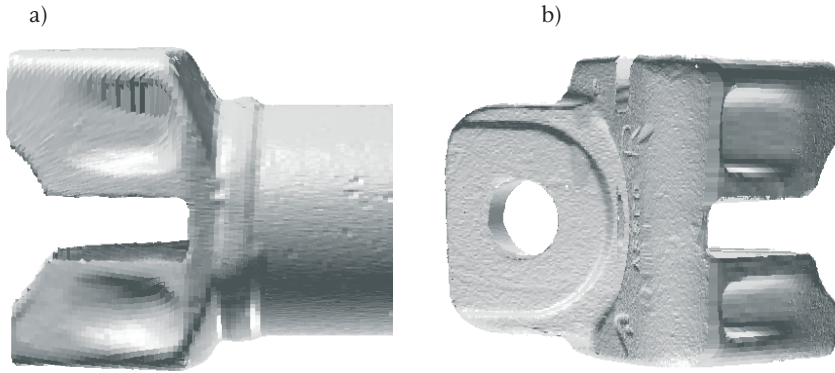
Fig. 3. „Rotax” system node: a) the view of the whole node, b) cross-section.

W węźle następuje przekazanie sił na poszczególne elementy. Elementy węzła mogą być połączone ze sobą w sposób sztywny lub przegubowy. W wypadku połączenia sztywnego przekazywane są dwie siły prostopadłe do osi elementu (siły tnące), siła osiowa (siła normalna), dwa momenty zginające oraz moment skręcający. W zależności od tego z jakim przegubem mamy do czynienia, odpowiednie obciążenia nie są przekazywane na kolejne elementy. Obciążenia przekazywane są za pośrednictwem specjalnie wykształconych powierzchni. Za przekazanie każdego rodzaju obciążenia może odpowiadać inny element lub powierzchnia. Przyjęcie właściwego schematu przekazania sił jest zagadnieniem bardzo trudnym i mającym wpływ na poprawne przeprowadzenie analizy. Stworzenie komputerowego modelu węzła umożliwia obciążenie go w dowolny sposób. Jednak, aby model odzwierciedlał pracę węzła, należy przyjąć odpowiednie schematy statyczne oraz parametry materiałowe.

3. Modelowanie węzła

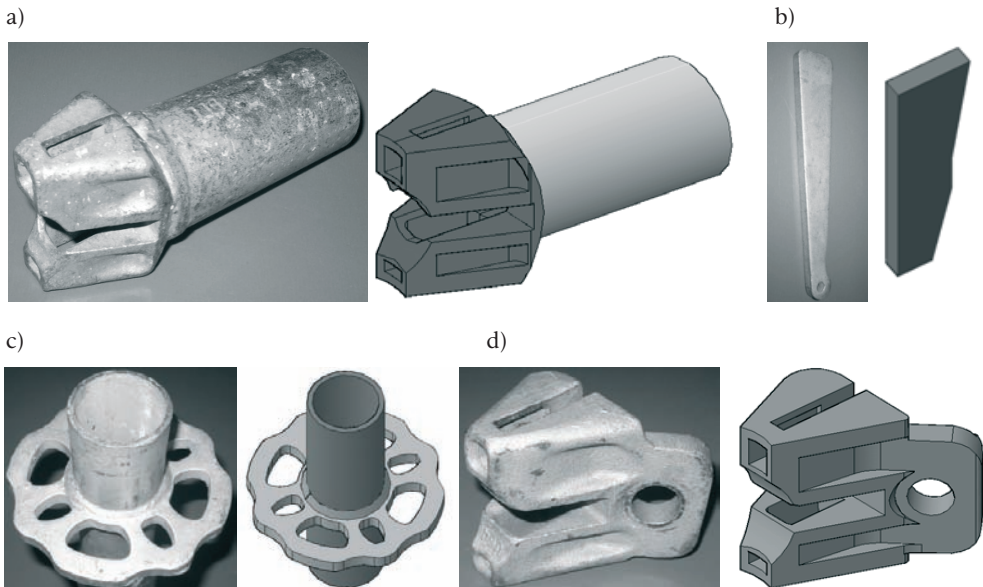
Analizę numeryczną węzła rusztowania modułowego rozpoczęto od zebrania wszelkich niezbędnych wymiarów poszczególnych elementów węzła. W tym celu przestudiowano udostępnione rysunki techniczne elementów rusztowań, jak również dokonano skanowania elementów. Skanowanie przeprowadzone zostało za pomocą skanera przestrzennego marki ROLAND model Picza LPX-600. Miało ono na celu wychwycenie jak największej liczby krzywizn, których parametry

geometryczne nie zostały umieszczone na dostępnych rysunkach. Wyniki skanowania (Rys. 4) mają charakter jedynie pomocniczy.



Rys. 4. Przykład wyniku skanowania a) uchwyt rygła; b) głównia stężenia.
Fig. 4. The scan results: a) the ledger end, b) the brace end.

Znając wszelkie niezbędne wymiary, przystąpiono do modelowania elementów w programie AutoCAD. Biorąc pod uwagę możliwości programu Autodesk Algor Simulation 2010, dokonano pewnych uproszczeń modeli brylowych poszczególnych elementów. Ponieważ siatka elementów skończonych generowana jest automatycznie w programie przeprowadzającym analizę, pominięto małe krzywizny w obrębie, których wystąpiłoby niepotrzebne zagęszczenie elementów. Wyodrębniono sześć podstawowych elementów, wchodzących w skład rozpatrywanego węzła: rurę stojaka, talerzyk, klin, głównię rygła, głównię stężenia oraz rurę rygła.



Rys. 5. Elementy węzła: a) głównia rygła z przyspawaną rurą rygła, b) klin, c) rura stojaka z przyspawanym talerzykiem, d) głównia stężenia.

Fig. 5. Node elements: a) the ledger end with ledger pipe fixed by welding, b) wedge, c) the pipe of the stand with rosette fixed by welding, d) the brace end.

Już podczas modelowania konieczne było uwzględnienie i specjalne ukształtowanie powierzchni styku elementów. Wygładzono powierzchnie styku klina i talerzyka, przez co wyeliminowano punktowe przekazywanie siły z rygla i stężenia na talerzyk. W celu zmniejszenia liczby elementów zamodelowano tylko część klina bezpośrednio biorącą udział w przekazaniu sił. Pominięte części umożliwiają jedynie montaż i zapobiegają odłączeniu klina od głowni rygla. Spoiny, łączące talerzyk ze stojakiem, zamodelowano jako elementy bryłowe. Pominięto spoiny łączące rygiel z rurą rygla, ponieważ są to spoiny czołowe. Spoiny zgodnie z normą [7] powinny być wykonane przez wykwalifikowanych spawaczy z zastosowaniem elektrody lub drutu spawalniczego o właściwościach nie gorszych niż własności elementów łączonych. Na rysunku 5 pokazano zamodelowane elementy wchodzące w skład węzła. W większe otwory talerzyka montowane są stężenia natomiast w mniejsze rygle. Nie modelowano rury stężenia, ponieważ rura jest połączona z głownią stężenia za pomocą nitu, do którego mogą być przyłożone obciążenia ze stężenia. Niezależnie od przyłożonego obciążenia zadano takie same warunki brzegowe, a mianowicie podpory pełne na obu krawędziach modelu rury stojaka.

