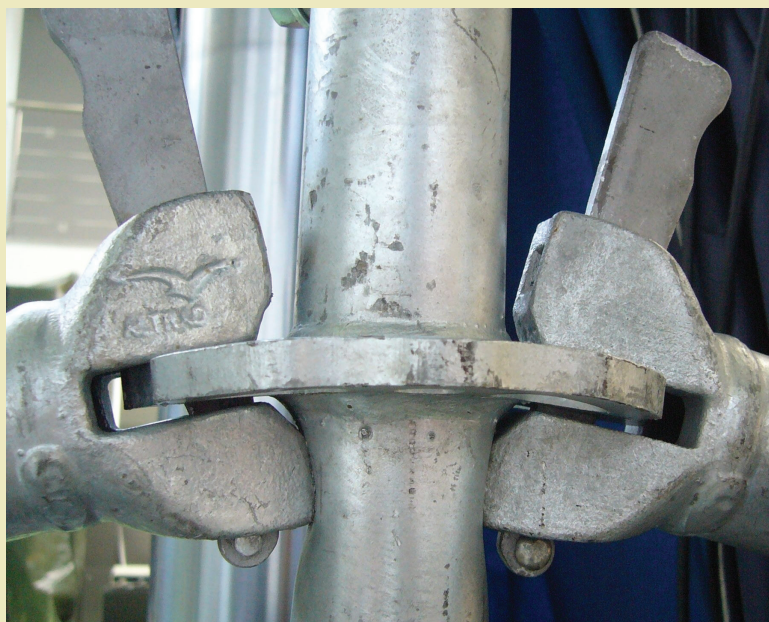




Michał Pieńko

Dobór kryteriów oceny nośności węzłów rusztowań budowlanych



Lublin 2019

MONOGRAFIE

Dobór kryteriów oceny nośności
węzłów rusztowań budowlanych

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
ul. Nadbystrzycka 40
20-618 Lublin

Michał Pieńko

Dobór kryteriów oceny nośności węzłów rusztowań budowlanych



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2019

Recenzenci:

dr hab. inż. Lucjan Ślęczka, prof. Politechniki Rzeszowskiej

dr hab. inż. Adam Glema, prof. Politechniki Poznańskiej

Redakcja i skład publikacji (zdjęcie na okładce): Michał Pieńko

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2019

ISBN: 978-83-7947-357-1

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 50 egz.

Spis treści

Streszczenia	7
Wykaz najważniejszych symboli i oznaczeń.....	11
1 Wstęp.....	13
1.1 Wprowadzenie	13
1.2 Problem naukowy.....	15
1.3 Zakres pracy.....	16
2 Problematyka rusztowań w literaturze	17
2.1 Przegląd norm i aktów prawnych.....	17
2.2 Przegląd laboratoryjnych metod badawczych przestrzennego stanu naprężenia.....	27
2.3 Węzły stalowe i ich badania.....	29
2.4 Badania rusztowań prowadzone przez inne ośrodki badawcze.....	32
2.4.1 Badania przyczyn awarii rusztowań	33
2.4.2 Badania pełnowymiarowych konstrukcji rusztowań	35
2.4.3 Badania laboratoryjne pojedynczych układów rusztowań	38
2.4.4 Badania węzłów rusztowań.....	40
2.4.5 Inne badania rusztowań	45
2.4.6 Analizy numeryczne	50
2.5 Podsumowanie przeglądu literatury	55
3 Badania laboratoryjne	57
3.1 Cel i zakres badań laboratoryjnych	57
3.2 Badania właściwości materiałowych.....	59
3.3 Badania laboratoryjne węzłów	68
3.3.1 Opracowanie stanowiska badawczego węzła rusztowania	70
3.3.2 Badania węzła obciążonego siłą N_x	74
3.3.3 Badania węzła obciążonego siłą V_y	76
3.3.4 Badania węzła obciążonego siłą V_z	78
3.3.5 Badania węzła obciążonego momentem M_x	81
3.3.6 Badania węzła obciążonego momentem M_y	83
3.3.7 Badania węzła obciążonego momentem M_z	86

3.3.8 Zestawienie wyników pomiarów.....	88
3.4 Analiza wyników badań laboratoryjnych węzła	89
3.4.1 Określenie nośności węzła	90
3.4.2 Określenie sztywności węzła	95
3.5 Podsumowanie badań laboratoryjnych	100
4 Analizy numeryczne	103
4.1 Wstęp.....	103
4.2 Budowa modelu	104
4.2.1 Geometria.....	105
4.2.2 Modele materiałowe	107
4.2.3 Budowa siatki elementów skończonych.	110
4.2.4 Zagadnienie kontaktu pomiędzy elementami węzła.....	116
4.2.5 Wybór programu obliczeniowego oraz typu analizy	118
4.3 Przeprowadzenie analiz węzła obciążonego jedną formą obciążenia ...	120
4.3.1 Analiza numeryczna węzła obciążonego momentem zginającym M_y	123
4.3.2 Analiza numeryczna węzła obciążonego siłą V_z	127
4.3.3 Analiza numeryczna węzła obciążonego siłą N_x	132
4.4 Obciążenia wielokrotne	135
4.4.1 Zachowanie węzła pod wpływem wielokrotnego obciążenia	135
4.4.2 Określenie kryterium możliwości ponownego użycia elementów .	144
4.5 Podsumowanie analiz numerycznych.....	147
5 Podsumowanie i wnioski ogólne.....	149
Bibliografia.....	153

Streszczenia

Dobór kryteriów oceny nośności węzłów rusztowań budowlanych

Jednym z nieodzownych elementów podczas wznoszenia i remontów obiektów budowlanych są rusztowania budowlane, przybierające często bardzo skomplikowane kształty. Wzajemne połączenia elementów składowych rusztowania nie są połączeniami stałymi i wymagają szczególnej uwagi na etapie projektowania. Dodatkowo te same elementy są wykorzystywane wielokrotnie w różnych konfiguracjach obciążenia. W ramach niniejszego pracy przeanalizowano aktualny stan wiedzy na temat rusztowań budowlanych. Przegląd obejmował zarówno normy odnoszące się do rusztowań, jak również badania laboratoryjne prowadzone przez krajowe oraz zagraniczne jednostki naukowe. W normach szczegółowo zostały opisane procedury wykonywania badań całych układów rusztowań ramowych, jak również ich elementów składowych. Przedmiotem badań prowadzonych przez inne ośrodki badawcze są głównie rusztowania ramowe lub rusztowania rurowo-złączkowe. W przypadku rusztowań modułowych badania laboratoryjne oraz analizy numeryczne obejmują zagadnienia stateczności całych konstrukcji. W literaturze przedmiotu nie odnaleziono badań zachowania węzłów rusztowań pod wpływem różnych form obciążenia, odnoszących się do węzłów rusztowań, w których połącznie jest uzyskiwane poprzez wbicie klina w otwór rozety.

Badania laboratoryjne rozpatrywanego węzła przeprowadzono na autorskich uchwytach, umożliwiających obciążenia węzła dowolną formą obciążenia niezależnie od producenta oraz użytego materiału, na ogólnodostępnych maszynach wytrzymałościowych. Prosta budowa i minimalna liczba elementów, ulegających zniszczeniu w znacznym stopniu ograniczyła koszty badań, jak również czas ich wykonania. Węzeł poddawano obciążeniu w postaci: siły normalnej N_x , siły tnącej w płaszczyźnie poziomej V_y , siły tnącej w płaszczyźnie pionowej V_z , momentu zginającego w płaszczyźnie pionowej M_y , momentu zginającego w płaszczyźnie poziomej M_z oraz momentu skręcającego M_x . Uzyskane dane pozwoliły na określenie dopuszczalnych obciążeń węzła jak również charakteru uzyskiwanego połączenia. W przypadku zginania w płaszczyźnie poziomej oraz skręcania, połączenie należy traktować jako przegubowe, natomiast w przypadku zginania w płaszczyźnie pionowej połączenie ma charakter połączenia półsztywnego o sztywności 3374 kNcm/rad. Dla rozpatrywanego systemu rusztowania nie stwierdzono wyraźnych luzów w początkowej fazie obciążania. Analizując poszczególne formy zniszczenia węzła wskazano jego newralgiczne elementy, co może stanowić dane porównawcze w analizach uszkodzeń, występujących w rzeczywistych konstrukcjach.

Przeprowadzono również badania mające na celu określenie charakterystyk materiałowych poszczególnych elementów węzła. Każdy z elementów wykazał inne charakterystyki materiałowe, a w szczególności głowica rygla będąca odlewem.

Analizy numeryczne przeprowadzone w programie Abaqus dostarczyły informacji na temat wrażliwości modelu na parametry początkowe analizy związane ze zjawiskiem tarcia, jak również głębokością wbicia klina. Wskazano również wpływ niedokładności wykonania połączenia na zachowanie węzła. Połączenie uzyskiwane w rozpatrywanym systemie rusztowań nie jest typowym połączeniem występującym w konstrukcjach stalowych. Te same elementy rusztowania są wykorzystywane wielokrotnie w różnych konfiguracjach, dlatego też w ramach pracy przeprowadzono szereg analiz wielokrotnego obciążenia węzła. Przeanalizowano zarówno wielokrotne wbicie klina jak również wielokrotne obciążenie węzła głównymi formami obciążenia w postaci siły N_x , V_z oraz momentu M_y . Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że wielokrotne wbicie klina w otwór rozety, przy założeniu stałej siły wbicia, nie powoduje zmiany geometrii w obrębie klina oraz rozety a tym samym nie wpływa negatywnie na jakość uzyskanego połączenia. Natomiast obciążenie węzła na poziomie 60% obciążeń dopuszczalnych zarówno w przypadku siły N_x jak i momentu M_y powoduje zmiany w geometrii rozety wpływające na jakość połączenia. Ponowne obciążenie węzła nawet w niedużym zakresie obciążenia może powodować wysunięcie klina, a tym samym wzrost przemieszczeń na kierunku zadanego obciążenia.

Nie ma możliwości kontroli poziomu wyężenia elementów w trakcie użytkowania konstrukcji rusztowania. Dlatego też opracowano parametr w postaci granicznej głębokości wbicia klina na poziomie 5,5 mm świadczącej o co najmniej jednokrotnym obciążeniu węzła do wartości granicznej. Parametr ten może zostać wykorzystany przez użytkowników jako parametr określający przydatność elementu do dalszego użytkowania.

Przeprowadzone badania oraz analizy numeryczne mają na celu zwiększenie poziomu wiedzy na temat newralgicznych elementów rusztowań budowlanych jakimi są ich węzły. Uzyskane informacje wpłyną pozytywnie na poziom bezpieczeństwa zarówno w trakcie projektowania konstrukcji jak i wielokrotnego użytkowania tych samych elementów.

Abstract

Selection of criteria for estimation of load-bearing capacity of scaffolding joints

As part of this work, the current state of knowledge on scaffolds was analyzed. The review included standards relating to scaffolds as well as laboratory tests conducted by national and foreign scientific units. The standards describe in detail the procedures for testing façade scaffold systems and their components. The research carried out by other research centers are mainly focused on façade scaffolds or tube-coupler scaffolds. In the case of modular scaffolds the main subject of laboratory tests and numerical analysis is a stability analysis of whole structures. So far, in the professional literature there was no mention about laboratory test which would include the various load forms of scaffold node in which the connection would be obtained by driving a wedge into the rosette hole.

Laboratory tests were carried out using typical testing machine and author-invented grip handle which allows to load a node by any form of load, regardless of the manufacturer and the used material. Simple structure and minimal number of damaged elements reduced the research cost and time significantly. The node was subjected to load in the form of: normal force N_x , shearing force in the horizontal plane V_y , shearing force in the vertical plane V_z , bending moment in the vertical plane M_y , bending moment in the horizontal plane M_z and torque M_x . The obtained data allowed to determine the load-bearing capacity of the node as well as the nature of the connection. In the case of bending in the horizontal plane and torque, the joint should be treated as a hinge, while in the vertical plane the connection is a semi-rigid connection with a stiffness of 3374 kNcm/rad. In the case of analyzed scaffolding node there was no looseness observed in the initial loading phase. Analyzing various forms of the node damage the critical elements were indicated, what may be used as comparative data in the analysis of damages occurring in real structures.

The laboratory tests of material characteristics of individual node components was also carried out. Every node element have different material characteristics especially the ledger end because it was made by molding.

Numerical analyzes carried out in the Abaqus program provided information on the model's sensitivity to the initial parameters of the analysis related to the phenomenon of friction, as well as the depth of the wedge insertion. The influence of inaccuracy of the node execution or assembly on node behaviour was also indicated. The connection obtained in the considered scaffolding system is not a typical connection of steel structures. The same scaffolding elements are used repeatedly in various configurations, therefore a series of multiple load tests of node were carried out. Both repetitive wedge insertion as

well as multiple loading of the node with the main loads in the form of normal force N_x , shearing force in the vertical plane V_z and bending moment in the vertical plane M_y were performed. Based on the analyzes it was found that multiple wedge insertion into the rosette, assuming constant insertion force, does not change the geometry of the wedge and rosette and thus does not affect negatively the quality of the obtained connection. However, node load at the level of 60% of permissible load, both in the case of N_x force and moment M_y , causes changes in the geometry of the rosette affecting the quality of the connection. The re-loading of the node, even in a small load range, may lead to wedge slipping of the rosette, and therefore increase displacements in the direction of the load.

There is no possibility to control the level of effort in elements during use of the scaffold structure. Therefore, a parameter was developed in the form of a wedge depth of 5.5 mm showing that node was loaded by the limit value at least one time. This parameter can be used by users as a parameter determining the usefulness of the element in further use.

The conducted laboratory tests and numerical analysis are aimed at increasing the level of knowledge about the critical elements of scaffolds, which are their nodes. The obtained information or may have a positive impact on the level of security both during the design of the structure and the repeated use of the same elements of scaffolding.

Wykaz najważniejszych symboli i oznaczeń

a	– ramię działania siły
E_{lo}	– energia całkowita
E_{ul}	– energia sprężystego zakresu pracy wężła
f_u	– wytrzymałość stali na rozciąganie
f_y	– granica plastyczności stali
F	– siła przykładana do próbek w trakcie wykonywania badań laboratoryjnych
F_a	– wartość siły uzyskanej na drodze analiz numerycznych
F_l	– wartość siły uzyskanej w trakcie badań laboratoryjnych
$k_{s,k}$	– współczynnik statystyczny uzależniony od liczby przeprowadzonych prób z 75% poziomem zaufania (EN 12811-3:2002)
k_φ	– sztywność wężła przy zginaniu
M_a	– wartość momentu uzyskanego na drodze analiz numerycznych
M_l	– wartość momentu uzyskanego w trakcie badań laboratoryjnych
M_x	– moment skręcający o wektorze wzdłuż osi X
M_y	– moment zginający o wektorze wzdłuż osi Y
M_z	– moment zginający o wektorze wzdłuż osi Z
N_x	– siła normalna o wektorze wzdłuż osi X
P_{kl}	– wartość obciążenia przyłożonego do klina
$\overline{q_e}$	– średnia wartość ilorazu energii całkowitej i energii zakresu pracy sprężystej wężła
$r_{u,i}^a$	– graniczna wartości obciążenia
$r_{u,i}^c$	– graniczna wartości obciążenia uwzględniająca smukłość elementów
R	– obliczeniowa wartość nośności wężła
$R_{k,b}$	– bazowa charakterystyczna wartość nośności wężła
$R_{k,nom}$	– charakterystyczna wartość nośności wężła
u	– przemieszczenie trawersy prasy wytrzymałościowej
u_{kl}	– przemieszczenie klina

$u_{x,y,z}$	– przemieszczenie występujące wzdłuż poszczególnych osi zgodne z zadaniem obciążeniem
V_y	– siła tnąca o wektorze wzdłuż osi Y
V_z	– siła tnąca o wektorze wzdłuż osi Z
\bar{y}	– średnia wartość logarytmów wartości granicznych
α_{cr}	– mnożnik obciążenia krytycznego
γ_F	– częściowy współczynnik bezpieczeństwa wynikający z losowego charakteru oddziaływań
γ_M	– częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z materiałem
γ_{R2}	– częściowy współczynnik bezpieczeństwa uzależniony od właściwości plastycznych węzła
Δ	– błąd wyników analiz numerycznych
ϕ	– kąt obrotu głowicy rygla
$\varphi_{x,y,z}$	– kąt obrotu w poszczególnych płaszczyznach
μ	– współczynnik tarcia statycznego
ρ	– współczynnik korelacji Pearsona
σ	– odchylenie standardowe

Pozostałe, nie ujęte w spisie symbole i indeksy dodawane do zestawionych w liście oznaczeń zostały opisane w odpowiednich miejscach w pracy.

1 Wstęp

Rusztowanie robocze jest to konstrukcja lub urządzenie, podtrzymujące pomosty robocze zdolne do bezpiecznego przenoszenia ciężaru, znajdujących się na nich ludzi, oraz niezbędnych materiałów, narzędzi i sprzętu [75]. Zadaniem rusztowania jest zapewnienie bezpiecznego miejsca pracy oraz bezpiecznego dojścia, odpowiednio do wykonywanej pracy [63]. Obie przytoczone definicje odnoszące się do rusztowań zawierają istotne informacje. Po pierwsze rusztowanie jest to konstrukcja i jako taka powinna być traktowana, po drugie rusztowanie ma zapewnić bezpieczeństwo. Bardzo często rusztowania są jednak traktowane jako konstrukcje drugorzędne, do których nie przykładana się większej uwagi ze względu na ich tymczasowość.

1.1 Wprowadzenie

Rusztowanie może być wykonane w różnorodnych systemach i z różnych materiałów. W normie [75] możemy odnaleźć podział rusztowań ze względu na charakter pracy i są to rusztowania stojakowe, ramowe, koźłowe, wspornikowe oraz systemowe. Każdy z tych typów rusztowań może zostać wykonany z tych samych elementów. Wymogi rynku skłaniają producentów rusztowań do wytwarzania uniwersalnych systemów, umożliwiających optymalne dopasowanie rusztowania do obiektu z uwzględnieniem czasochłonności ich wznoszenia. Takim rozwiązaniem są modułowe systemy rusztowań, umożliwiające rozbudowywanie konstrukcji rusztowania w dowolnym kierunku i umieszczanie pomostów roboczych na dowolnej wysokości w rozstawie co 0,5 m. Połączenia pomiędzy poszczególnymi elementami uzyskiwane są poprzez złącza klinowe nie wymagające użycia klucza, co w znacznym stopniu skraca czas montażu.

Określenie maksymalnych obciążeń, jakie mogą zostać przyłożone do danego elementu konstrukcyjnego, lub dobór elementów mających na celu przeniesienie danego obciążenia jest jednym z podstawowych problemów, które należy rozwiązać projektując daną konstrukcję. Standardowe podejście projektanta polega na sprawdzeniu co najmniej dwóch warunków: warunku stanu granicznego nośności związanego z nośnością danego elementu oraz warunku stanu granicznego użytkowalności, związanego z możliwością spełnienia planowanych funkcji (przemieszczenia, drgania, stan zarysowania itp.). Jeżeli, któryś z powyższych warunków nie jest spełniony, należy wprowadzić zmiany polegające na przykład na zwiększeniu zbrojenia w przypadku elementów wykonanych w konstrukcji żelbetowej lub zmianie parametrów przekroju w przypadku konstrukcji stalowych. W celu sprawdzenia przytoczonych warunków konieczne jest stworzenie numerycznego modelu odwzorowującego rzeczywiste zachowanie konstrukcji pod wpływem

obciążenia. Warunek ten zostanie spełniony jedynie w przypadku doboru właściwego schematu statycznego, którego głównymi elementami są warunki brzegowe, występujące formy połączeń pomiędzy elementami oraz odpowiedni model materiału.

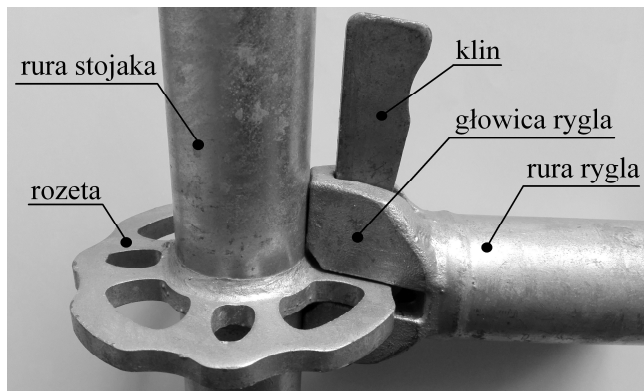
W przypadku rusztowań możliwość zwiększenia przekroju danego elementu jest praktycznie niemożliwa. Wymagałoby to stworzenia nowego elementu i jego wprowadzenie na rynek z zachowaniem wszelkich procedur. Projektowanie rusztowań polega na optymalnym doborze istniejących elementów i sprawdzeniu czy zostanie przeniesione zadane obciążenie. Takie podejście wymaga szczegółowej wiedzy na temat dopuszczalnych obciążeń, przypadających na dany element, jak również charakteru połączeń oraz ich zachowania pod wpływem obciążenia. Właściwe określenie powyższych charakterystyk nie jest oczywiste, tym bardziej że w przypadku rusztowań dany element jest wykorzystywany wielokrotnie i jest narażony na różne formy obciążenia.



Rys. 1.1 Platforma robocza wykonana z systemu modułowego w trakcie realizacji obiektu „Galeria Zamek” w Lublinie

Rusztowanie kojarzy się z konstrukcją ustawioną w bezpośrednim sąsiedztwie budynku, składającą się z ramek, ustawionych w pionie jedna na drugiej, i wypełnioną pomostami. Przedmiotem badań niniejszej pracy jest węzeł rusztowania modułowego, stanowiący miejsce połączenia poszczególnych elementów składowych konstrukcji rusztowania. Na Rys. 1.1 przedstawiono typowe rusztowanie modułowe, którego newralgicznym elementem jest badany węzeł. Rusztowania modułowe są rozwiązaniem uniwersalnym, umożliwiającym optymalne dostosowanie geometrii rusztowania do obiektu, bardzo często wykorzystywane jako platformy robocze (Rys. 1.1), do prac w obiektach przemysłowych [56] lub obiektach zabytkowych [59]. Newralgicznym

elementem rusztowania modułowego jest węzeł pokazany na Rys. 1.2, który składa się z rozety (gr. 9 mm), rury stojaka ($\varnothing 48,3$ gr. 3,2 mm), głowicy rygla, rury rygla ($\varnothing 48,3$ gr. 3,2 mm) oraz klina (gr. 6 mm). Przyjęte nazewnictwo elementów będzie występowało w całej pracy.



Rys. 1.2 Elementy węzła rusztowania modułowego

Charakterystyczna rozeta, przyspawana do pionowego stojaka wykonanego z rury, umożliwia wytworzenie połączenia maksymalnie z ośmioma elementami. Otwory mniejsze umożliwiają wytworzenie połączenia z ryglami, natomiast większe są dedykowane dla stężeń. Połączenie uzyskiwane poprzez wbicie klina w obręb rozety jest połączeniem tymczasowym i nie można go traktować ani jako połączenie przegubowe ani sztywne. Jednoznaczne określenie charakteru połączenia pomiędzy elementami węzła jest elementem niezbędnym do właściwego modelowania konstrukcji przestrzennych wykonanych z tego typu systemu. Ponadto elementy rusztowań są wielokrotnie użytkowane w różnych konfiguracjach i podlegają różnorodnym formom obciążeń mogącym mieć wpływ na nośności i możliwości ich dalszego stosowania.

1.2 Problem naukowy

Problemem naukowym jest opisanie zjawisk fizycznych zachodzących w węzłach rusztowań budowlanych oraz dobór kryteriów oceny ich nośności. Celem niniejszej pracy jest:

- stworzenie stanowisk badawczych węzła rusztowania,
- określenie charakteru połączenia stojak rygiel oraz sztywność węzła,
- określenie kryteriów oceny nośności węzła rusztowania z uwzględnieniem zakresu obszaru uplastycznienia,
- określenie wpływu wielokrotności użytkowania elementów na ich nośność.

Uzyskane wyniki będą stanowiły wytyczne do projektowania dowolnych konstrukcji rusztowań modułowych, wykonanych z tego typu elementów.

Przeprowadzone analizy oraz stworzone modele numeryczne będą mogły posłużyć do analizy szczególnych przypadków obciążenia węzła również poza liniowym zakresem pracy węzła. Modele numeryczne dostarczą informacje na temat zjawisk zachodzących w węźle, które są trudne do określenia w trakcie badań laboratoryjnych i umożliwią szczegółowe prześledzenie rozkładu naprężenia.

1.3 Zakres pracy

Rozwiązanie problemu naukowego wymaga wykonania badań laboratoryjnych i numerycznych, a w szczególności:

- badania laboratoryjne materiałów, z jakich wykonane są poszczególne elementy wchodzące w skład węzła,
- wykonanie prototypowych uchwytów, umożliwiających przeprowadzenie badań laboratoryjnych,
- badania laboratoryjne węzła w różnych schematach obciążenia,
- analizę nośności węzła,
- analizy numeryczne węzła jednoelementowego,
- weryfikacja modelu numerycznego na podstawie badań laboratoryjnych z uwzględnieniem takich zjawisk jak: tarcie, uplastycznienie, duże deformacje,
- numeryczna analiza wpływu wielokrotności obciążeń na nośność węzła.

W pracy analizowano węzeł z pojedynczym rygłem poddanym wszystkim możliwym formom obciążenia. Wykonując analizy numeryczne, jak również badania laboratoryjne, wykorzystano symetrię układu. Badania laboratoryjne wykonywano na próbkach pobranych z rzeczywistych elementów rusztowania modułowego ROTAX Plus firmy Altrad-Mostostal i nie poddawano ich wstępnemu przygotowaniu (nie wygładzano powierzchni przekazywania obciążeń). Badania laboratoryjne przeprowadzano z użyciem własnych prototypowych uchwytów, natomiast analizy numeryczne przeprowadzano z wykorzystaniem programu Abaqus 6.14-2.

2 Problematyka rusztowań w literaturze

Tematyka funkcjonowania rusztowań budowlanych była poruszana w wielu pracach naukowych, jak również możemy odnaleźć szereg przepisów i norm, odnoszących się do rusztowań. Większość prac odnosi się jednak do konstrukcji rusztowania jako całości. Analizowane są konstrukcje rusztowań, stanowiące konstrukcje wsporcze szalunków, w obrębie których często dochodziło do katastrof budowlanych. Nie odnaleziono pracy zawierającej szczegółową analizę numeryczną nośności węzła rusztowania, w którym połączenie jest uzyskiwane poprzez wbicie klina.

2.1 Przegląd norm i aktów prawnych

Podstawowymi normami odnoszącymi się do zagadnień związanych z rusztowaniami są aktualnie obowiązujące europejskie normy:

- PN-EN 12810-1 Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – Część 1: Specyfikacja techniczna wyrobów [61],
- PN-EN 12810-2 Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – Część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji [62],
- PN-EN 12811-1 Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 1: Rusztowania Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania [63],
- PN-EN 12811-2 Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 2: Informacje o materiałach [64],
- PN-EN 12811-3 Tymczasowe urządzenia budowlane – Część 3: Obciążenia badawcze [65],
- PN-EN 12811-4 Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 4: Daszki ochronne rusztowań – Wymagania dotyczące wykonania i konstrukcji wyrobu. [66]
- PN-EN 12812 Deskowanie – Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania [67],
- PN-EN 12813 Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Wieże nośne z elementów prefabrykowanych – Szczegółowe metody konstruowania [68],
- PN-EN 74-1, Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 1: Złącza do rur – Wymagania i metody badań [72],
- PN-EN 74-2, Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 2: Złącza specjalne – Wymagania i metody badań [73],

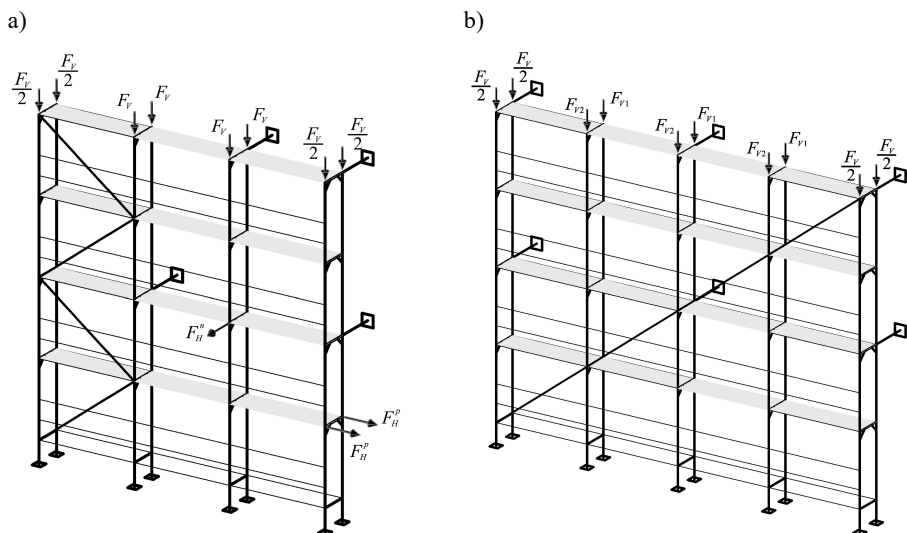
- PN-EN 74-3, Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 3: Podstawki płaskie i sworznie centrujące – Wymagania i metody badań [74],
- PN-EN 39 Rury stalowe do budowy rusztowań – Warunki techniczne dostawy [71],
- PN-EN 1004 Ruchome rusztowania robocze wykonane z prefabrykowanych elementów konstrukcyjnych – Materiały, wymiary, obciążenia projektowe, wymagania bezpieczeństwa i warunki wykonania i ogólne zasady projektowania [60].

W pierwszej z przytoczonych norm [61], możemy odnaleźć ogólne wymagania dotyczące wykonania, projektowania oraz oceny systemów prefabrykowanych rusztowań elewacyjnych. Wyróżniono w niej klasyfikację rusztowań uwzględniającą takie kryteria, jak: obciążenia użytkowe, pomosty i ich podparcia, szerokość systemu, wysokość prześwitu, zakrycia ochronne oraz sposób dostępu w pionie. Norma jednoznacznie wskazuje wymiar średnicy zewnętrznej rur (48,3 mm), jak również minimalne grubości ścianek w zależności od użytego materiału i jego charakterystyk wytrzymałościowych. W normie zostały również zawarte informacje na temat wymagań ogólnych poszczególnych elementów składowych rusztowania oraz wymagania dotyczące projektowania konstrukcji. Norma [61] wielokrotnie odwołuje się do pozostałych norm, w których zostały zawarte informacje szczegółowe. Ważnym elementem normy są punkty wskazujące producentom co powinny zawierać instrukcje wyrobu, jak należy oznaczać wyrób oraz w jaki sposób dokonywać jego oceny.

Dokumentem, w którym możemy odnaleźć informację na temat zasad analiz i projektowania konstrukcji rusztowań jest norma [62]. W normie możemy odnaleźć schemat blokowy etapów projektowania konstrukcji, jak również wskazane zostały schematy konfiguracji badań laboratoryjnych, służących sprawdzeniu zachowania się systemu pod wpływem znacznego obciążenia – typ 1 (Rys. 2.1 a) oraz schemat badań reprezentacyjnej sekcji konfiguracji systemu w celu sprawdzenia współczynnika obciążenia przy wyboczeniu sprężystym α_{cr} określanego za pomocą obliczeń – typ 2 (Rys. 2.1 b). W badaniu typu 1 pierwszym krokiem jest obciążanie rusztowania siłą poziomą F_H^n , prostopadłą do elewacji i przyłożoną w punkcie węzłowym nie zakotwionym, oraz dwoma siłami poziomymi F_H^p równoległymi do elewacji, przyłożonymi do dwóch sąsiednich punktów węzłowych, leżących w płaszczyźnie nie zakotwionej. Siły F_H^p i F_H^n są przykładane od zera do wartości końcowej, następnie układ jest odciążany. Zabieg ma na celu ułożenie się elementów rusztowania i likwidację ewentualnych luzów. Następnie rusztowanie jest poddawane szczegółowej inwentaryzacji w celu określenia dokładnych niedokładności geometrycznych i ponownie obciążane do wcześniej ustalonych wartości sił

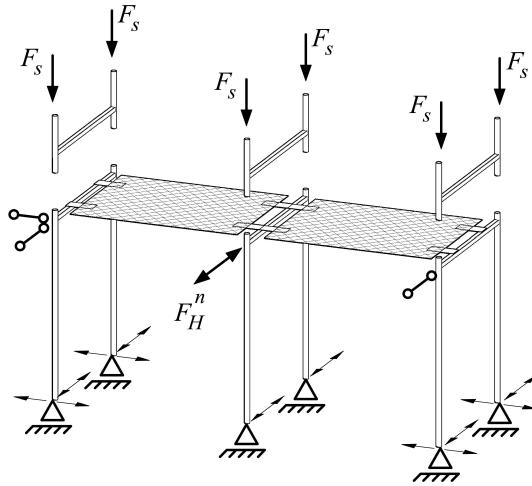
poziomych. Po przeprowadzeniu procedury odciażania i obciążania siły poziome są pozostawione w dalszych badaniach jako obciążenia stałe. Jako kolejne obciążenia są przykładane siły pionowe F_v , które są przykładane do węzłów górnych rusztowania, przy czym na skrajne słupki przykładana jest siła $0,5F_v$. Podczas badania wartość tych sił jest zwiększana aż do wystąpienia uszkodzenia.

W przypadku badania typu 2 są przykładane tylko obciążenia pionowe do górnych punktów stojaków. Oczywiście siły w skrajnych stojakach powinny przyjmować połowę wartości sił przyłożonych do środkowych stojaków. Tak, jak w przypadku badania typu 1, należy wstępnie obciążyć konstrukcję tak, aby nie przekroczyć zakresu sprężystego. Następnie ją odciażyć, zinwentaryzować geometrię i rozpocząć właściwy proces obciążenia aż do uszkodzenia rusztowania. Podczas badania należy mierzyć wartości sił oraz przemieszczenia poziome w kierunku prostopadłym i równoległym do elewacji.



Rys. 2.1 Propozycja normowa schematu rusztowania i jego obciążenia:
a) badanie typu 1 tzw. „global test”, b) badanie typu 2

W załączniku A normy [62] możemy odszukać przykładowe schematy najczęściej wymaganych badań. W przypadku badań z obciążeniem w płaszczyźnie poziomej, których celem jest określenie sztywności poziomej z uwzględnieniem luzów oraz nośności połączenia pomostu z poprzecznicą lub z elementami pionowymi, zostały przedstawione cztery schematy. Na Rys. 2.2 przedstawiono przykładowy schemat stanowiska badawczego, przeznaczonego do wyznaczania sztywności i nośności w kierunku prostopadłym do elewacji przez przyłożenie siły F_H^n .

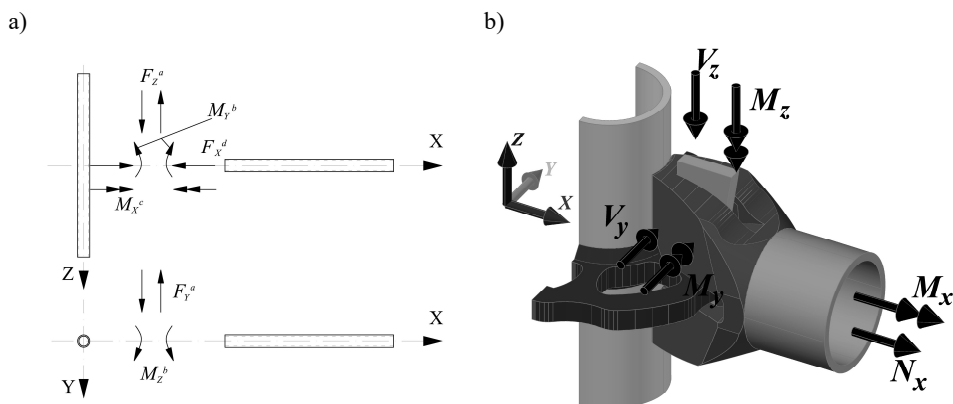


Rys. 2.2 Typowe stanowisko badawcze w przypadku badania F_H^n prostopadłej do elewacji

W przytoczonej normie odnajdziemy również schematy (Rys. 2.3 a) oraz ogólne wytyczne, odnoszące się do badań węzłów systemów modułowych, będących przedmiotem badań w niniejszej dysertacji. W zaleceniach wskazano możliwe wartości sił wewnętrznych, które mogą pojawić się w poprzecznicach – elementach poziomych (rygiel Rys. 1.2). Są nimi: moment skręcający o wektorze wzdłuż osi $X - M_x$, moment zginający o wektorze wzdłuż osi $Y - M_y$, moment zginający o wektorze wzdłuż osi $Z - M_z$, siła normalna o wektorze wzdłuż osi $X - N_x$, siła tnąca o wektorze wzdłuż osi $Y - V_y$ oraz siła tnąca o wektorze wzdłuż osi $Z - V_z$. Zaproponowane oznaczenia, różniące się od oznaczeń występujących w normie, będą występowały w całej pracy i będą się odnosiły do poszczególnych sił wewnętrznych (Rys. 2.3 b). Badania prowadzone w celu określenia nośności oraz tam, gdzie to konieczne, sztywności i luzów w połączeniu podzielono na trzy grupy badań:

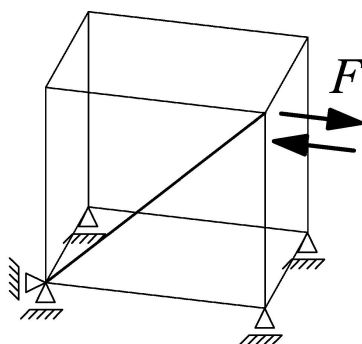
- jednego połączenia i jednej siły wewnętrznej,
- jednego połączenia i kilku sił wewnętrznych,
- więcej niż jednego połączenia w jednym węźle.

Zakres badań należy ustalić w zależności od konkretnej konstrukcji i zakresu stosowania. Ponadto „inżynier nadzorujący obliczenia i badania powinien zgodnie opracować program koniecznych badań i uzyskać zatwierdzenie jednostki certyfikującej”. Nie wskazano w niej jednak szczegółowych wytycznych, w jaki sposób badania mają być przeprowadzane i jak ma wyglądać stanowisko badawcze.



Rys. 2.3 Schemat sił wewnętrznych występujących w połączeniu stojaka z poprzecznica lub podłużnicą: a) oznaczenia według normy [62], b) przyjęte oznaczenia w pracy

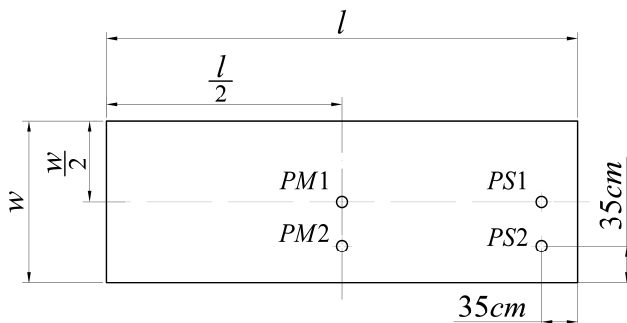
Norma [62] dopuszcza wykonanie badań w schemacie pokazanym na Rys. 2.2 do wyznaczenia średniej sztywności połączeń między poprzecznicami i stojakami wzdłuż osi pionowej – M_z . W przypadku zastrzałów (stężeń pionowych), norma [62] zaleca, aby badania przeprowadzane były w konfiguracji posiadającej jeden zastrzał (Rys. 2.4). Takie rozwiązanie umożliwia jednoznaczną interpretację uszkodzenia jednego zastrzału lub połączenia. Przedstawiona konfiguracja umożliwia również ustalenie możliwości wystąpienia wyboczenia stężenia.



Rys. 2.4 Schemat badań w konfiguracji z pojedynczym zastrzałem według normy [62]

W załączniku B normy [62] szczegółowo została opisana procedura wykonywania badań, polegających na obciążaniu pomostów spadającą masą o energii równej 2450 J. Badania należy przeprowadzać z użyciem kuli stalowej o średnicy 0,5 m i masie 100 kg. Wymagania co do średnicy, masy i materiału

wymuszają zastosowanie kuli drażonej. Uzyskanie wymaganej wartości energii wymaga, aby wysokość spadania kuli wynosiła 2,5 m. Badania polegają na sprawdzeniu czy pomost, pomimo uderzenia, jest w stanie przenieść obciążenie pochodzące od ciężaru kuli stalowej. Opisany test ma na celu sprawdzenie czy pomost utrzyma człowieka spadającego z wyższego poziomu roboczego.