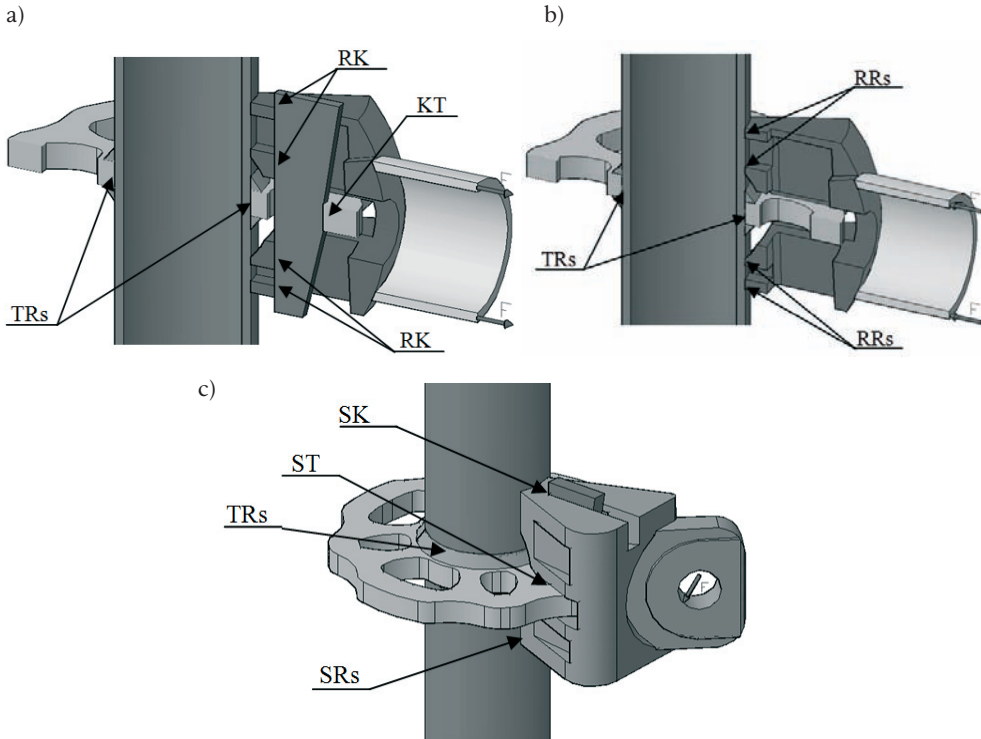
3.1. Sposoby przekazania sił w węźle

W zależności od działającego obciążenia, wyróżnione zostały poszczególne powierzchnie przekazujące obciążenie. Niemożliwe było przyjęcie jednego modelu dla każdego schematu obciążenia. Jeżeli mamy do czynienia z rozciąganiem rygla, siła w węźle powoduje „odciąganie” elementu od węzła. W przypadku takiego obciążenia najbardziej wytężonym elementem jest klin, za pośrednictwem którego siły z rygla przekazywane są na talerzyk. W celu pokazania wzajemnego oddziaływania elementów dokonano przekroju węzła w jego osi symetrii (Rys. 6a). Siła rozciągająca z rygla przekazywana jest na klin przez powierzchnie oznaczone jako RK. Klin przekazuje siły na talerzyk za pośrednictwem powierzchni KT. Talerzyk oddziałuje na rurę stojaka poprzez spoiny-powierzchnia TRs. W przypadku rozciągania nie występuje bezpośrednie oddziaływanie pomiędzy głownią rygla a rurą stojaka. Na powierzchni styku głowni rygla z talerzykiem występuje tarcie, które nie jest uwzględniane w zakresie obliczeń liniowych.

Jeżeli rygiel jest ściskany, klin nie bierze udziału w przekazywaniu sił (Rys. 6b). Występuje tylko jedna powierzchnia wzajemnego oddziaływania pomiędzy rygłem a rurą stojaka RRs. Tak jak w przypadku rozciągania na powierzchni styku głowni rygla i talerzyka występuje tarcie, nie uwzględniane w obliczeniach. Talerzyk stanowi pierścień wzmacniający i usztywniający rurę.

Siła w stężeniu działa na węzeł na pewnym mimośrodzie. Konieczne było przeanalizowanie zachowania się węzła pod wpływem takiego układu obciążenia. Analizując rzeczywisty węzeł w rusztowaniu stwierdzono, że nie może dojść do obrotu głowicy stężenia względem talerzyka. Mając to na uwadze, wyodrębniono pięć powierzchni biorących udział w przeniesieniu obciążeń (Rys. 6c). Głowica stężenia, obracając się, powoduje odkształcenie talerzyka oraz wywiera nacisk na rurę stojaka. Siła ze stężenia przekazywana jest na wszystkie elementy węzła w sposób bezpośredni jak i pośredni. Przekazanie siły na talerzyk następuje przez powierzchnie ST, na klin przez powierzchnie SK a na rurę stojaka przez powierzchnie SRs. Stężenie oddziałuje na talerzyk w sposób pośredni powierzchnią wspólną klina i talerzyka - KT. Ponieważ talerzyk jest elementem przyspawanym do rury

stojaka, przekazanie sił następuje przez spoiny - powierzchnia TRs. Powierzchnia nie zaznaczona KT występują w tym samym miejscu jak na Rys. 6a.



Rys. 6. Przekazanie sił w przypadku: a) rozciągania rygła, b) ściskania rygła, c) stężenia.
 Fig. 6. Force transfer in the case of: a) tension of the ledger, b) compression of the ledger, c) the brace.

3.2. Generowanie siatki elementów skończonych

Siatki tworzone były automatycznie za pomocą generatora siatek programu Autodesk Algor Simulation 2010, w którym zadawano wymiar przestrzennego elementu skończonego. Program tworzył elementy ośmiowęzłowe, sześciowęzłowe oraz czterowęzłowe. Kształt elementu był uzależniony od miejsca występowania oraz styczności z elementem o innym wymiarze siatki. Wygenerowane siatki mają wspólne węzły na powierzchniach styku poszczególnych elementów. Podczas generowania siatki elementów skończonych wzięto pod uwagę możliwości obliczeniowe komputera PC, jak również ograniczenia obliczeniowe użytego programu. Konieczne było stworzenie modelu, który umożliwił połączenie dowolnej liczby elementów w jednym węzle.

Rury zostały zamodelowane jako elementy płytowe, ponieważ uzyskanie czterech elementów skończonych na grubości ścianki rury pionowej równej 3,2 mm wymagało stworzenia siatki o boku 0,8 mm [3]. Tak mały wymiar powodował niepotrzebne zwiększenie liczby elementów.