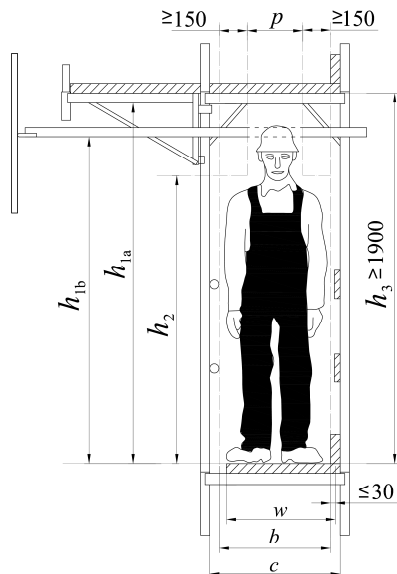
Rys. 2.5 Położenie miejsca uderzenia pomostu

W pomostach dopuszczalne są trwałe odkształcenia i lokalne uszkodzenia. Ponieważ kula ma symulować upadek pracownika z pomostu wyższego, do uderzenia ma dochodzić za pośrednictwem poduszki tłumiącej, której charakterystyki sztywności zostały szczegółowo podane w normie [62]. Rozmieszczenie oraz punkty upadku również zostały wskazane i są uzależnione od szerokości pomostu (Rys. 2.5).

W załączniku C normy [62] nie opisano kolejnych badań. Wskazano jedynie konieczność przeprowadzania badań cyklicznych spawanych stopnic aluminiowych.

Norma PN-EN 12811-1 [63] jest najbardziej rozbudowaną normą odnoszącą się do rusztowań, w której możemy odnaleźć informacje między innymi na temat:

- nazewnictwa typowych części składowych systemu rusztowań elewacyjnych,
- wymagań dotyczących materiałów,
- klas szerokości stref roboczych,
- klas prześwitu,
- szerokości stref roboczych (Rys. 2.6),
- zabezpieczeń bocznych,
- zakryć ochronnych,
- podkładów i podstawek śrubowych,
- dojsć między poziomami,
- obciążeń,
- imperfekcji.



Rys. 2.6 Wymagania dotyczące prześwitu i szerokości stref roboczych [63]

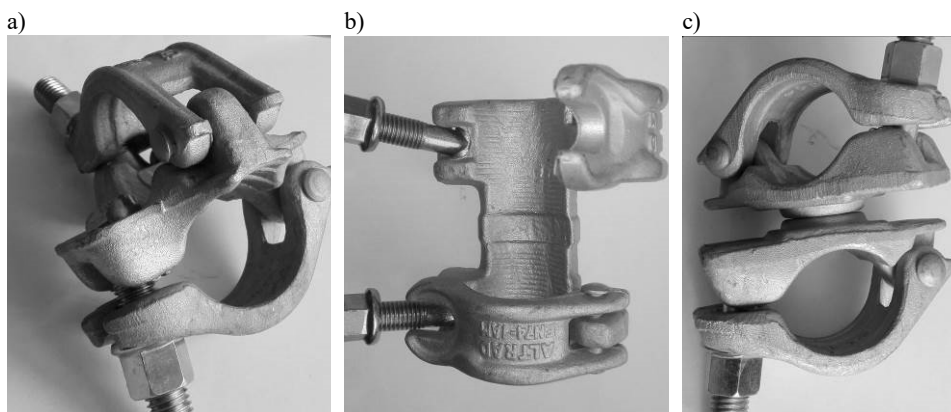
Odnajdziemy w niej również informacje na temat obciążeń, jakie należy przykładać w obrębie strefy roboczej w zależności od klasy obciążenia, oraz obciążenia wiatrem. Szczegółowo została opisana procedura wyznaczania wartości obciążeń wiatrem, uwzględniając takie elementy, jak współczynniki siły aerodynamicznej, współczynniki miejsca, kierunek oddziaływania oraz zakrycia ochronne. Opisano również procedurę łączenia poszczególnych form obciążenia w warunkach eksploatacji oraz warunkach, w których rusztowanie nie jest eksploatowane, ale jest narażone na działanie wiatru. W rozdziale 10 normy [63] podane zostały zasady projektowania konstrukcji rusztowań pod kątem stateczności i możliwości eksploatacji. W procedurach projektowania podano sposób postępowania, uwzględniający odchylenia między elementami pionowymi (imperfekcje geometryczne), połączenia między elementami rurowymi z uwzględnieniem złączy rurowych oraz podstawek śrubowych. Podano również wartości współczynników bezpieczeństwa odnośnie oddziaływań γ_F jak i nośności γ_M w zależności od rozpatrywanego stanu granicznego. Projektując rusztowanie, tak jak każdą inną konstrukcję, należy sprawdzić dwa stany graniczne: stan graniczny nośności oraz stan graniczny użytkowości. Ponadto w przypadku rusztowań wolno stojących należy sprawdzić stabilność konstrukcji pod kątem powstania poślizgu bocznego, wypiętrzenia i przewrócenia się.

W załączniku A normy PN-EN 12811-1 [63] podano procedurę wyznaczania obciążenia wiatrem na zakryte rusztowania robocze, natomiast w załączniku

B metodę obliczania charakterystycznych nośności i odkształceń podpór śrubowych. W załączniku C znajdziemy wartości charakterystyczne nośności złącza w zależności od klasy i rodzaju złącza. W normie wyróżniono cztery rodzaje złączy:

- krzyżowe (RA) – połączenie rur pod kątem prostym (Rys. 2.7 a),
- wzdłużne typu ciernego (SF) – połączenie osiowe rur (Rys. 2.7 b),
- obrotowe (SW) – połączenie rur pod dowolnym kątem (Rys. 2.7 c),
- równoległe (PA) – połączenie rur równoległe (Rys. 2.7 c).

Złącza te są złączami stosowanymi w przypadku rusztowań rurowych i służą do łączenia rur ze sobą w różnych konfiguracjach. Połączenia tego typu nie są elementem niniejszej pracy i nie są głównym elementem rusztowań modułowych, w których połączenia między elementami uzyskiwane są za pomocą klina zabijanego w otwór rozety. Załącznik D zawiera informacje na temat odchyłeń krajowych typu A spowodowanych przepisami w takich krajach, jak Austria, Włochy oraz Wielka Brytania. Jest to załącznik jedynie informacyjny.



Rys. 2.7 Złącza rurowe: a) krzyżowe (RA), b) wzdłużne (SF), c) obrotowe (SW) lub równoległe (PA)

W normie PN-EN 12811-2 [64] przedstawiono informację na temat materiałów często używanych do wykonania tymczasowych konstrukcji stosowanych na placu budowy, jakimi są rusztowania. W normie podano informacje o właściwościach materiałów takich jak stal, stopy aluminium, żeliwo, drewno konstrukcyjne, materiały drewnopochodne oraz informacje dotyczące spawania, ograniczenia korozji i innych czynników, powodujących pogorszenie jakości. Są to jedynie informacje ogólne, które powinien uwzględniać konstruktor.

Norma PN-EN 12811-3 [65] jest poświęcona badaniom i możemy w niej odnaleźć sześć typów badań ze wskazaniem przykładowych elementów, które należy przebadać. Przykładowy podział badań przedstawiono w Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Typowe rodzaje testów [65]

Nr	Rodzaj testu	Element testu	Przykłady
1	nośność oraz sztywność	s, a, c	- połączenia - węzeł modułowy - płaszczyzna pozioma
2	model numeryczny	s a, c	- konfiguracja całego systemu
3	wpływ obciążenia wielokrotnego	a, c, e	- połączenia - węzeł modułowy - płaszczyzna pozioma
4	wpływ obciążenia cyklicznego (300000cykli)	a, c, e	- stopnie schodów
5	wibracje	a, c	- połączenia klinowe - złączki
6	uderzenie	a, c	- pomosty - zabezpieczenia boczne
s – konfiguracja całego systemu; a – konfiguracja; c – komponenty; e-elementy			

Ponadto w normie [65] wskazano wytyczne odnośnie przeprowadzania badań, a w szczególności:

- liczby próbek,
- zakresu obciążania,
- liczby powtórzeń,
- dokumentacji powykonawczej,
- wzorów, na podstawie których określana jest nośność oraz sztywność połączenia.

Ponieważ w niniejszej pracy wykorzystano wzory zawarte w normie, szczegółowy opis procedur wyznaczania nośności i sztywności węzła zostanie przedstawiony w rozdziale związanym z badaniami laboratoryjnymi. Pozycje [66], [67], [68] opisują zasady konstruowania i projektowania konstrukcji z elementów rusztowania, które mogą być wykorzystane jako daszki ochronne, konstrukcje wsporcze deskowań, konstrukcje lub rusztowania wieżowe. Szczególną uwagę zwrócono na kształtowanie posadowienia rusztowania, imperfekcje geometrii rusztowania oraz zasady przyjmowania obciążeń.

Odrębna grupa norm [72], [73], [74] zawiera szereg wytycznych odnośnie metod badań i wymagań stawianych złączom rurowym (Rys. 2.7), sworzniom centrującym i podstawkom. W normach są opisane klasy złączy wraz z wymaganiami, jakie im się stawia oraz schematy stanowisk badawczych. Stanowiska badawcze zostały szczegółowo opisane wraz z podaniem wymiarów, miejsc występowania czujników, zakresem obciążeń i wzorami, pozwalającymi na określenie sztywności połączenia. Ponieważ tego typu złącza są niezbędnym

elementem bardzo dobrze znanych rusztowań rurowych, opracowano szczegółowe wytyczne pozwalające na określenie charakterystyk wytrzymałościowych połączeń. Połączenia tego typu występują również w przypadku rusztowań systemowych, ale wykorzystywane są jako elementy dodatkowe w specyficznych sytuacjach. W normie PN-EN 39 [71] można znaleźć wymagania dotyczące rur ze stali niestopowych stosowanych w konstrukcjach tymczasowych i roboczych rusztowań. Ponadto w normie określono wymagania dotyczące długotrwałego cechowania rur, jak również powłoki ochronnej oraz wymaganą kontrolę i badania. Norma PN-EN 1004 [60] opisuje zasady kształtowania i projektowania rusztowań przejezdnych oraz metody ich badań. W normie opisano zasady przyjmowania obciążeń do obliczeń, sposób przyjmowania połączeń w schematach statycznych, zasady budowy modelu z uwzględnieniem imperfekcji oraz warunki stanów granicznych nośności dla rusztowań przejezdnych.

Funkcjonowanie rusztowań jest regulowane także aktami prawnymi. Istotnym aktem prawnym, w którym możemy znaleźć informacje na temat wymogów stawianych rusztowaniom jest Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych [22]. W rozdziale 8 Rozporządzenia [22] można znaleźć informacje określające warunki montażu, odbioru rusztowania, użytkowania i demontażu rusztowania. Rozpatrując przepisy prawne odnoszące się do rusztowań należy również przytoczyć polskie normy z 1996: PN-M-47900-1 [75], PN-M-47900-2 [76], PN-M-47900-3 [77]. W wielu dokumentach i publikacjach autorzy powołują się właśnie na te normy. Wynika to z faktu, iż możemy w nich odnaleźć precyzyjne i jednoznaczne zapisy odnoszące się chociażby do nośności podłoża gruntowego, komunikacji, stężeń, kotwienia, zabezpieczeń dodatkowych. Ponieważ w normach europejskich nie ma wzmianki o niektórych elementach lub jest mnóstwo odwołań do innych norm, posługiwanie się zaleceniami zawartymi w polskich normach jest dużo wygodniejsze.

Podsumowując, normy odnoszą się w szczególności do rusztowań ramowych oraz złączy rurowych. W normach szczegółowo zostały opisane procedury wykonywania badań całych układów rusztowań ramowych, jak również ich elementów składowych. Nie wszystkie sformułowania i zalecenia są adekwatne do rusztowań modułowych, charakteryzujących się inną specyfiką pracy. W normach nie ma szczegółowych zaleceń co do stanowisk badawczych, w tym sposobu obciążania i pomiarów odnoszących się bezpośrednio do rusztowań modułowych i poszczególnych form obciążenia. Ze względu na brak szczegółowych rozwiązań, odnoszących się do obciążania elementów obciążeniem równomiernym, w 2014 roku autor zgłosił do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej stanowisko do badań odkształceń elementów poziomych obciążonych równomiernie i w 2015 roku uzyskał na nie patent [58].

Stanowisko wielokrotnie było wykorzystywane do przeprowadzania badań laboratoryjnych takich elementów, jak rygle poziome, rygle podwójne, konsole.

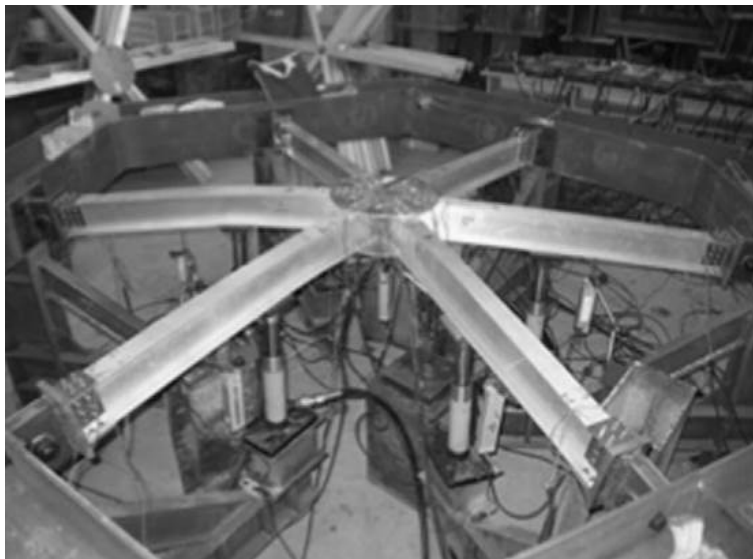
2.2 Przegląd laboratoryjnych metod badawczych przestrzennego stanu naprężenia

Rusztowania budowlane są konstrukcjami prętowymi, składającymi się z kształtowników, głównie w postaci rur okrągłych. Jednakże ich węzły ze względu na specyfikę pracy (nie są to węzły stałe), wielokrotność użytkowania i skomplikowaną geometrię wymagają szczególnego podejścia zarówno w kwestii ich nośności, jak i przestrzennego stanu naprężenia w elementach węzła oraz zjawisk związanych z kontaktem i miejscowym uplastycznieniem.

Badania przestrzennego stanu naprężenia jest zagadnieniem skomplikowanym i dostarczającym wielu problemów. Najbardziej rozpowszechnioną metodą badania stanu naprężenia jest metoda wykorzystująca czujniki elektrooporowe (tensometry), mierzące odkształcenia. Czujniki rejestrują zmianę oporu drucika oporowego, przyklejonego do badanego elementu za pośrednictwem kleju i cienkiej folii. Problematiczną kwestią jest lokalizacja przyklejenia tensometru, jak również ustawienie go zgodnie z kierunkami występujących odkształceń (niekierunkowość czujnika). Jeżeli stan naprężenia jest całkowicie nie znany powstaje problem znalezienia kierunków głównych odkształceń. Rozwiązaniem jest stosowanie rozet tensometrycznych, które mierzą odkształcenia w trzech kierunkach. Wykorzystując wzory transformacyjne możemy określić wartości oraz kierunki główne odkształceń. Warunkiem wykorzystania czujników elektrooporowych jest właściwe przygotowanie próbki, jak również jej płaska powierzchnia. Przykładem prac z wykorzystaniem czujników elektrooporowych jest praca [40], w której przebadano jednowarstwowy węzeł płytowy. Połączenie między elementami uzyskiwane było poprzez śruby oraz uzębrowaną płytę centralną. Czujniki umieszczano zarówno na płycie centralnej, jak i na łączonych płaskich elementach. Analizowano rozkład naprężenia w 14 punktach na próbce podawanej obciążeniu. Wyniki laboratoryjne zostały potwierdzone analizami numerycznymi, a otrzymany model umożliwił przeanalizowanie wpływu wymiarów łączonych elementów na ich nośność.

Przykładem pracy, w której analizowano rozkład naprężenia z wykorzystaniem czujników elektrooporowych w postaci tensometrów oraz rozet, jest również praca [23]. Przedmiotem badań jest sześćcioelementowy węzeł z okrągłą blachą węzłową wykonany ze stopu aluminium. Połączenie w węźle uzyskiwano za pomocą śrub. Czujniki zostały rozmieszczone zarówno w obrębie łączonych elementów, jak i blachy węzłowej, przy czym rozety umieszczano na powierzchni blach węzłowych. Węzeł obciążano w samo równoważącą się sztywną ramie wywołując zginanie elementów łączonych (Rys. 2.8). Na podstawie zapisu wartości siły, uzyskiwanej na poszczególnych tłokach, oraz

tensometrów uzyskano krzywe zależności siła-odkształcenie, charakteryzujących zachowanie się blach węzłowych pod wpływem obciążenia. Duża liczba czujników umożliwiła wskazanie obszarów, w których nie występują znaczne odkształcenia oraz obszary dużych odkształceń.



Rys. 2.8 Stanowisko badawcze sześcieelementowego węzła z blachą węzłową (fot. [23])

Przyklejenie tensometru dokładnie w miejscu i kierunku występowania największych odkształceń nie zawsze jest możliwe i bardzo często jest ograniczone rozmiarem elementów oraz wzajemnym ich układem. Pomiar może być prowadzony tylko do momentu osiągnięcia dopuszczalnych odkształceń tensometru, po których ulega on zniszczeniu.

Inną rozpowszechnioną metodą badawczą przestrzennego stanu naprężenia jest system cyfrowej korelacji obrazu (DIC – Digital Image Correlation). Szczegółowe zasady działania systemu zostały opisane w pracy [31]. Metoda ta wymaga odpowiedniego przygotowania powierzchni pomiarowej próbki, polegającego na naniesieniu aerografem jednolitej białej warstwy i czarnych losowo rozmieszczonych punktów. Po przygotowaniu próbki można przystąpić do ustawienia parametrów pomiaru. W zależności od liczby kamer możliwa jest rejestracja wyników w układzie 2D (jedna kamera) lub 3D (dwie kamery). Najważniejszą czynnością przed przystąpieniem do badań jest właściwa kalibracja urządzenia opisana w instrukcji każdego urządzenia. Wymaga ona dostosowania intensywności oświetlenia oraz czasu naświetlania. Należy również ustawić tryb zapisu zdjęć, określić obszar pomiarowy i sprawdzić poprawność kalibracji. Po wykonaniu badań z użyciem cyfrowej korelacji obrazu możliwe jest wyznaczenie składowych przemieszczeń i odkształceń na

podstawie wzajemnej zmiany położenia czarnych punktów na próbce. Największymi zaletami metody DIC są: możliwość bezdotykowego pomiaru dowolnych materiałów, wyznaczanie przemieszczeń i odkształceń w dowolnym obszarze strefy pomiarowej, wykrywanie pęknięć i akumulacji uszkodzeń, możliwość pomiaru aż do zniszczenia próbki. Dzięki powyższym zaletom metoda ta umożliwia walidację modeli metody elementów skończonych. Niestety obszar próbki, w którym występują największe odkształcenia musi być doskonale widoczny w trakcie badań. Problemатyczne również są badania próbek o zakrzywionym kształcie, ponieważ strefa widocznych punktów jest ograniczona. Przykładem wykorzystania cyfrowej korelacji obrazu może być praca [85], w której przeprowadzono symulacje komputerowe oraz badania laboratoryjne mające na celu określenie wpływu wielkości otworów na współczynnik koncentracji naprężenia. Badaniom poddano płaskie próbki z nawierconymi otworami o średnicy 2,5 mm, 1,5 mm oraz 0,75 mm umieszczonymi w obrębie przewężenia próbki celem wywołania koncentracji naprężenia. Zarówno badania laboratoryjne, jak i modele numeryczne potwierdziły, że zwiększenie średnicy otworu prowadzi do liniowego spadku współczynnika koncentracji naprężenia i liniowego wzrostu maksymalnych naprężeń.

Do metod badawczych przestrzennego stanu naprężenia, oprócz opisanych powyżej, możemy również zaliczyć takie metody, jak:

- elektroniczna interferometria plamkowa ESPI (ang. Electronic Speckle Pattern Interferometry),
- metoda interferencji optycznej [13],
- metoda pamięci magnetycznej materiałów (MPM),
- metoda emisji akustycznej (EA).

Każda z powyższych metod wymaga bezpośredniego dostępu do miejsc, w których dochodzi do uszkodzenia. W przypadku rozpatrywanego węzła, ze względu na geometrię i specyfikę pracy, wykorzystanie przedstawionych metod jest znacznie utrudnione lub całkowicie niemożliwe. Badania przestrzennego stanu naprężenia węzłów rusztowań modułowych muszą być wspomagane analizami komputerowymi, pozwalającymi na prześledzenie wszystkich zjawisk zachodzących w węźle i określenie ich wpływu na uzyskane wyniki.

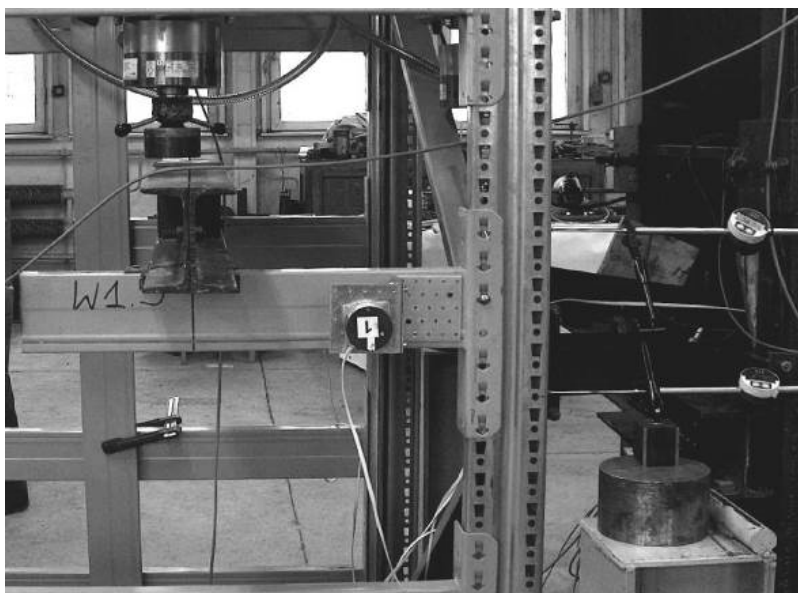
2.3 Węzły stalowe i ich badania

Węzły konstrukcji stalowych są obiektem wielu prac naukowych, w których rozpatrywane są zagadnienia związane z ich sztywnością oraz nośnością. Połączenia pomiędzy poszczególnymi elementami uzyskiwane są najczęściej za pomocą spoin lub blach węzłowych oraz śrub. W przypadku rusztowania modułowego połączenie, uzyskiwane za pomocą klina wbijanego w otwór rozety, ma charakter połączenia tymczasowego, znacznie różniącego się specyfiką pracy w stosunku do rozwiązań stosowanych w konstrukcjach stalo-

wych. Ze względu na bogaty zakres literatury w rozdziale przytoczono tylko przykładowe prace, mające na celu wskazanie szerokiego zakresu prowadzonych badań.

Jednym z podstawowych zagadnień podejmowanych przez naukowców jest określenie sztywności węzła stalowego w zależności od zastosowanych połączeń, usztywnień lub śrub. Jednym z przykładów tego typu badań jest praca [44]. W pracy przeanalizowano wpływ grubości blachy węzłowej, odległości śrub od półki dwuteownika oraz rozstawu śrub na sztywność połączenia rygla, w postaci dwuteownika, ze słupem. Wpływ podanych parametrów badano z użyciem modelu numerycznego, który został skalibrowany na podstawie wieloetapowych badań laboratoryjnych. Badania laboratoryjne obejmowały: badania materiałów, badania śrub, badania połączeń oraz badania układu węzła w ramie. Przeprowadzone analizy numeryczne pozwoliły na określenie wzoru na wartość graniczną kąta obrotu węzła zależności od trzech wspomnianych parametrów.

Badania laboratoryjne węzła pod względem nośności oraz podatności zostały przeprowadzone również w pracy [33]. Przebadano w niej podatny węzeł zaczepowy rygiel-słup, występujący w stalowych regałach magazynowych. Rozpatrywane połączenie ma szczególne znaczenie pod względem bezpieczeństwa, ponieważ ma zapewnić sztywność układu w kierunku podłużnym, w którym nie występują stężenia. Próbom poddano dwie grupy rygli, z pełną lub częściową spoiną łączącą blachę czołową połączenia zaczepowego z rygłem (Rys. 2.9).



Rys. 2.9 Widok stanowiska badawczego (fot. [33])

W wyniku przeprowadzonych badań określono sztywność węzła, uwzględniając wytyczne zawarte w normach, innych opracowaniach oraz zaleceniach wydanych przez Instytut Logistyki i Magazynowania w Poznaniu. Wyznaczając sztywność zgodnie z wytycznymi uzyskano mniejszą sztywność w przypadku pełnej spoiny co wydaje się przeczyć logice i poddaje w wątpliwość wytyczne normowe. Przeanalizowano również zachowanie węzła pod wpływem obciążenia przy różnym ułożeniu spoin. Co ciekawe każdorazowo zniszczeniu ulegał rygiel i nie zauważono odkształceń plastycznych w obrębie słupa wykonanego ze stali o wyższych parametrach wytrzymałościowych.

Wyjątkowa sytuacja obciążenia węzła, uwzględniająca przypadek usunięcia jednego ze słupów konstrukcji kompozytowej stalowo-betonowej, została opisana w pracy [32]. Badania w skali rzeczywistej (1,8x14,8 m) dotyczyły konstrukcji kompozytowej, w której połączenie słupa HEB 200 z ryglem w postaci dwuteowników IPE300 uzyskiwano za pośrednictwem blachy węzłowej oraz czterech śrub M20. Obciążeniu poddano dwa rodzaje układów belek: układ referencyjny, składający się z konstrukcji stalowej, oraz układ konstrukcji stalowo-betonowej. Usunięcie słupa środkowego symulowano przykładając obciążenie za pomocą siłownika hydraulicznego, wywierającego nacisk na słup, znajdujący się w osi symetrii układu. W obu przypadkach do zniszczenia dochodziło w obrębie blachy węzłowej oraz śrub, przy czym odkształcenia plastyczne zaobserwowano przy obrocie 0,07 rad co potwierdza słuszność stosowanej formy połączenia w postaci cienkich blach węzłowych.

W pracy [93] przeanalizowano wpływ podatności węzła na przesuw i na rozkład sił wewnętrznych w konstrukcjach prętowych. Analizie poddano nietypową konstrukcję kratową przykrycia dachowego hali wystawowej oraz jednowarstwową kopułę prętową stanowiącą przekrycie pawilonów wystawowych. Hala wystawowa w Chorzowie uległa zawaleniu w 2006 roku, natomiast pawilon wystawowy uległ awarii w latach 60. ubiegłego wieku. Przeprowadzone analizy udowodniły, że uwzględnienie podatności węzłów krzyżulców na przesuw powoduje wzrost sił wewnętrznych w pasach kratownic nawet o 70%. W przypadku kopuły uwzględnienie podatności oraz poślizgu w obrębie węzłów nakładkowych powoduje utratę globalnej stateczności konstrukcji przy obciążeniach normowych. Autorzy wskazują konieczność standaryzacji opisu charakterystyk podatnościowych $N-\delta$ połączeń zakładkowych przy różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych.

Połączenia zakładkowe, wielokrotnie stosowane w przypadku konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych, były obiektem prac przedstawionych w artykule [9]. Badania obejmowały 22 rodzaje połączeń uzyskiwanych za pomocą jednej śruby, w których zróżnicowano liczbę kątowników oraz wielkość kątownika równoramienne, średnicę i położenie otworów oraz średnicę śrub. Połączenie celowo projektowano z pozostawieniem luzu w obrębie śrub, ażeby zniszczeniu ulegał kątownik. Badania przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczenia wynoszącym

0,5 mm/min a przemieszczenia rejestrowano za pomocą ekstensometru optycznego. W większości przypadków do zniszczenia dochodziło w miejscu osłabienia otworem ścianki przylgowej przy jednoczesnej dużej deformacji giętnej blachy węzłowej. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że nośność połączenia, wyznaczana za pomocą wyrażeń zawartych w Eurocodzie 3 [70], jest zaniżona, natomiast norma bezpośrednio odnosząca się do elektroenergetycznych linii napowietrznych zawyża wartość nośności. Ponadto nie uwzględniono w niej położenia otworu względem brzegu ramienia kątownika, co może prowadzić do znacznych i niebezpiecznych przeszacowań nośności.

Zagadnieniem, wymagającym większych nakładów finansowych i dostępu do specjalistycznych stanowisk badawczych, są badania wpływu temperatury na nośność konstrukcji stalowych. W przypadku pozycji [41] analizowano wpływ temperatury na sztywność połączenia słup-rygiel wykonanych z dwuteowników. Badania laboratoryjne obejmowały testy w pełnej skali, w których oprócz obciążania węzła siłami dokonywano jego podgrzania. Badania podzielono na trzy warianty: stała temperatura 500°C i przyrost obciążenia do zniszczenia, 650°C przyrost obciążenia do zniszczenia oraz stałe obciążenie i przyrost temperatury do zniszczenia. Badania potwierdziły wpływ temperatury na zmniejszenie sztywności połączenia. W przypadku stałej temperatury i przyrostu obciążenia sztywność połączenia jest stała do momentu wystąpienia odkształceń plastycznych, po osiągnięciu których gwałtownie spada. W trakcie zwiększania temperatury sztywność połączenia wzrasta do momentu osiągnięcia temperatury ok. 300°C, a następnie gwałtownie maleje. Badania laboratoryjne potwierdzono analizami numerycznymi.

Zachowanie połączeń w konstrukcjach stalowych stanowi ciągle temat wielu prac badawczych. Węzły rozpatrywane w niniejszej pracy są specyficzną grupą połączeń, do której trudno jest zastosować dotychczas opracowane wzory. Skomplikowana geometria i zagadnienia związane ze zjawiskiem tarcia znacznie utrudniają ich analizę. Ze względu na różnorodne wykorzystanie rusztowań i możliwość obciążenia węzła dowolną formą obciążenia, klasyczne podejście, jak do elementów połączonych ze sobą w trwały sposób, wydaje się nieadekwatne.

2.4 Badania rusztowań prowadzone przez inne ośrodki badawcze

Konstrukcje rusztowań bardzo często są marginalizowane ze względu na swą tymczasowość. Skomplikowane konstrukcje obiektów zarówno użyteczności publicznej, jak i obiektów przemysłowych, wymuszają na wykonawcach i inwestorach szczegółowe podejście do problematyki rusztowań zarówno pod względem kosztów, jak i bezpieczeństwa użytkowania. Elewacje szklane, elewacje pochyłe, obiekty zabytkowe i przemysłowe czy też wykorzystanie rusztowań jako konstrukcji wsporczych deskowań wymagają nietypowych

rozwiązań, których nie odnajdziemy w katalogach czy dokumentacji techniczno-ruchowej. Wymagają one indywidualnego podejścia w kwestii ich projektowania i możliwości realizacji. Właściwe projektowanie wymaga poznania specyfiki pracy poszczególnych elementów systemu, jak również ich parametrów wytrzymałościowych. W poniższym rozdziale przedstawiona zostanie problematyka rusztowań podejmowana przez różne ośrodki badawcze zarówno w kraju jak i za granicą. Rozpatrując problematykę rusztowań należy rozróżnić co najmniej trzy podstawowe typy rusztowań:

- rusztowania rurowo-złączkowe, w których głównym elementem są rury łączone ze sobą za pomocą złączek,
- rusztowania ramowe, których główny element stanowi rama nośna,
- rusztowania modułowe, składające się ze stojaków oraz rygli wyposażonych głowice, umożliwiające wytworzenie połączenia.

2.4.1 Badania przyczyn awarii rusztowań

Zadaniem rusztowania jest umożliwienie wykonania prac na wysokości przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa jego użytkownikom. O drugim elemencie przypominamy sobie dopiero w przypadku wystąpienia awarii lub katastrofy budowlanej, w której giną ludzie lub pociągają za sobą znaczne straty materialne. Jest to najczęstszy powód wykonywania badań rusztowań. W grudniu 2016 roku doszło do zawalenia się konstrukcji rusztowania na terenie budowy wieży chłodniczej elektrowni Fengcheng w Chinach, w wyniku którego zginęły 67 osoby. Przyczyny wypadku nie zostały jeszcze określone. Do katastrofy budowlanej z udziałem rusztowań doszło również w Gdańsku w lipcu 2001 roku, w wyniku której zginęły 2 osoby a siedem zostało rannych. Rusztowanie zostało zmontowane na czas prowadzenia prac termomodernizacyjnych. Jako wstępne przyczyny katastrofy wskazano błędnie wykonany montaż, a w szczególności ustawienie rusztowania na podmokłym gruncie bez odwodnienia. Rusztowania wykorzystywane jako konstrukcja wsporcza deskowań podlega dynamicznym formom obciążenia, wynikającym z układania mieszanki betonowej (Rys. 2.10) oraz możliwości uderzenia pojazdów poruszających się w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Pomimo specjalnego podejścia do projektowania tego typu konstrukcji, awarie w trakcie wykonywania wiaduktów drogowych pociągają za sobą największe starty finansowe. Przykładem rusztowania wsporczego deskowania, które uległo awarii w wyniku uderzenia pojazdu, jest rusztowanie użytkowane w trakcie budowy nowych wiaduktów nad autostradą A18 [29]. Jako powód wystąpienia awarii podano zbyt małą, wymaganą aktualnymi przepisami, wysokość skrajni drogowej wynoszącej 4,20 m, którą według autorów należy zwiększyć do wartości co najmniej 4,30 m.



Rys. 2.10 Przykład katastrofy budowlane rusztowań wsporczych w trakcie układania mieszanki betonowej (fot. [25])

Praca [25] o charakterystycznym tytule: *„Rusztowania – bezpieczne narzędzie czy śmiertelne zagrożenie – przepisy i praktyka”* opisuje problematykę bezpieczeństwa rusztowań stosowanych w Polsce. Wyszczególniono w niej cztery elementy, mające wpływ na bezpieczeństwo użytkowania rusztowań: produkt, projekt, montaż i użytkowanie, wskazując konieczność zaostreżenia polskich przepisów odnośnie wykonywania prac na wysokości, jak miało to miejsce we Francji po dwóch katastrofach budowlanych z udziałem rusztowań. W 1992 zawaleniu uległo rusztowanie stanowiące tymczasową trybunę w wyniku czego śmierć poniosło 18 osób, natomiast 2300 osób doznało poważnych obrażeń ciała. W 2003 roku doszło do katastrofy rusztowań w stoczni Saint-Nazaire, w wyniku której 16 osób poniosło śmierć a 29 osób doznało obrażeń.

Rusztowania ulegają również miejscowym uszkodzeniom, których skutkiem może być śmierć lub ciężkie uszkodzenie ciała. W pracy [45] opisano przypadek katastrofy z 2007 roku, w wyniku której śmierć poniosła jedna osoba, a do zdarzenia doszło w trakcie demontażu rusztowania. Uszkodzeniu uległa rama, na której zamontowano obrotowy wysięgnik wciągarki. Nieusztyniona i niezakotwiona rama doznała przeciążenia w wyniku czego doszło do zerwania trzpieni wtykowych ramy. Niestety zerwana rama pociągnęła za sobą pracownika obsługującego wciągarkę, powodując upadek z 10 piętra i śmierć na miejscu. Szereg analiz numerycznych potwierdziło przekroczenie dopuszczalnych naprężeń w obrębie trzpienia, który uległ zniszczeniu.

Niewielkie zmiany w postaci zastosowania zakotwienia do ściany oraz zastrzału w górnym węźle ramy mogłoby skutecznie zapobiec wypadkowi.

Wypadki z udziałem rusztowań skłoniły naukowców do przeprowadzenia badań mających na celu określenie przyczyn wypadków, określenia wpływu poszczególnych składników na prawdopodobieństwo ich wystąpienia [8] oraz sposobu ich zapobiegania. Badania obejmowały studium wypadków z udziałem rusztowań [89], jak również badania bezpośrednio na terenie budów [24], [82].

2.4.2 Badania pełnowymiarowych konstrukcji rusztowań

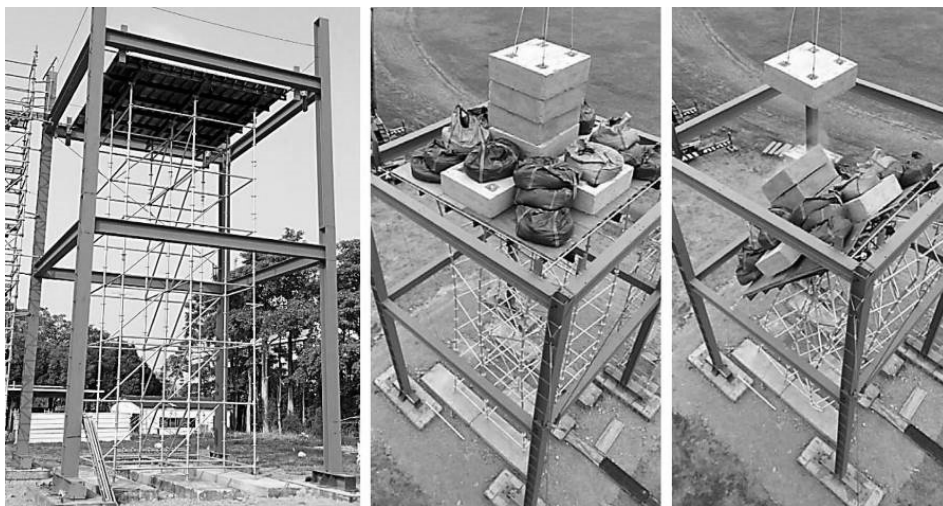
Rusztowania wsporcze deskowań podlegają największym obciążeniom a ze względu na duże wysokości przy jednocześnie małych przekrojach elementów o nośności konstrukcji decyduje obciążenie krytyczne powodujące utratę stateczności konstrukcji i jej wyboczenie. Dodatkowo tego typu rusztowania nie są kotwione co w znacznym stopniu obniża ich nośność. Przeprowadzanie badań w pełnej skali wymaga dużych nakładów finansowych oraz stanowisk badawczych, umożliwiających obciążenie układu. Większość badań w skali rzeczywistej przeprowadzanych jest w Chinach.

Przykładem badań rusztowania ramowego w pełnej skali są badania opisane w pracy [34], w której analizowano wpływ ścieżki układania mieszanki betonowej na rozkład sił w poszczególnych rurach pionowych rusztowania ramowego. Rusztowanie o wymiarach 549x686 cm i wysokości 510 cm stanowiło konstrukcję wsporczą drewnianej konstrukcji deskowania. Obciążenie mieszanką betonową symulowane było workami z piaskiem o masie 500 kg, układanych w trzech schematach ścieżki betonowania. W trakcie każdego z badań rejestrowano odkształcenia za pomocą czujników tensometrycznych rozmieszczonych na 40 rurach pionowych. Na podstawie proporcji odkształceń i znanej wartości obciążenia określano wartości sił w poszczególnych stojakach oraz stworzono grafy obrazujące rozkład sił w poszczególnych krokach obciążenia w zależności od przyjętej ścieżki obciążenia. Badania dowiodły również, że obciążenia w trakcie betonowania nie rozkładają się równomiernie na poszczególne stojaki, co może wynikać z rodzajów połączeń w deskowaniu i rusztowaniu. Największe siły w stojakach są osiąganе w trakcie betonowania a nie po wypełnieniu całej powierzchni stropu, jednakże maksymalne siły są zbliżone do wartości otrzymywanych przy założeniu obciążenia równomiernego.