Stworzono trzy modele dokładne o siatce zagęszczonej w elementach węzła, biorących udział w przekazaniu sił:

- model nr 1, w którym występuje rozciąganie rygła (Rys. 7a). W skład węzła wchodzi głównia rygła o wymiarze boku siatki równym 2 mm, rura rygła o wymiarze boku siatki równym 3 mm, klin oraz talerzyk o wymiarze boku siatki równym 1 mm i rura stojaka o wymiarze boku siatki równym 4 mm,
- model nr 2, w którym występuje ściskanie rygła (Rys. 7b). W skład węzła wchodzi głównia rygła o wymiarze boku siatki równym 2 mm, rura rygła o wymiarze boku siatki równym 3 mm, talerzyk o wymiarze boku siatki równym 2,25 mm i rura stojaka o wymiarze boku siatki równym 1 mm,
- model nr 3, w którym występuje stężenie (Rys. 7c). W skład węzła wchodzi głównia stężenia o wymiarze boku siatki równym 1 mm, rura rygła o wymiarze boku siatki równym 3 mm, talerzyk o wymiarze boku siatki równym 1,5 mm i rura stojaka o wymiarze boku siatki równym 1 mm.

Ze względu na ograniczenia programu opracowano model o mniejszej liczbie elementów, nazywanym dalej modelem przybliżonym. W modelu zastępczym przyjęto takie same wymiary siatki zarówno przy ścisaniu jak i rozciąganiu. Wymiary boków siatki oraz liczbę węzłów i elementów zestawiono w Tabeli 1.

Przyjęte wymiary siatki w modelu przybliżonym umożliwiają przyłączenie dowolnej liczby elementów niezależnie od rodzaju oddziaływania. Oddziaływanie pomiędzy poszczególnymi powierzchniami opisanymi w punkcie 3.1, zgodnie z zaleceniami zawartymi między innymi w pracy [4], uzyskiwane było dzięki węzłom wspólnym poszczególnych siatek. W celu wyeliminowania wzajemnego oddziaływania odsuwano węzły, znajdujące się na powierzchni głowicy rygła od węzłów na powierzchni rury stojaka. Wykorzystywano również moduł programu Algor, który umożliwiał wyeliminowanie wzajemnego oddziaływania pomiędzy talerzykiem a rygłem lub stężeniem.

Dla wszystkich elementów, tworzących węzeł, przyjęto takie same charakterystyki materiałowe:

- moduł sprężystości podłużnej Young'a:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2,$$

- gęstość objętościową:

$$\rho = 8,02 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3,$$

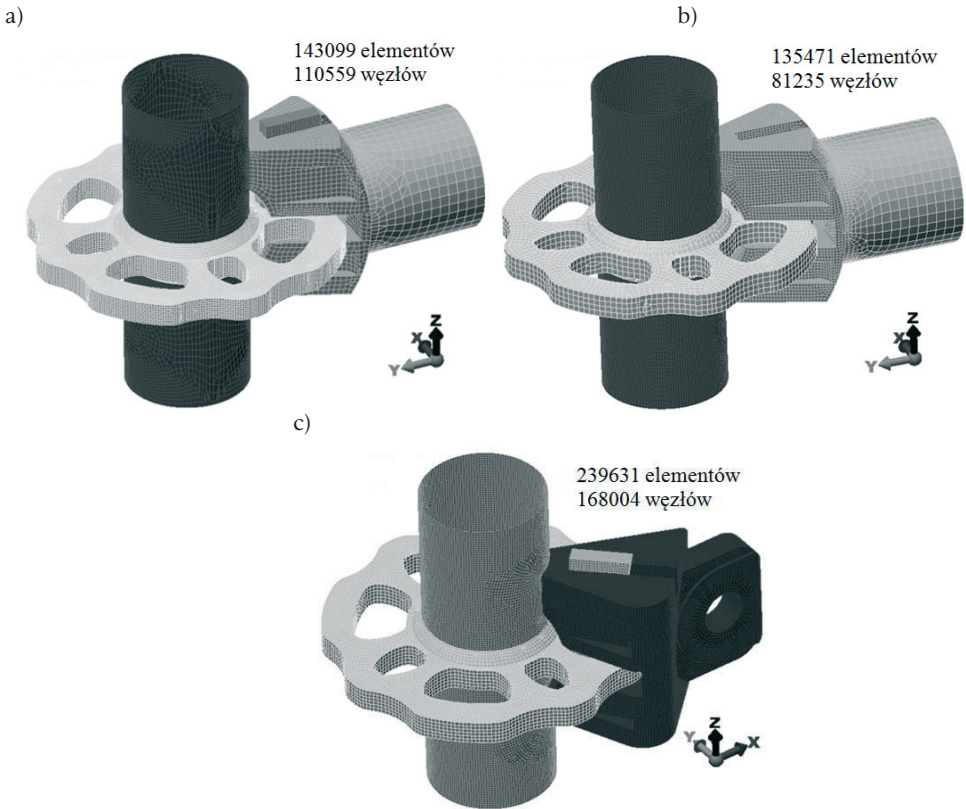
- współczynnik Poissona:

$$\nu = 0,29,$$

- granicę plastyczności

$$R_e = 326 \text{ N/mm}^2.$$

Granicę plastyczności przyjęto na podstawie świadectwa odbioru, wystawionego przez dostawcę materiałów, z których wykonywane są poszczególne elementy rusztowania. Zastosowane jednostki wynikają z wymiarów modeli elementów, narysowanych w milimetrach.



Rys. 7. Modele obliczeniowe: a) rozciąganie rygla, b) ściskanie rygla, c) stężenie.
 Fig. 7. Numerical models: a) tension of the ledger, b) compression of the ledger, c) the brace.

Tabela 1. Wymiary boków siatki oraz liczba elementów i węzłów poszczególnych modeli.
 Table 1. Dimensions of grid an number of elements and nodes in particular models.

ELEMENTY WĘZŁA	Wymiary boków elementów siatki MES [mm]		Liczba elementów		Liczba węzłów	
	Model dokładny	Model przybliżony	Model dokładny	Model przybliżony	Model dokładny	Model przybliżony
ROZCIĄGANIE						
Klin	1	1	8061	8230	9665	9726
Głównia rygla	2	2	33133	25220	16341	13804
Talerzyk	1	1,5	69031	35397	75150	27471
Rura stojąca	4	2	12219	7864	12116	7942
Rura rygla	3	4	1032	655	1100	694
ŚCISKANIE						
Głównia rygla	1	2	79232	25220	46649	13804
Talerzyk	2,25	1,5	35930	35397	17674	27471
Rura stojąca	1	2	19390	7854	19515	7942
Rura rygla	3	4	1032	919	1100	1000
STĘŻENIE						
Klin	1	1	8051	8151	9703	9722
Głównia stężenia	1	2	158798	34463	105912	18834
Talerzyk	1,5	1,5	53007	37712	36465	28174
Rura stojąca	1	2	19775	7997	19901	8058

3.3. Przyjęcie obciążeń węzła

W celu określenia nośności węzła rusztowania modułowego konieczne jest uwzględnienie zarówno liczby połączonych elementów, jak również wzajemne proporcje sił. Ze względu na możliwość podłączenia do węzła ośmiu elementów istnieje wiele możliwych kombinacji węzłów. W celu wybrania najczęściej występujących układów przeprowadzono analizę jednego z zaprojektowanych rusztowań. Analizie poddano rusztowanie robocze użytkowane podczas renowacji wieży kaplicy Karola Scheiblera w Łodzi (Rys. 8.). Konstrukcja rusztowania, ze względu na zabytkowy charakter kaplicy, nie mogła być kotwiona do ścian. Głównym elementem przeznaczonym do renowacji była kamienna wieża usytuowana centrycznie. W celu umożliwienia wykonania prac konieczne było obudowanie rusztowaniem całej kaplicy. Konstrukcja rusztowania oparta została na podłożu za pośrednictwem podkładów, natomiast możliwość ruchu w płaszczyźnie poziomej została zablokowana poprzez rury uniwersalne zaparte o ściany.



Rys. 8. Rusztowanie usytuowane wokół Kaplica Karola Scheiblera w Łodzi.
Fig. 8. Scaffolding standing by Karol Scheibler Chapel in Łódź.

Analizie numerycznej poddano węzły, najczęściej występujące w rusztowaniu oraz węzły z pojedynczymi elementami. Fakt różnych proporcji pomiędzy siłami uwzględniono, stosując trójstopniową skalę obciążeń: 1.0; 0.5; 0.25.

Ponieważ obliczenia wykonywano w zakresie liniowym, obciążenie wyjściowe wynosiło 1,0 kN. Umożliwiło to w prosty sposób obliczenie całkowitego dopuszczalnego obciążenia danego elementu, które wyznaczano dzieląc wytrzymałość obliczeniową stali, użytej do produkcji elementów rusztowania, przez wartość naprężeń występujących przy obciążeniu siłą równą 1,0 kN. W ten sposób otrzymujemy współczynnik określający całkowite dopuszczalne obciążenie danego elementu.

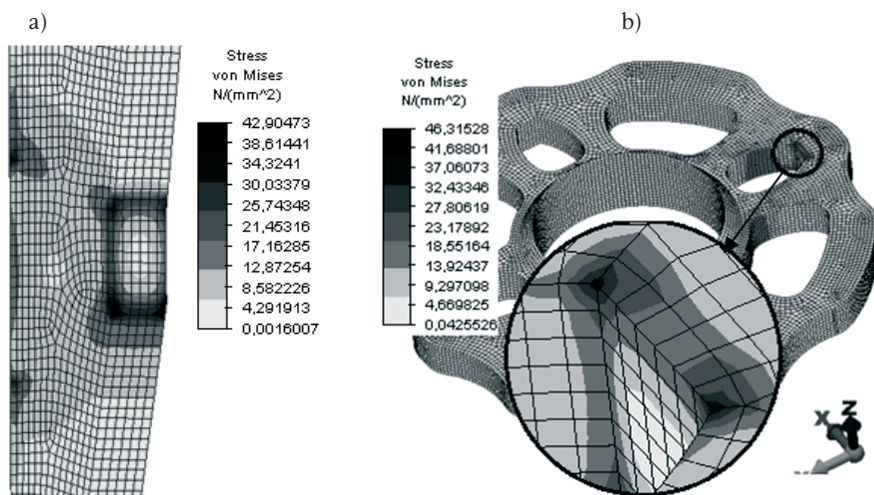
4. Analiza wyników obliczeń statycznych

Obliczenia w zakresie liniowym przeprowadzono za pomocą programu Autodesk Algor Simulation 2010. W ich wyniku otrzymano wartości przemieszczeń oraz naprężenia w poszczególnych elementach, wchodzących w skład węzła.

4.1. Węzeł z rygłem rozciągającym

Pierwszym modelem, poddanym analizie, był węzeł jednoelementowy z rozciągającym rygłem. Siła rozciągająca w postaci dwóch sił o wartości wypadkowej 1000N została przyłożona do węzłów znajdujących się najbliżej poziomej osi symetrii rury rygla. Wygenerowane punkty siatki nie znajdowały się w osi, co skutkowało powstaniem momentu zginającego. W celu zminimalizowania tego efektu przyłożono parę sił o wartości 19,0 N do węzłów zlokalizowanych w osi pionowej rury rygla. Ponieważ siły były przeciwnie skierowane, nie zwiększały wartości siły rozciągającej. Przyłożenie sił w węzłach wywołało lokalne naprężenia, które nie są brane pod uwagę w dalszej analizie.

Zgodnie z przypuszczeniami najbardziej wytężonym elementem okazał się klin. W obrębie połączenia klina z poszczególnymi elementami wystąpiła koncentracja naprężeń (Rys. 9). Otrzymane wartości naprężeń zostały wywołane obciążeniem równym 1,0 kN, natomiast w rzeczywistych konstrukcjach na węzeł działają siły będące wielokrotnością tego obciążenia. Jeżeli w wyniku obciążenia następuje przekroczenie granicy plastyczności, w miejscach koncentracji może dochodzić do uplastycznienia stali. W przypadku obliczeń liniowych, w których nie uwzględnia się nieliniowości materiału po przekroczeniu granicy plastyczności, fakt ten nie może przesądzać o nośności węzła.



Rys. 9. Rozkład naprężeń: a) klin, b) talerzyk.

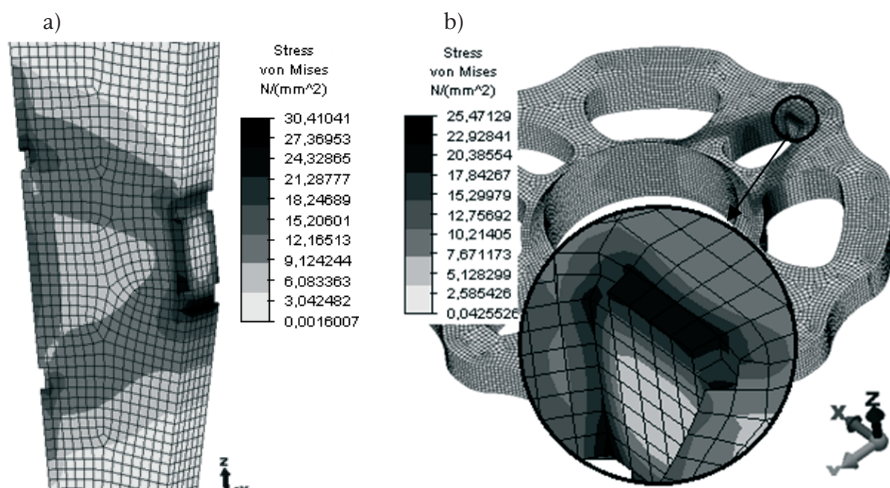
Fig. 9. Distribution of stresses in: a) the wedge b) the rosette.

Według pracy [5] w przypadku szczeliny lub ostrego naroża, nie należy określać nośności na podstawie maksymalnych naprężeń występujących w miejscu koncentracji. Z rozwiązań liniowej teorii sprężystości otrzymujemy nieskończone naprężenia w wierzchołku szczeliny lub ostrego naroża i porównanie ich np. z naprężeniami dopuszczalnymi dla materiału konstrukcji nie ma sensu. Konieczne jest wtedy wykorzystanie teorii plastyczności i mechaniki pękania. Bardzo trudno otrzymać wiarygodne wyniki w strefie koncentracji naprężeń, ponieważ w ich obszarze występuje uplastycznienie materiału a tym samym wykroczenie poza obszar obliczeń liniowych. Jeżeli naprężenia wyznaczane są w zakresie obliczeń liniowych

konieczne jest zastosowanie pewnych przybliżeń. Jedną z możliwości jest odczytanie naprężeń w pewnej odległości od wierzchołka karbu i pominięcie wartości ekstremalnych w punkcie koncentracji.