Rusztowania rurowo-złączkowe, w których połączenia uzyskiwane są za pośrednictwem złączy, poddawano badaniom pełnowymiarowym i opisano w pracach [37] i [39]. Pomimo czasochłonnego montażu, tego typu rusztowania znalazły szerokie zastosowanie w Wielkiej Brytanii oraz Chinach. W pracy [39] zaprezentowano badania pełnowymiarowych konstrukcji rusztowań bez stężeń pionowych a w pracy [37] pełnowymiarowe badania rusztowań, w których występują stężenia pionowe. Obciążeniom poddano 12 układów rusztowań różniących się między sobą rozstawem rur pionowych, wysokością początkową

rury pionowej, wysokością głowic górnych, wysokością poszczególnych poziomów oraz całkowitą wysokością konstrukcji. W tego typu konstrukcjach istotnym elementem jest moment dokręcenia śrub poszczególnych złączy oraz dokładność montażu. Konstrukcja rusztowania była montowana przez pracowników budowy, wyposażonych w klucz dynamometryczny o wartości momentu dokręcenia 40 Nm. Obciążenie przykładano do konstrukcji za pośrednictwem układu belek stalowych, opartych na głowicach górnych. Badania przeprowadzano do momentu spadku siły, bez całkowitego zniszczenia ze względu na bezpieczeństwo i rozmiar konstrukcji. Ponieważ badania laboratoryjne posłużyły do weryfikacji analiz numerycznych, badania laboratoryjne obejmowały również badania węzła, dla którego określono sztywność na zginanie oraz badania materiałowe. Uzyskane na podstawie czterech próbek, wartości sztywności połączenia z wykorzystaniem złączy krzyżowych wykazywały duży rozrzut, dlatego przyjęto wartość średnią na poziomie 16 kN/rad. Zastanawiająca jest jednostka, ale taka została podana w opracowaniu. Moduł Younga stali uzyskano na poziomie 184 GPa, natomiast granice plastyczności na poziomie 374 MPa. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano uproszczony model określania stateczności konstrukcji, który może być wykorzystywany w praktyce projektowania konstrukcji. Analogiczne badania i analizy numeryczne przeprowadzono dla konstrukcji ze stężeniami pionowymi [37], przy czym badania laboratoryjne obejmowały dwa układy, różniące się między sobą występowaniem dodatkowych pól, nie podlegających obciążeniu. Badania przeprowadzone w ramach obu opracowań wykazały, że nośność konstrukcji wzrasta wraz ze wzrostem sztywności połączeń i grubości ścianki rur, natomiast maleje wraz ze wzrostem rozstawu słupków, imperfekcji i wysokości. Wzrost wysokości głowic górnych powoduje nieliniowy spadek nośności konstrukcji a zastosowanie stężeń pionowych zwiększa nośność układu nawet o 53%.

W pracy [48] opisano globalne badania konstrukcji wsporczej deskowań, wykonanej z rusztowania typu modułowego, posiadającego rozety przyspawane do stojaków oraz rygle z głowicami. Połączenie między elementami uzyskiwane jest za pomocą klina wbijanego w rozetę. Badaniom globalnym poddano konstrukcję rusztowania o wymiarach 3,6x3,6x9,9 m, w której tylko środkowy słupek był stężony w czterech kierunkach a słupki narożne nie były stężone. Na rusztowaniu umieszczono deskowanie w postaci platformy o wymiarach 4,88x4,88 m, którą zabezpieczono przed możliwością ruchu poziomego za pomocą dziewięciu rolek opartych o dwuteowniki symulujące ściany rzeczywistego obiektu. Konstrukcję obciążano symetrycznie workami z piaskiem oraz betonowymi blokami do całkowitego zniszczenia (Rys. 2.11). W trakcie badań, w celu określenia występujących sił osiowych, na czterech stojakach umieszczono czujniki elektrooporowe po obu stronach rury, natomiast wychylenia pionowe mierzono z wykorzystaniem siedmiu teodolitów.



Rys. 2.11 Globalne badania konstrukcji wsporczej deskowania (fot. [48])

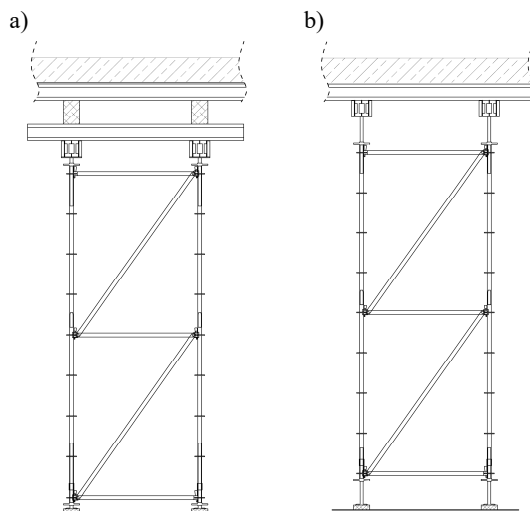
W tej samej pracy oprócz pełnowymiarowych badań konstrukcji wykonano badania laboratoryjne, obejmujące pojedyncze pole o wysokości dwóch stojaków. Badaniom poddano trzy układy: rusztowanie bez stężeń i zawleczek, bez stężeń i z zawleczkami oraz układ ze stężeniami. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że stosowanie zawleczek nie ma znaczącego wpływu na nośność rozpatrywanego układu, natomiast zastosowanie stężeń zwiększa je dwukrotnie. Badania laboratoryjne posłużyły również do weryfikacji parametrów modelu numerycznego, uwzględniającego charakter połączenia pomiędzy poszczególnymi elementami rusztowania. Badania globalne potwierdziły, że konstrukcje bez stężeń pionowych wykazują duże przemieszczenia poziome (nawet 535 mm) i w ramach bezpieczeństwa wszystkie pola powinny być stężane. Określenie obciążenia krytycznego wymaga zastosowania analizy drugiego rzędu, charakteru połączeń elementów oraz imperfekcji, od których zależy nominalna siła pozioma.

Fasadowe rusztowania bambusowe są powszechnie stosowanymi konstrukcjami w rejonie południowo-wschodniej Azji. Badania w skali rzeczywistej tego typu konstrukcji zostały opisane na przykład w pracy [91]. Ponieważ charakterystyki materiałowe są uzależnione od wilgotności elementów, w badaniach użyto typowych elementów suszonych przez okres jednego miesiąca. Konstrukcje w postaci dwóch pól i wysokości 900 cm, i w czterech różnych konfiguracjach rozmieszczenia kotwienia, obciążano workami z piaskiem do momentu utraty stateczności z jednoczesnym mierzeniem wartości siły występującej w słupku środkowym. W wyniku obciążania, w każdym rozpatrywanym przypadku dochodziło do wyboczenia słupka wewnętrznego a dalsze obciążanie prowadziło do lokalnych uszkodzeń

w postaci poślizgu w węźle lub zgniecenia poziomego elementu bambusowego. Nie zaobserwowano całkowitego zawalenia się rusztowania pomimo obciążenia rusztowania 60 workami o masie 20 kg każdy. W pracy [91] stwierdzono, że rozmieszczenie kotew ma istotny wpływ na stateczność konstrukcji i nie powinny być demontowane w trakcie użytkowania rusztowania. Analizy numeryczne, skalibrowane na podstawie przeprowadzonych badań, mogą być wykorzystywane w procesie projektowania bambusowych konstrukcji rusztowań.

2.4.3 Badania laboratoryjne pojedynczych układów rusztowań

Badania laboratoryjne wykonywane są w mniejszej skali i najczęściej dotyczą pojedynczych układów rusztowań, w których określana jest siła krytyczna, po przekroczeniu której następuje zniszczenie układu w danej konfiguracji. W pracy [50] przeanalizowano szereg konfiguracji jedno- i dwupłaszczyznowych ramowych rusztowań wsporczych wykonanych z typowych ram rusztowań stosowanych w Chinach. Badania zróżnicowano ze względu na liczbę pól, układ pól w pionie, rozstaw pól oraz uszkodzenia. Uwzględnienie uszkodzeń polegało na pozyskaniu losowo wybranych, wielokrotnie użytkowanych, elementów bezpośrednio z budowy. W przypadku każdej konfiguracji obciążenie przykładano do momentu utraty stateczności. Następnie odcinano konstrukcję, demontowano, montowano ponownie i obciążano. Ponowne obciążenie symulowało wielokrotność użytkowania. Przeprowadzone badania dostarczyły informacji na temat nośności poszczególnych układów, jak również przemieszczeń w nich występujących co może być szczególnie istotne dla projektantów. Ponadto opracowano współczynnik zmniejszający nośność ze względu na wielokrotność użytkowania. Rusztowania, pozyskane bezpośrednio z placu budowy, miały nośność mniejszą niż elementy nowe, ale większą niż elementy nowe poddane ponownemu obciążeniu, co świadczy o ich dobrym stanie. Podobne badania przeprowadzono dla rusztowań o dużo większych charakterystykach wytrzymałościowych, wynikających z zastosowanych przekroi [49]. Badania przeprowadzano z użyciem jednego pola rusztowania składającego się z dwóch segmentów o wysokości 1,5 m. W badaniach różnicowano wysokość podstawki dolnej jak również głowicy górnej. Również w tym przypadku, na podstawie ponownego obciążenia układu, wyznaczono współczynnik zmniejszający nośność ze względu na wielokrotność użytkowania na poziomie $\mu = 0,63$. Co ważne wskazano że stosowanie dodatkowych elementów (Rys. 2.12 a) w celu uzyskania zadanej wysokości deskowania, potrafi obniżyć nośność konstrukcji nawet o 70%. Dużo lepszym rozwiązaniem jest regulowanie wysokości za pomocą rozwiązań systemowych w postaci podstawek i głowic regulowanych (Rys. 2.12 b).



Rys. 2.12 Uzyskanie właściwej wysokości konstrukcja wsporcza deskowania:
a) z wykorzystaniem elementów niesystemowe b) z wykorzystaniem podstawek i głowic regulowanych

W przypadku pracy [47] analizowano wpływ obciążenia mimośrodowego na nośność konstrukcji z uwzględnieniem występowania poprzeczek na najniższym poziomie. Badania laboratoryjne obejmowały odwrócone, dwupoziomowe pole rusztowania ramowego, z zastosowaniem przesuwnych podpor przegubowych w postaci blachy i kul stalowych, modelujących możliwość przesuwu najwyższej ramy rusztowania. Model numeryczny, skalibrowany na podstawie badań laboratoryjnych, posłużył do analiz rusztowań wielopoziomowych i określenia wpływu obciążenia mimośrodowego, występowania poprzeczki dolnej oraz przyjętych warunków brzegowych, na wartość siły krytycznej. Porównanie wartości siły krytycznej, uzyskanej w trakcie badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych, zostało zawarte w pracy [88]. Badaniom laboratoryjnym poddano czteropoziomowe pojedyncze pole rusztowania wykonane z czterech różnych systemów rusztowań ramowych, występujących w Stanach Zjednoczonych. Analizy numeryczne wykonano z wykorzystaniem komercyjnego systemu ANSYS, który według autora artykułu może być z powodzeniem stosowany przez biuro projektowe rusztowań w celu zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcji i jej odpowiedzialnego projektowania. Podobne badania przeprowadzono w pracy [90], w której badaniom poddano pojedyncze jedno i dwupoziomowe pole rusztowania ramowego. W pracy dodatkowo analizowano wpływ przyjętych warunków brzegowych, zarówno podstawek jak i głowic, na wartość siły krytycznej. Dowiedziono, że w zależności od przyjętych warunków brzegowych w analizie numerycznej, wartość siły krytycznej może wynosić od 50% do 120% wartości otrzymanej na drodze badań doświadczalnych. Jeżeli nie

mamy danych odnośnie sposobu zablokowania możliwości przesuwu poziomego góry rusztowania oraz sposobu podparcia, bezpieczniejszym podejściem w projektowaniu jest stosowanie podpór przegubowych i modelowanie góry rusztowania jako swobodnej. Istotnym elementem decydującym o stateczności, szczególnie w rusztowaniach wielopoziomowych, są stężenia zmniejszające długość wyboczeniową a tym samym zwiększające dopuszczalne obciążenia nawet pięciokrotnie.

Pojedyncze układy rusztowań modułowych, umożliwiające rozbudowę konstrukcji wsporczej w dowolnym kierunku również były obiektem badań laboratoryjnych. Tak, jak w przypadku rusztowań ramowych, w pracy [54] przeprowadzono szereg badań pojedynczych układów modułowych o wymiarze pola 1525x1525 mm, różniących się między sobą sposobem posadowienia, występowaniem stężeń pionowych oraz lokalizacją połączeń czopowych. Badania polegały na obciążaniu układu rusztowania do momentu osiągnięcia siły krytycznej, powodującej wyboczenie konstrukcji. W trakcie badań mierzono wartości odkształceń w stojakach oraz stężeniach za pomocą czujników elektrooporowych, na podstawie których określano wartości sił osiowych. Wykorzystując czujniki LVDT oraz teodolity, mierzono wartości przemieszczeń trawersy oraz przemieszczenia poziome stojaków.

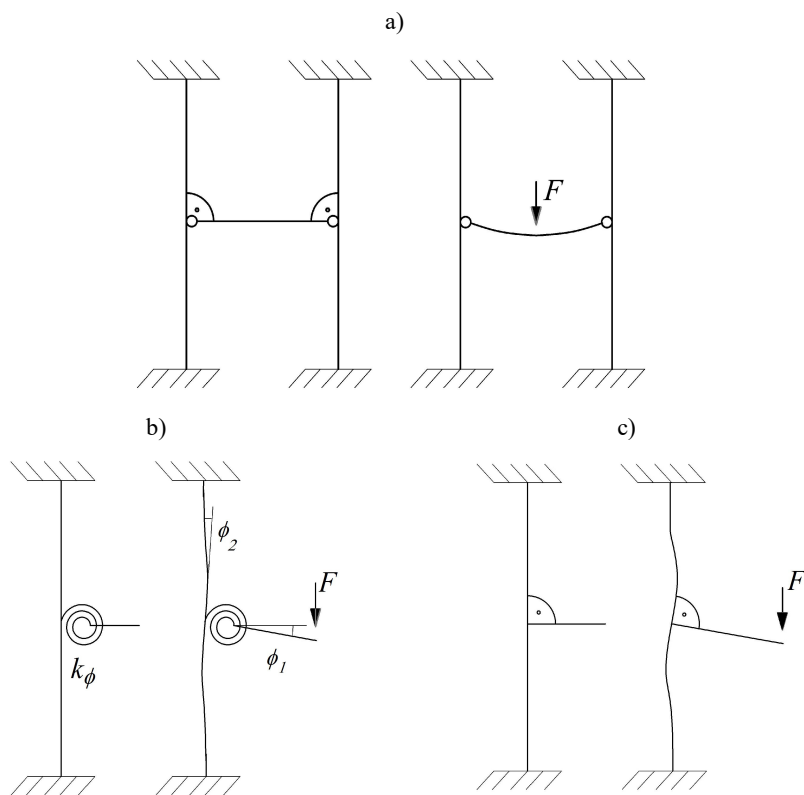
W przypadku każdej konfiguracji rusztowania przeprowadzono dwa tożsame badania i wyznaczano wartość średnią siły krytycznej. Na podstawie badań wysunięto następujące wnioski: w przypadku przegubowego podparcia zarówno dolnej części jak i górnej nośność układu spada o 25%, zróżnicowanie wysokości posadowienia oraz lokalizacja połączenia czopowego nie ma istotnego wpływu dla stateczności konstrukcji, natomiast zastosowanie stężeń zwiększa wartość siły krytycznej 2,5-krotnie. Nośność rusztowania trzypoziomowego ze stężeniami jest większa niż pola dwupoziomowego bez stężeń, co wynika ze zmniejszenia długości wyboczeniowej stojaków rusztowania.

2.4.4 Badania węzłów rusztowań

Ze względu na duże zróżnicowanie systemów rusztowań oraz rozwiązań stosowanych do wytwarzania połączenia między poszczególnymi elementami rusztowania, w literaturze można odnaleźć szereg badań laboratoryjnych węzłów zarówno rusztowań rurowo-złączkowych, jak i rusztowań modułowych. Stworzenie modelu numerycznego wymaga określenia i zastosowania jednego z typów połączenia:

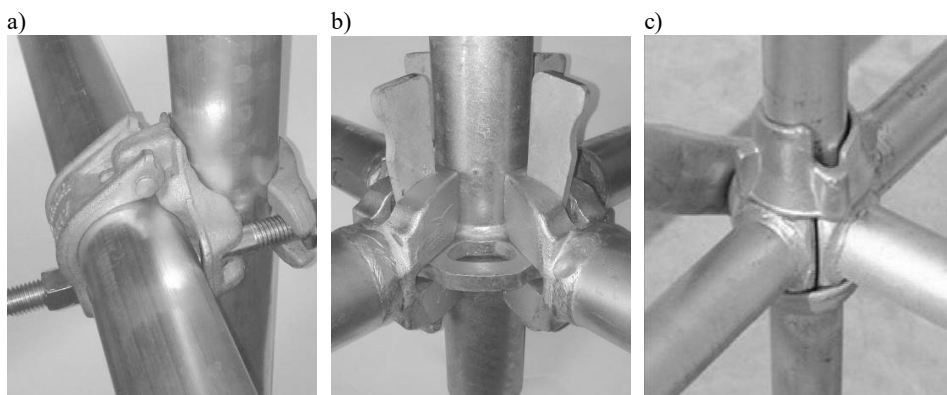
- przegubowe (Rys. 2.13 a),
- półsztywne (podatne) (Rys. 2.13 b),
- sztywne (Rys. 2.13 c).

W rusztowaniach połączenia występują zarówno pomiędzy elementami pionowymi, jak i pionowymi i poziomymi.



Rys. 2.13 Schematy połączeń węzłowych: a) przegubowe, b) półsztywne, c) sztywne

Najbardziej rozpowszechnionym badaniem węzłów rusztowań są badania węzła rusztowania rurowo-złączkowego (Rys. 2.14 a). Procedura badań została szczegółowo opisana w obecnie obowiązujących normach takich, jak [72] i [73]. Ze względu na szerokie zastosowanie tego typu rusztowań już w latach 70 ubiegłego wieku wykonywano badania złączy rurowych [35]. W przytoczonej pracy przeanalizowano szereg obciążeń, jakim może być poddany węzeł w postaci złączy krzyżowych i obrotowych. Złączki poddawano obciążeniu powodującemu poślizg, rozerwanie i zginanie. Każdorazowo uzyskiwano krzywe zależności siła-przemieszczenie lub moment-obrót. Wykonując badania różnicowano moment dokręcenia śrub od wartości 10 Nm do 80 Nm, jak również przeanalizowano wpływ występowania smaru technicznego stosowanego w procesie produkcji nowych rur i złączy. Połączenie w postaci złączy rurowych zakwalifikowano do połączeń typu półsztywnego i jako takie powinny być traktowane w trakcie wykonywania analiz numerycznych całych konstrukcji.



Rys. 2.14 Węzły rusztowań: a) rurowo-złączkowych, b) modułowych typu rozeta-klina, c) modułowych (fot. [28])

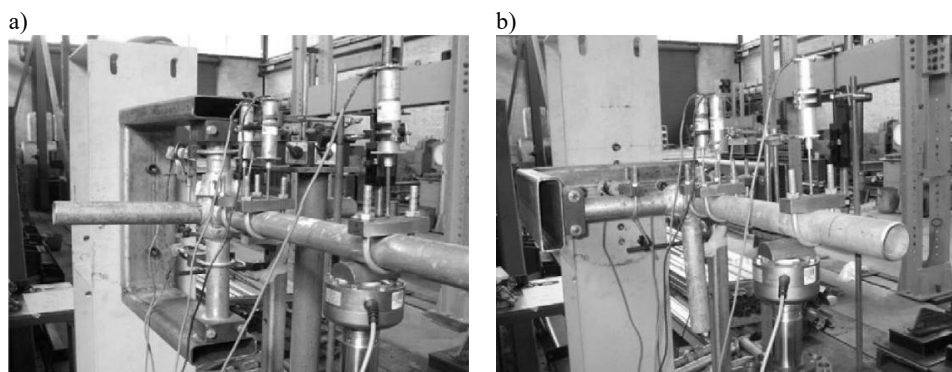
Badania węzła rusztowania rurowo-złączkowego, mające na celu określenie sztywności oraz odporności na przesuw, zostały opisane w pracy [28]. Wykonując badania uwzględniono takie zmienne, jak wartość momentu dokręcenia śrub, stan łączonych elementów (stare i nowe), formy obciążenia (poślizg i obrót) w różnych konfiguracjach węzła, wytworzonego przez złącze krzyżowe (liczba złączy). Badania odporności na poślizg wykonywano z wykorzystaniem prasy hydraulicznej oraz czujników przemieszczeń. Pomiary wykonywano do momentu wystąpienia poślizgu lub zniszczenia złącza. W wyniku badań otrzymywano krzywe zależności siła-przemieszczenie, na podstawie których, zgodnie z przepisami obowiązującymi w Chinach, określano dopuszczalne obciążenia w momencie uzyskania podczas badań przemieszczenia równego 7 mm. W przypadku węzła z jednym złączem, odporność na poślizg, przy momencie dokręcenia 40 Nm, określono na poziomie 14,87 kN. Obciążanie węzła momentem zginającym realizowano obciążając rurę poziomą ciężarem odważnika o masie 10 kg, zawieszonym na stałym ramieniu 1 m względem węzła. Czujnikami przemieszczeń, umieszczonymi w znanej odległości 200 mm, mierzono wartości przemieszczeń rury pionowej i poziomej. Na podstawie odczytów z tych czujników określano kąt obrotu. Do zniszczenia węzła najczęściej dochodziło w wyniku pęknięcia złączki, a ze względu na duży rozrzut otrzymanych wyników, sztywność połączenia na obrót określono w przedziale $5\div 29$ kNm/rad. Przeprowadzono również badania niskocyklowe, które wykazały spadek sztywności połączenia w wyniku wielokrotnego użytkowania. Czujniki elektrooporowe klejone w obrębie złączy, wskazywały duże amplitudy odkształceń, mogące świadczyć o powstawaniu odkształceń plastycznych, obniżających sztywność.

W wyniku przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazano, że odporność na poślizg oraz sztywność na obrót wzrasta wraz ze wzrostem wartości

dokręcenia śrub, ale może powodować pękanie złączy. Wiek złącza obniża właściwości mechaniczne rozpatrywanego węzła, jednak ze względu na wzrost chropowatości powierzchni w przypadku starszych rur uzyskano większą odporność na poślizg przy jednoczesnej dużej deformacji rur. Do zniszczenia złącza dochodzi w obrębie śrub i miejsca połączenia obejmują górnej i dolnej i są to miejsca, na które należy zwracać szczególną uwagę. Powołując się na wytyczne zawarte w europejskiej normie, odnoszącej się do projektowania węzłów konstrukcji stalowych [70], rozpatrywane połączenia powinny być traktowane jako półsztywne. W zależności od przyjętego rozwiązania (Rys. 2.14) węzły rusztowań mogą posiadać różną charakterystykę. W pracy [78] przeanalizowano wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez autorów i postawiono następujące wnioski:

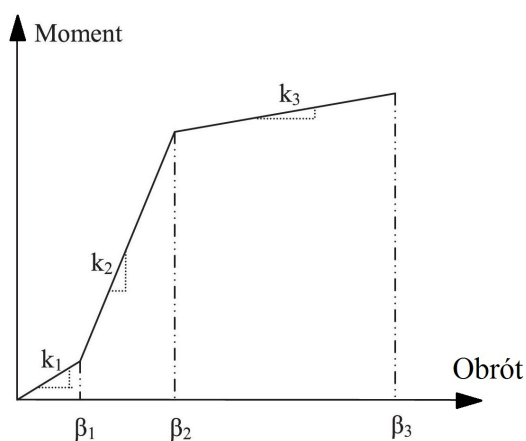
- węzły mogą wykazywać różną charakterystykę w zależności od kierunku i zwrotu wektora przyłożonego momentu (zgodnie lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara),
- zależność moment-obrót ma charakter nieliniowy,
- połączenie w początkowej fazie obciążania może wykazywać luzę pozwalającą na obrót nawet na poziomie $0,05 \div 0,1$ rad,
- sztywność połączenia spada wraz ze wzrostem obciążenia, ze względu na odkształcenia plastyczne, występujące nawet przy małych obciążeniach,
- w trakcie odciążania węzeł wykazuje większą sztywność,
- sztywność na zginanie oraz skręcanie jest bardzo mała i połączenie można traktować jako przegubowe.

Węzeł typu modułowego (Rys. 2.14 c), w którym połączenie jest uzyskiwane z wykorzystaniem obejm górnych i dolnych, był obiektem badań opisanych w pracy [15]. Węzeł poddawano obciążeniu w postaci momentu zginającego o wektorze zgodnym z osią pionową z (Rys. 2.15 b) oraz z osią poziomą y (Rys. 2.15 a). W badaniach analizowano układy z różną liczbą elementów połączonych w jednym węźle (dwu, trzy lub czteroelementowe) oraz poddanych działaniu momentu z uwzględnieniem dwóch zwrotów wektora. Każdorazowo badania polegały na przyłożeniu obciążenia w postaci siły skupionej do rygła poziomego tworzącego węzeł ze sztywno zamocowanym stojakiem. Badania przeprowadzano w jednym cyklu obciążenia do momentu spadku siły lub wystąpienia uszkodzenia. Wartość momentu obliczano na podstawie wartości przyłożonej siły na znanym ramieniu, natomiast wartość kąta obrotu określano na podstawie pomierzonych wartości przemieszczeń rejestrowanych przez czujniki LVDT, które były rozmieszczone na ryglu oraz stojaku. W wyniku przeprowadzonych badań 172 próbek określono sztywności połączenia w obu kierunkach. Wykres zależności moment-obrót podzielono na trzy odcinki, przypisując im odpowiednie sztywności k_1 , k_2 i k_3 oraz wartości odpowiadającym im obrotów β_1 , β_2 β_3 (Rys. 2.16) na granicach przedziałów, w których wyznaczono te sztywności.



Rys. 2.15 Stanowisko badawcze węzła modułowego: a) zgodnie z osią pionową,
b) zgodnie z osią poziomą (fot. [15])

Pierwszy z odcinków odpowiada za luzy występujące w połączeniu, drugi jest tożsamy ze sztywnością początkową, natomiast trzeci odcinek jest związany ze sztywnością po wystąpieniu odkształceń plastycznych.



Rys. 2.16 Trzyodcinkowy wykres zależności moment-obrót

Wartości uzyskane dla węzła czteroelementowego przedstawiono w Tab. 2.2. Przeprowadzone badania wskazały, że sztywność węzła względem osi pionowej (M_z) jest dużo mniejsza niż sztywność na zginanie względem osi poziomej (M_y). Największą sztywność połączenia uzyskuje się w przypadku węzła czteroelementowego a podane wartości sztywności mogą zostać wykorzystane w procesie projektowania konstrukcji.

Tab. 2.2 Wartości sztywności węzła czteroelementowego ([15])

Wektor momentu	sztywność [kNm/rad]			kąt obrotu [rad]		
	k_1	k_2	k_3	β_1	β_2	β_3
M_y	39	102	5,3	0,014	0,036	0,16
M_z	15	7,5	0,8	0,020	0,040	0,10

Całkowicie inne podejście do problematyki określania właściwości węzłów rusztowań modułowych, w których połączenie uzyskiwane jest z wykorzystaniem klinów (Rys. 2.14 b), przedstawiono w przytaczanej już pracy [54]. W celu określenia wartości sztywności węzła, wytworzonego pomiędzy stojakiem a rygłem poziomym, przeprowadzono szereg analiz numerycznych pojedynczego pola rusztowania przy różnych wartościach sztywności węzła. Porównanie wartości, uzyskanej siły krytycznej, z tożsamymi badaniami laboratoryjnymi pozwoliło na określenie sztywności połączenia na poziomie 3434 kNm/rad. Co ciekawe autorzy w pracach [48] oraz [55] stwierdzają, że połączenie stojak-rygiel można traktować jako sztywne, połączenie pomiędzy stojakami w postaci trzpienia jest połączeniem półsztywnym a połączenie między stojakiem a stężeniem jest połączeniem przegubowym. Dość duża różnica występuje w przypadku wartości sztywności połączenia stojaków pionowych, które wynoszą odpowiednio 4,9 kNm/rad w pracy [48], 5886 kNm/rad w pracy [54] oraz 785 kNm/rad w pracy [55], pomimo tego, iż w każdej z prac występuje rusztowanie modułowe z połączeniem klinowym. Różnice te mogą wynikać z faktu, iż rozpatrywane rusztowania różniły się średnicą rury stojaka.

W przypadku rusztowań bambusowych newralgicznym elementem są węzły uzyskiwane za pomocą sznurka oplatającego łączone elementy. Charakterystyki takiego połączenia są silnie uzależnione od jakości wykonania, oraz mogą ulegać zmianie w wyniku zmiany parametrów wilgotnościowych. W pracy [1] możemy odnaleźć zarówno badania laboratoryjne, jak i analizy numeryczne prototypowego węzła wykonanego z PVC, który mógłby znaleźć zastosowanie w bambusowych konstrukcjach rusztowań. W ramach badań laboratoryjnych przeprowadzono testy określające charakterystyki materiałowe elementów bambusowych i PVC, badania samego węzła, badania połączenia łączników i elementów bambusowych oraz badania całej konstrukcji.

2.4.5 Inne badania rusztowań

W przypadku rusztowań wykorzystywanych do prac remontowych lub wykończeniowych elewacji największy problem stanowią kotwienia. Ich rozmieszczenie oraz liczba, znacznie ograniczająca front robót, wynika z konieczności przeniesienia obciążeń prostopadłych do elewacji. Głównym obciążeniem prostopadłym do elewacji jest obciążenie wiatrem, szczególnie

w przypadku rusztowań posiadających okrycia ochronne w postaci siatek lub plandek. W pracach [27], [86], [87] oraz [92] można odnaleźć wnioski z badań w tunelach aerodynamicznych, przeprowadzanych na modelach konstrukcji rusztowań z zakryciem ochronnym oraz bez, ustawionych przy budynku o różnych współczynnikach wypełnienia elewacji. W każdej pracy określano rozkład współczynnika ciśnienia na powierzchni rusztowania lub siatki ochronnej przy różnych kątach natarcia wiatru. Współczynnik aerodynamiczny jest jedną z podstawowych wartości niezbędnych do prawidłowego obliczenia obciążenia wywieranego przez wiatr na rusztowanie. W przypadku strony nawietrznej uzyskano wartości współczynnika większe niż zalecane w normach, szczególnie w obrębie naroży oraz ostatnich kondygnacji rusztowania. Stopień wypełnienia elewacji budynku (konstrukcja szkieletowa lub pełna elewacja z oknami) ma wpływ na rozkład współczynnika ciśnienia szczególnie na powierzchniach prostopadłych do kierunku wiatru. Budynki sąsiednie mogą zwiększać wartość obciążenia wiatrem, szczególnie w przypadku odległości między budynkami wynoszącej 1,5-krotność szerokości budynku stojącego przed rusztowaniem, nawet o 66%.

W związku z awariami rusztowań, tematyką podejmowaną przez naukowców jest opracowanie systemu monitoringu rusztowań mającego na celu wczesne ostrzeganie użytkowników rusztowań. System ostrzegania oparty na rozmieszczeniu czujników przemieszczeń oraz odkształceń został przedstawiony w pracy [94]. Lokalizację czujników dobrano na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych pełnych konstrukcji wsporczych deskowań wykonanych z rusztowań ramowych oraz szeregu analiz numerycznych. Parametrami określającymi stateczność konstrukcji są przemieszczenia poziome ($u < u_{all} = 10 \text{ mm}$) oraz wartości sił w stojakach ($P = EA\varepsilon < P_{all}$) mogące doprowadzić do utraty stateczności. Przedstawione rozwiązanie może być zastosowane w rzeczywistych konstrukcjach. Monitoring stanu połączenia elementów systemu modułowego (Rys. 2.14 c), mającego na celu wskazanie ewentualnych luzów wynikających z niedokładności montażowych lub drgań konstrukcji został przedstawiony w pracach [97], [96]. System oparty jest na czujnikach piezoelektrycznych rozmieszczonych na łączonych elementach, mierzących stratę energii, wynikającą z występujących luzów w węźle. Opracowana metodyka może być stosowana w celu wykrywania luzów, jednak badania przeprowadzano w warunkach laboratoryjnych i budzą one wątpliwości co do możliwości ich wykorzystania w rzeczywistych konstrukcjach.

Montaż rusztowania polega na łączeniu ze sobą elementów składowych systemu. Połączenie pomiędzy głównymi elementami nośnymi, którymi są rury pionowe, uzyskiwane jest najczęściej z wykorzystaniem trzpienia wspawanego w jedną z rur. Tego typu połączenia jest rozwiązaniem wygodnym z punktu widzenia montażu, jednakże, ze względu na występujące luzy, może prowadzić do powstania odchyłeń między elementami a tym samym odchylenia od pionu

całej konstrukcji. Oczywiście brak pionowości może wynikać również z błędnego montażu oraz zakrzywienia elementów. Każda z konstrukcji posiada imperfekcje mające wpływ na jej nośność. W pracy [15] przeprowadzono badania konstrukcji rusztowania modułowego polegające na określeniu występujących imperfekcji. W celu określenia odchylenia prostoliniowości elementów użyto liniałów dostosowanych do badanego systemu, za pomocą teodolitów określono odchylenia pomiędzy poszczególnymi poziomami stojaków, natomiast za pomocą suwmiarki określono mimośród obciążenia, występujący pomiędzy głowicami konstrukcji rusztowania a konstrukcją deskowania. Przebadana konstrukcja rusztowania spełniała wymogi zawarte w przepisach obowiązujących w Australii zarówno w kwestii prostoliniowości elementów (dopuszczalna wartość maksymalna – $L_h/1000$), odchylenia od pionu (dopuszczalna wartość maksymalna – $H/400$) oraz mimośrodu obciążenia (dopuszczalna wartość maksymalna – 40 mm), uzyskując średnie wartości odpowiednio $L_h/2080 = 0,00048$ m, $H/625 = 0,0016$ m oraz 18,75 mm, gdzie L_h to wysokość elementu a H to wysokość rusztowania. Autorzy artykułu jednoznacznie wskazują, że w przypadku innych konstrukcji wartości imperfekcji mogą się znacznie różnić, ponieważ są uzależnione od zastosowanego systemu, użytych materiałów, jakości montażu jak również stopnia zużycia elementów.

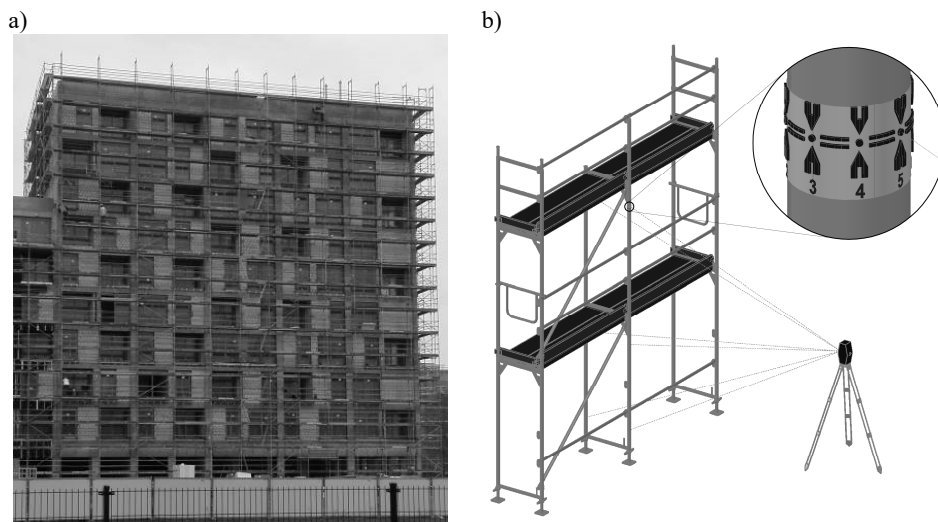
Badania konstrukcji rusztowań są przeprowadzane również bezpośrednio na terenie budów, na których są użytkowane. Pomimo szeregu przepisów dotyczących warunków wykonania i użytkowania, rzeczywiste konstrukcje nie zawsze spełniają wymagania w zakresie ich bezpieczeństwa. Rusztowanie może być miejscem katastrofy, wypadku bądź sytuacji niebezpiecznej. Przyczyny tych zdarzeń mogą być różne – techniczne, społeczne, organizacyjne etc. Przykładem pracy, w której przeprowadzono badania jakościowe obejmujące 105 konstrukcji rusztowań na terenie Hiszpanii jest praca [82]. Badania prowadzono w 2007 roku i analizowano w nich konstrukcje rusztowań systemowych i niesystemowych pod względem jakościowej oceny warunków bezpieczeństwa. Analizując rusztowania zwracano uwagę na takie elementy jak: stężenia, kotwienie, krawężniki, oporęczowanie, drabiny, pomosty, belki poprzeczne, poszerzenia oraz posadowienie. W przypadku każdej konstrukcji dokonywano wizualnej oceny wyżej wymienionych elementów pod względem poprawności ich montażu oraz stanu technicznego, oraz za pomocą liny określano poprawność ustawienia rusztowania w kierunku poziomym i pionowym. Każdy z elementów oceniano w pięciostopniowej skali. Rusztowania systemowe wykazały dużo wyższy poziom bezpieczeństwa uzyskując całkowity wynik na poziomie 4,19 w stosunku do rozwiązań niesystemowe z wynikiem 1,80. W obu przypadkach najczęściej zastrzeżeń budziła jakość wykonania posadowienia rusztowania. Rusztowania niesystemowe uzyskały lepszy wynik niż systemowe pod względem zastosowanych stężeń co może wynikać z konieczności uzyskania stateczności konstrukcji, którą zapewniają głównie stężenia.

Badania mające na celu określenie statystycznej korelacji pomiędzy możliwością upadku z wysokości a takimi elementami jak wady konstrukcyjne, prowadzony nadzór, uprawnienia monterów rusztowań, poziom skomplikowania, położenie geograficzne, wielkość oraz liczba użytkowników zostały przedstawione w pracy [24]. Badania w 2001 i 2002 roku przeprowadzono na 113 rusztowaniach zlokalizowanych we wschodniej części Stanów Zjednoczonych. Badania przeprowadzano w formie listy pytań zadawanych bezpośrednio na budowie oraz wizji lokalnej. W 30 przypadkach stwierdzono wady konstrukcyjne takie, jak brak kotwienia, błędne posadowienie, brak stężeń lub nadmierne obciążenie konstrukcji. 36 konstrukcji zakwalifikowano jako nieakceptowalne, z czego prawie trzy czwarte zagrażało życiu. Na podstawie przeprowadzonych analiz statystycznych przedstawiono następujące zalecenia mające na celu zwiększenie bezpieczeństwa prac wykonywanych z wykorzystaniem rusztowań:

- zlecanie montażu zewnętrznej firmie monterskiej,
- zatrudnienie na stałe osoby przeszkolonej do nadzoru prac wykonywanych na rusztowaniach,
- dostosowanie optymalnych rozwiązań (inne rozwiązania niż rusztowania ramowe),
- wdrożenie metody kontroli czterech czynników: wypełnienie pomostami, dostęp do miejsca pracy, oporęczownie oraz kotwienie.

Aktualnie w Polsce, w ramach projektu nr 244388 „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych, prowadzone są badania rzeczywistych konstrukcji rusztowań (Rys. 2.17 a). Autor niniejszego opracowania jest jednym z wykonawców projektu, w ramach którego oprócz szczegółowej inwentaryzacji konstrukcji rusztowania, prowadzone są badania parametrów środowiskowych związanych z temperaturą, nasłonecznieniem, hałasem, prędkością wiatru i drganiami. Badania obejmują 120 rusztowań na terenie całej Polski i wykonywane są przez pięć zespołów w okresie pięciu dni roboczych w odniesieniu do każdej konstrukcji. Istotnym nowatorskim elementem badań są pomiary rzeczywistych imperfekcji (Rys. 2.17 b) wykonywane za pomocą tachimetru i znaczników nanoszonych na słupki rusztowania. Oprogramowanie stworzone na potrzeby projektu umożliwia generowanie modelu z rzeczywistymi trójwymiarowymi niedokładnościami montażu głównych elementów nośnych jakimi są ramki rusztowania. Dodatkowymi elementami badań są badania gruntu, na którym ustawiono rusztowanie, badania nacisku słupka rusztowania na podłoże gruntowe, badania nośności kotew oraz występujące uszkodzenia. Ponieważ obiektem badań są rusztowania ramowe, uzyskane wyniki nie będą wykorzystywane w niniejsze pracy, której tematem są węzły rusztowań

modułowych, charakteryzujące się inną specyfiką pracy. Doświadczenie zdobyte w ramach projektu oraz metodyka badań mogą być w przyszłości wykorzystana do badań rzeczywistych konstrukcji rusztowań modułowych.



Rys. 2.17 Badania rusztowań bezpośrednio na terenie budowy: a) przykładowe rusztowanie, b) schemat pomiarów rzeczywistych imperfekcji

Rusztowania znalazły swoje zastosowanie również jako elementy konstrukcyjne tymczasowych trybun, montowanych w trakcie wydarzeń kulturalnych lub sportowych. Ze względu na specyficzne wykorzystanie, tego typu konstrukcje narażone są na dynamiczne formy obciążenia, mogące doprowadzić do zniszczenia konstrukcji. W celu niedopuszczenia do wystąpienia rezonansu konieczne jest właściwe określenie częstości drgań własnych konstrukcji. Przykładem pracy, w której przeprowadzono badania laboratoryjne konstrukcji tymczasowych trybun i analizowano wpływ zastosowanego modelu na uzyskaną wartość częstości drgań własnych, jest praca [11]. W obrębie tymczasowych trybun o wymiarach 8,30x6,00x4,50 m, zmontowanych przez firmę zewnętrzną, przeprowadzono pomiary w 54 punktach za pomocą dwóch czujników przyspieszeń. Drgania konstrukcji wymuszano z użyciem młotka modalnego. Ze względu na różnorodność występujących połączeń, właściwe zamodelowanie konstrukcji i określenie częstości drgań własnych jest znacznie utrudnione. W przypadku rozpatrywanej konstrukcji pierwszą postać drgań własnych uzyskano w kierunku równoległym (wzdłuż siedzisk) częstotliwością 5,74 Hz. Właściwe modelowanie tymczasowych trybun wymaga uwzględnienia w modelu numerycznym siedzisk znacznie zwiększających sztywność konstrukcji w kierunku równoległym oraz podatnego charakteru połączeń.

2.4.6 Analizy numeryczne

Przeprowadzenie analiz numerycznych, odzwierciedlających zachowanie konstrukcji rusztowania, wymaga uzyskania informacji na temat charakterystyk materiałowych, charakterystyk połączeń, warunków brzegowych, występujących niedokładności układu. Informacje te pozyskiwane są na drodze badań laboratoryjnych, których przykłady zostały opisane w poprzednich akapitach. Zakres pozycji literaturowych, w których opisane są analizy numeryczne jest bardzo duży, dlatego też w pracy przytoczone zostaną przykładowe prace wskazujące zakres i różnorodność dotychczas przeprowadzonych analiz konstrukcji rusztowań.

Badania węzłów rusztowań rurowo-złączkowych zaprezentowane w pracy [28], zostały wykorzystane przez autorów w analizach numerycznych, opisanych w pracy [38], i obejmujących analizy stateczności konstrukcji wykonanych z tego typu rusztowań. Analizy zostały poprzedzone dodatkowymi badaniami laboratoryjnymi całych konstrukcji, w których zastosowano trzy typy przebadanych poprzednio węzłów, wykonanych z nowych elementów. Analizy numeryczne, wykonane w programie ANSYS, uwzględniały nieliniowość materiałową, geometryczną oraz imperfekcje, które zostały określone na poziomie 0,05 m zgodnie z pierwszą formą wyboczenia uzyskaną w analizach liniowych. Węzły zdefiniowano jako podatne o sztywności na obrót równej 22,58 kNm/rad. Wartości siły krytycznej uzyskanej na drodze badań laboratoryjnych różniły się w stosunku do analiz maksymalnie o 11%. Dzięki zastosowaniu czujników elektrooporowych oraz czujników przemieszczeń, rozmieszczonych na konstrukcji rusztowania, możliwe było porównanie zarówno wartości, jak i przebiegu krzywych siła-przemieszczenie oraz siła-naprężenie. W przypadku węzła posiadającego małą odporność na poślizg (pojedyncze złącze) o nośności całej konstrukcji decyduje nośność węzła.

W normach, jak również dostępnych pracach, możemy odnaleźć różne sposoby określania jednej z podstawowych własności konstrukcji rusztowań – sztywność węzła na obrót. Autorzy pracy [78] przeanalizowali różne metody wyznaczania jej wartości, mającej wpływ na nośność całej konstrukcji. Wykorzystując badania laboratoryjne przeprowadzone w poprzednich pracach, przeanalizowano sześć metod wyznaczania wartości sztywności na obrót w zakresie nośności charakterystycznej od 0 do 0,97 kNm:

- aproksymacja wyników pomiarów wielomianem drugiego stopnia (dokładny przebieg),
- przyjęcie jako sztywność stałej sztywności początkowej (otrzymana wartość sztywności – 32 kNm/rad),
- przyjęcie sztywności jako stałej wartości określonej w trakcie odciążania (otrzymana wartość sztywności – 65 kNm/rad),
- sztywność określana zgodnie z normą EN 12811-3 [65] (aproksymacja pomiarów dwoma prostymi),

- sztywność określana według procedury odnoszącej się do wielopoziomowych regałów paletowych – Federation Européenne de la Manutention. FEM 10.2.02. The design of static steel pallet racking (otrzymana wartość sztywności – 10,65 kNm/rad),
- sztywność określana według procedury odnoszącej się do wielopoziomowych regałów paletowych – SEMA Code of practice for static racking (UK) (otrzymana wartość sztywności – 7,82 kNm/rad).

Przeprowadzone analizy w programie LUSAS wskazały, że podejście zgodne z SEMA powoduje niepotrzebne obniżenie obliczeniowej nośności konstrukcji i może być stosowane w bardzo zachowawczej analizie. Natomiast wyniki uzyskane z zastosowaniem procedury, opisanej w FEM oraz normie EN 12811 3, są zbliżone do wyników uzyskanych w badaniach i mogą być stosowane w praktyce projektowej. Ponieważ połączenie może wykazywać początkowe luzy, oprócz określenia sztywności, stworzony dwuwymiarowy model numeryczny umożliwiał wprowadzenie luzu w zakresie zgodnym z otrzymanym w badaniach laboratoryjnych. Początkowe luzy mają istotny wpływ na nośności w przypadku konstrukcji obciążonych w poziomie, jednakże ich wpływ można zminimalizować stosując stężenia w rozpatrywanej, obciążonej płaszczyźnie.

Badania przeprowadzone w skali rzeczywistej, opisane w pracy [34], posłużyły do weryfikacji modelu numerycznego, w którym rozpatrywano nierównomierne obciążenie mieszanką betonową [46]. Badania laboratoryjne prostokątnego układu rusztowania poddanego obciążeniu równomiernemu posłużyły do skalibrowania modelu numerycznego, wykonanego w programie GMNAF (Geometry and Material Nonlinear Analysis of Frame). Po uzyskaniu zgodnych wyników, przeanalizowano szereg schematów ustawienia rusztowania w kształcie litery L oraz U, różniących się między sobą liczbą pól. Każdy z tych układów poddano obciążeniu równomiernemu. O nośności konstrukcji decydują miejsca przewężeń, które ulegają wyboczeniu. Układ prostokątny przeanalizowano pod kątem obciążenia nierównomiernego trapezowego i trójkątnego oraz obciążenia przyrostowego. W przypadku rusztowań ramowych nierównomierne obciążenie zwiększa wyężenie elementów konstrukcji. Stan wyężenia zależy od kierunku układania mieszanki betonowej. Natomiast rusztowania mieszane nie wykazują takiej zależności. Przeprowadzone analizy dowodzą, że rusztowania mieszane wykazują o połowę mniejszą nośność niż układy ramowe a zastosowanie dodatkowych elementów w postaci konstrukcji drewnianych, usytuowanych na rusztowaniu, dwukrotnie zmniejsza dopuszczalne obciążenia niezależnie od systemu.

Ze względu na bardzo pracochłonny proces wyznaczania rzeczywistych imperfekcji występujących w konstrukcjach rusztowań, w analizach numerycznych stosowane są różne zastępcze metody ich uwzględniania. Jedną z metod jest wprowadzanie przeskalowanych imperfekcji zgodnych z pierwszą

formą wyboczenia (EBM – eigenbuckling modes). Metoda ta została zastosowana w cytowanej już pracy [90] oraz w pracy [18], w której imperfekcje zamodelowano zgodnie z pierwszą formą wyboczenia, skalując wartości uzyskanych przemieszczeń za pomocą wartości dopuszczalnej wynoszącej jedną tysięczną wysokości rusztowania. Stosując w analizach numerycznych powyższą metodę uzyskano siłę krytyczną zbliżoną do wartości uzyskanej na drodze badań laboratoryjnych. W pracy [5] wskazano wpływ wielkości imperfekcji na wartość sił uzyskiwanych w poszczególnych elementach rusztowania. Rozpatrzono dwa kierunki występowania imperfekcji, równoległy oraz prostopadły do rusztowania, zgodne z kierunkiem obciążenia wiatrem. Dokonano również porównania wyników uzyskanych z zastosowaniem metody odnoszącej się do pierwszej postaci wyboczenia oraz uzyskanych z wykorzystaniem metody polegającej na wprowadzeniu imperfekcji w każdej ramie pionowej (IGI – initial geometric imperfections). W metodzie tej imperfekcje mają kształt sinusoidy i są uzależnione od geometrii trzpienia, stanowiącego połączenia pomiędzy ramami pionowymi. W przypadku obu metod uzyskano podobne wartości naprężenia w poszczególnych elementach rusztowania. Inną metodą polegającą na wprowadzeniu dodatkowego obciążenia poziomego (NHF – notional horizontal forces), mającego na celu symulowanie, występujących imperfekcji, powodujących siły poziome, zastosowano w pracy [46]. Obciążenie wynoszące 0,1% obciążenia pionowego zostało przyłożone w środku wysokości rusztowania. Każda z tych metod jest metodą przybliżoną nieodzwierciedlającą rzeczywistej sytuacji, która może wystąpić w konstrukcji rusztowania. Imperfekcje mogą mieć charakter losowy i zależą od wielu czynników, między innymi od jakości montażu i stanu badanego rusztowania. Chcąc wyeliminować wpływ imperfekcji na inne elementy, będące obiektem analiz, w trakcie badań laboratoryjnych należy je zinwentaryzować i wprowadzić do modelu, jak to miało miejsce w przypadku pracy [16]. W pracy przedstawiono trudności z wykalibrowaniem modelu numerycznego rusztowania modułowego, wynikające z: imperfekcji, charakteru połączeń, dużych przemieszczeń, pracy poza zakresem sprężystym materiału oraz niejednorodnych warunków brzegowych.

Konstrukcje wsporcze deskowań są szczególną grupą rusztowań, podlegającą znacznym obciążeniom w trakcie układania mieszanki betonowej. Grupa badaczy, w cyklu artykułów [52], [53] opracowała uproszczoną metodę wyznaczania obciążenia krytycznego konstrukcji wsporczych wykonanych z rusztowań typu ramowego. Przeprowadzenie szeregu analiz numerycznych z wykorzystaniem autorskiego programu pozwoliło na określenie zależności nośności rusztowania od takich elementów, jak: wysokość konstrukcji, liczba pól, charakterystyki materiałowe, występowanie dodatkowych elementów drewnianych niwelujących różnicę wysokości (Rys. 2.12) oraz zastosowane stężenia. Dodatkowo opracowano wskazówki, którymi należy się kierować projektując lub nadzorując tego typu konstrukcje:

- rusztowanie powinno być wyposażone w podstawki regulowane niwelujące ewentualne różnice posadowienia oraz umożliwiające optymalne dostosowanie wysokości rusztowania,
- oparcie konstrukcji o istniejące ściany lub słupy znacznie zwiększa jej nośność,
- dodatkowe elementy drewniane powinny być zabezpieczone gwoździami,
- oprócz stężeń pionowych należy stosować stężenia poziome na co drugim poziomie rusztowania,
- stężenia należy łączyć z konstrukcją rusztowania w celu zmniejszenia ich długości wyboeczeniowej,
- projektanci powinni wskazywać miejsca, w których można połączyć stężenia poziome z istniejącymi ścianami i słupami,
- dodatkowe elementy drewniane należy zastępować rozwiązaniami systemowymi w postaci rur stalowych,
- należy ograniczać liczbę połączeń rur pionowych lub stosować dłuższe i dokładnie spasowane trzpienie zwiększające sztywność połączenia,
- zaproponowano stosowanie na pierwszym poziomie zamkniętych ram stalowych znacznie zwiększających nośność całej konstrukcji.

Wyniki uzyskane w trakcie badań laboratoryjnych obejmujących całe konstrukcje, jak również węzły rusztowań modułowych, zostały wykorzystane w analizach numerycznych opisanych w pracy [95]. Analizy obejmowały typową jednopopolową, trzypoziomową konstrukcję wsporczą deskowania, wykonaną z systemu modułowego (Rys. 2.14). Obliczenia wykonano z użyciem komercyjnego australijskiego oprogramowania Strand7, umożliwiającego uwzględnienie nieliniowości materiałowych, geometrycznych i imperfekcji. Trójwymiarowy prętowy model uwzględniał takie elementy, jak:

- sprężysto-idealnie plastyczny materiał (dla każdego elementu na podstawie badań laboratoryjnych określono inną granicę plastyczności f_y w zakresie 350÷450 MPa),
- półsztywny charakter połączenia w płaszczyźnie pionowej, zgodny z trójliniowym schematem przedstawionym na Rys. 2.16 ($k_1 = 40,9$ kNm/rad; $k_2 = 77,6$ kNm/rad; $k_3 = 4,6$ kNm/rad),
- małą sztywność połączenia w płaszczyźnie poziomej (4,0 kNm/rad),
- podpory przegubowe, blokujące możliwość przesuwu w trzech kierunkach modelujące oparcie konstrukcji na podłożu,
- podpory przegubowe, blokujące możliwość przesuwu w kierunku poziomym, modelujące oparcie głowic górnych o deskowanie,
- obciążenie w postaci siły skupionej przyłożonej do głowic górnych, modelujące obciążenie mieszanką betonową oraz ciężarem deskowania.
- obciążenie w postaci momentu zginającego, wynikającego z mimośrodowego obciążenia, występującego w głowicach przyjętego na poziomie 20 mm,

- imperfekcje, polegające na braku prostoliniowości elementów na poziomie $l/500$, gdzie l to długość elementu, zgodne z pierwszą formą wyboczenia lub formą zniszczenia pojedynczej ramki (nie uwzględniano imperfekcji globalnych – odchylenia od pionu),
- zróżnicowanie długości podstawek regulowanych oraz głowic górnych na poziomie 100 mm, 400 mm oraz 900 mm.

Modele zostały zweryfikowane na podstawie piętnastu badań pełnowymiarowych konstrukcji przeprowadzonych przez autorów i opisanych w innych pracach. Wartości dopuszczalnych obciążeń uzyskano na poziomie 111,6 kN, 73,1 kN, 27,5 kN odpowiednio dla długości podstawek i głowic 100 mm, 400 mm i 900 mm. W pierwszym przypadku doszło do przekroczenia granicy plastyczności w rurze pionowej najniższego poziomu, natomiast w ostatnim przypadku doszło do utraty stateczności i wyboczenia podstawki. Uzyskane graniczne obciążenia zostały porównane z wartościami określonymi zgodnie z przepisami obowiązującymi w Australii i Stanach Zjednoczonych. Wartości uzyskane zgodnie z wzorami, zawartymi w normach obowiązujących w Stanach Zjednoczonych, były bardzo zbliżone, niezależnie od długości podstawek i głowic, natomiast w przypadku długości podstawek wynoszącej 900 mm uzyskano większe wartości, wykorzystując wzory zawarte w normach australijskich niż amerykańskich. W celu porównania wyników wartość granicznego obciążenia, uzyskanego na drodze analiz, przemnażano przez współczynnik 0,9, tzn. taki sam, jak w obowiązujących normach. Autorzy nie narzucają stosowania tego współczynnika w zaawansowanych analizach. Ze względu na możliwość wielokrotnego użytkowania tych samych elementów, mogącego wpłynąć negatywnie na sztywności połączeń lub zwiększenie deformacji elementów, według autorów pracy [95] współczynnik ten powinien być określony na drodze dalszych badań, uwzględniających między innymi wielokrotność użytkowania.

Wirtualne modele numeryczne umożliwiają przeanalizowanie zachowania elementu lub konstrukcji pod wpływem dowolnej formy obciążenia, jak również pozwalają na wyeliminowanie ewentualnych konfliktów elementów składowych. Dodatkową zaletą jest możliwość przedstawienia rozwiązania potencjalnym producentom lub firmom bez konieczności tworzenia modelu rzeczywistego. Tego typu podejście zaprezentowano w pracy [26], w której przedstawiono nowatorskie rozwiązanie kotwienia rusztowania. Wykonawcy elewacji za wszelką cenę ograniczają liczbę kotw, ponieważ w znacznym stopniu zmniejszają one front robót. W przypadku obiektów zabytkowych [81], lub elewacji szklanych ich liczba jest ograniczana do minimum. Niestety błędnie dobrane lub niewłaściwie wykonane kotwienie konstrukcji rusztowania jest częstym powodem ich awarii. W przytoczonej pracy przeanalizowano przykładową konstrukcję rusztowania, obciążonego wiatrem. Działanie wiatru rozpatrywano w czterech kierunkach, zgodnie z wytycznymi zawartymi

w normie [63]. Na ich podstawie otrzymano siły występujące w kotwach. Następnie wykonano szereg analiz numerycznych, które umożliwiły zoptymalizowanie elementów składowych systemu kotwienia zarówno pod względem geometrii jak i użytych materiałów. Obliczenia wykonywano z użyciem modeli prętowych oraz bryłowych uwzględniających nieliniowość materiałową oraz imperfekcje w przypadku ściskania. Pierwszy, wyjściowy model numeryczny został zweryfikowany na podstawie badań laboratoryjnych. Model obciążano zarówno siłą rozciągającą, modelującą odrywanie konstrukcji od ściany, jak i ściskającą, modelującą parcie wiatru w kierunku elewacji, przyłożoną do ramienia w miejscu połączenia z konstrukcją rusztowania. Zaletą rozwiązania jest możliwość przenoszenia obciążenia zarówno w formie rozciągania (odrywanie od ściany), jak i ściskania (parcie w kierunku ściany), które nie było przenoszone przez standardowe rozwiązania istniejące na rynku. Uwzględniono również konieczność ominięcia warstwy izolacji termicznej poprzez zastosowanie długich elementów kotwionych do ściany. Przedstawione rozwiązanie umożliwia przeniesienie znacznie większych obciążeń a tym samym zwiększa stabilność konstrukcji. Stosując przedstawione rozwiązanie możemy w znacznym stopniu ograniczyć liczbę kotew, ale z drugiej strony należy wziąć pod uwagę nośność złączy występujących pomiędzy kotwą a konstrukcją rusztowania. Te ostatnie w przypadku dużej nośności kotew mogą okazać się najsłabszym miejscem rusztowania.

2.5 Podsumowanie przeglądu literatury

W pracy przedstawiono aktualny stan obowiązujących przepisów i norm odnoszących się do rusztowań zarówno pod względem ich badań jak i zasad projektowania. W normach szczegółowo zostały opisane procedury wykonywania badań całych układów rusztowań ramowych, jak również ich elementów składowych. Nie wszystkie sformułowania i zalecenia są adekwatne do rusztowań modułowych, charakteryzujących się inną specyfiką pracy i możliwościami wykorzystania.

Zakres badań laboratoryjnych jest bardzo duży, jednakże w większości przypadków badania przeprowadzane są na całych konstrukcjach. Nie znaleziono informacji na temat pełnych badań laboratoryjnych węzła rusztowania modułowego, w których połączenie jest uzyskiwane za pomocą klina, uwzględniających wszystkie formy obciążenia. W przypadku węzłów rusztowań modułowych skupiono się na określaniu sztywności na zginanie tylko w płaszczyźnie pionowej. W wielu opracowaniach możemy znaleźć informacje na temat węzła rusztowania modułowego, przedstawionego na Rys. 2.14 c, lub węzła rusztowań rurowo-złączkowych. Określanie sztywności węzła na podstawie badań całych konstrukcji wydaje się być niewłaściwym podejściem ze względu na dużą liczbę zmiennych jak również trudności w ich jednoznacznym określeniu. Dokładność montażu oraz imperfekcje mogą mieć charakter losowy

i ażeby ich wpływ wykluczyć konieczne jest przeprowadzenie dużej liczby badań. Problematiczną kwestią pozostaje wielokrotność użytkowania tych samych elementów. Badania tego typu są bardzo czasochłonne i wymagają dużych nakładów finansowych.

Analizy numeryczne nie muszą ograniczać się do momentu osiągnięcia granicy plastyczności i wytworzenia przegubu plastycznego w dowolnym elemencie składowym konstrukcji. Możliwości obliczeniowe, pozwalają na odwzorowanie zachowania konstrukcji również poza tym zakresem. Umożliwiają również rozpatrywanie konstrukcji jako całości, przy czym wymagają kompletnej wiedzy na temat połączeń, warunków brzegowych oraz użytych materiałów.

Powyższe braki, jak również chęć uzyskania jednoznacznych informacji na temat nośności węzła, skłoniły autora do przeprowadzenia pełnych badań uwzględniających wszystkie formy obciążenia węzła rusztowania budowlanego, w którym połączenia uzyskiwane są za pomocą klina (Rys. 2.14 b). Stworzenie modelu numerycznego umożliwi prześledzenie wszystkich zjawisk zachodzących w węźle, trudnych do określenia w trakcie badań laboratoryjnych, mających wpływ na charakter jego pracy. Model numeryczny umożliwi również określenie wpływu wielokrotności użytkowania na zmiany w nim zachodzące bez konieczności przeprowadzania długotrwałych i kosztownych badań laboratoryjnych. Wymienione zagadnienia są opisane w następnych rozdziałach niniejszej pracy.

3 Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne są najlepszym sposobem weryfikacji założonej formy pracy dowolnego elementu konstrukcyjnego. Dostarczają informacji na temat newralgicznych punktów badanego obiektu, jak również są niezbędnym etapem przed wprowadzeniem produktu do użytkowania. Badania powinny być przeprowadzane w warunkach pracy podobnych do rzeczywistych i uwzględniać możliwie najwięcej przypadków obciążenia. Większość elementów wchodzących w skład danego systemu rusztowań ma normowo opracowane formy badań z jednoznacznym wskazaniem stanowisk, formy obciążania i mierzonych wielkości. W odniesieniu do węzła rusztowania modułowego w przepisach normowych [62] zostały wskazane jedynie formy obciążenia, które należy przeanalizować. Brakuje natomiast wskazania metod badawczych, co skłoniło autora do opracowania stanowisk badawczych, umożliwiających przeprowadzenie badań laboratoryjnych na dostępnych maszynach wytrzymałościowych.

3.1 Cel i zakres badań laboratoryjnych

Celem badań laboratoryjnych było przeanalizowanie zachowania węzła pod wpływem poszczególnych form obciążenia i wskazanie najbardziej wyężonych obszarów i elementów węzła. Badania obejmowały węzeł z pojedynczym rygłem, do którego przykładano obciążenie w postaci sił oraz momentów przedstawionych na Rys. 3.1. Przyjęty układ współrzędnych będzie obowiązywał w obrębie całej pracy. Rozpatrywano wszystkie możliwe formy obciążenia jakie mogą występować w ryglu i z rygla są przekazywane na węzeł:

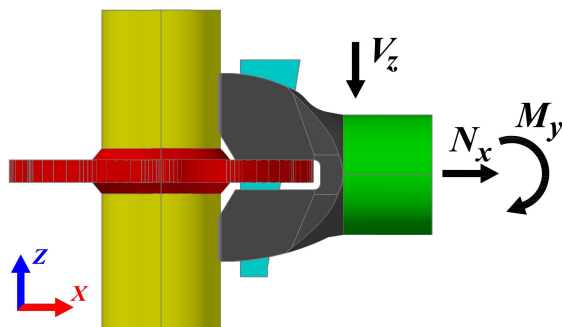
- N_x – siła normalna (zgodna z osią X),
- V_y – siła tnąca (zgodna z osią Y),
- V_z – siła tnąca (zgodna z osią Z),
- M_x – moment skręcający,
- M_y – moment zginający w płaszczyźnie ZX ,
- M_z – moment zginający w płaszczyźnie YX .

Ponieważ w odniesieniu do węzła te wielkości są obciążeniami zewnętrznymi, to w tekście będą one nazywane siłami w przypadku siły normalnej N_x i sił tnących V_y i V_z , oraz momentami, w przypadku momentu skręcającego M_x i momentów zginających M_y i M_z .

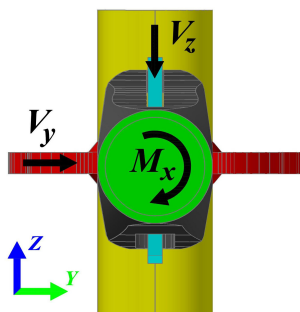
Zaobserwowane podczas badań zniszczenia mogą posłużyć do wskazania elementów, które należy wzmocnić lub przeprojektować i zoptymalizować geometrię. Uzyskane wyniki zależności siła-przemieszczenie lub moment-obrót są podstawą do określenia dopuszczalnych obciążeń, jakim może być poddany węzeł. W przypadku węzłów stalowych gwałtowny spadek siły lub wzrost przemieszczeń jednoznacznie wskazują nośność węzła. Ze względu na wielo-

krotność użytkowania tych samych elementów, charakter połączenia oraz specyfikę pracy konstrukcji rusztowań, określenie dopuszczalnych obciążeń nie jest takie oczywiste.

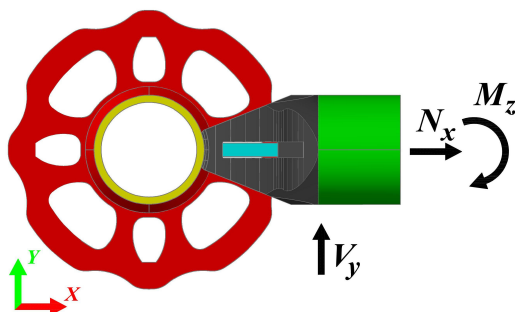
a)



b)



c)



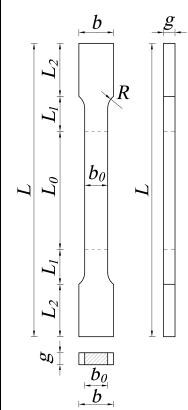
Rys. 3.1 Schemat analizowanych form obciążenia węzła: a) płaszczyzna ZX, b) płaszczyzna ZY, c) płaszczyzna YX

Z powodu skomplikowanej budowy oraz braku, podczas badań, bezpośredniego dostępu do obszarów węzła podlegających uplastycznieniu, badania laboratoryjne należy uzupełnić symulacjami numerycznymi. W procesie modelowania badań laboratoryjnych będą pełniły bardzo ważną rolę, ponieważ posłużą do weryfikacji modelu węzła. Poza bezpośrednimi badaniami węzła, przeprowadzono również badania określające podstawowe charakterystyki materiałów, z których zostały wykonane poszczególne elementy węzła. Charakterystyki materiałowe są podstawowymi danymi niezbędnymi do przeprowadzenia analiz numerycznych. W początkowym etapie prac charakterystyki materiałowe przyjmowano zgodnie z wynikami badań, udostępnionymi przez producentów. Ze względu na brak przebiegu krzywej naprężenie-odkształcenie dla materiałów, wyniki analiz numerycznych węzła, uzyskiwane na ich podstawie w znacznym stopniu różniły się od wyników badań laboratoryjnych tego węzła.

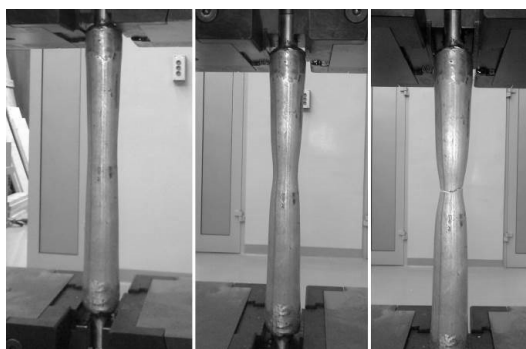
3.2 Badania właściwości materiałowych

Ponieważ jednym z kluczowych elementów pracy są analizy numeryczne, ich przeprowadzenie wymaga przyjęcia charakterystyk materiałowych, które należy określić na podstawie badań laboratoryjnych na próbkach materiału z poszczególnych elementów węzła. W przypadku badań, mających na celu określenie charakterystyk materiałowych, wykorzystywano tensometrię elektrooporową, dzięki której możliwe było bezpośrednie mierzenie odkształceń badanego elementu. W zależności od kształtu i rozmiaru próbki stosowano tensometry pomiarowe TFs 5/120 oraz TFw 2/120. Tensometry były przyklejane do powierzchni elementu, po uprzednim jej przygotowaniu, za pomocą kleju cyjanoakrylowego. Ze względu na rozmiar próbek, badania zostały wykonane na prasie wytrzymałościowej MTS model 319.25 o zakresie sił ± 250 kN, skoku tłoka ± 120 mm oraz prasie wytrzymałościowej MTS Bionix model 370.02 o zakresie sił ± 25 kN i skoku tłoka ± 100 mm. W trakcie badań oprócz wartości odkształceń mierzonych za pośrednictwem tensometrów, uzyskiwano zależności pomiędzy przemieszczeniem tłoka maszyny oraz przyłożonym obciążeniem. Badaniom poddano fragmenty rur, bezpośrednio wycięte z pionowych stojaków, kliny, rozety oraz głowice rygli, z których pobrano próbki płaskie o maksymalnym możliwym wymiarze (Tab. 3.1). Ze względu na brak dostępności blach, z których wykonywane są kliny oraz rozety, próbki pobierano bezpośrednio z elementów węzła. Próbkę wykonywano poprzez bezpośrednie frezowanie i polerowanie elementów węzła. Proces był skomplikowany i wymagał zastosowania specjalistycznych stanowisk, dlatego też zlecono ich wykonanie firmie zewnętrznej. Wartość promienia wyokrąglenia R dobrano na podstawie publikacji [12], w której przeprowadzono zarówno badania laboratoryjne, jak również symulacje komputerowe próbek materiałów poddanych rozciąganiu.

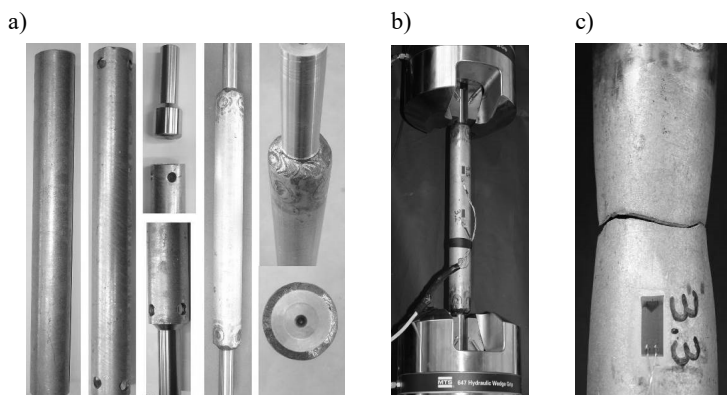
Tab. 3.1 Wymiary próbek płaskich pobranych z poszczególnych elementów węzła

	Element węzła	Wymiary [mm]							
		L	L_0	L_1	L_2	b	b_0	g	R
klin (Rys. 3.6 a)		100,0	40,0	12,0	18,0	12,0	8,0	5,0	5,0
rozeta (Rys. 3.9 a)		28,0	10,0	4,0	5,0	8,0	4,0	1,3	5,0
głowica rygla (Rys. 3.12 a)		40,0	15,0	4,0	8,5	8,0	4,0	2,7	5,0

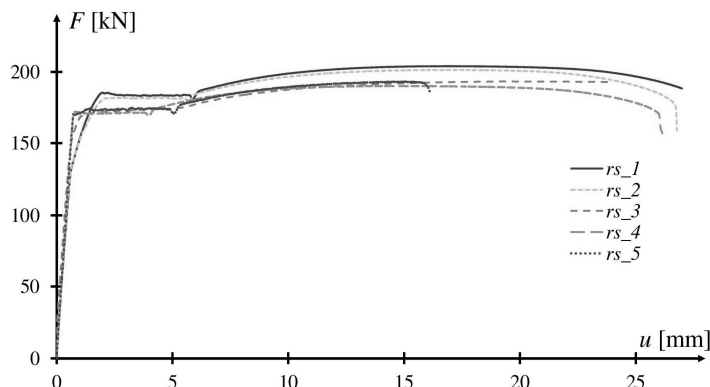
Pierwszym rozpatrywanym elementem poddanym badaniom, mającym na celu określenie charakterystyk materiałowych, była rura stojaka. Próbka o długości 50 cm została pobrana bezpośrednio ze stojaka. Ze względu na ograniczone rozmiary szczęk prasy wytrzymałościowej zastosowano stalowe trzpienie przyspawane do rury. Wstępne badania sprawdzające możliwości dostępnych maszyn zakończyły się sukcesem. Do zerwania próbki doszło w obrębie rury i nie doszło do zniszczenia spoin trzpieni (Rys. 3.2). W trakcie wykonywania właściwych badań na rurze umieszczano trzy tensometry: dwa w środku po obu stronach rury oraz jeden w 1/4 długości rury (Rys. 3.3 b). Badania rury stojaka przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczeń wynoszącym 1 mm/min. Badania kontynuowano do momentu zerwania próbki. W wyniku przeprowadzonych badań na 5 próbkach uzyskano wykresy zależności siła-przemieszczenie (Rys. 3.4) oraz naprężenie-odkształcenie (Rys. 3.5). W początkowej fazie obciążenia wykres jest prostoliniowy, następnie można zauważyć charakterystyczną półkę plastyczną po przekroczeniu granicy plastyczności, która jest charakterystyczna dla stali z niską zawartością węgla.



Rys. 3.2 Pilotażowa statyczna próba rozciągania rury z wykorzystaniem trzpieni

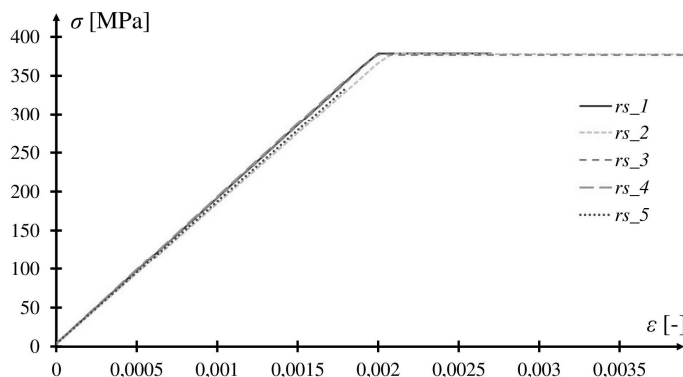


Rys. 3.3 Próbka materiału rury stojaka: a) wykonanie próbki, b) badanie, c) zniszczenie



Rys. 3.4 Wyniki zależności siła-przemieszczenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału rury stojaka uzyskane z maszyny wytrzymałościowej

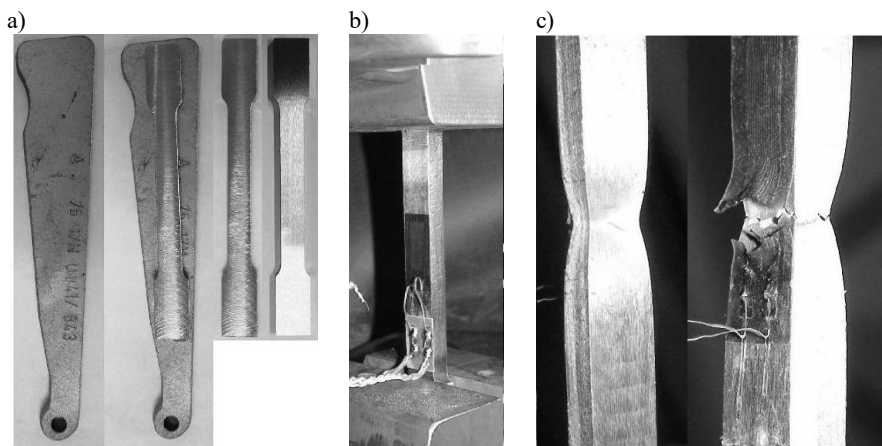
Tensometry wykazywały odkształcenie tylko w niewielkim zakresie odkształceń przekraczających zakres sprężysty. Dalszy proces obciążania prowadził do ich zniszczenia, dlatego też wykres obejmuję tylko początkową fazę obciążania. W wyniku przeprowadzonych badań rury uzyskano średnią wartość modułu sprężystości $E_{rs} = 186 \text{ GPa}$, granicę plastyczności $f_{yrs} = 375 \text{ MPa}$ oraz granicę wytrzymałości $f_{urs} = 425 \text{ MPa}$. W Tab. 3.2 podano wyniki pomiarów wymienionych parametrów dla poszczególnych prób.



Rys. 3.5 Wyniki zależności naprężenie-odkształcenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału rury stojaka uzyskane z wykorzystaniem tensometrów

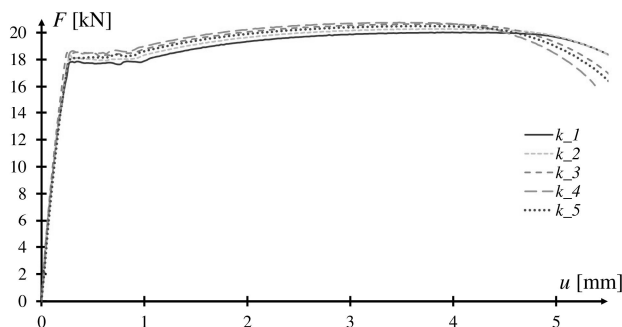
W trakcie opracowywania wyników zauważono znaczne odchylenie wyników uzyskanych w pierwszych dwóch próbach obciążania rury. Odchylenia w postaci pochylenia linii wykresu w obrębie liniowych zależności pomiędzy przemieszczeniami i siłą (Rys. 3.4) wynikały ze zbyt małej siły zaciskającej

szczęki prasy. Próbkę, w przypadku pierwszych dwóch prób, uległy wysunięciu, co spowodowało nieproporcjonalny wzrost przemieszczeń. Błąd wyeliminowano w pozostałych próbach i wyniki uśredniono na podstawie trzech poprawnie przeprowadzonych prób. W przypadku odczytu za pośrednictwem tensometrów wskazany błąd nie miał wpływu na uzyskane wyniki i możliwe było uśrednienie wyników z 5 prób.



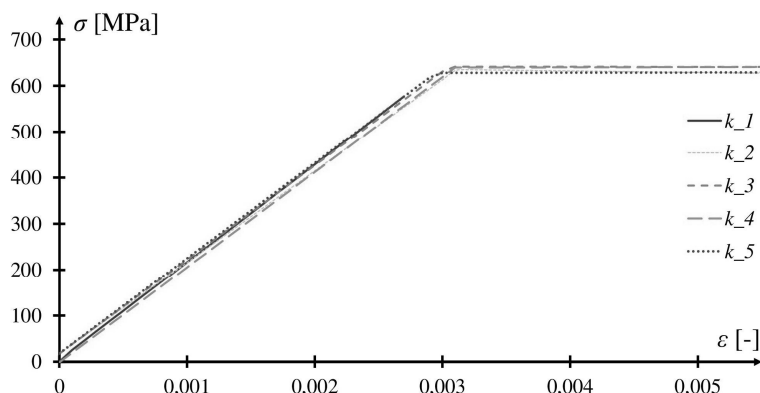
Rys. 3.6 Próbkę materiału klina: a) wykonanie próbki, b) badanie, c) zniszczenie

W przypadku klina pobrano próbkę płaską o maksymalnym możliwym wymiarze (Rys. 3.6). Próbkę wyfrezowano z klina a następnie wypolerowano. Na próbce umieszczono tensometr i tak, jak w przypadku rur, badania przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczeń wynoszącym 0,5 mm/min. Badania kontynuowano do momentu zerwania próbki. W wyniku przeprowadzonych badań na 5 próbkach uzyskano wykresy zależności siła-przemieszczenie (Rys. 3.7) oraz naprężenie-odkształcenie (Rys. 3.8).

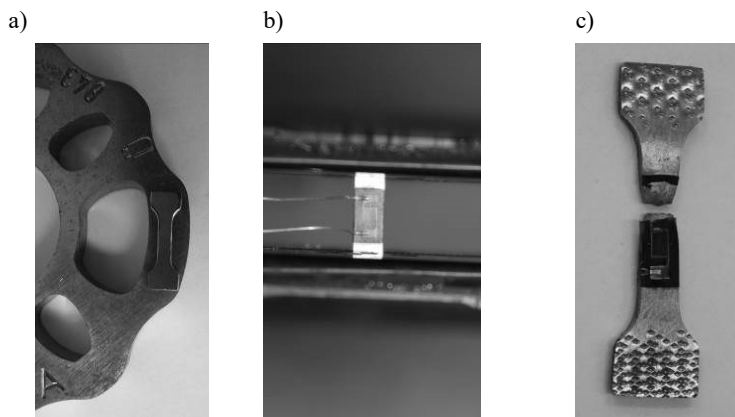


Rys. 3.7 Wyniki zależności siła-przemieszczenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału klina uzyskane z maszyny wytrzymałościowej

Tak, jak w przypadku rur, uzyskano charakterystyczny wykres z półką plastyczną, występującą po przekroczeniu granicy plastyczności. W wyniku przeprowadzonych badań materiału klina uzyskano średnią wartość modułu sprężystości $E_k = 206$ GPa, granicę plastyczności $f_{yk} = 635$ MPa oraz granicę wytrzymałości $f_{uk} = 715$ MPa. Szczegółowe wyniki analiz w odniesieniu do tych badań zestawiono w Tab. 3.2.