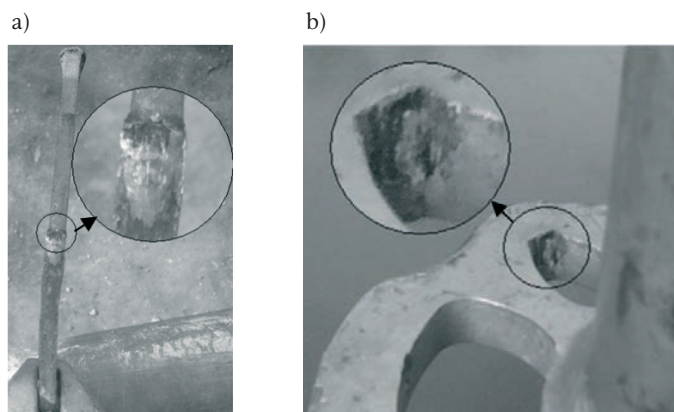
Miejscowe uplastycznienie stali nie oznacza całkowitej utraty nośności całego elementu. Zasięg strefy uplastycznienia jest nieporównywalnie mały w stosunku do wymiarów całego elementu. Przekroczenie granicy plastyczności nie oznacza zniszczenia elementu a jedynie nieodwracalne zmiany w strukturze materiału jakim jest stal.

Zgodnie z zaproponowanym przybliżeniem, wyznaczając nośność węzła nie brano pod uwagę naprężeń występujących w miejscach ich koncentracji. Na Rys. 10 przedstawiono rozkład naprężeń po wyeliminowaniu miejsc koncentracji.



Rys. 10. Rozkład naprężeń bez koncentracji: a) klin, b) talerzyk.
 Fig. 10. Distribution of stresses without concentration: a) the wedge b) the rosette.

Obszary, w których zaobserwowano uplastycznienie stali na rzeczywistych elementach (Rys. 11), pokrywają się z miejscami wystąpienia koncentracji naprężeń uzyskanych w wyniku przeprowadzonych analiz statycznych.



Rys.11. Uplastycznienie stali: a) klin; b) talerzyk.
 Fig. 11. Steel plasticization: a) the wedge b) the rosette.

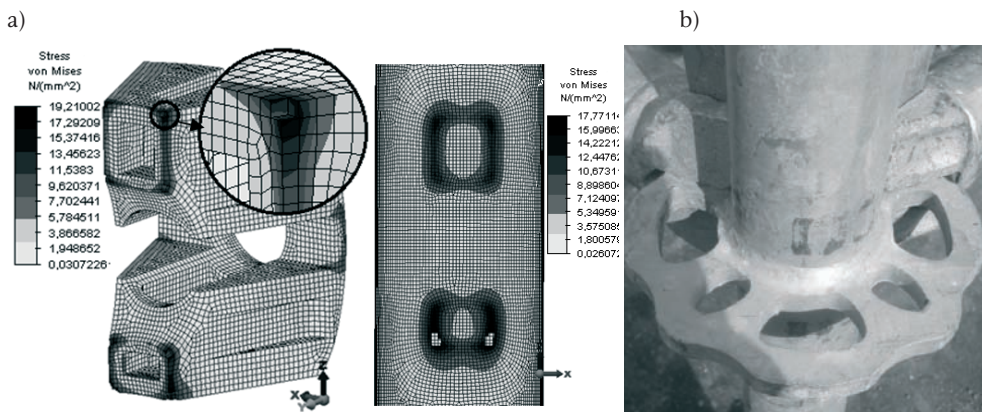
W Tabeli 2. zawarto wartości naprężeń w wypadku rozciągania rygła odczytanych po wyeliminowaniu miejsc koncentracji. Zarówno w modelu dokładnym jak i w uproszczonym koncentracja występuje w tych samych miejscach. Rozkład naprężeń jest taki sam, jedynie naprężenia różnią się wartościami. Maksymalne różnice pomiędzy naprężeniami wynoszą 10,37% i występują w obrębie talerzyka. Różnice te wynikają z wymiaru elementów siatki MES, przyjętej dla talerzyka. Przy obciążeniu siłą równą 1,0 kN, w najbardziej wyteżonym elemencie jakim jest klin, maksymalne naprężenia wynoszą 30,41 MPa. Różnica naprężeń w modelu dokładnym i przybliżonym jest w tym elemencie nieznaczna i wynosi 0,30%.

Tabela 2. Ekstremalne wartości naprężeń w poszczególnych elementach przy rozciąganiu rygła.
Table 2. Extreme values of stresses in particular elements during tension of the ledger.

ROZCIĄGANIE „1”	Wymiary siatki [mm]		Naprężenia [MPa]		Różnica naprężeń [%]
	Model dokładny	Model przybliżony	Model dokładny	Model przybliżony	
Klin	1,0	1,0	30,41	30,50	+0,30
Głównia rygła	2,0	2,0	16,89	15,40	-8,82
Talerzyk	1,0	1,5	25,47	22,83	-10,37
Rura stojaka	4,0	2,0	8,10	8,04	-0,74

4.2. Węzeł z ryglem ściskanym

W przypadku ściskania siła ściskająca była przyłożona w postaci dwóch sił o wartości wypadkowej 1000 N i w tych samych węzłach jak przy rozciąganiu. Zastosowano ten sam dodatkowy układ sił zmniejszający moment zginający. Założono, że nie ma oddziaływania pomiędzy powierzchnią talerzyka i rygła, a klin nie bierze udziału w przenoszeniu obciążeń w przypadku ściskania. Koncentracja naprężeń wystąpiła na powierzchni oddziaływania pomiędzy głownią rygła z rurą stojaka (Rys. 12a). W celu wyznaczenia nośności węzła zastosowano takie same procedury jak w przypadku rozciągania. Wyeliminowano miejsca koncentracji i odczytano wartości naprężeń.



Rys. 12. Miejsca koncentracji naprężeń: a) uzyskane w wyniku analizy statycznej, b) zaobserwowane w rzeczywistej konstrukcji.

Fig. 12. The place of stresses concentration: a) results in computational static analysis, b) observed in real structure.

W rzeczywistych konstrukcjach także zaobserwowano miejscowe uplastycznienie stali. Występuje ono w tych samych miejscach jakie uzyskano w obliczeniach (Rys 12b). Na powierzchniach rury stojaka i głowni rygła, bezpośrednio przekazujących na siebie obciążenia, nastąpiło trwałe odkształcenie elementu. Na powierzchni rury ma ono postać „odciśniętej” powierzchni głowni rygła, natomiast na powierzchni głowni rygła doszło do jej „spłaszczenia”. Na powierzchni talerzyka nie zaobserwowano miejscowych koncentracji naprężeń. W przypadku ściskania talerzyk stanowi jedynie pierścień wzmacniający i usztywniający rurę stojaka.