Rys. 3.8 Wyniki zależności naprężenie-odkształcenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału klina uzyskane z wykorzystaniem tensometrów

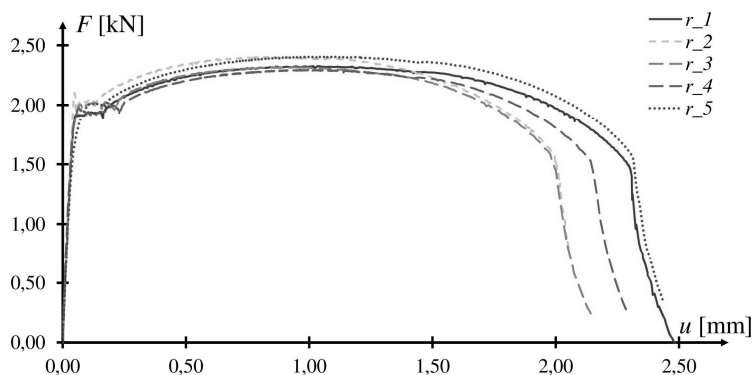


Rys. 3.9 Próbką materiału rozety: a) wykonanie próbki, b) badanie, c) zniszczenie

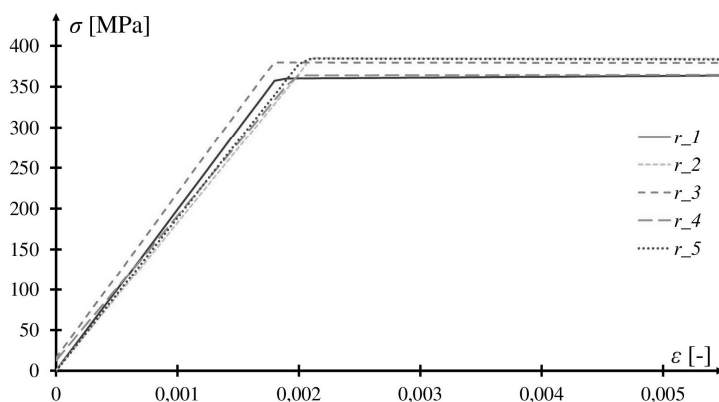
Najtrudniejszymi badaniami okazały się badania materiałów, z których wykonane są rozety oraz głowice rygla. Zarówno w przypadku rozet, jak i głowic rygla, konieczne było pozyskanie próbek bezpośrednio z gotowych elementów rusztowań. Nie uzyskano dostępu do blach, z których wycinane są rozety, ponieważ są one sprowadzane z Chin w ostatecznym kształcie.

Wymusiło to wyfrezowanie próbek o bardzo małych wymiarach (Rys. 3.9 a). Tak małe próbki zostały przebadane w prasie MTS o maksymalnym zakresie siły 25 kN. Ponieważ rozmiar uniemożliwiał zastosowanie ekstensometru, bezpośrednio na próbce umieszczono tensometr TFw 2/120 (Rys. 3.9 b). Badania przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczeń, wynoszącym 0,1 mm/min. Badania kontynuowano do momentu zerwania próbki. W wyniku przeprowadzonych badań na 5 próbkach uzyskano wykresy zależności siła-przemieszczenie (Rys. 3.10) oraz naprężenie-odkształcenie (Rys. 3.11).

W Tab. 3.2 zestawiono wyniki poszczególnych prób. Średnie wartości własności materiałowych to: moduł sprężystości $E_r = 190$ GPa, granica plastyczności $f_{yr} = 370$ MPa oraz granica wytrzymałości $f_{ur} = 450$ MPa.



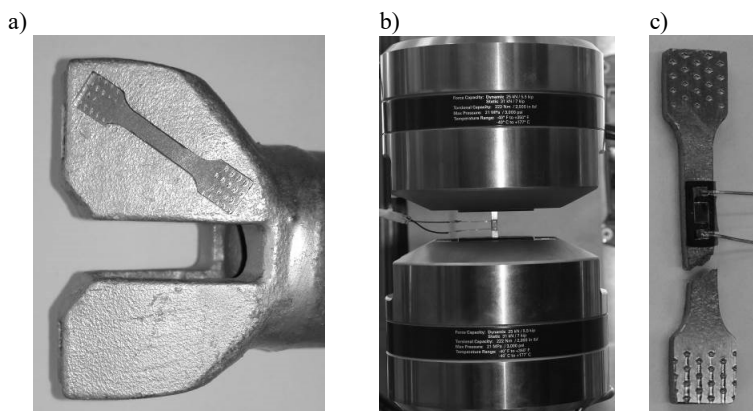
Rys. 3.10 Wyniki zależności siła-przemieszczenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału rozety uzyskane z maszyny wytrzymałościowej



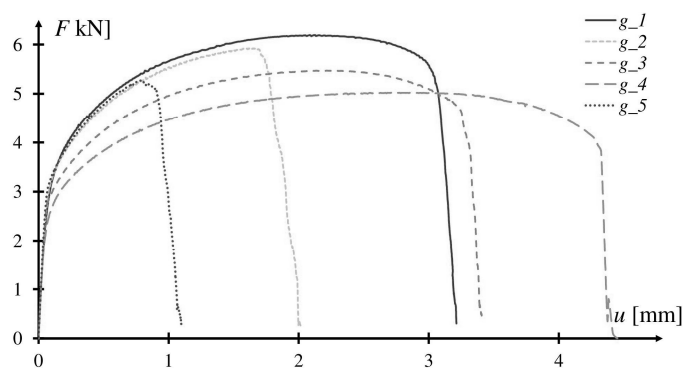
Rys. 3.11 Wyniki zależności naprężenie-odkształcenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału rozety uzyskane z wykorzystaniem tensometrów

Największe rozrzuty wyników w statycznej próbie rozciągania uzyskano w przypadku głowicy rygla. Wynika to z faktu, iż głowice są elementami odlewanymi. Próbkę do badań pobrano z gotowych ocynkowanych elementów. Próbkę pobrano za pomocą frezarki numerycznej a następnie przeszlifowano powierzchnie w celu uzyskania powierzchni równoległych (Rys. 3.12). Na próbce przyklejono tensometr. Badania przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczeń, wynoszącym 0,1 mm/min. Badania kontynuowano do momentu zerwania próbki. W wyniku przeprowadzonych badań na 5 próbkach uzyskano wykresy zależności siła-przemieszczenie (Rys. 3.13) oraz naprężenie-odkształcenie (Rys. 3.14).

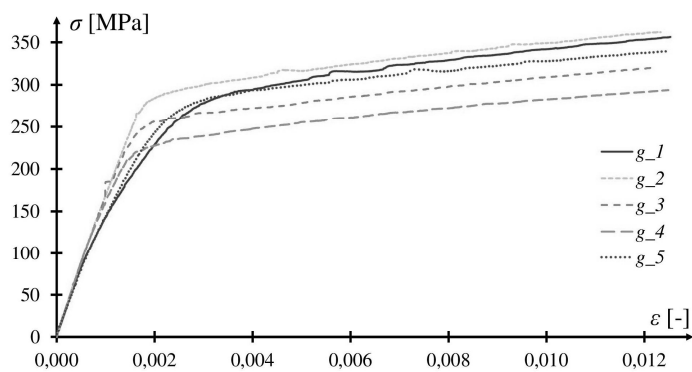
Na wykresach zależności przemieszczenie-siła (Rys. 3.13) możemy zauważyć, że każdy wykres ma inny przebieg. W przypadku pozostałych materiałów można było zauważyć charakterystyczną dla stali półkę plastyczną. Na wykresach, na Rys. 3.13 uzyskanych dla głowicy, nie ma fragmentu, który można potraktować jako półkę plastyczną. Wynika to stąd, że głowica jest odlewem a charakterystyki materiałowe są zbliżone do elementów wykonanych ze staliwa [21]. Ponadto w trakcie próbnego pobierania próbek z głowicy rygla, po wykonaniu cięcia zauważono wtrącenia mogące w znaczny sposób wpływać na charakter pracy i nośność głowicy rygla. Wtrącenia wystąpiły w newralgicznym miejscu głowicy w miejscu przewężenia (Rys. 3.15), z tego powodu materiał, z którego wykonano głowice zachowuje się jak materiał kruchy. Losowa lokalizacja niedoskonałości materiału, powoduje że zerwanie próbki następowało przy różnych wydłużeniach. W przypadku dwóch prób zaobserwowano gwałtowne zerwanie próbek, a przełom ma nieregularną powierzchnię. W wyniku przeprowadzonych badań głowic rygla uzyskano średnią wartość modułu sprężystości $E_g = 148$ GPa, granicę plastyczności $f_{yg} = 230$ MPa oraz granicę wytrzymałości $f_{ug} = 470$ MPa. Wyniki badań poszczególnych prób zestawiono w Tab. 3.2.



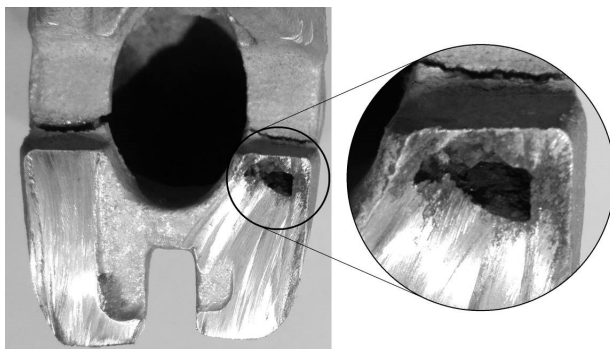
Rys. 3.12 Próbkę materiału głowicy rygla: a) wykonanie próbki, b) badanie, c) zniszczenie



Rys. 3.13 Wyniki zależności siła-przemieszczenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału głowicy rygla uzyskane z maszyny wytrzymałościowej



Rys. 3.14 Wyniki zależności naprężenie-odkształcenie w przypadku badań wytrzymałościowych materiału głowicy rygla uzyskane z wykorzystaniem tensometrów

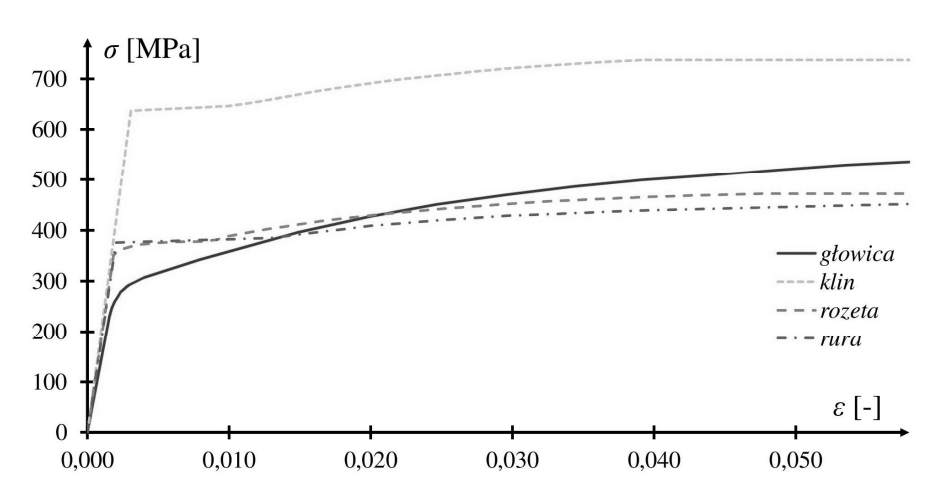


Rys. 3.15 Wtrącenie zauważone w trakcie próby pobrania próbki materiału z głowicy rygla

W Tab. 3.2 zestawiono wyniki uzyskane z poszczególnych prób wraz z podaniem odchylenia standardowego próby oraz wartości średniej. Niestety każdy z elementów węzła został wykonany z innego materiału (Rys. 3.16). Różnice występują zarówno w zakresie granic plastyczności, wytrzymałości, jak i modułu Young'a.

Tab. 3.2 Zestawienie wyników parametrów materiałowych poszczególnych elementów węzła

Nr	głowica rygla			klin			rozeta			rura stojaka		
	E_g	f_{yg}	f_{ug}	E_k	f_{yk}	f_{uk}	E_r	f_{yr}	f_{ur}	E_{rs}	f_{yrs}	f_{urs}
	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa]	[MPa]
1	125	235	505	212	619	702	198	359	444	188	286*	449*
2	171	244	490	198	638	713	183	379	459	182	267*	444*
3	164	210	455	204	642	719	203	375	443	187	373	426
4	150	217	425	207	646	723	178	356	438	189	379	420
5	132	245	475	207	628	716	189	382	465	183	374	428
\bar{y}	148	230	470	206	635	715	190	370	450	186	375	425
σ	20	16	31	5	11	8	10	12	12	3	3	4
* – błędnie przeprowadzone badania, nie brane pod uwagę $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ – wartość średniej arytmetycznej $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ – odchylenie standardowe												



Rys. 3.16 Wyniki zależności naprężenie-odkształcenie materiałów, z których wykonano poszczególne elementy węzła

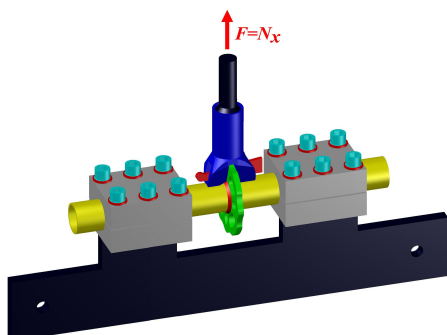
Dodatkowo w przypadku głowicy rygla nie występuje charakterystyczna dla stali półka plastyczna. Materiał użyty do produkcji klina wykazał największą granicę wytrzymałości na rozciąganie. Zbliżone charakterystyki materiałowe zaobserwowano w przypadku rozety oraz rury stojaka, które są elementami połączonymi ze sobą spoinami. Zróżnicowanie materiałów było przyczyną problemów w trakcie przeprowadzania analiz numerycznych, opisanych w dalszej części pracy. Dlatego też ostatecznie w modelach przyjęto krzywe materiałowe odwzorowujące materiały poszczególnych elementów zgodne z krzywymi przedstawionymi na Rys. 3.16.

3.3 Badania laboratoryjne węzłów

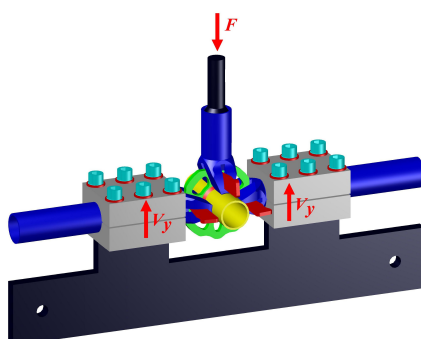
W celu określenia nośności połączenia, jak również określenia charakterystyk, opisujących zachowanie węzła podczas obciążania, konieczne jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych. W normie [62] nie ma dokładnych informacji, jak powinno wyglądać stanowisko badawcze w odniesieniu do rozpatrywanego węzła rusztowań. Zgodnie z normą możliwe jest określenie nośności połączenia na podstawie badań całego pola rusztowania, co według autora może dostarczać wielu błędów ze względu na występowanie różnorodnych luzów. Badając dany układ elementów możemy mówić o nośności rozpatrywanego układu, natomiast określenie nośności węzła wymaga przeprowadzenia badań przy minimalnej liczbie elementów w celu wyeliminowania ich wzajemnego wpływu. Dlatego też w pierwszym etapie badań zaprojektowano i wykonano autorskie uchwyty, umożliwiające obciążenie węzła w standardowej maszynie wytrzymałościowej dowolną formą obciążenia (Rys. 3.17), jaka może wystąpić w ryglu. W przypadku każdej z nich, do węzła przykładano obciążenia w formie siły wywoływanej przemieszczeniem tłoka. Uniwersalny, autorski uchwyt w przedstawionej formie umożliwiał wywołanie pożądanej formy obciążenia węzła przy minimalnej liczbie elementów. Obciążenie do węzła było przykładane do rury lub stojaka, w zależności od zakresu obciążeń, za pośrednictwem trzpienia przykręcanego lub przyspawyanego.

Badania w laboratorium zostały wykonane na prasie wytrzymałościowej MTS 250, której tłok ma możliwość ruchu w pionie oraz może obracać się wokół własnej osi. Podstawowe parametry tej prasy to: zakres sił ± 250 kN, skok tłoka ± 120 mm, kąt obrotu $\pm 55^\circ$, moment skręcający ± 2200 Nm. W trakcie badań uzyskiwano zależności pomiędzy przemieszczeniem tłoka maszyny oraz przyłożonego obciążenia. W zależności od rozpatrywanej formy obciążenia dokonywano przeliczeń w celu określenia wartości badanej formy obciążenia. Ze względu na skomplikowany kształt i fakt iż newralgiczne miejsce, jakim jest bezpośredni styk klina i rozety, nie jest widoczne w momencie przeprowadzania badań, nie było możliwości bezpośredniej obserwacji miejsca uszkodzeń.

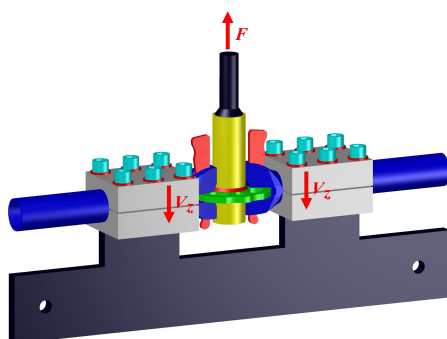
a)



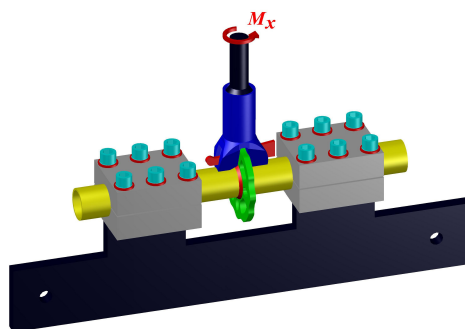
b)



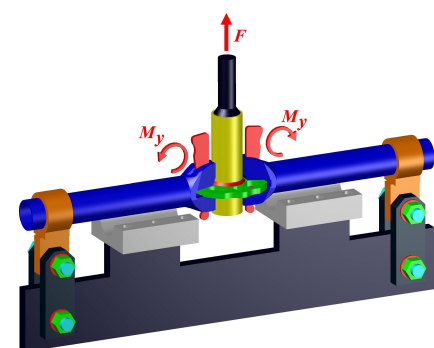
c)



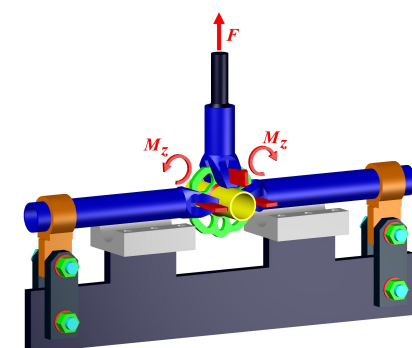
d)



e)



f)



Rys. 3.17 Modele uchwytów umożliwiających obciążenie węzła: a) siłą N_x , b) siłą V_y , c) siłą V_z , d) momentem M_x , e) momentem M_y , f) momentem M_z

Badaniom poddawano węzeł rusztowania modułowego Rotax Plus firmy Altrad-Mostostal. Wybrano ten model rusztowania, ponieważ już wcześniej Politechnika Lubelska nawiązała współpracę z powyższą firmą. Firma była zainteresowana wynikami badań i dalszymi pracami badawczymi, mającymi na celu poprawienia pracy poszczególnych elementów oraz zmianę użytych materiałów, z których wykonywane są poszczególne elementy węzła, wchodzące w skład danego systemu rusztowania.

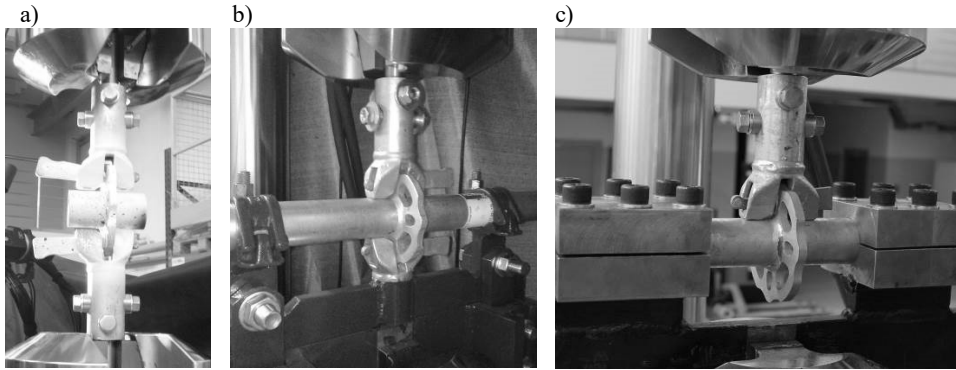
Węzeł obciążano zgodnie z formami obciążenia, przedstawionymi na Rys. 3.1 oraz ich zwrotami. Nie rozpatrywano przeciwnych zwrotów sił oraz momentów. Założenie w przypadku obciążeń w postaci siły V_y oraz momentów M_x oraz M_z wynikało z występującej symetrii węzła. Węzeł nie powinien być obciążany siłą tnącą V_z z przeciwnym zwrotem, ponieważ nie jest on do takiej formy obciążenia dostosowany. W obrębie rozety oraz głowicy występuje wolna przestrzeń o wymiarze 3 mm. Obciążanie węzła mogłoby powodować wysunięcie klina i całkowitą utratę połączenia. Taka sama sytuacja może wystąpić w przypadku zginania momentem M_y . Nie rozpatrywano również ściskania w postaci obciążenia N_x , ponieważ mogłoby dojść do wyboczenia rury w obrębie węzła. Otrzymana nośność na ściskanie mogłaby być obciążona błędem związanym z przyjętą długością ryglu podlegającego ściskaniu. Ponadto w rzeczywistych konstrukcjach rusztowań, w przypadku ściskania, o nośności konstrukcji decyduje długość ściskanego elementu a nie węzeł. Dodatkowo ściskanie mogłoby doprowadzić do zniszczenia uchwytów maszyny a należy pamiętać, że są to badania prototypowe, których nie wykonywano wcześniej. Dopuszczalne wartości sił ściskających w ryglu są uzależnione od jego długości i związane są ze zjawiskiem wyboczenia i bardziej miarodajnymi badaniami są badania elementu a nie jego połączenia z innymi elementami.

We wszystkich badaniach próbki w postaci nowych stojaków z rozetami oraz ryglu pozyskano od firm i nie były w żaden sposób przygotowywane.

3.3.1 Opracowanie stanowiska badawczego węzła rusztowania

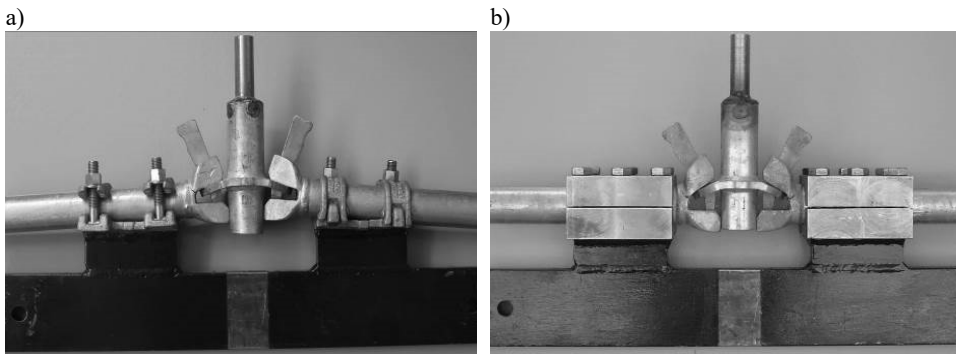
Pierwszą formą obciążenia, dla której opracowano uchwyt była siła N_x . Początkowo chciano wykorzystać możliwość symetrycznego obciążenia węzła (Rys. 3.18 a). Jednakże ze względu na zmiany zachodzące w obrębie klina i rozety symetria obciążenia była zachowana tylko w początkowej fazie obciążania. Dochodziło do zniszczenia obszaru przekazania obciążenia pomiędzy klinem i rozetą po jednej stronie układu. Ponieważ obszar zniszczenia nie był bezpośrednio widoczny trudno było jednoznacznie określić zachodzące zjawiska. Kolejnym krokiem było opracowanie uchwytu, w którym obciążenie przykładano niesymetrycznie z jednoznacznym wskazaniem strony ulegającej zniszczeniu. Niestety zastosowane rozwiązanie (Rys. 3.18 b) nie powodowało oczekiwanego efektu. Układ był za mało sztywny i do zniszczenia dochodziło po obu stronach rozety. W przypadku sił mniejszych niż powodująca zerwanie

rury, zamiast trzpieni spawanych zastosowano trzpienie przykręcane. W trzpieniu zastosowano gwintowane otwory oraz specjalne podkładki umożliwiające dopasowanie śrub do krzywizny rury i uzyskanie maksymalnej powierzchni docisku (Rys. 3.18 b).



Rys. 3.18 Etapy tworzenia uchwytu umożliwiającego obciążenie węzła siłą N_x : a) układ symetryczny, b) układ niesymetryczny c) układ niesymetryczny ostateczny

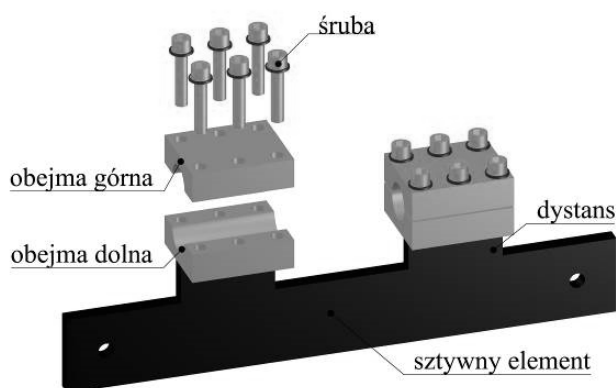
Również w przypadku siły V_z zastosowanie złączy wzdłużnych jako elementów sztywnego zamocowania (Rys. 3.19 a) okazało się błędnym podejściem. Zniszczeniu ulegały złącza a węzeł ulegał dodatkowemu zginaniu. Ostatecznie zastosowano rozwiązanie, w którym wykorzystywano masywne obejmy stanowiące sztywne zamocowanie elementów badanego węzła (Rys. 3.18 c, Rys. 3.19 b).



Rys. 3.19 Etapy tworzenia uchwytu umożliwiającego obciążenie węzła siłą V_z : a) uchwyt z wykorzystaniem złączy wzdłużnych, b) uchwyt z zastosowaniem masywnych obejm

W skład uniwersalnego uchwytu, umożliwiającego obciążenie węzła siłami N_x , V_y lub V_z oraz momentem M_x , przedstawionego na Rys. 3.20 wchodzi:

- sztywny element umieszczany bezpośrednio w zaciskach maszyny wytrzymałościowej – element stalowy wykonany z płaskownika o wymiarach 700x100x20 mm,
- dwa dystanse, przyspawane do sztywnego elementu stalowego, umożliwiające montaż elementów o większych gabarytach, elementy są wykonane z płaskowników mających wymiar 120x50x20 mm,
- dwie obejmy dolne z gwintowanymi otworami o średnicy 16 mm i wyfrezowanym półokręgiem o średnicy 48,3 mm, przespawane do dystansu, elementy stalowe mają wymiary 130x38x110 mm,
- dwie obejmy górne z otworami o średnicy 17 mm i wyfrezowanym półokręgiem o średnicy 48,3 mm, elementy stalowe mają wymiary 130x 38x110 mm,
- dwanaście śrub M16 klasy 10.9.

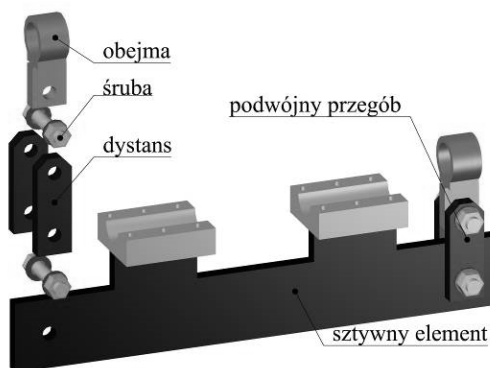


Rys. 3.20 Model uchwytu umożliwiającego obciążenie węzła siłami N_x , V_y , V_z oraz momentem M_x

W zależności od formy obciążenia w obrębie obejm dolnych umieszcza się rygle lub stojak rusztowania, który następnie jest blokowany za pomocą obejm górnych i śrub. Rozwiązanie umożliwia sztywne zamocowanie badanego węzła, do którego obciążenie jest bezpośrednio przykładane w obrębie rury stojaka lub rygla, wyposażonego w przyspawany lub przykręcony trzpień. Odległość między dystansami dobrano w taki sposób, ażeby zminimalizować ramię siły i w efekcie zmniejszenie momentu, którego całkowite wyeliminowanie jest praktycznie niemożliwe. W przypadku siły V_z oraz V_y obejmy utrzymują rygle w bezpośrednim sąsiedztwie spoin łączących głowicę rygla i rurę rygla. Przestrzeń między obejmami jest również niezbędna w przypadku obciążenia siłą N_x oraz momentem M_x , ponieważ umożliwia ona swobodny obrót i przesuw głowicy rygla. Sztywny element w postaci kształtownika mógłby być krótszy i w przypadku wymienionych form obciążenia, poza obszarem obejm jest zbędny. Zastosowano taką długość z myślą o pozostałych formach obciążenia.

W przypadku uchwytu, dostosowanego do dostępnych maszyn wytrzymałościowych, umożliwiającego obciążanie węzła momentem M_y lub M_z , wykorzystano ten sam element sztywny (Rys. 3.21). Obejmy dolne oraz dystanse są zbędne w tych badaniach, ale ponieważ zostały przyspawane w celu realizacji wcześniej opisanych badań nie odcinano ich. Elementami uchwytu są:

- sztywny element wraz z przyspawanymi dystansami i obejmami dolnymi (wykorzystano element poprzedniego uchwytu), w którym wykonano otwory średnicy 20 mm w odległości 300 mm od osi symetrii uchwytu,
- cztery dystanse z otworami o średnicy 20 mm, elementy stalowe wykonane z płaskownika 140x50x 20 mm,
- obejmy, wykonanej z połowy złącza obrotowego (Rys. 2.7 c), do którego przyspawano płaskownik 60x50x20 mm z otworem średnicy 20 mm, umożliwiającym połączenie obejm z dystansem,
- cztery śruby M20 klasy 10.9.



Rys. 3.21 Model uchwytu umożliwiającego obciążenie węzła momentem M_y oraz M_z

Długość dystansów dobrano w taki sposób, ażeby możliwy był montaż rygli w obrębie obejm bez konieczności wytwarzania dodatkowego elementu sztywnego. W przypadku obciążania węzła momentami, występującymi w ryglu, dochodzi do dużych przemieszczeń, dlatego też zastosowano podwójny przegub dzięki czemu zwiększono zakres obciążeń, w których nie występuje znaczna siła normalna. W trakcie obciążania dochodzi do zmiany odległości w płaszczyźnie poziomej między osią symetrii uchwytu a osią obejm. Przegub podwójny umożliwia zmianę tej odległości bez występowania siły normalnej, mającej wpływ na zachowanie węzła. Zginanie węzła jest wywołane poprzez siłę przyłożoną na ramieniu, co powoduje, że węzeł jest poddany oddziaływaniu w postaci momentu, modelującego zginanie rygla jak i siłą, która modeluje siłę tnącą w ryglu. Uzyskiwana wartość siły V_z stanowi ok. 10% siły powodującej zniszczenie węzła. W rzeczywistych konstrukcjach rusztowań zginanie również jest wywoływane poprzez siłę równoległą lub prostopadłą do osi stojaka na

zadany ramieniu działania. W przypadku form obciążenia w postaci momentów jesteśmy w stanie określić ich wartość, znając wartość siły przyłożonej do rygla oraz ramię jej oddziaływania. Procedura wyznaczania wartości momentu zginającego zostanie opisana w dalszej części odnoszącej się do tej formy obciążenia.

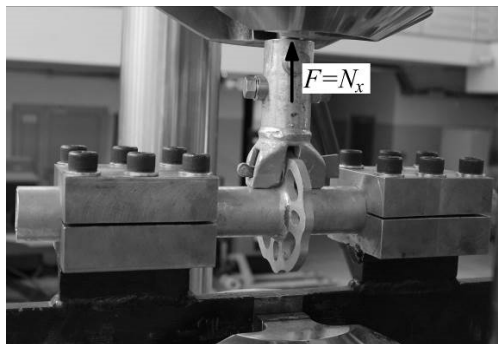
Ze względu na wymogi, zawarte w normie [61] odnoszącej się do wartości średnicy zewnętrznej rur, z których wykonane są elementy składowe rusztowania, opracowany uchwyt umożliwia wykonanie badań węzła dowolnego systemu rusztowań typu modułowego niezależnie od producenta oraz materiału, z jakiego został on wykonany. Badania nie wymagają dużego nakładu pracy w trakcie przygotowywania próbek a sam montaż stanowiska nie jest skomplikowany. W trakcie realizacji poniższej pracy opracowane uchwyty zostały wykorzystane w trakcie realizacji zlecenia powierzonego Politechnice Lubelskiej, mającego na celu określenie parametrów wytrzymałościowych prototypowych węzłów rusztowania modułowego. Badania zostały wykonane w 2014 i są jednym z elementów niezbędnych do uzyskania europejskiego certyfikatu, umożliwiającego wprowadzenie produktu na rynek. Uchwyt został zaprojektowany, jak również własnoręcznie wykonany, przez autora.

3.3.2 Badania węzła obciążonego siłą N_x

Pierwszym z rozpatrywanych układów obciążenia węzła był układ, w którym obciążenie zostało przyłożone w postaci siły wzdłuż osi rygla, modelującej siłę normalną w ryglu. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem sztywnego zamocowania rury stojaka i przy jednostronnym rozciąganiu rygla (Rys. 3.22). W przypadku tego typu podejścia jedynym problemem była średnica rury rygla. Ponieważ maszyna wytrzymałościowa nie była przystosowana do normatywnej średnicy rury rusztowania, zastosowano trzpień przykręcane bezpośrednio do rury. Zastosowanie śrub oraz wyokrąglonych podkładek umożliwiało wielokrotne wykorzystanie tych samych trzpień w szeregu badań. Śruby były wkręcane bezpośrednio w trzpień a przekazanie obciążenia następowało zarówno poprzez tarcie, jak i powierzchnię styku śruby i rury rygla.

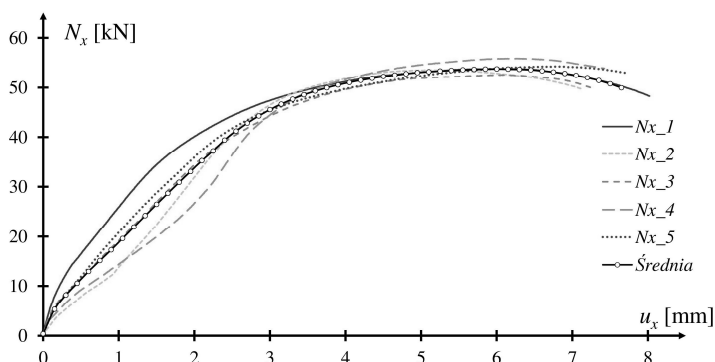
Próbka węzła składała się z pojedynczego rygla oraz rury stojaka o długości 0,5 m z przyspawaną rozetą. Po umieszczeniu klina w otworze rozety oraz oparciu górnej krawędzi głowicy rygla, połączenie między elementami realizowano z wykorzystaniem młotka o masie 500 g, którym wbijano klin. Tak przygotowaną próbkę umieszczano w zaprojektowanym uchwycie i przykręcano rurę stojaka w obrębie obejm za pomocą sześciu śrub na każdą obejmę. Następnie umieszczano uchwyt w maszynie wytrzymałościowej i wykonywano badania. Badania przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczeń wynoszącym 1 mm/min w jednym cyklu obciążenia. Badania przeprowadzano do pełnego zniszczenia próbki. W trakcie badań dokonywano pomiaru przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej oraz wartości przyłożo-

nego obciążenia. Przeprowadzono pięć niezależnych prób, każdorazowo zmieniając wszystkie elementy składowe węzła.



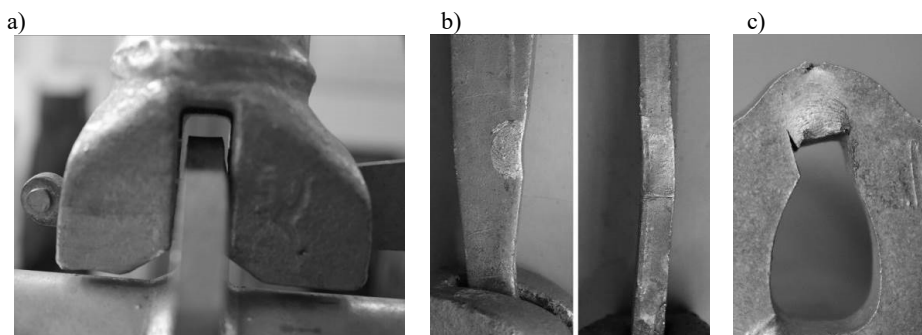
Rys. 3.22 Uchwyt zastosowany w przypadku obciążenia węzła siłą N_x

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano wykresy zależności pomiędzy przemieszczeniami a siłą N_x (Rys. 3.23). 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 a tym samym 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 niedokładności powierzchni poszczególnych elementów, powodujące rozbieżności pomiędzy poszczególnymi próbami obciążenia. Rusztowania są konstrukcjami podlegającymi wielokrotnemu wykorzystaniu, 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. 3.23 Wyniki zależności siła-przemieszczenie uzyskane w przypadku obciążenia węzła siłą N_x

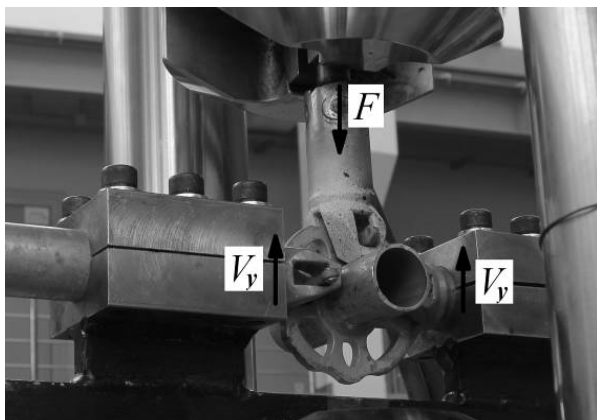
Zaobserwowano trwałe zmiany w postaci miejscowego uplastycznienia stali w miejscu styku klina oraz rozety. Już podczas wbijania klina następuje minimalne odkształcenie w miejscu bezpośredniego przekazania obciążenia. Badania laboratoryjne potwierdziły fakt, iż podczas rozciągania zniszczeniu ulega rozeta. Forma zniszczenia ma postać ścięcia otworu rozety poprzez klin (Rys. 3.24). Trwałym odkształceniom ulega klin w miejscu bezpośredniego oddziaływania na rozetę. Nie zauważono widocznych zmian w obrębie spoin, łączących rozetę z rurą stojaka. Oględziny rzeczywistych konstrukcji rusztowań również wskazywały, iż najbardziej wyężonym elementem, w przypadku rozciągania rygla, jest klin oraz rozeta.



Rys. 3.24 Forma zniszczenia w przypadku obciążenia węzła siłą N_x : a) deformacja węzła, b) klin, c) rozeta

3.3.3 Badania węzła obciążonego siłą V_y

Obciążenie, symulujące siłę tnącą w płaszczyźnie pomostu, jest obciążeniem występującym bardzo rzadko, ale niewykluczonym. Mamy z nim do czynienia np. w przypadku kotwienia rusztowania do budynku. Sytuacja ta występuje, gdy trzeba ominąć otwór w ścianie lub inną przeszkodę, uniemożliwiająca montaż łącznika kotwiącego bezpośrednio do stojaka. Kotwa jest montowana wtedy do rygla a siła normalna występująca w kotwie jest przekazywana na rygiel wywołując w nim siłę tnącą V_y . Siła V_y powinna być przyłożona bezpośrednio do rygla, lecz tego typu obciążenie nie byłoby możliwe w dostępnych maszynach laboratoryjnych i wymagałoby stworzenia kolejnego uchwytu o skomplikowanej budowie. Problemem okazało się również przyłożenie obciążenia z głowicy maszyny do węzła. W pierwszych próbach do węzła przyłożono siłę ze zwrotem do góry, powodującą rozciąganie rygla, ale po przekroczeniu siły ok. 20 kN, talerzyk i klin w połączeniu służącym do przekazania siły, ulegały odkształceniom plastycznym. Dlatego też zdecydowano się na obciążanie węzła, w układzie pokazanym na Rys. 3.25 czyli siłą F skierowaną do węzła. W takim układzie obciążenie jest przekazywane przez znacznie większą powierzchnię styku rury i głowicy rygla.



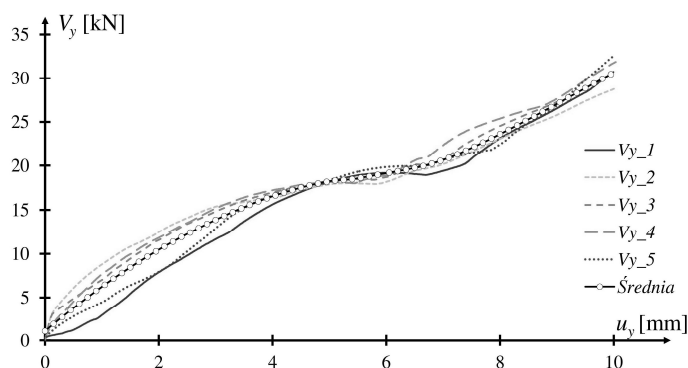
Rys. 3.25 Uchwyt zastosowany w przypadku obciążenia węzła siłą V_y

Próbka węzła składała się z dwóch rygli oraz rury stojaka o długości 0,2 m z przyspawaną rozetą. Po umieszczeniu klina w otworze rozety oraz oparciu górnej krawędzi głowicy rygla o rozetę, połączenie między elementami realizowano poprzez wbici klina za pomocą młotka o masie 500 g. Tak przygotowaną próbkę umieszczano w zaprojektowanym uchwycie i przykręcano rury rygli w obrębie obejm za pomocą sześciu śrub na każdą obejmę. W celu przyłożenia obciążenia, w skład węzła wchodził dodatkowy rygiel, za pośrednictwem którego przykładano siłę do rury stojaka. Następnie umieszczano uchwyt w maszynie wytrzymałościowej i wykonywano badania. Badania przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczeń, wynoszącym 1 mm/min w jednym cyklu obciążenia. Badania przeprowadzano do momentu osiągnięcia przemieszczenia o wartości 10 mm. W trakcie badań dokonywano pomiaru przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej oraz wartości przyłożonego obciążenia. Przeprowadzono pięć niezależnych prób, każdorazowo zmieniając wszystkie elementy składowe węzła.

Na Rys. 3.26 pokazano wykres siły V_y w funkcji przemieszczenia u_y . Na wykresie tym charakterystycznym punktem jest zmiana nachylenia wykresów po przekroczeniu przemieszczenia około 6 mm. Po przekroczeniu przemieszczeń o wartości 6 mm dochodzi do oparcia ścianek bocznych klina o krawędzie otworu głowicy rygla, czego efektem jest wzmocnienie całego układu. Wartość siły, przypadającej na jeden rygiel, to połowa siły występującej w maszynie wytrzymałościowej, dlatego wartość występującej siły V_y określano na podstawie wzoru:

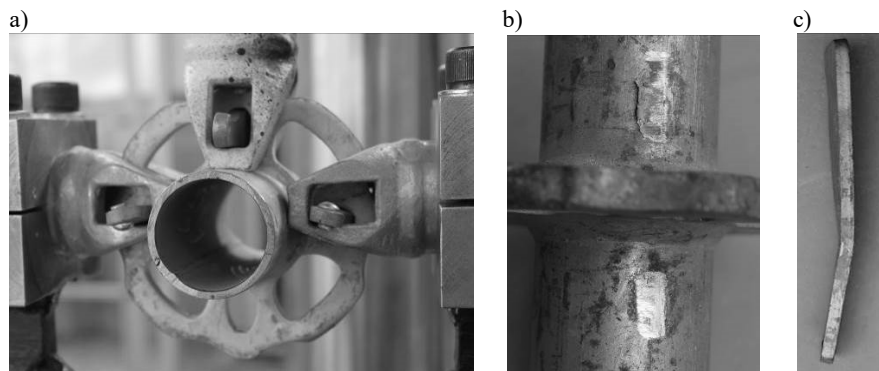
$$V_y = \frac{F}{2}. \quad (3.1)$$

gdzie: F – siła odczytana na tłoku maszyny wytrzymałościowej



Rys. 3.26 Wyniki zależności siła-przemieszczenie uzyskane w przypadku obciążenia węzła siłą V_y

W zakresie badanych obciążeń nie uzyskano krytycznej wartości siły, przy której następowalby nagły wzrost przemieszczeń a tym samym jednoznaczny moment zniszczenia węzła. Nieodwracalne odkształcenia plastyczne zaobserwowano w obrębie rury stojaka (Rys. 3.27 a). Oddziaływanie w postaci tarcia pomiędzy głowicą rygla a rurą stojaka pozostawiło zauważalne ślady w postaci otarć powierzchni rury. Udział klina w przenoszeniu obciążeń w przypadku dużych przemieszczeń spowodował jego odkształcenie, przedstawione na Rys. 3.27 c.

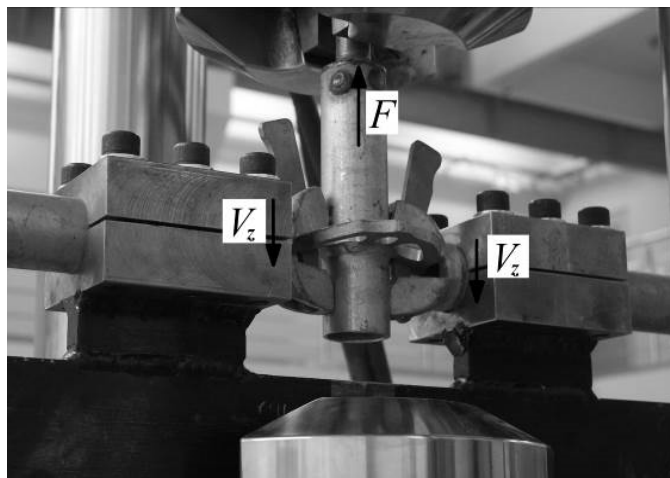


Rys. 3.27 Forma zniszczenia w przypadku obciążenia węzła siłą V_y : a) deformacja węzła, b) rura stojaka, c) klin

3.3.4 Badania węzła obciążonego siłą V_z

Oddziaływanie w postaci siły V_z występuje w przypadku węzła z ryglem, na którym opiera się podest lub w przypadku, gdy rusztowanie jest podwieszone do istniejącej konstrukcji. Uzyskanie czystego ścinania na maszynie wytrzymałościowej służącej do osiowego rozciągania jest praktycznie

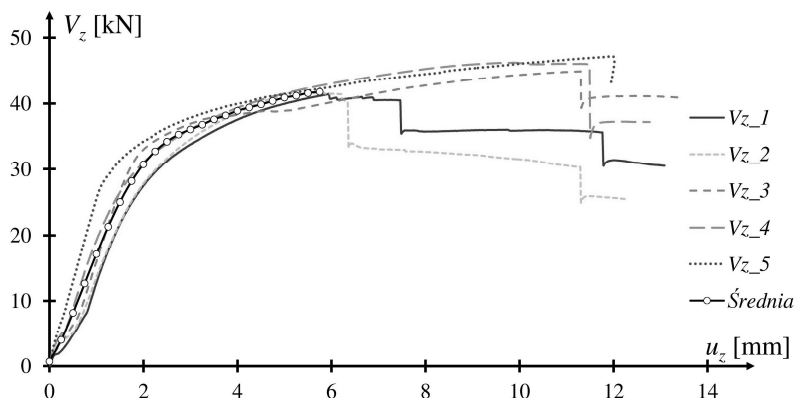
niemożliwe. Zawsze będziemy mieli do czynienia ze zginaniem. W celu zminimalizowania wpływu zginania na formę odkształcenia pod wpływem ścinania, w zaproponowanym uchwycie zminimalizowano ramię działania siły oraz usztywniono uchwyty (Rys. 3.28) maksymalnie, jak było to możliwe.



Rys. 3.28 Uchwyt zastosowany w przypadku obciążenia węzła siłą V_z

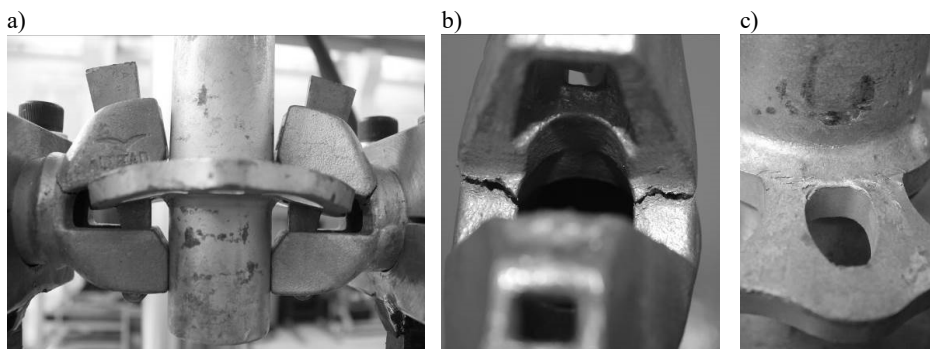
Próbka węzła składała się z dwóch rygli oraz rury stojaka o długości 0,25 m z przyspawaną rozetą. Ze względu na znaczne siły niszczące węzeł poprzez jego ścinanie niemożliwe było zastosowanie trzpieni ze śrubami. Trzpień został przyspawany w obrębie rury stojaka. Próbkę węzła przygotowywano tak, jak w przypadku poprzedniego badania poprzez wbicie klina w otwór rozety młotkiem o masie 500 g. Próbkę umieszczano w zaprojektowanym uchwycie a następnie przykręcano do obejm za pomocą sześciu śrub na każdą obejmę. Następnie umieszczano uchwyt w maszynie wytrzymałościowej i wykonywano badania. Badania przeprowadzano przy stałym przyroście przemieszczeń wynoszącym 1 mm/min w jednym cyklu obciążenia. Badania przeprowadzano do momentu zniszczenia węzła a dokładnie pęknięcia w obrębie głowicy rygla. W trakcie badań mierzono przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej oraz wartości przyłożonego obciążenia. Przeprowadzono pięć niezależnych prób, każdorazowo zmieniając wszystkie elementy składowe węzła. Wartość siły ścinającej przypadającej na jeden rygiel to połowa siły występującej w maszynie wytrzymałościowej, dlatego wartość występującej siły V_z określano na podstawie wzoru:

$$V_z = \frac{F}{2}. \quad (3.2)$$



Rys. 3.29 Wyniki zależności siła-przemieszczenie uzyskane w przypadku obciążenia węzła siłą V_z

Przeprowadzone badanie wskazało newralgiczne miejsca w obrębie głowicy oraz nasunęło pytanie czy w przypadku większej liczby elementów w jednym węźle nie nastąpiłoby ścięcie rozety. W przypadku ścinania otrzymano inny charakter wykresu (Rys. 3.29) niż w pozostałych formach obciążenia. Na wykresie widoczne są przedziały, w których nastąpiło pęknięcie głowicy rygla. Przed badaniami przypuszczano, iż zniszczeniu ulegnie w głównej mierze rozeta. Naturalnym zachowaniem może wydawać się sytuacja, gdy pod wpływem ścinania dojdzie do zniszczenia spoin, łączącego rozetę z rurą stojaka. Tak jednak się nie stało. W głównej mierze zniszczeniu uległy głowice rygli. Jako pierwsze zaczęły pojawiać się pęknięcia w obrębie naroży głowicy (Rys. 3.30 b). Pod wpływem dalszego obciążenia pęknięcia powłoki ocynku pojawiły się również w obrębie spoin, ale wystąpiły one przy znacznie większym obciążeniu.



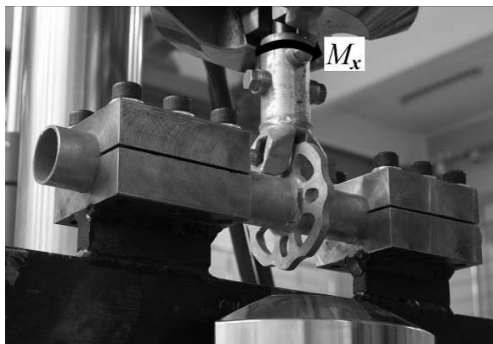
Rys. 3.30 Forma zniszczenia w przypadku obciążenia węzła siłą V_z : a) deformacja węzła, b) głowica rygla, c) rozeta

3.3.5 Badania węzła obciążonego momentem M_x

W przypadku typowych konstrukcji rusztowań, obciążenie w postaci momentu skręcającego w ryglu praktycznie nie występuje. Połączenie pomiędzy pomostem a rygłem jest połączeniem przegubowym, dlatego też nie następuje przekazanie obciążenia w postaci momentu. Jednakże w przypadku nietypowych konstrukcji rusztowań, których geometrię należy dostosować do obiektu poprzez wykonanie nieregularnych poszerzeń pomostu lub daszków ochronnych, tego typu obciążenie może wystąpić. Jest to nietypowa forma obciążenia, jednakże rusztowania modułowe, których węzeł jest przedmiotem badań są do takich sytuacji przeznaczone. W normie [62] jako jedną z form obciążenia węzła wskazano moment M_x (Rys. 2.3 a), modelujący moment skręcający rygiel. Dzięki przeprowadzonym badaniom możliwe będzie określenie dopuszczalnych obciążeń, jak również określenie charakteru połączenia uzyskiwanego pomiędzy rygłem a stojakiem w przypadku obciążenia w postaci momentu skręcającego rygiel.

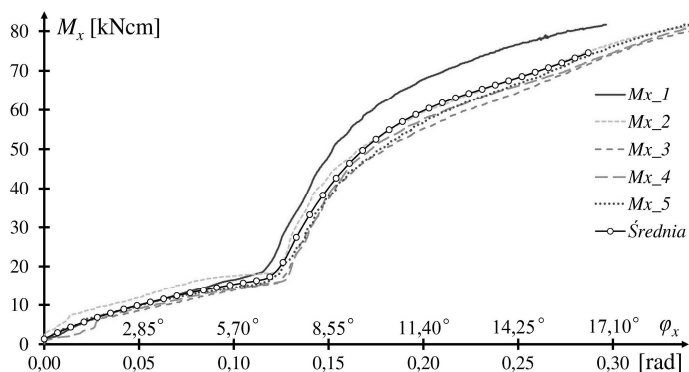
Podczas badań zachowania węzła pod wpływem obciążenia, symulującego moment skręcający M_x , próbka węzła składała się z pojedynczego rygla z przykręconym trzpieniem oraz rury stojaka o długości 0,5 m wyposażonego w przyspawaną rozetę. Próbkę węzła przygotowywano tak, jak w przypadku poprzedniego badania poprzez wbicie klina w otwór rozety z wykorzystaniem młotka o masie 500 g. Następnie umieszczano uchwyt w maszynie wytrzymałościowej i wykonywano badania (Rys. 3.31). Badanie zostało przeprowadzone przy pomocy maszyny MTS 250, w której możliwe jest przyłożenie momentu skręcającego bezpośrednio do rygla. Badania przeprowadzano przy stałym przyroście kąta obrotu głowicy maszyny, wynoszącym $2^\circ/\text{min}$ w jednym cyklu obciążenia. Badania przeprowadzano do momentu osiągnięcia około 17° obrotu głowicy. W trakcie badań dokonywano pomiaru kąta obrotu głowicy maszyny wytrzymałościowej oraz wartości przyłożonego obciążenia w postaci momentu skręcającego. Przeprowadzono pięć niezależnych prób, każdorazowo zmieniając wszystkie elementy składowe węzła. Wolna przestrzeń w obrębie głowicy rygla jest o trzy milimetry większa niż grubość rozety (Rys. 3.1). Tego typu wolna przestrzeń powoduje, że w przypadku skręcania sztywność połączenia do momentu oparcia się obu ścianek głowicy o rozetę jest znikoma (Rys. 3.32) a połączenie w analizach wytrzymałościowych konstrukcji rusztowań może być modelowane jako przegubowe. Elementem, wytwarzającym opór zapewniającym sztywność do momentu uzyskania kąta obrotu o około 7° , jest tylko klin oraz wyokrąglenie głowicy bezpośrednio dotykające rurę rygla. Przesunięcie, po którym sztywność połączenia wzrasta, wykracza poza zakres przemieszczeń, z jakimi mamy do czynienia w konstrukcjach rusztowań. Tak duże skrócenie rygla nie jest możliwe, bo oznaczałoby znaczne odkształcenie konstrukcji, a więc przekroczenie dopuszczalnych nośności elementów, oraz przekroczenie stanów

granicznych użytkowania. Wartości momentu M_x podano w dość nietypowej jednostce kNcm, co wynika z uzyskania małych wartości oraz jednostek stosowanych w katalogach producentów rusztowań. Wartości kąta podano w dwóch jednostkach: radianach [rad] co jest częściej spotykanym oznaczeniem w literaturze oraz stopniach [°]. Zastosowanie dwóch jednostek ma ułatwić interpretację otrzymanych wyników.

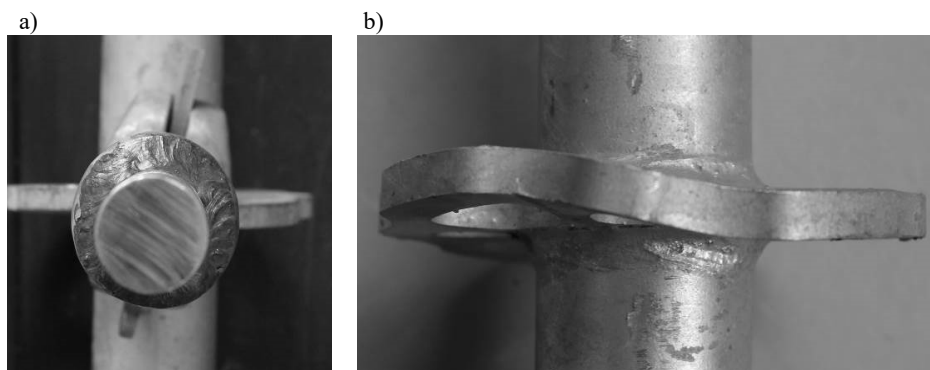


Rys. 3.31 Uchwyt zastosowany w przypadku obciążenia węzła momentem M_x

Jak widać na Rys. 3.32 nie zaobserwowano spadku wartości momentu w badaniach w zakresie kąta obrotu do 17° . Jednak w wyniku obciążeń, w obrębie rozety widoczne są wyraźne odkształcenia plastyczne. Zniszczenia powstałe pod wpływem momentu M_x dotyczą rozety w obrębie oddziaływania ścianek głowicy (Rys. 3.33). Rozeta uległa znacznemu wygięciu, przy czym należy pamiętać, że przedstawione deformacje zostały zaobserwowane po uzyskaniu znacznego kąta obrotu wynoszącego około 17° . Pomimo braku wyraźnego punktu na wykresie, który wskazywałby na zniszczenie węzła, węzeł z takimi uszkodzeniami na pewno nie powinien być użyty po raz kolejny.



Rys. 3.32 Wyniki zależności moment-kąt obrotu uzyskane w przypadku obciążenia węzła momentem M_x



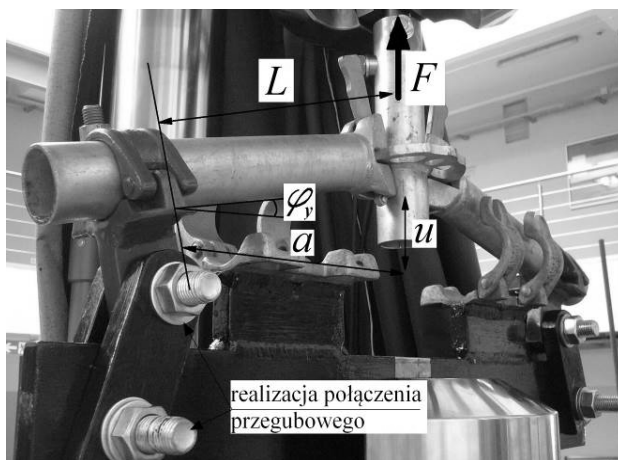
Rys. 3.33 Forma zniszczenia w przypadku obciążenia węzła momentem M_x : a) deformacja węzła, b) rozeta

3.3.6 Badania węzła obciążonego momentem M_y

Obciążenie momentem M_y jest jednym z najczęściej rozpatrywanych oddziaływań, występujących w węzłach konstrukcji stalowych, do których należą rusztowania. Określenie nośności oraz charakter połączenia (Rys. 2.13) pomiędzy elementami pionowymi i poziomymi było przedmiotem wielu prac naukowych opisanych w p 2.4.4 niniejszego opracowania. W trakcie użytkowania rusztowania, w wyniku przekazania obciążenia z pomostów na rygiel, dochodzi do jego zginania w płaszczyźnie pionowej, które w postaci momentu M_y jest przekazywane na węzeł. Jeżeli, w danej płaszczyźnie, w konstrukcji nie występują stężenia, połączenie uzyskiwane pomiędzy poziomym rygłem i pionowym stojakiem powinno zapewniać stabilność konstrukcji. Przyjęcie błędnego schematu statycznego, nieprawidłowo uwzględniającego charakter występujących połączeń, może doprowadzić do katastrofy budowlanej lub nieekonomicznego projektowania konstrukcji.

Zgodnie z zasadami mechaniki obciążenie, modelujące zginanie rygla w płaszczyźnie pionowej, uzyskano poprzez zastosowanie siły F działającej na ramieniu a . (Rys. 3.34). Ponieważ węzeł poddany zginaniu ulega znacznym odkształceniom, konieczne było zastosowanie podwójnych przegubów w celu wyeliminowania występowania sił normalnych spowodowanych zbliżaniem się rygla do siebie. W przypadku obciążania węzła momentem M_y mamy do czynienia z obciążeniem węzła siłą V_z , jednak jej wpływ jest znikomo mały i wynosi około 10% wartości siły, powodującej zniszczenie węzła. Próbkę węzła przygotowywano tak, jak w przypadku poprzedniego badania, poprzez wbicie klina w otwór rozety z wykorzystaniem młotka o masie 500 g. Próbkę, składającą się z dwóch rygla o długości 350 mm oraz stojaka z przykręconym trzpieniem, umieszczano w zaprojektowanym uchwycie. Następnie umieszczano uchwyt w maszynie wytrzymałościowej i wykonywano badania. Badania przeprowa-

dzano przy stałym przyroście przemieszczeń, wynoszącym 5 mm/min w jednym cyklu obciążenia, do momentu osiągnięcia kąta obrotu głowicy równego około 8°. Odpowiada to przemieszczeniu pionowemu rury stojaka około 45 mm. W trakcie badań dokonywano pomiaru przemieszczenia głowicy maszyny wytrzymałościowej oraz wartości przyłożonego obciążenia F . Przeprowadzono pięć niezależnych prób, każdorazowo zmieniając wszystkie elementy składowe węzła.



Rys. 3.34 Uchwyt zastosowany w przypadku obciążenia węzła momentem M_y

Wartość występującego momentu M_y określano na podstawie wzoru:

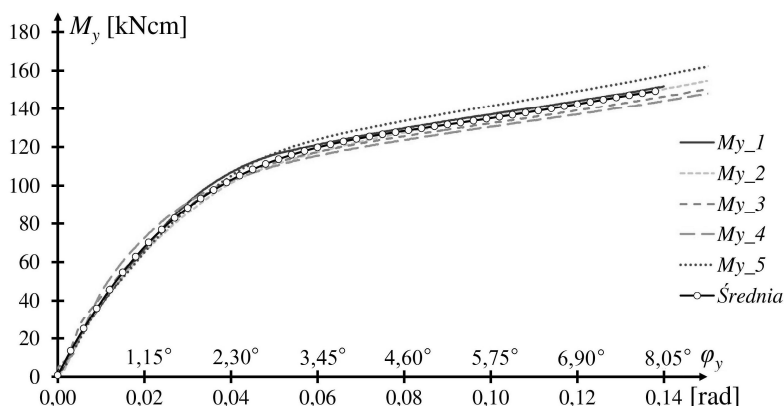
$$M_y = \frac{F}{2} a \quad (3.3)$$

gdzie: F – siła przyłożona do rury stojaka, a – ramię działania siły. W przypadku zastosowanego uchwytu ramię działania siły nie jest wartością stałą i wyznaczano ją na podstawie wzoru:

$$a = \sqrt{L^2 - u^2} \quad (3.4)$$

gdzie L – odległość osi obejmy rygla od osi węzła (osi maszyny wytrzymałościowej) wynoszącej 300 mm a przemieszczenie u jest mierzonym przemieszczeniem głowicy maszyny. Wartość kąta obrotu określano na podstawie wzoru:

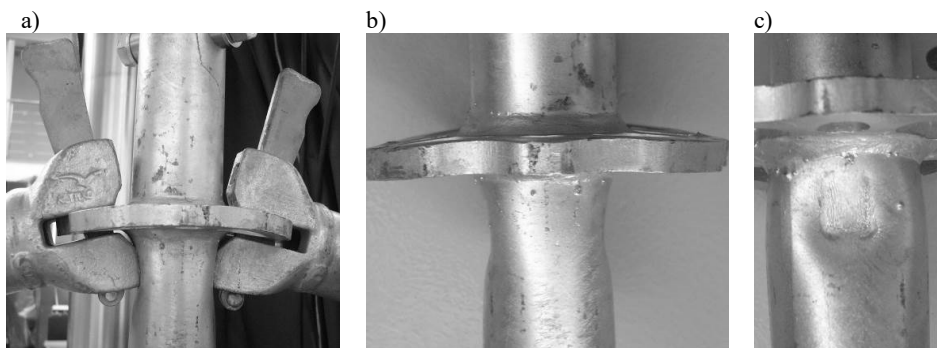
$$\phi_y = \arctan\left(\frac{u}{a}\right) \quad (3.5)$$



Rys. 3.35 Wyniki zależności moment M_y -kąt obrotu φ_y uzyskane w przypadku obciążenia węzła momentem M_y

Wykres otrzymanych zależności moment M_y -obrót φ_y przedstawiono na Rys. 3.35. Nie zauważono wyraźnego spadku wartości momentu na wykresie. Tak jak w przypadku pozostałych obciążeń, w obrębie wykresu możemy zaobserwować prostoliniową część wykresu, określającą sztywność węzła, oraz krzywoliniową część związaną z odkształceniami plastycznymi zaobserwowanymi w obrębie rury stojaka.

W przypadku oddziaływania na węzeł momentu M_y zniszczenie miało postać odkształcenia rozety, jak również rozległych wgnieceń rury stojaka w strefie docisku głowicy rygła do rur (Rys. 3.36). Zaprojektowany uchwyt zadziałał prawidłowo, pozwalając na zbliżenie się końców rur do siebie. Siły, które ewentualnie mogłyby doprowadzić do zniszczenia węzła w wyniku działania siły V_z , są dziesięciokrotnie mniejsze niż uzyskane w badaniach opisanych w p.3.3.4.

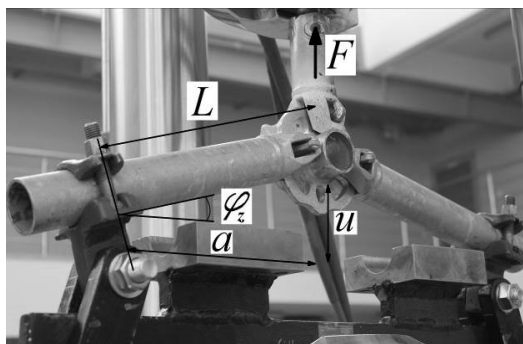


Rys. 3.36 Forma zniszczenia w przypadku obciążenia węzła momentem M_y : a) deformacja węzła, b) rozeta, c) rura stojaka

3.3.7 Badania węzła obciążonego momentem M_z

Obciążenie węzła w postaci momentu M_z , który wywołuje zginanie rygla w płaszczyźnie poziomej, może być wywołane oddziaływaniem wiatru na rusztowanie. Może to szczególnie dotyczyć rusztowań z przekryciem ochronnym w postaci siatek lub plandek. Jeżeli kotwienie rusztowania nie jest realizowane w każdym stojaku rusztowania, wzajemne przemieszczenia poszczególnych stojaków w płaszczyźnie poziomej wywołuje obciążenie węzła w postaci momentu M_z . Sztywność konstrukcji rusztowania w płaszczyźnie poziomej zapewniają pomosty usytuowane na ryglach poprzecznych, jednakże nie zawsze pomosty znajdują się na każdym poziomie rusztowania. Brak pomostów możemy również zaobserwować w przypadku rusztowań, wykorzystywanych jako konstrukcje wsparcie deskowań.

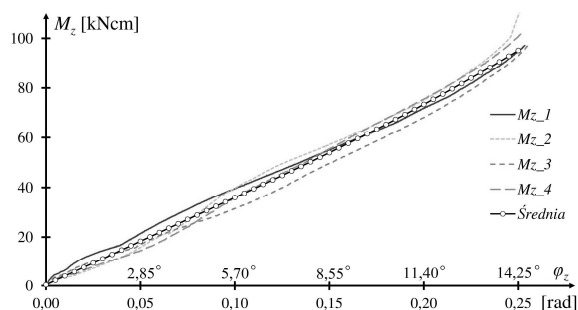
W celu uzyskania momentu M_z , za pomocą maszyny służącej do osiowego rozciągania wykorzystano ten sam uchwyt jak w przypadku momentu M_y (Rys. 3.37). Różnica w badaniu polegała na zmianie elementu, podlegającego rozciąganiu z rury stojaka na rygiel, oraz obróceniu płaszczyzny pracy węzła. W skład badanego węzła wchodziły dwa rygle o długości 350 mm, rygiel wyposażony w trzpień, służący do przyłożenia obciążenia, oraz rura stojaka o długości 150 mm z przyspawaną rozetą, pobraną ze stojaka dostarczonego przez firmę. Siła uzyskana po próbnym obciążeniu była na tyle mała, że nie wystąpił problem, związany z formą obciążenia węzła opisany w przypadku siły V_y , tzn. nie nastąpiło zniszczenie elementów, które miały tylko przekazać obciążenie. Dlatego zdecydowano się na obciążanie węzła siłą rozciągającą, przekazywaną bezpośrednio z klina na talerzyk.



Rys. 3.37 Uchwyt zastosowany w przypadku obciążenia węzła momentem M_z

Zgodnie z zasadami mechaniki zginanie uzyskano poprzez zastosowanie siły F , działającej na ramieniu a (Rys. 3.37). Ponieważ węzeł poddany działaniu momentu M_z ulega znacznym odkształceniom, konieczne było zastosowanie podwójnych przegubów, umożliwiających znaczny obrót uchwytów bez wprowadzania dodatkowych obciążeń. Siła, przy której przerywano obciążanie,

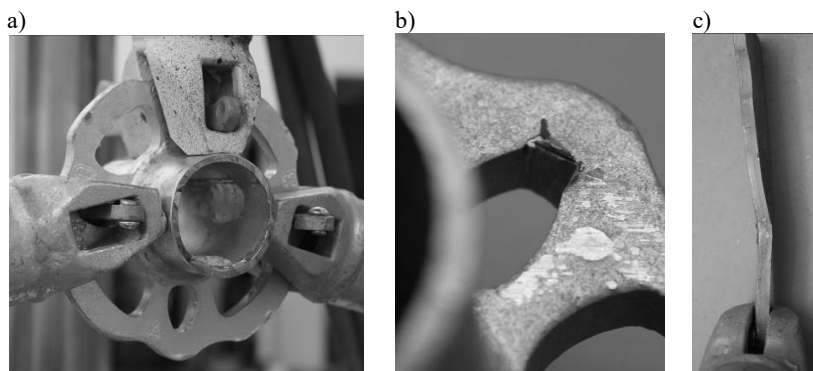
wynosiła zaledwie około 6 kN i nie powodowała praktycznie żadnych odkształceń wynikających z działania siły rozciągającej na rygle jak również ścinania w płaszczyźnie badanych elementów. Zastosowano taką samą procedurę wyznaczania wartości kąta obrotu oraz wartości momentu jak w przypadku badań oddziaływania momentu M_y na węzeł. Zastosowane podwójne przeguby umożliwiały obciążanie węzła w zakresie zmiany kąta φ_z od 0° do 14° . Dalsze obciążanie węzła powodowało występowanie sił normalnych, zaburzających otrzymane wyniki.



Rys. 3.38 Wyniki zależności moment-kąt obrotu uzyskane w przypadku obciążenia węzła momentem M_z

W przypadku działania momentu M_z na węzeł nie zaobserwowano znacznych zmian w przebiegu wykresu zależności moment-kąt obrotu (Rys. 3.38). Badanie przerwano, ponieważ zakres przemieszczeń przekroczył wartość 14° , które w praktyce oznaczają przekroczenie stanu granicznego użyteczności.

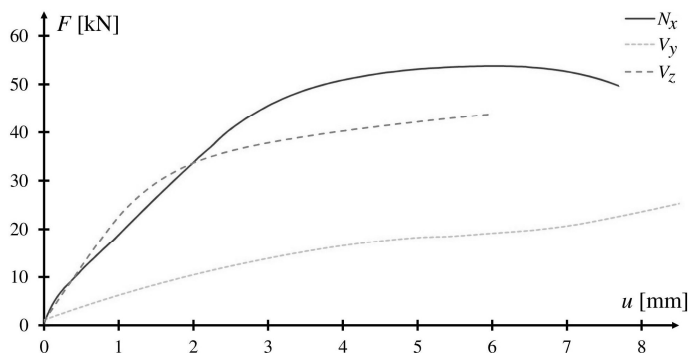
Zniszczenia na skutek obciążenia węzła momentem M_z zaobserwowano jedynie w obszarze klina (Rys. 3.39), który uległ wygięciu oraz talerzyka w miejscu styku z klinem.



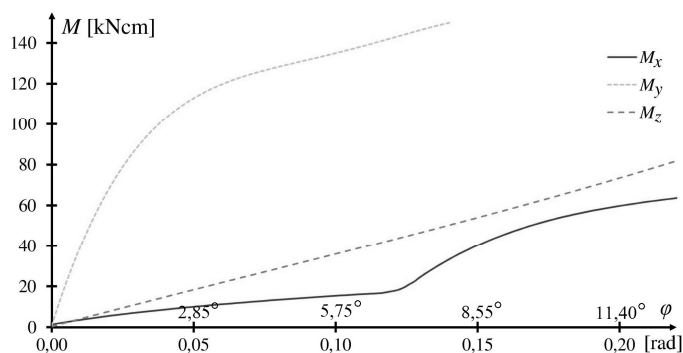
Rys. 3.39 Forma zniszczenia w przypadku obciążenia węzła momentem M_z : a) deformacja węzła, b) rozeta, c) klin

3.3.8 Zestawienie wyników pomiarów

W celu wzajemnego porównania otrzymanych wyników poszczególnych form obciążenia zestawiono je na wspólnych wykresach, przedstawionych na Rys. 3.40 oraz Rys. 3.41. Przedstawione przebiegi zależności siła-przemieszczenie oraz moment-kąt obrotu są wartościami uśrednionymi uzyskanymi na podstawie przeprowadzenia badań. Największą nośność węzeł wykazuje w przypadku obciążenia siłą N_x oraz obciążenia momentem M_y .



Rys. 3.40 Zestawienie średnich przebiegów zależności siła-przemieszczenie w przypadku poszczególnych form obciążenia



Rys. 3.41 Zestawienie średnich przebiegów zależności moment-obrót w przypadku poszczególnych form obciążenia

Badania przeprowadzano do momentu zniszczenia próbki lub do uzyskania znacznych przemieszczeń. Zniszczenia zaobserwowane w trakcie badań mogą być wykorzystane przez producentów rusztowań jako wytyczne w celu poprawy wybranych parametrów materiałowych lub geometrii elementów. Inwentaryzacja rusztowań obejmująca ich uszkodzenia może dostarczyć informacji na

temat rzeczywistych obciążeń, jakim są poddawane konstrukcje rusztowań. W przypadku poszczególnych form obciążenia zniszczeniu ulegały:

- N_x – rozeta oraz klin,
- V_y – rura stojąca (w niewielkim stopniu),
- V_z – głowica rygla,
- M_x – rozeta,
- M_y – rura stojąca oraz rozeta,
- M_z – rozeta oraz klin.

Określenie dopuszczalnych wartości poszczególnych form obciążenia wymaga doboru ich kryteriów. Według autora, w celu określenia dopuszczalnego obciążenia węzła rozpatrywanego rusztowania należy wziąć pod uwagę następujące kryteria:

- zniszczenia elementu,
- wielokrotności użytkowania.

Pierwsze z wymienionych kryteriów jest kryterium stosowanym w przypadku normy [65], w której przedstawiono procedurę określania nośności na podstawie przebiegu wykresu oraz zniszczenia węzła. W dalszej części pracy ta procedura zostanie przeprowadzona i zastosowana do wyników badań opisanych w punktach 3.3.3÷3.3.7. W przypadku normy [72], odnoszącej się do rusztowań rurowo-złączkowych oprócz szczegółowego omówienia stanowisk badawczych, jednoznacznie wskazano wartości przemieszczeń występujących w połączeniu, po przekroczeniu których badania należy przerwać. W odniesieniu do rozpatrywanych węzłów takich wytycznych nie opracowano. Pomimo, iż w węźle nie występuje zniszczenie charakteryzujące się spadkiem siły, określenie dopuszczalnych wartości obciążenia bez uwzględnienia występujących przemieszczeń wydaje się być niewłaściwe. Konstrukcje rusztowań budowlanych są specyficzną grupą konstrukcji, charakteryzującą się wielokrotnością wykorzystania tych samych elementów. Fakt ten należy uwzględnić określając nośność węzła tak, ażeby pomimo wystąpienia danego obciążenia, element mógł być wykorzystywany wielokrotnie. Wpływ wielokrotności użytkowania zostanie prześledzony na podstawie analiz numerycznych opisanych w dalszej części pracy.

3.4 Analiza wyników badań laboratoryjnych węzła

Na podstawie uzyskanych wyników zależności siła-przemieszczenie lub moment-obrót możliwe jest określenie nośności węzła w przypadku poszczególnych form obciążenia, jak również określenie charakteru uzyskiwanego połączenia. W przypadku węzłów półsztywnych konieczne jest również określenie sztywności węzła.

3.4.1 Określenie nośności węzła

W normie PN-EN 12811-3 [65] przedstawiono procedurę wyznaczania charakterystycznej wartości nośności węzła $R_{k,nom}$ określonej wzorem:

$$R_{k,nom} = \frac{R_{k,b}}{\gamma_{R2}} \quad (3.6)$$

gdzie: $R_{k,b}$ – bazowa wartość graniczna, γ_{R2} – współczynnik bezpieczeństwa uzależniony od właściwości plastycznych węzła.

Proces podzielono na 10 kroków. Pierwszym z nich jest określenie granicznej wartości obciążenia $r_{u,i}^a$, przy której następuje zniszczenie, czyli maksymalnej wartości przyłożonego obciążenia podczas badań laboratoryjnych. W przypadku badań, w których następuje spadek wartości siły, oprócz określenia wartości maksymalnej obciążenia, należy policzyć iloraz energii, opisany wzorem:

$$q_e = \frac{E_{lo}}{E_{ul}}, \quad (3.7)$$

gdzie wartość energii sprężystej E_{ul} wyznacza się ze wzoru:

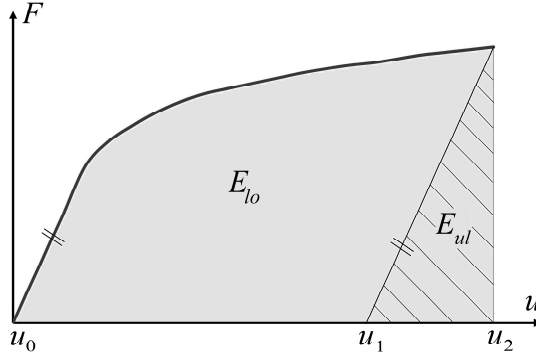
$$E_{ul} = \int_{u_1}^{u_2} F_{ul}(u) du, \quad (3.8)$$

natomiast wartość całkowitej energii wyznacza się na podstawie wzoru:

$$E_{lo} = \int_{u_o}^{u_2} F_{lo}(u) du. \quad (3.9)$$

Graficzna interpretacja wzorów (3.7), (3.8), (3.9) została przedstawiona na Rys. 3.42. Energia E_{ul} jest równa polu figury utworzonej przez linię poprowadzoną z punktu wyznaczającego nośności $r_{u,i}^a$, oś odciętych i linię pionową. Linia ukośna to linia o takim samym nachyleniu jak w nachylenie wykresu w części sprężystej. Energia E_{lo} jest równa polu figury utworzonej przez wykres F - u , oś odciętych i linię pionową. Do wyznaczenia wartości pól, jak również aproksymacji funkcji zestawem krzywych, wykorzystano własny algorytm i oparty na nim program komputerowy, opracowany w Katedrze Mechaniki Budowli w ramach prac badawczo-rozwojowych dla przemysłu. Funkcje aproksymujące krzywe opisujące pomiary, są dobierane tak, aby korelacja pomiędzy wynikami pomiarów i poszczególnymi funkcjami była możliwie największa i spełniała warunek $\rho^2 \geq 0,95$, gdzie ρ^2 jest to współczynnik korelacji Pearsona. Zgodnie z założeniami normy [65] w początkowej fazie obciążenia wykres należy aproksymować funkcją liniową, opisującą liniowo-

sprężystą pracę węzła. Problematyczną kwestią jest jednoznaczne wskazanie punktu, w którym kończy się prosta a rozpoczyna część krzywoliniowa, która powinna być opisana wielomianem.