Ekstremalne wartości naprężeń wystąpiły w głowni rygła i wynosiły 19,21 MPa. W modelu przybliżonym maksymalne naprężenia wystąpiły w rurze stojaka i wynosiły 16,47 MPa. Różnica ta wynika z przyjętych wymiarów elementów skończonych. Mają one również wpływ na różnice naprężeń pomiędzy modelem przybliżonym i dokładnym, wynoszące 25,30%.

Tabela 3. Ekstremalne wartości naprężeń w poszczególnych elementach przy ściskaniu rygła.
Table 3. Extreme values of stresses in particular elements during compression of the ledger.

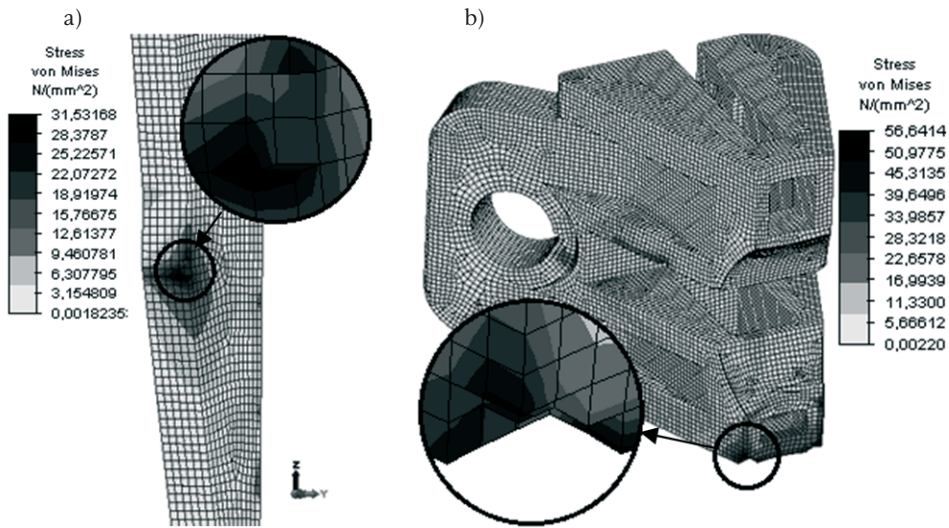
ŚCISKANIE „1”	Wymiary siatki [mm]		Naprężenia [MPa]		Różnica naprężeń [%]
	Model dokładny	Model przybliżony	Model dokładny	Model przybliżony	
Klin	nie pracuje przy ściskaniu				
Głownia rygła	1,00	2,00	19,21	14,35	-25,30
Talerzyk	2,25	1,50	7,46	6,07	-18,63
Rura stojaka	1,00	2,00	17,77	16,47	-7,32

4.3. Węzeł ze stężeniem

Siła w stężeniu została przyłożona w postaci pięciu sił skupionych o wartości po 200N każda. Ponieważ najczęstszym stężeniem, występującym w rusztowaniu roboczym użytkowanym podczas renowacji wieży kaplicy Karola Scheiblera w Łodzi, było stężenie pionowe pola o wymiarach 1,57 m x 2,00 m, siły przyłożono pod kątem 61,0°. Pominięto modelowanie rury stężenia oraz nitu, dlatego też siły zostały przyłożone w węzłach, znajdujących się wewnątrz otworu głowni stężenia. Pod wpływem obciążenia głownia uległa obrotowi. Koncentracja naprężeń wystąpiła zarówno w miejscu wzajemnego oddziaływania klina na talerzyk, jak również na powierzchni wspólnej głowni stężenia i rury stojaka. Tak jak w poprzednich sytuacjach obliczeniowych, w celu określenia nośności przy danym obciążeniu, wyeliminowano miejsca koncentracji naprężeń i wyniki przedstawiono w formie tabeli (Tabela 4). Na rysunku 13 pokazano rozkład naprężeń po wyeliminowaniu ich koncentracji. Otrzymane naprężenia porównano z wynikami uzyskanymi w modelu przybliżonym.

Tabela 4. Ekstremalne wartości naprężeń w elementach przy obciążeniu stężeniem.
Table 4. Extreme values of stresses in particular elements during load with the brace.

STĘŻENIE „1”	Wymiary siatki [mm]		Naprężenia [MPa]		Różnica naprężeń [%]
	Model dokładny	Model przybliżony	Model dokładny	Model przybliżony	
Klin	1,0	1,0	31,53	32,15	+1,93
Głownia stężenia	1,0	2,0	56,64	47,73	-15,73
Talerzyk	1,5	1,5	45,70	40,54	-11,29
Rura stojaka	1,0	2,0	57,93	51,71	-10,74



Rys. 13. Rozkład naprężeń bez koncentracji: a) klin, b) głownia stężenia.

Fig. 13. Distribution of stresses without concentration: a) the wedge b) the brace end.

W przypadku węzła, w którego skład wchodzi stężenie, najbardziej wyężonym elementem okazała się rura stojaka. Maksymalne naprężenia w tym elemencie wynosiły 57,93 MPa. Ponieważ w wyniku przyjętego schematu statycznego naprężenia uzyskane w rurze stojaka mogą być obarczone dużym błędem, jako miarodajne przyjęto naprężenia uzyskane w głowni stężenia, a jako naprężenia decydujące o nośności rozpatrywanego węzła przyjęto wartość 56,64 MPa. Różnica w stosunku do naprężeń uzyskanych w modelu przybliżonym wynosiła 15% i wynikała z różnych rozmiarów elementów skończonych w modelach.

4.4. Węzeł wieloelementowy

Kolejnym rozpatrywanym węzłem jest węzeł dwuelementowy, w którego skład wchodzi dwa rygle. Przeanalizowano jednaście sytuacji obliczeniowych uwzględniających zarówno kierunek działania sił jak również wzajemne proporcje sił (wszystkie możliwe kombinacje). Odczytując wartości naprężeń, postępowano tak samo jak w przypadku węzłów obciążonych pojedynczymi elementami. W zależności od przyłożonego obciążenia (rozciąganie lub ściskanie) dochodziło do lokalnej koncentracji naprężeń w obrębie klina lub głowni rygła.

W przypadku węzła obciążonego tylko siłami rozciągającymi, obszary oddziaływania poszczególnych sił nie zachodzą na siebie. Także zmiany proporcji sił w poszczególnych elementach, wchodzących w skład węzła, nie powodują zmiany naprężeń w obszarze poza bezpośrednim oddziaływaniem danej siły, a w obszarze oddziaływania siły wartości naprężeń zmieniają się proporcjonalnie do wartości obciążenia. Dużo większe rozbieżności zaobserwowano w przypadku różnych kierunków działania siły. Zmiana wartości siły powoduje zmianę wartości naprężeń zarówno w elemencie, do którego została przyłożona siła, jak również w pozostałych elementach tworzących węzeł. Rura stojaka oraz talerzyk jako elementy, na które przekazywane są wszystkie oddziaływania, są najbardziej podatne na nieproporcjonalne zmiany wartości siły. W tym przypadku duży wpływ na otrzymane

wyniki może mieć przyjęty schemat statyczny. Zadane pełne zamocowania na końcach zamodelowanej rury stojaka, mogą powodować nadmierne usztywnienie węzła. Konstrukcje przesztywnione generują większe naprężenia, ponieważ „nie poddają” się obciążeniu.