Rys. 3.42 Interpretacja wzorów 3.8 oraz 3.9

Założono, że w tym punkcie $\rho_p^2(u)$ (dla prostej) i $\rho_w^2(u)$ (dla wielomianu) powinny przyjmować możliwie największe wartości. W tym celu przeanalizowano zmiany wartości następujących funkcji:

$$g_1(u) = \rho_p^2(u) + \rho_w^2(u), \quad (3.10)$$

$$g_2(u) = \rho_p^2(u)\rho_w^2(u), \quad (3.11)$$

$$g_3(u) = 2 \frac{\rho_p^2(u)\rho_w^2(u)}{\rho_p^2(u) + \rho_w^2(u)}. \quad (3.12)$$

Dla funkcji $g_1(u)$, $g_2(u)$, i $g_3(u)$ wyznaczono lokalne maksima a ich odcięte proponuje się jako pierwsze współrzędne punktu pomiędzy prostą i wielomianem aproksymującymi wyniki pomiarów. Wszystkie trzy funkcje współczynników korelacji wykazują maksima lokalne dla wartości do siebie zbliżonych, a więc wszystkie mogą posłużyć do wyboru punktu przejściowego. Stopień wielomianu, aproksymującego część krzywoliniową określono jako 4. Przy wyższych stopniach wielomianu otrzymywano podobne wartości kwadratu współczynnika korelacji ale czas wykonywania obliczeń w znacznym stopniu się wydłużał. Taki sam stopień wielomianu uzyskano w badaniach, opisanych w pracach [84] i [33]. Wymienione prace dotyczą badań podatnych węzłów w stalowych regałach magazynowych.

Jako graniczne wartości obciążenia $r_{u,i}^a$ przyjmowano mniejszą z wartości: maksymalne obciążenie przeniesione przez węzeł (wartość maksymalna siły) lub

wartość siły, przy której $q_e = 11$. W punkcie normy [65], określającym zasady przyjmowania wartości granicznej, możemy odnaleźć zapis iż w przypadku połączeń, w których występuje tarcie, jako wartość graniczną należy przyjąć wartość, pod wpływem której następuje poślizg. W przypadku rozpatrywanego węzła do poślizgu dochodzi w innym kierunku niż rozpatrywane obciążenie, dlatego też nie ma wyraźnej granicy, którą możemy traktować jako moment wystąpienia poślizgu. W przypadku badań węzłów rurowo-złączkowych (Rys. 3.43) w normie [72] jednoznacznie określono graniczną wartość wzajemnego przesunięcia badanych elementów, po uzyskaniu których badanie można zakończyć, pomimo iż nie musi nastąpić spadek siły.



Rys. 3.43 Węzeł rusztowania rurowo-złączkowego

Przechodząc do kolejnego kroku wyznaczania nośności komponentów rusztowania, należy uwzględnić wpływ wyboczenia. Ponieważ w przypadku węzła nie dochodzi do wyboczenia, wartość graniczną uwzględniającą smukłość elementów można określić jako:

$$r_{u,i}^c = r_{u,i}^a \quad (3.13)$$

W normie [65] analizę statystyczną oparto na założeniu, że logarytmy z wartości nośności elementów rusztowań mają rozkład normalny. Wartość średnią logarytmów wartości granicznych należy określić ze wzoru:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3.14)$$

gdzie: $y_i = \ln r_{u,i}^c$. Odchylenie standardowe należy określić na podstawie wzoru:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.15)$$

gdzie: n – liczba próbek.

Statystyczną wartość graniczną z 75% poziomem zaufania, uzależnioną od liczby przeprowadzonych prób, należy określić na podstawie wzoru:

$$y_5 = \bar{y} - k_{s,k} \sigma, \quad (3.16)$$

gdzie: $k_{s,k}$ – współczynnik uzależniony od liczby przeprowadzonych prób i zgodnie z tabelą umieszczoną w normie [65] w przypadku 5 prób wynosi 2,46. Ostatecznie bazową wartość graniczną należy określić na podstawie wzoru:

$$R_{k,b} = e^{y_5}. \quad (3.17)$$

Wartość współczynnika bezpieczeństwa, który uwzględnia ciągłość należy określić zgodnie ze wzorem:

$$1,25 \geq \gamma_{R2} = -0,025 \bar{q}_e + 1,275 \geq 1,00, \quad (3.18)$$

gdzie: \bar{q}_e – średnia wartość ilorazu energii całkowitej i energii zakresu pracy sprężystej, którą należy określić na podstawie wzoru:

$$\bar{q}_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{ei}, \quad (3.19)$$

gdzie: n – liczba przeprowadzonych prób, q_{ei} – wartość uzyskana w poszczególnych próbach w odniesieniu do wartości granicznej $r_{u,i}^a$.

Współczynnik bezpieczeństwa γ_{R2} jest to współczynnik uwzględniający przebieg zniszczenia. Jeżeli do zniszczenia dochodzi gwałtownie, w wyniku kruchego pęknięcia, ze względów bezpieczeństwa wartość współczynnika osiąga maksymalną wartość 1,25. Elementy, w których zniszczenie następuje gwałtownie, charakteryzują się dużym rozrzutem wyników, a tym samym niższym poziomem zaufania. W przypadku badań węzłów, gdzie o formie zniszczenia decydują właściwości plastyczne wartość współczynnika γ_{R2} może osiągnąć wartość 1,00. Zniszczenie następuje po wystąpieniu znacznych odkształceń a wyniki poszczególnych prób są do siebie zbliżone. Tym samym poziom zaufania uzyskanych wyników jest znacznie większy.

Ostateczne wartości dopuszczalnego obliczeniowego obciążenia należy określać na podstawie wzoru:

$$R = \frac{R_{k,nom}}{\gamma_M \gamma_F}, \quad (3.20)$$

gdzie: $\gamma_M = 1,1$ – częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z właściwościami materiału, $\gamma_F = 1,5$ – częściowy współczynnik bezpieczeństwa wynikający z losowego charakteru oddziaływań.

Wartości nośności węzła uzyskane na podstawie przedstawionych wzorów, uzyskane w przypadku poszczególnych form obciążenia zostały zestawione w Tab. 3.3.

Tab. 3.3 Wartości nośności węzła dla poszczególnych form obciążenia

Nr	$r_{u,i}^a$	$r_{u,i}^c$	q_e	y_i	σ	y_5	$R_{k,b}$	γ_{R2}	$R_{k,nom}$	R
Siła N_x										
1	53,788	53,788	3,35	3,985	0,0229	3,933	51,048	1,208	42,27	25,62
2	53,522	53,522	1,94	3,980						
3	52,519	52,519	2,56	3,961						
4	55,890	55,890	2,43	4,023						
5	54,368	54,368	3,21	3,996						
		$\overline{q_e}$	\overline{y}							
		2,70	3,989							
Siła V_y										
1	19,215	19,215	3,59	2,956	0,0437	2,824	16,849	1,117	15,09	9,15
2	18,020	18,020	11,00	2,891						
3	18,479	18,479	10,93	2,917						
4	18,157	18,157	4,09	2,899						
5	20,009	20,009	2,09	2,996						
		$\overline{q_e}$	\overline{y}							
		6,34	2,932							
Siła V_z										
1	41,328	41,328	3,62	3,722	0,0571	3,650	38,472	1,122	34,30	20,79
2	42,130	42,130	3,03	3,741						
3	44,908	44,908	7,30	3,805						
4	46,178	46,178	6,35	3,833						
5	47,111	47,111	10,39	3,853						
		$\overline{q_e}$	\overline{y}							
		6,14	3,790							
Moment M_x										
1	18,327	18,327	1,56	2,908	0,0651	2,641	14,027	1,223	11,47	6,95
2	16,726	16,726	3,23	2,817						
3	15,667	15,667	2,51	2,752						
4	15,782	15,782	1,15	2,759						
5	15,960	15,960	2,02	2,770						
		$\overline{q_e}$	\overline{y}							
		2,10	2,801							
Moment M_y										
1	149,491	149,491	4,05	5,007	0,1398	4,720	112,198	1,150	97,56	59,13
2	152,485	152,485	5,58	5,027						
3	149,780	149,780	4,07	5,009						
4	143,489	143,489	6,13	4,966						
5	202,557	202,557	5,15	5,311						
		$\overline{q_e}$	\overline{y}							
		5,00	5,064							

cd. Tab. 3.3

Nr	$r_{u,i}^a$	$r_{u,i}^c$	q_e	y_i	σ	y_5	$R_{k,b}$	γ_{R2}	$R_{k,nom}$	R
Moment M_z										
1	80,842	80,842	1,46	4,392	0,0738	4,168	64,577	1,246	51,82	31,41
2	71,545	71,545	1,00	4,270						
3	85,258	85,258	1,00	4,446						
4	77,802	77,802	1,17	4,354						
			$\overline{q_e}$	\overline{y}						
			1,16	4,365						
W przypadku sił N_x , V_y , V_z wartości zostały wyrażone w jednostce kN, natomiast w przypadku momentów M_x , M_y , M_z wartości zostały wyrażone w jednostce kNm										

W przypadku momentu zginającego M_z dopuszczalną wartość obciążenia określono na podstawie czterech prób. Jeden z wyników został odrzucony ze względu na przypadkowe zablokowanie możliwości obrotu w obrębie przegubów. Zarówno w przypadku momentu skręcającego M_x jak i siły tnącej V_y dopuszczalne wartości obciążeń określono na podstawie wykresów w początkowym przedziale obciążenia, ponieważ możemy zauważyć wzmocnienia następujące po znacznych przemieszczeniach wynoszących około 7° w przypadku momentu M_x oraz 6 mm w przypadku siły V_y . Tak duże wartości przemieszczeń oznaczają w praktyce, że elementy rusztowania przestają zapewniać spełnienie warunków stanów granicznych użytkowania.

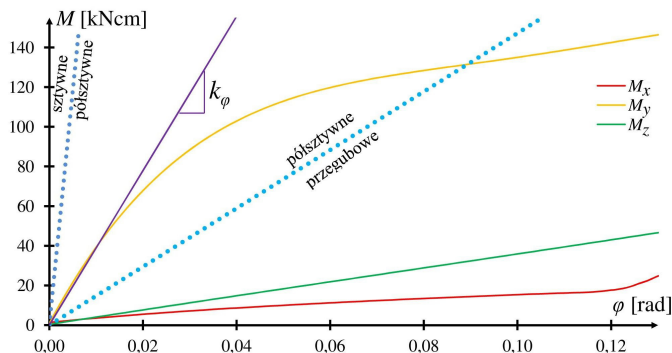
3.4.2 Określenie sztywności węzła

Oprócz nośności węzła, duże znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania rusztowań ma przebieg zależności obciążenie-przemieszczenie i wynikające z tego elementy schematu statycznego. Przyjęcie właściwego schematu statycznego, uwzględniającego charakter pracy połączenia elementów, ma diametralny wpływ na stateczność całej konstrukcji rusztowania. Podstawową własnością połączenia jest jego sztywność k_φ , która w przypadku zależności liniowej określana jest na podstawie wzoru:

$$k_\varphi = \frac{dF}{du}, \quad (3.21)$$

gdzie dF jest to przyrost obciążenia, natomiast du jest to przyrost przemieszczenia, odpowiadającego zadanemu obciążeniu. Na podstawie otrzymanych wyników badań laboratoryjnych określono rodzaj uzyskiwanego połączenia i wyznaczono jego sztywność k_φ przy działaniu momentów. Określając rodzaj połączenia w przypadku momentów zginających i skręcania zastosowano taką samą metodę jaka została opisana w pracy [28] i polegającą na podziale rodzaju uzyskiwanego połączenia w zależności od uzyskiwanej sztywności. Graniczne wartości sztywności, określające zakres, w których

połączenia są traktowane jako sztywne, półsztywne lub przegubowe, wyznaczono na podstawie wytycznych podanych w europejskiej normie, odnoszącej się do projektowania węzłów konstrukcji stalowych [70].



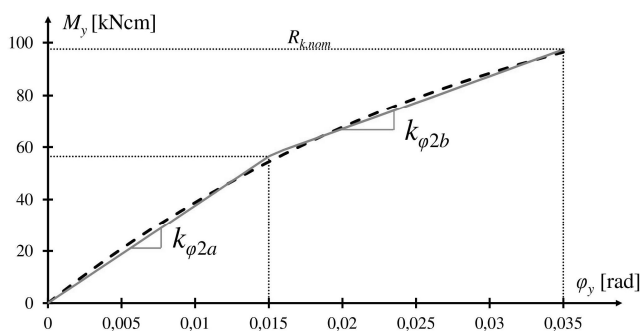
Rys. 3.44 Podział połączeń ze względu na sztywność

Na Rys. 3.44 uzyskany podział został naniesiony na wyniki uzyskane w badaniach laboratoryjnych. Jak widać na rysunku tylko zginanie w płaszczyźnie pionowej związane z działaniem momentu zginającego M_y , ma sztywność, która kwalifikuje połączenie jako półsztywne, dla którego należy określić sztywność k_ϕ . Klasyfikacja połączeń przedstawiona w PN-EN 1993-1-8 [70] ma związek ze sztywnością węzła na zginanie. Naniesienie wykresów momentów zginających i momentu skręcającego na wspólny miało na celu wskazanie różnic w sztywności węzła, w przypadku poszczególnych form obciążenia. Sztywność połączenia w zakresie przenoszenia obciążenia w postaci momentu zginającego w płaszczyźnie poziomej M_z oraz skręcania M_x jest dużo poniżej wartości granicznej połączeń półsztywnych, dlatego połączenie na kierunkach działania tych momentów powinno być traktowane jako przegubowe. Elementem zapewniającym sztywność konstrukcji w płaszczyźnie poziomej, są pomosty rusztowania co udowodniono w pracy [7]. W tej pracy analizowano stalowe pomosty rusztowań ramowych, które są użytkowane również w rozpatrywanym systemie rusztowań modułowych. W przypadku rusztowań modułowych, nieposiadających pomostów na każdym poziomie, należy stosować dodatkowe stężenia w płaszczyźnie poziomej, zapewniające stabilność całej konstrukcji. W typowych konstrukcjach rusztowań połączenie pomiędzy pomostami a ryglami są połączeniami przegubowymi uzyskiwanymi poprzez umieszczenie zaczepu pomostu na poprzecznicach o przekroju rurowym lub ceowym. Zastosowane rozwiązanie umożliwia niezależny obrót zaczepów pomostu w obrębie rygla. Obciążenia użytkowe, jak również obciążenia, wynikające z oddziaływania wiatru nie powodują skręcania rygli poziomych. Projektując nietypowe geometrie rusztowań nie należy doprowadzać do

skręcania rygli, ponieważ ich sztywność jest pomijalnie mała i wzrasta dopiero po znacznych przemieszczeniach wynoszących około 7° .

W publikacjach odnoszących się do węzłów rusztowań można odnaleźć różne metody wyznaczania ich sztywności. Określenia sztywności węzła dokonywano na podstawie badań laboratoryjnych pojedynczych węzłów [15], [28], [36], [78], [79], całych pól rusztowania [43] jak również porównawczych analiz numerycznych konstrukcji rusztowań [48], [54], [55]. W przypadku niniejszej pracy, określając wartość sztywności węzła, rozpatrywano cztery różne procedury, każdorazowo biorąc pod uwagę zakres obciążenia do charakterystycznej wartości nośności węzła $R_{k,nom}$. Jednym z przyjętych sposobów wyznaczania wartości sztywności węzła była aproksymacja uzyskanych wyników funkcją liniową przy założeniu stałej sztywności wynikającej ze sztywności początkowej węzła. Procedura określenia współczynnika funkcji prostoliniowej, a tym samym określenie sztywności oznaczonej jako $k_{\phi 1}$ odbywało się zgodnie z procedurą opisaną w trakcie wyznaczania granicznej wartości obciążenia $r_{u,i}^a$ za pomocą własnego algorytmu. Na podstawie wyników przedstawionych w Tab. 3.4 uzyskano średnią wartość sztywności równą $k_{\phi 1} = 3374 \text{ kNcm/rad}$.

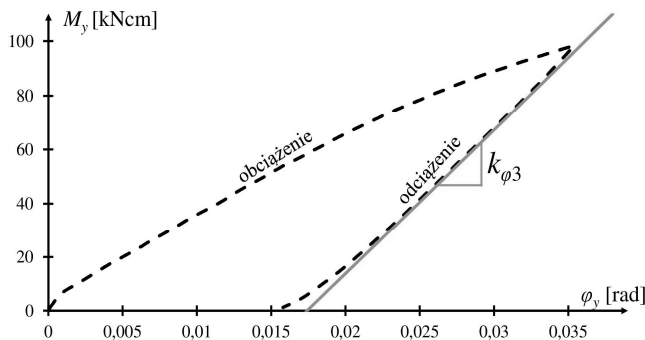
W przypadku drugiego podejścia wyznaczając sztywność posłużono się metodyką przedstawioną w pracy [15], polegającą do podziale wykresu zależności obciążenie-przemieszczenie na odcinki i określeniu sztywności dla poszczególnych odcinków. W przypadku rozpatrywanego węzła wykres został podzielony na dwa odcinki i dla każdego z nich dopasowano prostą (Rys. 3.45). Uzyskane wyniki $k_{\phi 2a}$ i $k_{\phi 2b}$ przedstawiono w Tab. 3.4. Wyznaczanie sztywności poprzez aproksymację dwóch funkcji prostoliniowych jest zgodne z wytycznymi zawartymi w normie [65], odnoszącej się do rusztowań.



Rys. 3.45 Sztywność węzła $k_{\phi 2}$ określona na podstawie podziału wykresu na dwa odcinki

Możemy odnaleźć również prace, w których wartość sztywności połączenia określona jest w trakcie odciążania próbki (Rys. 3.46). Ponieważ w trakcie wykonywania badań nie odciążano próbki, wartość sztywności przy odciążaniu

została określona na podstawie analiz numerycznych opisanych w dalszej części pracy. Tak jak w przypadku pracy [78], dotyczącej węzłów rusztowań rurowo-złączkowych, uzyskana wartość sztywności przy odciążeniu jest znacznie większa niż określona w trakcie obciążania i wynosi $k_{\varphi 3} = 5342 \text{ kNcm/rad}$.



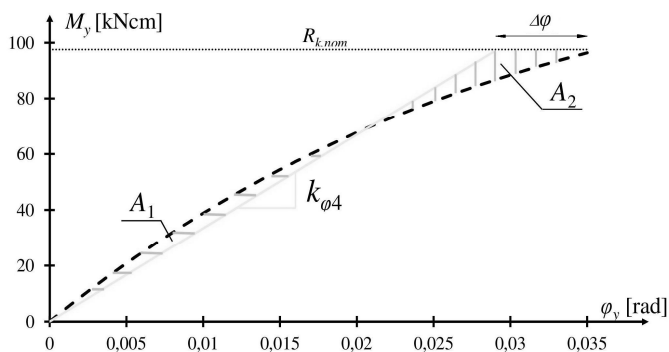
Rys. 3.46 Sztywność węzła $k_{\varphi 3}$ określona w trakcie odciążania próbki

Autor uważa, że określając wartość sztywności węzła należy brać pod uwagę proces obciążenia, na podstawie którego otrzymujemy mniejszą sztywność połączenia. Z jednej strony jest to bezpieczniejsze dla konstrukcji, z drugiej strony analizy statyczno-wytrzymałościowe mają na celu sprawdzenie co się dzieje z konstrukcją, gdy obciążenie wzrasta. W typowych połączeniach sztywność w trakcie odciążania powinna być taka sama jak w przypadku początkowej fazy obciążania, w której nie następuje uplastycznienie. W przypadku rozpatrywanego węzła różnica sztywności w trakcie odciążania w stosunku do sztywności uzyskiwanej w trakcie obciążania wynika z odkształceń plastycznych zachodzących w obrębie węzła już w niewielkim zakresie obciążenia.

Tab. 3.4 Wartości sztywności węzła w płaszczyźnie pionowej (oddziaływanie momentu M_y) uzyskane za pomocą poszczególnych procedur

badania laboratoryjne (funkcja liniowa)	nr		1	2	3	4	5
	ρ^2		0,9918	0,9946	0,9798	0,9897	0,9984
	$k_{\varphi i}$	[kNcm/rad]	2977,29	3939,53	2648,22	4087,50	3702,21
	$k_{\varphi 1}$	[kNcm/rad]	3374				
dwie funkcje liniowe	φ	[rad]	0-0,015			0,015-0,035	
	ρ^2		0,9917			0,9882	
	$k_{\varphi 2}$	[kNcm/rad]	3764			2028 φ +26,05	
w trakcie odciążania	ρ^2		0,9996				
	$k_{\varphi 3}$	[kNcm/rad]	5342				
warunek równych pól	$k_{\varphi 4}$	[kNcm/rad]	3346				

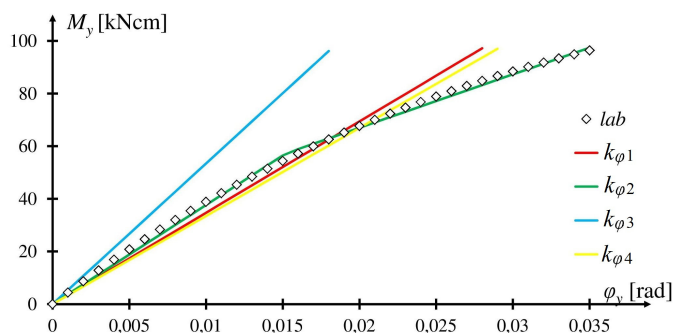
Ponieważ rozpatrywany węzeł rusztowania nie jest typowym węzłem konstrukcji stalowej i uzyskiwane połączenie nie jest połączeniem trwałym, w ramach porównania uzyskiwanych wyników tak, jak w przypadku pracy [78], sztywność określono również według procedury, odnoszącej się do wielopoziomowych regałów paletowych, zawartej w normie [69]. W przypadku regałów paletowych uzyskiwane połączenie również jest połączeniem nietrwałym. Procedura wyznaczania sztywności polega na doborze funkcji liniowej spełniającej warunek równych pól A_1 i A_2 , zawartych pomiędzy prostą a uzyskanym wykresem zależności moment-obrót (Rys. 3.47). Ponieważ wyniki mają charakter jedynie porównawczy, procedurę wyznaczania poszczególnych pól ograniczono do uśrednionego wykresu zależności moment-obrót, uzyskanych w trakcie badań laboratoryjnych. Przed przystąpieniem do wyznaczania pól, średni wynik badań aproksymowano wielomianami czwartego stopnia tak, jak miało to miejsce w przypadku pracy [33]. Nie spełniono warunku różnicy kąta obrotu $\Delta\varphi$ na poziomie 15%, występującego w wytycznych normy [69]. Różnica pomiędzy kątem uzyskanym przy wyznaczonej sztywności, spełniającej warunek równych pól, w stosunku do granicznej wartości kąta uzyskanego przy wartości $R_{k,nom}$ wyniosła 22,8%. Poglądowa wartość sztywności uzyskana zgodnie z procedurą wyniosła $k_{\varphi 4} = 3346$ kNm/rad (Tab. 3.4).



Rys. 3.47 Sztywność węzła $k_{\varphi 4}$ określona według procedury odnoszącej się do wielopoziomowych regałów paletowych

Ostatecznie jako wartość sztywności rozpatrywanego węzła rusztowania przyjęto wartość uzyskaną zgodnie z pierwszą procedurą, wynoszącą $k_{\varphi 1} = 3374$ kNm/rad. Wyniki uzyskane w poszczególnych procedurach zostały przedstawione na Rys. 3.48. W trakcie badań nie stwierdzono wyraźnego obszaru występowania luzów w początkowej fazie obciążenia. Sztywność połączenia maleje wraz ze wzrostem przyłożonego obciążenia. Spadek sztywności jest wyraźnie widoczny w zakresie przekraczającym wartość $R_{k,nom}$,

który nie był analizowany w trakcie określania sztywności. Zaobserwowane odkształcenia po przekroczeniu wartości $R_{k,nom}$ dyskwalifikują węzeł z ponownego użycia w innych konstrukcjach, dlatego też nie analizowano tego obszaru obciążeń.



Rys. 3.48 Sztywności węzła uzyskiwane poszczególnymi metodami

Różnica wartości uzyskanych na podstawie przyjęcia stałej sztywności początkowej i procedury odnoszącej się do regałów paletowych wynosi 0,8% natomiast sztywność określona w trakcie odciążania jest o 58,3% wyższa niż sztywność uzyskiwana w trakcie obciążania. Różnica sztywności węzła w stosunku do wyników podanych publikacji [54], w której, na podstawie szeregu analiz całych konstrukcji rusztowań, określono sztywność połączenia na poziomie 3434 kNm/rad, wynosi zaledwie 1,7%.

3.5 Podsumowanie badań laboratoryjnych

Przeprowadzone badania laboratoryjne, rozpatrywanego węzła rusztowania, dostarczyły informacji na temat wzajemnych zależności pomiędzy przyłożonym obciążeniem i zachodzącymi przemieszczeniami. Uzyskane dane pozwoliły na określenie dopuszczalnych obciążeń węzła (Tab. 3.3), jak również charakteru uzyskiwanego połączenia. W przypadku zginania w płaszczyźnie poziomej oraz skręcania, połączenie należy traktować jako przegubowe, natomiast w płaszczyźnie pionowej połączenie ma charakter połączenia półsztywnego o sztywności 3374 kNm/rad. W przypadku rozpatrywanego systemu rusztowania nie stwierdzono wyraźnych luzów w początkowej fazie obciążania.

Analizując poszczególne formy zniszczenia węzła wskazano jego newralgiczne elementy, co może stanowić dane porównawcze w analizach uszkodzeń, występujących w rzeczywistych konstrukcjach.

Opracowane uchwyty mogą być wykorzystane do badań węzłów rusztowań modułowych dowolnego producenta, niezależne od użytego materiału. Badania można przeprowadzić na ogólnodostępnych maszynach wytrzymałościowych,

bez konieczności ich doposażania, dowolną formą obciążenia. Ograniczenie liczby elementów poddawanych obciążeniu wyeliminowało niepożądane efekty związane z jednoczesnym występowaniem wielu zjawisk, jak ma to miejsce w trakcie badania całego pola rusztowania. Prosta budowa i minimalna liczba elementów ulegających zniszczeniu podczas badań w znacznym stopniu ograniczyła koszty badań, jak również czas ich wykonania.

Wyniki uzyskane w ramach badań laboratoryjnych, posłużą do weryfikacji modelu numerycznego węzła, którego jednym z niezbędnych elementów są charakterystyki materiałowe określone na podstawie przeprowadzonych badań. Każdy z elementów węzła wykazał inne charakterystyki materiałowe, a w szczególności głowica rygla będąca odlewem. Znacznie niższa wartość modułu Young'a materiału, z którego wykonane są głowice rygli wpływa na wyniki obliczeń. Dokładniejsze analizy pracy poszczególnych elementów węzła pod wpływem wybranych najważniejszych form obciążenia zaprezentowano w kolejnym punkcie na podstawie analiz numerycznych.

4 Analizy numeryczne

Skomplikowana budowa oraz brak bezpośredniego dostępu do newralgicznych elementów węzła podczas badań laboratoryjnych skłoniły autora do opracowania modeli numerycznych, umożliwiających szczegółowe prześledzenie pracy węzła i zachodzących w nich zmian pod wpływem obciążenia. Ponieważ elementy rusztowania są wielokrotnie użytkowane w różnych konfiguracjach obciążenia, konieczne jest prześledzenie wpływu obciążenia na ich bezpieczną pracę. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych, wykonanych w programie Abaqus opartym na metodzie elementów skończonych [99]. Stworzone modele numeryczne, skalibrowane na podstawie badań laboratoryjnych, opisanych w rozdziale 3, posłużyły do przeanalizowania zachowania węzła pod wpływem poszczególnych form obciążenia. W analizach numerycznych węzła uwzględniono nieliniowość geometryczną, nieliniowość materiałową oraz kontakt pomiędzy poszczególnymi częściami węzła.

4.1 Wstęp

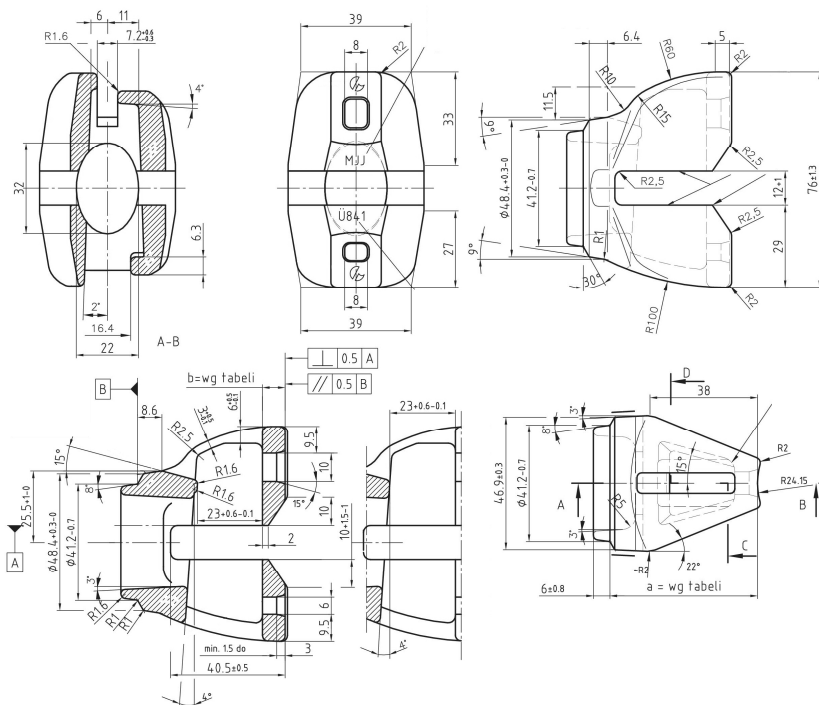
W większości przypadków projektowanie konstrukcji rusztowania polega na stworzeniu prętowego modelu numerycznego, do którego przykładane jest obciążenie w postaci ciężaru własnego, obciążenia użytkowego oraz obciążenia wynikającego z działania wiatru. Stworzony model jest analizowany pod kątem stateczności oraz występujących w nim sił wewnętrznych. Newralgicznym elementem rusztowania są węzły, dlatego należy również sprawdzić wartości sił, występujących w połączeniach i porównać je do wartości dopuszczalnych określonych przez producenta. Ponieważ konstrukcja rusztowania jest konstrukcją tymczasową, te same elementy, a więc też ich węzły, są wielokrotnie wykorzystywane. W obrębie węzłów w wyniku obciążania i wielokrotnego wbijania klina powstają deformacje. Nasuwa się więc pytanie czy element, który został obciążony do wartości dopuszczalnej może być użyty powtórnie w nowej konstrukcji. W jaki sposób jednoznacznie określić czy dany element może być ponownie użyty, pomimo tego że posiada deformacje?

W wielu publikacjach możemy odnaleźć wyniki analiz numerycznych dotyczących rusztowań, jednakże najczęstszym zagadnieniem podejmowanym przez naukowców są analizy stateczności całej konstrukcji rusztowania (por. [4], [14], [18], [19], [38], [42], [51] [94], [95]). Założenia modeli numerycznych są weryfikowane na podstawie uzyskanej wartości obciążenia, powodującego utratę stateczności konstrukcji, w stosunku do uzyskanych wyników badań laboratoryjnych. Na ich podstawie określany jest wpływ poszczególnych elementów modelu takich, jak warunki brzegowe, przyjęte schematy występujących połączeń, układy i rozmiary pól czy też imperfekcji. W analizach

obejmujących całe konstrukcje występuje wiele zmiennych mających wpływ na otrzymane wyniki. Ich wzajemne interakcje są trudne do jednoznacznej interpretacji. W 2017 roku opublikowano artykuł [17], w którym przeprowadzono analizy numeryczne węzła. Niestety został on opublikowany jedynie w języku chińskim, co w znacznym stopniu utrudnia interpretację. Jest to jedyna odnaleziona publikacja, w której analizowano bryłowy model węzła, w którym występuje rozeta, głowica rygla oraz klin. Analiza polegała na przyłożeniu do modelu węzła sił, uzyskanych z prętowego modelu całej konstrukcji rusztowania, wykorzystywanego jako konstrukcja trybun. Celem przeprowadzonych analiz było sprawdzenie czy węzeł zdoła przenieść przewidywane obciążenie. Ponieważ nie odnaleziono publikacji obejmującej szczegółową analizę zachowania węzła pod wpływem obciążenia oraz zachodzących w nich zmian w aspekcie wielokrotnego użytkowania, postanowiono przeprowadzić tego typu analizę.

4.2 Budowa modelu

Model rozpatrywanego węzła stworzono w programie graficznym Autocad na podstawie rysunków technicznych udostępnionych przez producenta, firmę Altrad-Mostostal (Rys. 4.1).

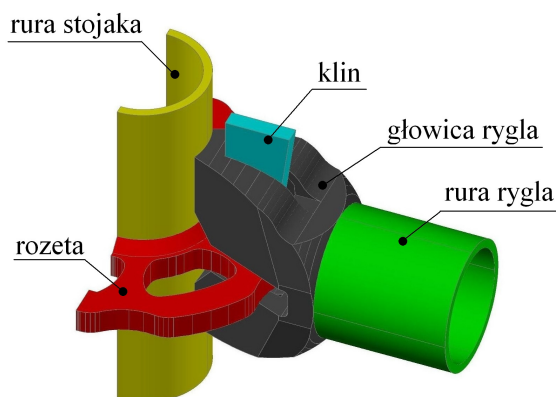


Rys. 4.1 Rysunek techniczny głowicy udostępniony przez producenta rusztowań

Ze względu na konieczność uwzględnienia zjawiska kontaktu wszystkie elementy węzła zamodelowano jako elementy trójwymiarowe. Stworzoną geometrię elementów węzła zaimportowano do programu Abaqus.

4.2.1 Geometria

Wszystkie części składowe węzła zamodelowano jako elementy bryłowe (Rys. 4.2). Model składał się z pięciu podstawowych części: rury stojaka, rozety, głowicy rygła oraz rury rygła. Ponieważ w węźle występuje płaszczyzna symetrii, którą wykorzystano również w trakcie badań laboratoryjnych, stworzono geometrię połowy rury stojaka oraz rozety.

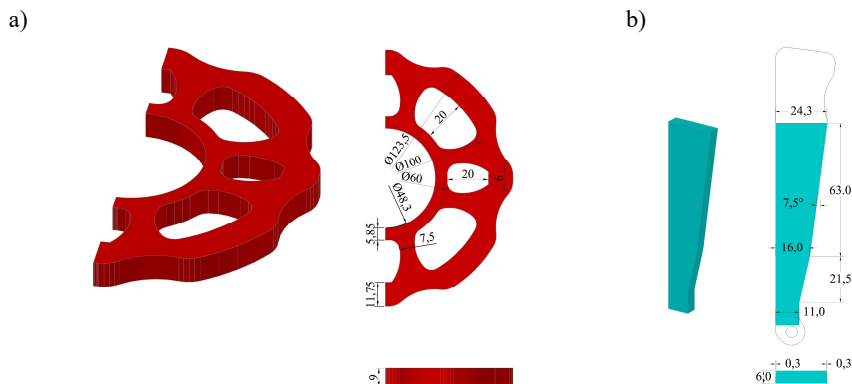


Rys. 4.2 Trójwymiarowy model węzła wygenerowany w programie Autocad

Rura stojaka, jak i rura rygła o średnicy 48,3 mm i grubości ścianki 3,2 mm, została wygenerowana jako element bryłowy, dzięki czemu możliwe było odwzorowanie rzeczywistego kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami. Równie prostym elementem do wygenerowania okazała się rozeta (Rys. 4.3). Ponieważ jest ona wycinana laserowo z blachy o grubości 9 mm, możliwe było stworzenie trójwymiarowego modelu na podstawie płaszczyzny, podlegającej wyciągnięciu wzdłuż prostej prostopadłej do płaszczyzny. Ze względu na duży promień krzywizny w rozecie pominięto krzywiznę występującą w obrębie bezpośredniego kontaktu klina oraz rozety.

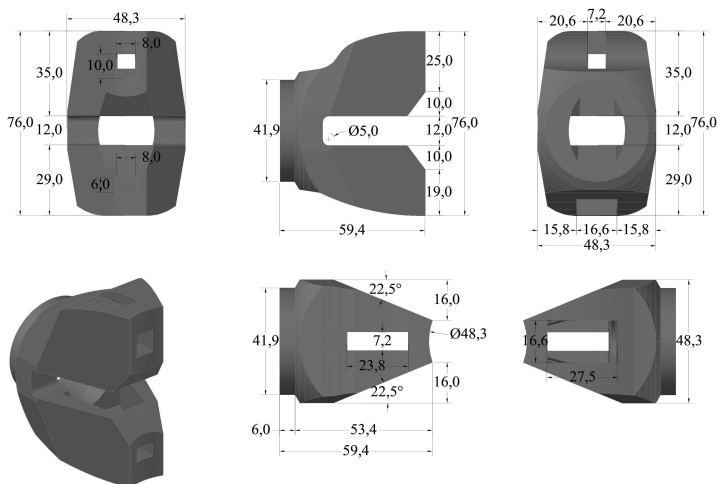
W przypadku klina geometrię ograniczono do obszaru bezpośrednio uczestniczącego w przenoszeniu obciążeń (Rys. 4.3 b). Pozostałe obszary nie biorą udziału w przenoszeniu obciążeń i umożliwiają jedynie montaż trzpienia, zapobiegającego całkowitemu wypadaniu klina i swobodę wyjmowania klina. W trakcie wizualnej inwentaryzacji klina zauważono, że płaszczyzny kontaktu pomiędzy rozetą i głowicą nie są do siebie równoległe. Na podstawie informacji od producenta ustalono, że wynika to z technologii wykonywania klina poprzez wytłaczanie. Ponieważ w trakcie badań dochodziło do niesymetrycznego

niszczenia otworu rozety w wyniku ścinania, wykonano podcięcie krawędzi klina o wartości 0,3 mm na obu płaszczyznach kontaktu.



Rys. 4.3 Trójwymiarowa geometria: a) rozety, b) klina

Najbardziej skomplikowaną geometrię posiada głowica rygla (Rys. 4.4). Liczne wyokrąglenia oraz krzywizny w znacznym stopniu komplikowały wygenerowanie trójwymiarowego modelu. Pominięto wyokrąglenia, wynikające z technologii wytwarzania, polegającej na wykonaniu odlewu i nie mające wpływu na otrzymywane wyniki przeprowadzanych analiz numerycznych. W początkowym etapie tworzenia modelu zachowano wszystkie wyokrąglenia, jakie zostały wskazane na udostępnionych rysunkach. Jednakże małe promienie wyokrąglenia w stosunku do geometrii węzła uniemożliwiły wygenerowanie siatki.