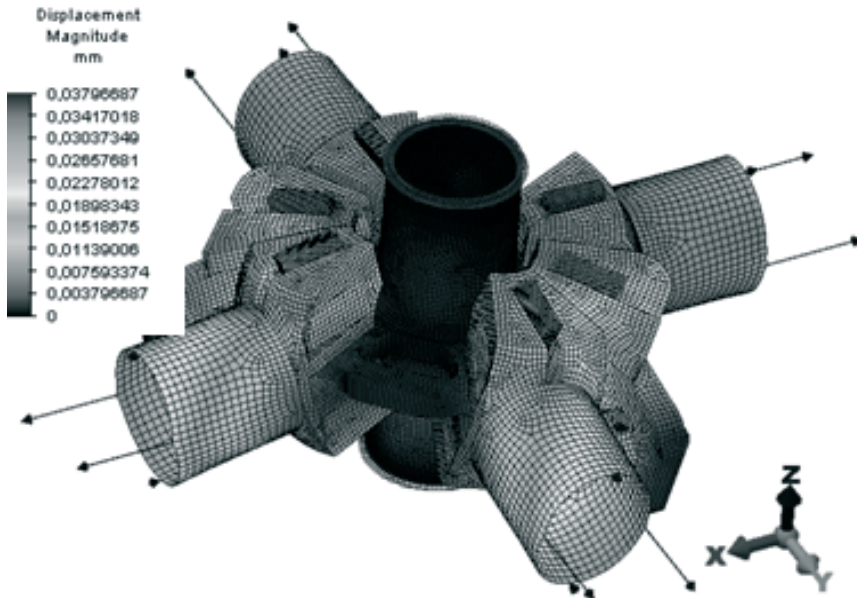
Ponieważ, w przypadku obciążenia węzła siłą rozciągającą i ściskającą równą 1,0 kN, zaobserwowano wzrost naprężeń, występujących w obrębie głowni rygła o 29,62%, uznano, że należy to uwzględnić przy określaniu ostatecznej nośności węzła przy ściskaniu. Naprężenia we wszystkich elementach otrzymane w przypadku sił ściskających w obu ryglach, były mniejsze nawet o 34,10% (w obrębie talerzyka) w stosunku do węzła jednoelementowego. Oznacza to, że naprężenia wywołane poszczególnymi siłami znoszą się nawzajem.

W skład węzła trójelementowego wchodzi dwa rygle oraz jedno stężenie. Obliczenia przeprowadzono dla 36 kombinacji obciążeń, uwzględniających zarówno kierunek jak i wartość obciążenia, działającego na poszczególne elementy węzła. Jeżeli stężenie wchodzi w skład węzła, powoduje ono wzrost naprężeń w głowni rygła ściskanego nawet o 80,77% w stosunku do węzła pojedynczego. W celu określenia nośności poszczególnych elementów węzła, niezależnie od ich liczby, konieczne było uwzględnienie tego faktu poprzez zmniejszenie nośności rygła ściskanego o 80,77%, a rygła rozciąganego o 15,93%. Naprężenia w głowni rygła ściskanego nie są proporcjonalne do wartości przyłożonych sił. Na ich wartość bezpośredni wpływ mają obciążenia pozostałych elementów wchodzących w skład danego węzła.

Niezależnie od przyłożonego do rygli obciążenia, maksymalne naprężenia występowały w obrębie stężenia. Maksymalne naprężenia uzyskane w głowni stężenia wynosiły 52,10 MPa. Wartość ta została uzyskana przy obciążeniu siłą ściskającą równą -1,0 kN, rygła bezpośrednio przyległego do stężenia oraz siłą rozciągającą równą 1,0 kN w drugim ryglu. Oznacza to, że nośność węzła jest bezpośrednio uzależniona od występowania stężenia. Jeżeli w skład węzła wchodzi stężenie, to o nośności całego układu decyduje dopuszczalne obciążenie przypadające na stężenie

W celu potwierdzenia wysuniętego wniosku wykonano obliczenia węzła z sześcioma elementami. W skład węzła wchodziły dwa stężenia oraz cztery rygle. Wszystkie elementy były obciążone siłami o wartości 1,0 kN (Rys. 14).

Przeprowadzone obliczenia węzła sześcieelementowego potwierdziły postawioną tezę, że jeżeli w węźle występuje stężenie, to obciążenie przez nie przekazywane decyduje o nośności całego węzła oraz ma wpływ na dopuszczalne obciążenie węzła ściskanego. Ponieważ wystąpiły znaczne różnice w wartościach naprężeń głowni rygła, w przypadku węzła sześcieelementowego i jednoelementowego, konieczne było zmniejszenie dopuszczalnego obciążenia rygła ściskanego. Naprężenia w ryglu ściskanym nie są proporcjonalne do przyłożonych obciążeń, co oznacza, że obszary oddziaływania sił pokrywają się. Dla węzła sześcieelementowego nie przeprowadzono wszystkich możliwych kombinacji obciążeń, dlatego też jako miarodajny wynik przyjęto największą różnicę naprężeń w przypadku węzła trójelementowego. Różnica, w stosunku do węzła jednoelementowego, wynosiła maksymalnie 80,77%.



Rys. 14. Przemieszczenia uzyskane w wyniku obciążenia węzła 6 elementami.
 Fig. 14. Displacements obtained according to node loading with 6 elements.

4.5. Określenie dopuszczalnych obciążeń poszczególnych elementów węzła

Znając granicę plastyczności, przyjętą na podstawie świadectwa odbioru wystawionego przez dostawcę materiałów, z których wykonywane są poszczególne elementy rusztowania, przystąpiono do wyznaczania maksymalnych dopuszczalnych obciążeń przekazywanych przez rygle oraz stężenia. W wyniku obliczeń otrzymano wartości naprężeń poszczególnych elementów dla modeli przybliżonych i dokładnych. W celu określenia dopuszczalnych obciążeń rygli i stężeń, niezależnie od liczby elementów wchodzących w skład węzła, po przeanalizowaniu wyników dla przybliżonych modeli wieloelementowych, skorygowano wyniki uzyskane dla modeli jednoelementowych.

Na podstawie normy [6] przyjęto:

$$f_{yk} = R_e = 326 \text{ MPa} , \quad (1)$$

gdzie: f_{yk} – wytrzymałość charakterystyczna stali, R_e – granica plastyczności podana przez dostawcę materiałów.

W celu wyznaczenia wytrzymałości obliczeniowej stali skorzystano ze wzoru:

$$f_d = \frac{f_{yk}}{\gamma_m} , \quad (2)$$

gdzie: f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali, γ_m – współczynnik materiałowy.

Współczynnik materiałowy jest zależny od granicy plastyczności stali. Zgodnie z normą [6] dla granicy plastyczności poniżej 355 MPa współczynnik materiałowy wynosi 1,15 a wytrzymałość obliczeniowa wynosi:

$$f_d = \frac{326 \text{ MPa}}{1,15} = 283,5 \text{ MPa}.$$

W przypadku jednoelementowego węzła z rygłem rozciągającym maksymalne naprężenia uzyskane w modelu dokładnym wynosiły 30,41 MPa i wystąpiły w obrębie klina. Po przeanalizowaniu wyników obliczeń przeprowadzanych na modelach przybliżonych, w odniesieniu do różnych układów obciążenia, zaobserwowano wzrost naprężeń maksymalnie o 15,93%. Uwzględniono ten fakt poprzez zwiększenie naprężeń w modelu dokładnym o 16%.

Wartości naprężeń, uwzględniające błędy modelu numerycznego, nazwano obliczeniowymi i wyznaczono ze wzoru:

$$\sigma'_{\max} = \sigma_{\max} \left(1 + \frac{\delta}{100\%} \right), \quad (3)$$

gdzie: σ_{\max} – maksymalne naprężenia uzyskane w modelu dokładnym, δ – maksymalna różnica naprężeń pomiędzy wynikami obliczeń dla modelu dokładnego i przybliżonego wyrażona w procentach.

Na podstawie naprężeń obliczeniowych i wytrzymałości obliczeniowej stali wyznaczono współczynnik dopuszczalnego obciążenia elementu. Zależność ta jest opisana wzorem:

$$\phi_{\max} = \frac{f_d}{\sigma'_{\max}}, \quad (4)$$

gdzie: f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali wyznaczona ze wzoru (2), σ'_{\max} – obliczeniowe naprężenia maksymalne wyznaczone ze wzoru (3).

Ponieważ, wyznaczając naprężenia w modelach dokładnych, przykładano obciążenie jednostkowe równe 1,0 kN, wzór na dopuszczalne obciążenie elementu ma postać:

$$N_{\max} = 1,0 \text{ kN} \cdot \phi_{\max} \quad (5)$$

W przypadku rygła rozciąganego obliczeniowe naprężenia maksymalne wynoszą:

$$\sigma'_{\max} = 30,41 \text{ MPa} \cdot \left(1 + \frac{16\%}{100\%} \right) = 35,28 \text{ MPa},$$

$$\phi_{\max} = \frac{283,5 \text{ MPa}}{35,28 \text{ MPa}} = 8,04,$$

$$N_{\max} = 1,0 \text{ kN} \cdot 8,04 = 8,04 \text{ kN}.$$

Niezależnie od liczby elementów, wchodzących w skład węzła, rygiel rozciągany może być obciążony siłą równą 8,04 kN.

Postępując analogicznie uzyskano maksymalne dopuszczalne obciążenia poszczególnych elementów węzła niezależnie od liczby połączonych elementów. Uzyskane wyniki zestawiono w Tabeli 5.

Tabela 5. Dopuszczalne obciążenia poszczególnych elementów węzła.
Table 5. Maximum load capacity for particular node elements.

Element węzła	Maksymalne dopuszczalne obciążenie [kN]	
	węzeł ze stężeniem	węzeł bez stężenia
Rygiel ściskany	8,15	11,35
Rygiel rozciągany	8,04	9,28
Stężenie	4,58	

5. Wnioski

Przeprowadzona analiza numeryczna, której celem było określanie dopuszczalnych obciążeń elementów, wchodzących w skład węzła, jest metodą wymagającą dużo mniejszych nakładów finansowych niż stanowisko laboratoryjne. Konieczne są jednak pewne przybliżenia oraz dodatkowa analiza zachowania się węzła pod wpływem obciążenia. Ponieważ obliczenia przeprowadzono w zakresie obliczeń liniowych, otrzymane wyniki są wartościami zaniżonymi w stosunku do faktycznej nośności węzła. W celu zwiększenia dokładności obliczeń należałoby przeprowadzić analizę nieliniową zarówno w zakresie materiału jak i wzajemnych oddziaływań elementów.

Przyjęty schemat statyczny mógł powodować nadmierne przeszywnienie węzła a tym samym wzrost naprężeń. Połączenia w węźle posiadają pewne luzy technologiczne w obrębie których, pod wpływem obciążenia, dochodzi do przemieszczania się elementów względem siebie. W rzeczywistych konstrukcjach uzyskane połączenia nie są połączeniami stałymi tak, jak ma to miejsce w przypadku spoin. W celu uwzględnienia tego zjawiska konieczne byłoby przeprowadzenie obliczeń nieliniowych, uwzględniających wzajemne oddziaływanie uzyskiwane poprzez tarcie.

W przypadku obciążeń, wywołujących naprężenia przekraczające granicę plastyczności, w miejscach koncentracji dochodzi do uplastycznienia stali. W rzeczywistych konstrukcjach uplastycznienie stali zaobserwowano w obrębie klina, talerzyka, głowni rygla oraz rury stojaka. Miejsca uplastycznienia pokrywały się z miejscami koncentracji naprężeń uzyskanych w wyniku obliczeń liniowych. Uwzględnienie tego faktu w modelu obliczeniowym wymaga zastosowania teorii plastyczności oraz mechaniki pękania, które wykraczają poza zakres obliczeń liniowych.

Przeprowadzona w pracy analiza numeryczna wybranego węzła rusztowania modułowego typu Rotax wykazuje, że dopuszczalne obciążenia rozpatrywanych elementów rusztowania może wynikać z nośności węzła a nie elementu. Z analizy statycznej rusztowania wynika, że konstrukcja węzłów powinna być zmieniona tak, aby można było wykorzystać w większym stopniu nośność stężenia. W celu potwierdzenia tej tezy konieczne jest szersze przeanalizowanie pracy węzła oraz wykroczenie poza zakres analizy liniowej.

Literatura

- [1] Misztela A., *Działalność IMBiGS w zakresie problematyki rusztowań*, Rusztowania, Polska Izba Gospodarcza Rusztowań, 1 (2005) 12-13.
- [2] Pieńko M., *Analiza statyczna węzłów systemów modułowych rusztowań*, Praca Magisterska, Lublin 2010.

- [3] Podgórski J., Błazik-Borowa E., *Wprowadzenie do metody elementów skończonych w statyce konstrukcji inżynierskich*, IZT Sp. z o.o., Lublin, 2001.
- [4] Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [5] Seweryn A., *Metody numeryczne w mechanice pękania*, Instytut Państwowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 2003.
- [6] PN-90/B-03200: *Konstrukcje stalowe: Obliczenia statyczne i projektowanie*.
- [7] PN-M-47900-3: *Rusztowania stojące metalowe robocze: Rusztowania ramowe*.

The numerical research of capacity of nodes in modular scaffolding system

Michał Pieńko

*Lublin University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Department of Structural Mechanics, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin,
e-mail: m.pienko@pollub.pl*

Abstract: The paper deals with static numerical analysis of a node in the modular scaffolds used for construction work. The purpose of this study was to determine the capacity of the node on the basis of linear analysis. Such analysis is an alternative method over traditional methods involving laboratory tests.

Keywords: scaffolding node, node strength, stress distribution, stress concentration.