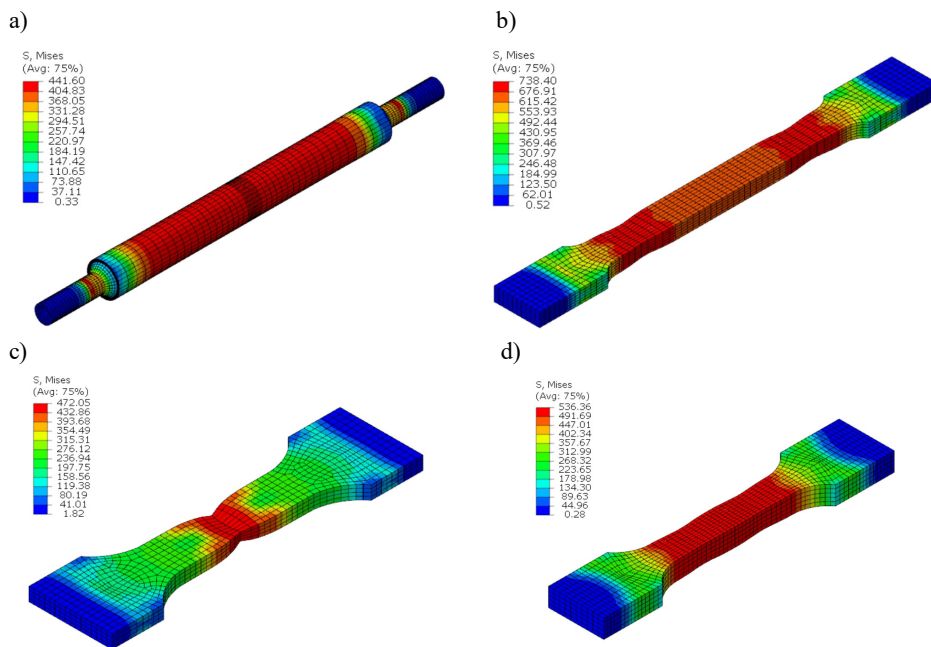


Rys. 4.4 Geometria głowicy rygla

W obrębie węzła zamodelowano również spoiny pachwinowe, występujące pomiędzy rurą stojaka oraz rozetą. Ponieważ jest to newralgiczny obszar węzła, spoiny te zostały zamodelowane jako elementy bryłowe. W modelu pominięto spoiny występujące pomiędzy głowicą rygla oraz rurą rygla, w obrębie których w trakcie wykonywania badań laboratoryjnych nie zaobserwowano żadnych zmian. Połączenie, występujące pomiędzy głowicą rygla oraz rurą rygla, zamodelowano jako połączenie pełne.

4.2.2 Modele materiałowe

W celu zweryfikowania wyników, uzyskanych w laboratorium, stworzono trójwymiarowy model numeryczny próbek materiału poszczególnych elementów węzła. Model numeryczny umożliwił sprawdzenie czy wprowadzone charakterystyki materiałowe we właściwy sposób odzwierciedlają zachowanie poszczególnych próbek pod wpływem obciążenia. Analizie poddawano próbki o wymiarach podanych w Tab. 3.1 w rozdziale 3.2.



Rys. 4.5 Modele numeryczne próbek materiałów: a) rury stojaka, b) kłina, c) rozety, d) głowicy rygla

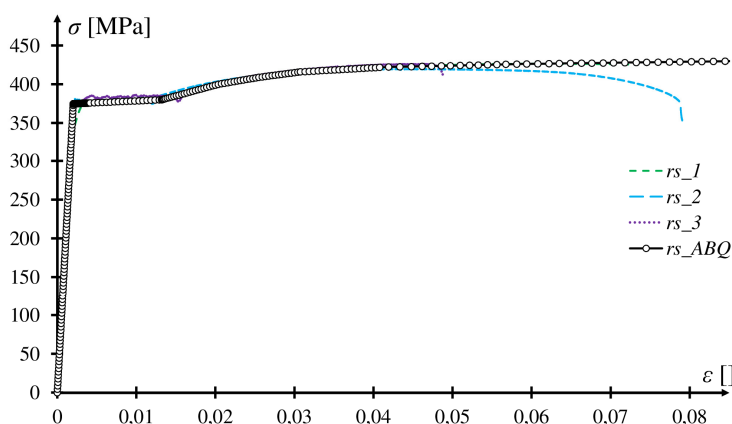
W przypadku rury, model numeryczny składał się z dwóch części: rury oraz przyspawanego trzpienia (Rys. 3.3). W modelu rury zdefiniowano 20550 elementów typu C3D8R (Rys. 4.5 a). Ponieważ w trakcie badań nie zauważono jakichkolwiek zmian w obrębie spawów, połączenie pomiędzy trzpieniami a rurą

zamodelowano jako pełne, przenoszące obciążenie z trzpieni bezpośrednio na rurę. W przypadku klina zdefiniowano 4380 elementów typu C3D8R (Rys. 4.5 b), rozety 2672 elementów typu C3D8R (Rys. 4.5 c) oraz głowicy rygla 3800 elementów typu C3D8R (Rys. 4.5 d). W przypadku próbek płaskich rozmiar i ukształtowanie elementów skończonych dobrano na podstawie pracy [12]. Umożliwiło to wyeliminowanie koncentracji naprężenia spowodowanych kształtem i rozmiarem siatki elementów skończonych.

Każdą z próbek obciążano poprzez zadanie przemieszczeń na jednym z końców tak, jak miało to miejsc w trakcie badań laboratoryjnych.

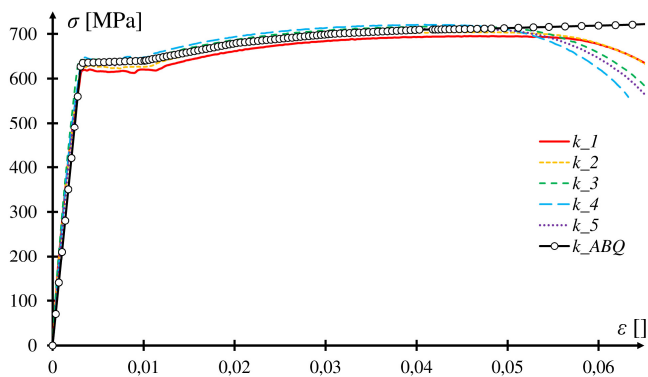
Analizy przeprowadzono z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej, a charakterystyki materiałowe obejmowały zarówno zakres sprężysty, jak i zakres plastyczny z podaniem zależności pomiędzy naprężeniami i odkształceniami.

W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano wykresy zależności naprężenie-odkształcenie (Rys. 4.6÷Rys. 4.9). Ponieważ w trakcie badań laboratoryjnych tensometry wykazywały odkształcenie tylko w niewielkim zakresie odkształceń przekraczających zakres sprężysty, dalszy przebieg zależności naprężenie-odkształcenie uzyskano z danych pozyskanych bezpośrednio z głowicy maszyny wytrzymałościowej po uprzednim ich skorygowaniu względem wyników bazowych uzyskanych z tensometrów.

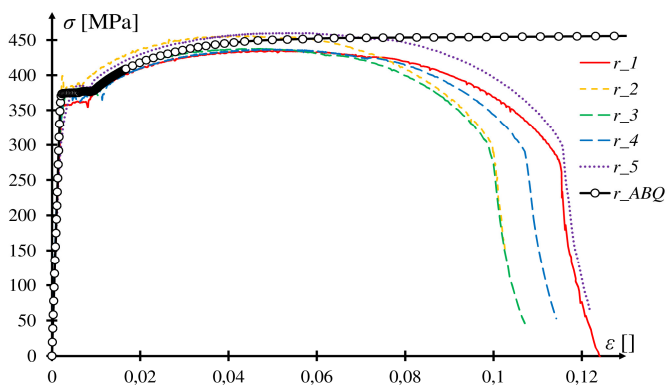


Rys. 4.6 Porównanie wyników uzyskanych w analizie numerycznej próbki materiału rury stojaka

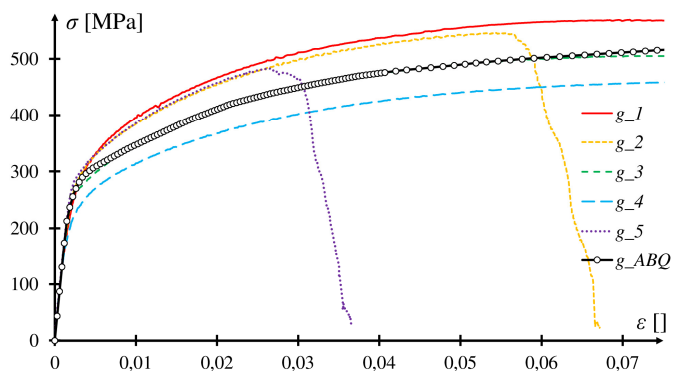
W przypadku spoin, łączących rurę stojaka oraz rozetę, zamodelowanych jako elementy bryłowe, zadano charakterystyki materiałowe zgodne z charakterystykami rozety. W odniesieniu do materiału, z którego wykonana jest rozeta, otrzymano wartości granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie niższe w stosunku do parametrów rury stojaka.



Rys. 4.7 Porównanie wyników uzyskanych w analizie numerycznej próbki materiału klina



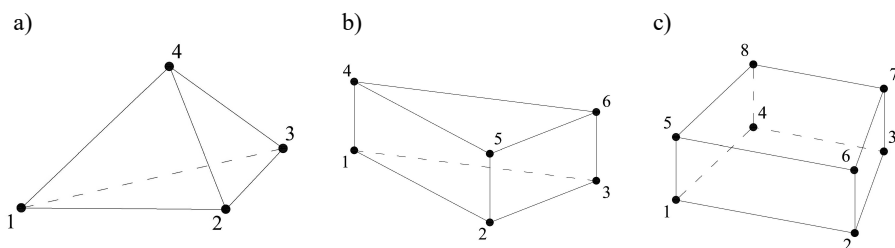
Rys. 4.8 Porównanie wyników uzyskanych w analizie numerycznej próbki materiału rozety



Rys. 4.9 Porównanie wyników uzyskanych w analizie numerycznej próbki materiału głowicy rygła

4.2.3 Budowa siatki elementów skończonych.

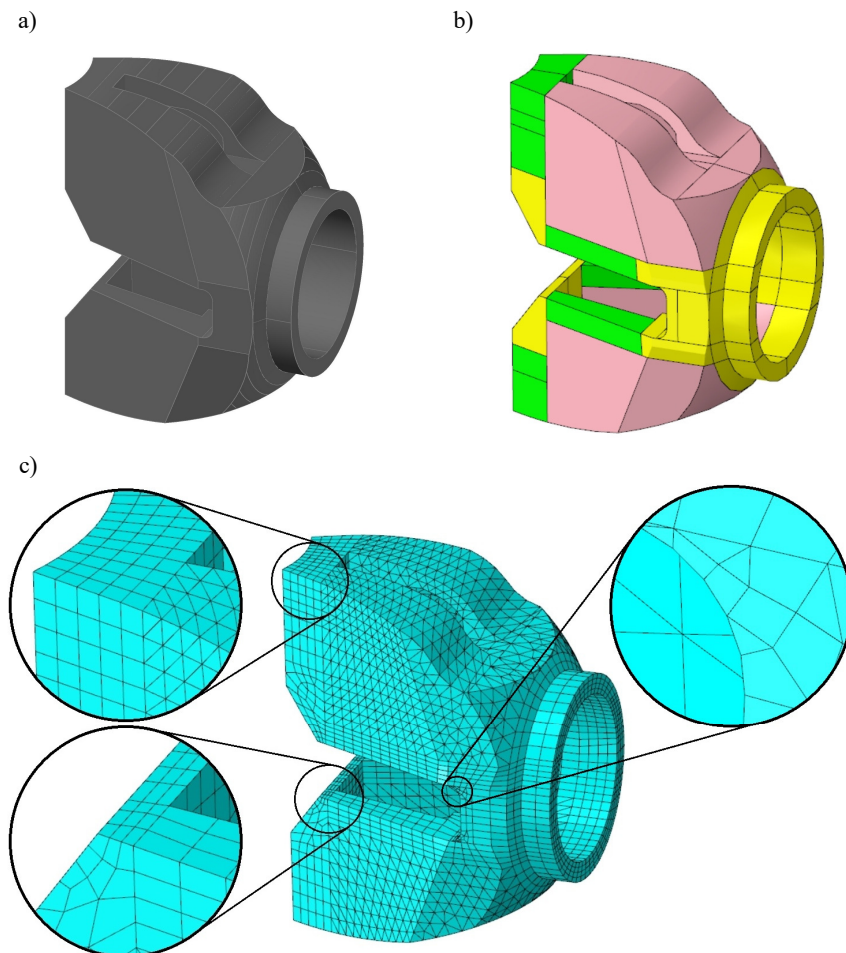
Dobór optymalnej siatki elementów skończonych jest zagadnieniem przysparzającym wiele trudności, szczególnie w przypadku skomplikowanej trójwymiarowej geometrii (por. [3], [10]). Problematyka doboru siatki jest elementem wielu prac, szczególnie w przypadku materiałów kompozytowych i analizy ich trójwymiarowej struktury [83]. Zachowanie wszystkich krzywizn geometrii w znacznym stopniu zwiększa liczbę elementów a tym samym wydłuża czas obliczeń. Konieczne jest uproszczenie modelu, szczególnie w przypadku, gdy wielkość wyokrąglenia jest bardzo mała w stosunku do rozmiaru całego modelu. W modelu pomijano więc krzywizny w obrębie obszarów, nie mających wpływu na rozkład naprężenia i nie będących newralgicznymi miejscami, przenoszącymi obciążenia. Proces dyskretyzacji wszystkich części składowych węzła przeprowadzono w module programu Abaqus. W modelu użyto głównie elementów ośmiowęzłowych C8D8R (Rys. 4.10 a). Ze względu na skomplikowaną geometrię w przypadku główni wykorzystano również elementy sześciowęzłowe C3D6 (Rys. 4.10 b) oraz czterowęzłowe C3D4 (Rys. 4.10 c). Obszary w których użyto elementów sześciowęzłowych i czterowęzłowych, nie biorą bezpośredniego udziału w przenoszeniu obciążeń a tym samym nie zaburzają otrzymanych wyników.



Rys. 4.10 Przestrzenne elementy bryłowe: a) czterowęzłowe (C3D4), b) sześciowęzłowe (C3D6), c) ośmiowęzłowe (C8D8R)

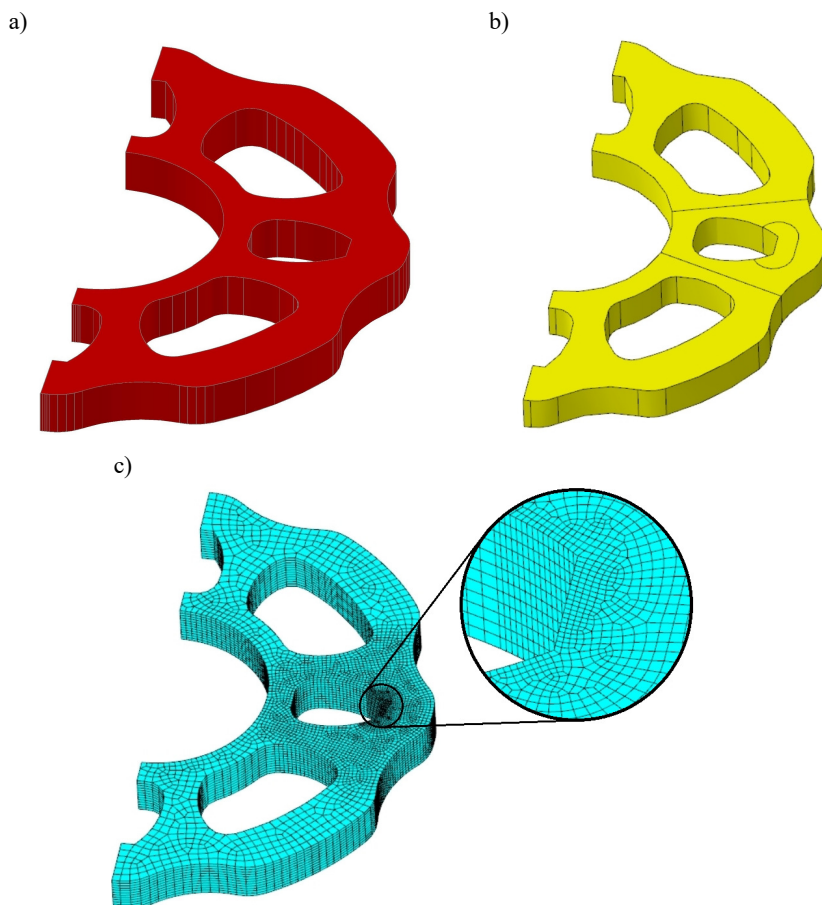
Proces wygenerowania siatki elementów skończonych wymagał podziału poszczególnych części bryłowych węzła tak, jak w przypadku pracy [30]. Podział geometrii brył, w przypadku poszczególnych części składowych węzła, został przedstawiony na Rys. 4.11 a ÷ Rys. 4.16 b. W przypadku obszaru koloru różowego, widocznego na Rys. 4.11 b, zastosowano elementy czterowęzłowe C3D4. Natomiast w przypadku koloru zielonego i żółtego zastosowano elementy ośmiowęzłowe C8D8R. Rozróżnienie na kolor zielony i żółty wynika z metody generowania elementów. W obrębie obszarów, gdzie występuje kontakt pomiędzy głowicą rygła i pozostałymi elementami, zastosowano elementy ośmiowęzłowe. Wyokrąglenie o promieniu 5 mm, występujące w obrębie głowicy, wymusiło zastosowanie elementów sześciowęzłowych C3D6. Układ

elementów skończonych został przedstawiony na Rys. 4.11÷ Rys. 4.16. W celu czytelności rysunku zastosowano powiększenia obszarów zaznaczonych okręgami.



Rys. 4.11 Proces dyskretyzacji głowicy rygla: a) model bryłowy, b) podział modelu, c) siatka elementów skończonych

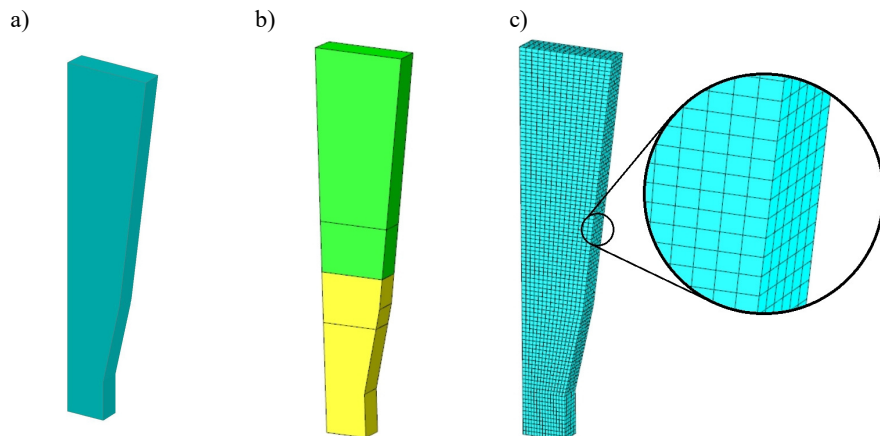
W przypadku rozety wygenerowanie siatki elementów skończonych było znacznie prostsze. Po zaimportowaniu geometrii stworzonej w programie Autocad, dokonano podziału bryły widocznego na Rys. 4.12 b. Wskazany podział umożliwił zagęszczenie siatki w obrębie newralgicznego punktu kontaktu klina z rozetą (Rys. 4.12 c).



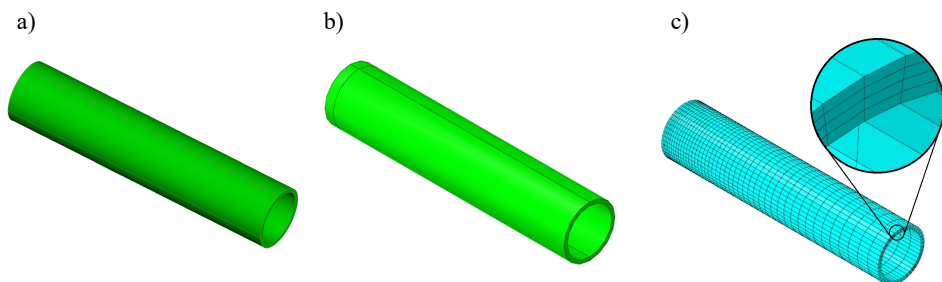
Rys. 4.12 Proces dyskretyzacji rozety: a) model bryłowy, b) podział modelu, c) siatka elementów skończonych

Ponieważ klin jest elementem płaskim, proces generowania siatki ograniczał się jedynie do podziału bryły, pokazanego na Rys. 4.13 b. Geometria klina posiada skośne powierzchnie w dwóch płaszczyznach, dlatego też wygenerowanie siatki elementów ośmiowzłowych nie było możliwe bez podzielenia bryły. W przypadku rury rygła, wygenerowanie elementów ośmiowzłowych mogło nastąpić po podziale bryły w płaszczyźnie pionowej (Rys. 4.14 b). Ponieważ w obrębie rury rygła nie zaobserwowano żadnych zniszczeń w trakcie badań laboratoryjnych, zastosowano cztery elementy na grubości rury (Rys. 4.14 c). Siatkę zagęszczono w obrębie bezpośredniego kontaktu rury rygła z głowicą rygła. Odwzorowanie obciążenia, zastosowanego w trakcie badań w postaci momentu zginającego w płaszczyźnie pionowej M_y , wymusiło zastosowanie rury

o długości 250 mm. W celu ograniczenia liczby elementów, w obrębie rury zastosowano stopniowe zwiększanie rozmiarów elementów siatki wzdłuż osi rury. Do tego celu wykorzystano procedurę dostępną w programie, polegającą na wskazaniu kierunku przyrostu rozmiarów elementów dyskretnych.

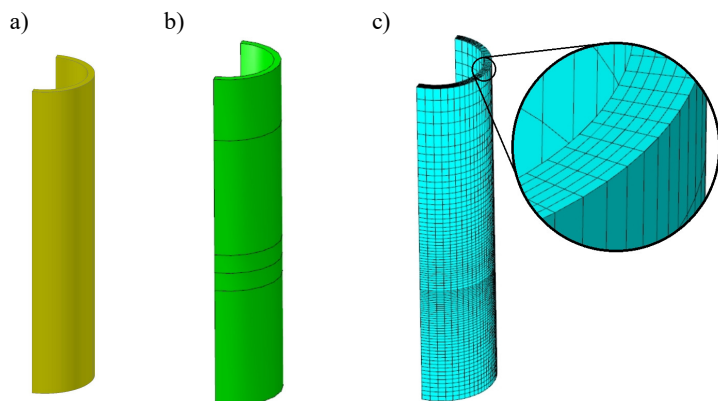


Rys. 4.13 Proces dyskretyzacji klina: a) model brylowy, b) podział modelu, c) siatka elementów skończonych



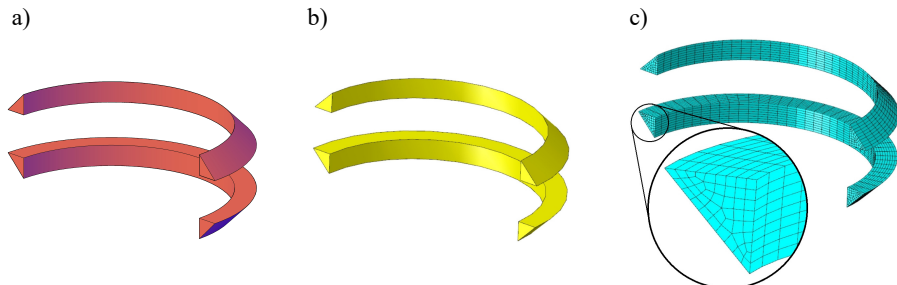
Rys. 4.14 Proces dyskretyzacji rury rygla: a) model brylowy, b) podział modelu, c) siatka elementów skończonych

Rozeta jest połączona z rurą stojaka za pomocą spoin pachwinowych. Generując siatkę elementów skończonych rury stojaka dokonano podziału bryły w obrębie występujących spoin (Rys. 4.15 b). W zależności od rozpatrywanej formy obciążenia tak, jak w przypadku rury rygla, zastosowano stopniowe zwiększanie rozmiarów siatki elementów skończonych. Ponieważ w przypadku zginania niewralgicznym obszarem oddziaływań jest obszar rury poniżej rozety, zastosowano elementy o mniejszym rozmiarze niż w pozostałym obszarze rury stojaka.



Rys. 4.15 Proces dyskretyzacji rury stojaka: a) model bryłowy, b) podział modelu, c) siatka elementów skończonych

Podczas modelowania węzła zmieniano również liczbę elementów na grubości rury. W przypadku analiz obciążeń, wywołujących zniszczenia w obrębie rury stojaka na grubości rury zastosowano sześć elementów. Wygenerowanie siatki w obrębie spoin nie wymagało dokonywania dodatkowych podziałów bryły (Rys. 4.16 b).

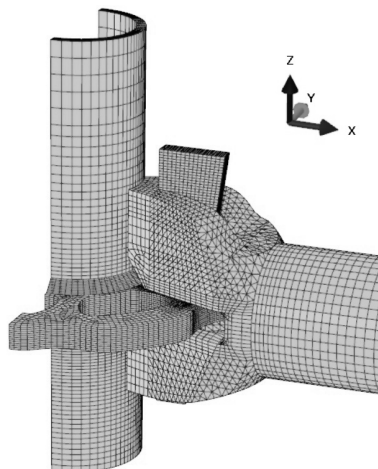


Rys. 4.16 Proces dyskretyzacji spoin łączących rurę stojaka z rozetą: a) model bryłowy, b) podział modelu, c) siatka elementów skończonych

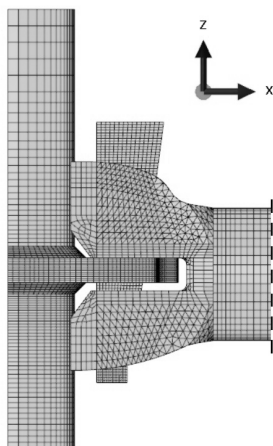
Program Abaqus umożliwia wskazanie kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami węzła bez konieczności zachowywania identycznego układu elementów skończonych. Na Rys. 4.17 przedstawiono dyskretny model węzła, w którego skład wchodzi rura stojaka, rozeta, spoiny, głowica rygła, rura rygła oraz klin. W Tab. 4.1 zestawiono liczbę elementów oraz węzłów elementów skończonych modelu dyskretnego. Ze względu na różnicowanie długości rury stojaka oraz rury rygła, zmniejsza się liczba elementów skończonych w zależności od analizowanej formy obciążenia. Podane wartości są wartościami maksymalnymi. Najwięcej elementów zostało wygenerowanych w obrębie

rozety. Obszarem, posiadającym najmniejszy rozmiar elementów skończonych, był obszar otworu rozety, w którym umieszczany jest klin.

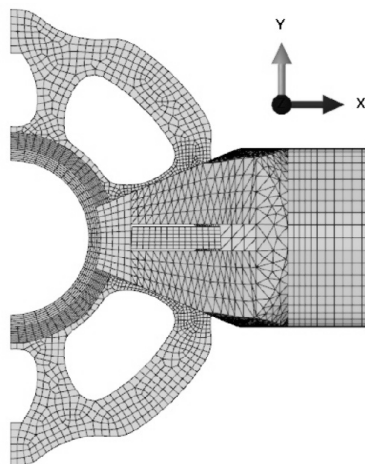
a)



b)



c)



Rys. 4.17 Model dyskretny węzła: a) widok aksonometryczny, b) widok w płaszczyźnie XZ , c) widok w płaszczyźnie XY

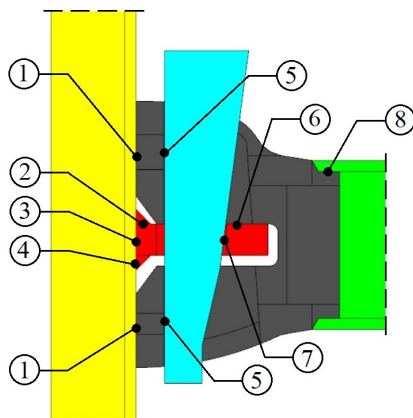
Generując geometrię oraz rozmiar elementów skończonych, jak również ich lokalizację, brano pod uwagę wymogi odnoszące się do zagadnień związanych z kontaktem. Właściwe zdefiniowanie kontaktu a tym samym przekazanie obciążeń pomiędzy poszczególnymi częściami węzła jest uzależnione od rozmiaru elementów, między którymi dochodzi do kontaktu.

Tab. 4.1 Zestawienie liczby elementów modelu dyskretnego węzła

część węzła	typ elementu	liczba węzłów	liczba elementów
głowica rygla	C3D4	10529	18900
	C3D6		210
	C3D8R		4265
klin	C3D8R	10864	8640
rozeta	C3D8R	39026	33300
rura stojaka	C3D8R	19173	15744
rura rygla	C3D8R	10120	7920
spoiny	C3D8R	4961	3640
Σ		94673	92619

4.2.4 Zagadnienie kontaktu pomiędzy elementami węzła

W obrębie rozpatrywanego węzła rusztowania wyróżniono osiem powierzchni kontaktu, wskazanych na Rys. 4.18. W przypadku każdej wskazanej powierzchni kontaktu zastosowano kontakt typu powierzchnia do powierzchni (*surface-to-surface contact*). W przypadku elementów bryłowych, w których nie występują ostre wierzchołki, tego typu kontakt zapewnia dokładniejsze wyniki [99].



Rys. 4.18 Oznaczenie powierzchni kontaktów występujących w modelu węzła rusztowania

Dla każdej pary powierzchni określono charakter kontaktu (Tab. 4.2). W przypadku kontaktu z tarcie (*hard contact*) występują następujące założenia [99]:

- dwie powierzchnie oddziałują na siebie dopiero wtedy, gdy węzły powierzchni zależnej (*slave*) dotykają powierzchni głównej (*master*),
- nie występuje ograniczenie odnośnie wartości nacisków, jakie mogą być przenoszone przez oddziaływujące na siebie powierzchnie,

- kontakt między powierzchniami może być utracony, jeżeli nie występuje między nimi oddziaływanie,
- oddziaływanie styczne do powierzchni styku jest uzależnione od współczynnika tarcia μ ,
- węzły powierzchni zależnej (*slave*) nie mogą przenikać powierzchni głównej (*master*).

Istotnym elementem jest ostatni wymieniony warunek. Algorytm programu sprawdza wzajemne przenikanie się powierzchni na podstawie współrzędnych węzłów, przy czym sprawdzany jest tylko warunek przenikania węzłów powierzchni zależnej (*slave*) w obrębie powierzchni głównej (*master*), co wymusza stosowanie mniejszych elementów skończonych w obrębie powierzchni zależnej (*slave*).

W przypadku wprowadzenia kontaktu pełnego (*tie*) możliwe jest uzyskanie połączenia między elementami nawet, jeżeli geometrie siatek elementów skończonych poszczególnych powierzchni, między którymi występuje kontakt, są różne. Z punktu widzenia numerycznego najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie siatek elementów o dokładnie tej samej geometrii. W przeciwnym wypadku konieczne jest interpolowanie wyników uzyskanych w obrębie poszczególnych powierzchni kontaktu, co znacznie wydłuża obliczenia lub je uniemożliwia z powodu trudności w znalezieniu rozwiązania.

Tab. 4.2 Zestawienie charakterystyk powierzchni kontaktu

Oznaczenie powierzchni kontaktu Rys. 4.18	powierzchnie kontaktu		rodzaj oddziaływania
	powierzchnia główna (<i>master</i>)	powierzchnia zależna (<i>slave</i>)	
1	głowica rygla	rura stojaka	kontakt z tarcie (<i>hard contact</i>)
2	rozeta	spoiny	pełne (<i>tie</i>)
3	rozeta	rura stojaka	pełne (<i>tie</i>)
4	spoiny	rura stojaka	pełne (<i>tie</i>)
5	głowica rygla	klin	kontakt z tarcie (<i>hard contact</i>)
6	głowica rygla	rozeta	kontakt z tarcie (<i>hard contact</i>)
7	klin	rozeta	kontakt z tarcie (<i>hard contact</i>)
8	głowica rygla	rura rygla	pełne (<i>tie</i>)

Ponieważ nie przeprowadzono badań w celu określenia współczynnika tarcia pomiędzy poszczególnymi częściami węzła, jego wartość została określona na podstawie analiz numerycznych całego węzła, opisanych w dalszej części pracy. Ostatecznie przyjęto wartość współczynnika tarcia jako $\mu = 0,1$ w obrębie wszystkich powierzchni kontaktu.

4.2.5 Wybór programu obliczeniowego oraz typu analizy

W początkowej fazie prac, analizy numeryczne przeprowadzano w programie Autodesk Algor Simulation Professional 2010. Wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych analiz z użyciem wymienionego programu zostały przedstawione w pracy [57]. Ze względu na złożoność zagadnienia, jak również ograniczenia programu w zakresie kontaktu, dalsze analizy numeryczne przeprowadzano w programie Abaqus, opartym na metodzie elementów skończonych [98]. Zjawiska związane z kontaktem mają duży wpływ na zachowanie węzła, szczególnie jeżeli połączenie jest połączeniem nietrwałym. Z tego typu połączeniem mamy do czynienia w przypadku rozpatrywanego węzła rusztowania. Ponieważ producent rusztowania zmienił geometrię głowicy rygła, stworzono nowy model węzła uwzględniający wprowadzone zmiany.

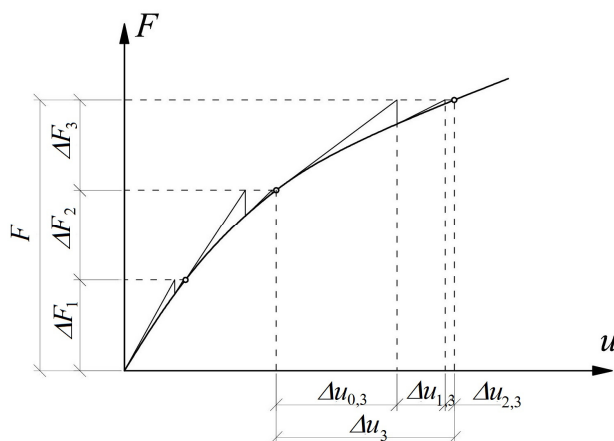
Przeprowadzając nieliniowe analizy numeryczne węzła zastosowano następujące numeryczne modele zjawisk fizycznych, których wpływ na wyniki analiz numerycznych i zasady zostały opisane np. w pracy [80]:

- nieliniowość materiałowa,
- nieliniowość geometryczna,
- nieliniowość warunków brzegowych (kontakt),
- mieszana metoda rozwiązania równania równowagi,
- bezpośrednie rozwiązanie układu równań,
- liniowy przyrost obciążenia pomiędzy krokami,
- liniowa ekstrapolacja poprzedniego stanu na początku każdej iteracji.

Pierwszym z przyjętych założeń, przeprowadzanych analiz numerycznych, jest nieliniowość materiałowa. Przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału, którego charakterystyki zostały określone na podstawie badań laboratoryjnych (Rys. 4.6 ÷ Rys. 4.9). Wprowadzono dane opisujące zarówno zakres sprężysty poprzez podane wartości modułu Younga, jak również dalszy przebieg krzywych zależności σ - ϵ w zakresie odkształceń plastycznych. Zdefiniowano cztery różne charakterystyki materiałowe dla poszczególnych elementów węzła: rozety, rury stojaka i rygła, głowicy rygła oraz klina. Ponieważ już przy małych przemieszczeniach dochodzi do miejscowego uplastycznienia materiału, uwzględnienie tego faktu było niezbędne w celu zamodelowania zachowania węzła. Sprawdzenie czy została przekroczona granica plastyczności przeprowadzono na podstawie oceny stanu naprężeń według hipotezy wyłączenia Hubera, Misesa, Hencky'ego, czyli HMM [2].

Kolejnym elementem analizy było uwzględnienie nieliniowości geometrycznej, związanej z dużymi przemieszczeniami. Ponieważ poszczególne elementy węzła podlegają dużym przemieszczeniom konieczne było uwzględnienie tego faktu przy budowie równań równowagi w kolejnych krokach obliczeniowych.

Rozwiązując zadanie poszukiwano przemieszczenia u przy zadanym obciążeniu F . W przeprowadzonych analizach do rozwiązania układu równań zastosowano metodę mieszaną, łączącą w sobie metodę przyrostową oraz iteracyjną. Obciążenie F przekładane do modelu zostało podzielone na przyrosty ΔF_i . W ramach każdego przyrostu stosowano iterację przy zmiennej macierzy sztywności K_i czyli stosowano zwykłą metodę Newtona-Raphsona (Rys. 4.19). Metoda mieszaną minimalizuje wady metody przyrostowej, pozwalając na stosowanie dużych przyrostów ΔF_i , nie powodując nadmiernych błędów.



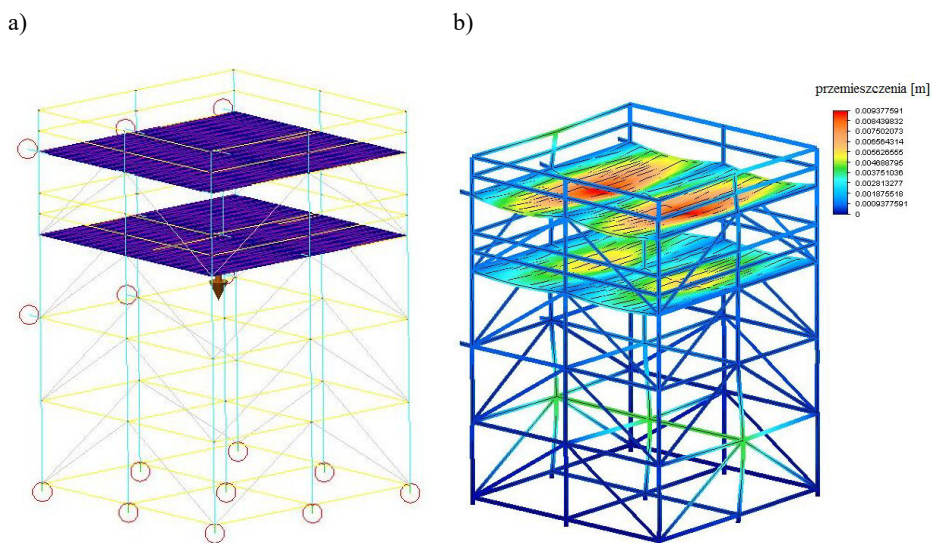
Rys. 4.19 Zwykła metoda Newtona-Raphsona

Dodatkowym elementem, wprowadzającym nieliniowość, były zmienne warunki brzegowe, wynikające z zastosowania kontaktu. Ze względu na geometrię poszczególnych elementów węzła, w każdym kroku obliczeniowym powierzchnia kontaktu ulegała zmianie.

Nie stosowano stabilizacji zarówno w zakresie rozwiązywania równań równowagi, jak i kontaktu. Stosowanie procedur stabilizacji rozwiązania wymaga szczegółowej znajomości jej procedur. Rozwiązanie zadania nieliniowego jest skomplikowane, porównywane przez autorów książki [80] do *sytuacji idącego krętą ścieżką w gęstej mgłę*. Uzyskanie wyników analiz numerycznych zbliżonych do wyników badań laboratoryjnych wymagało szeregu długotrwałych analiz, które w początkowej fazie w znacznym stopniu się różniły.

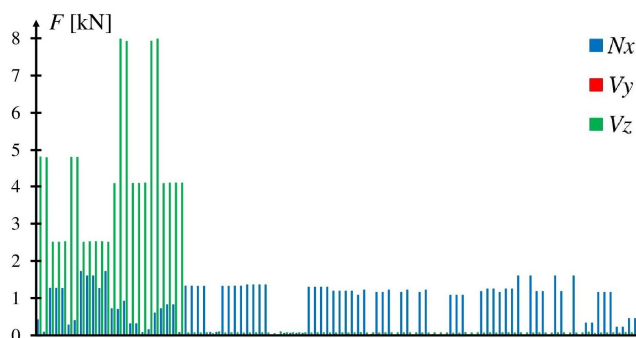
4.3 Przeprowadzenie analiz węzła obciążonego jedną formą obciążenia

Przed przystąpieniem do szczegółowych analiz numerycznych węzła obciążonego jedną formą obciążenia, przeanalizowano typową konstrukcję rusztowania w postaci platformy roboczej (Rys. 4.20). Rusztowanie zostało zamodelowane za pomocą elementów prętowych. Elementy powłokowe posłużyły do zamodelowania obciążenia a ich charakterystyki zostały tak dobrane, aby nie wpływały na sztywność konstrukcji. Obliczenia zaprezentowane w tym podpunkcie wyjątkowo zostały wykonane za pomocą programu Autodesk Simulation Multiphysics 2013. W celu uwzględnienia podatności połączeń stojak-rygiel w prętowym modelu zastosowano krótkie elementy, dla których zadano parametry odwzorowujące sztywność węzła w płaszczyźnie pionowej. Procedura doboru parametrów krótkich elementów została przedstawiona w pracy [6], w której analizowano węzły rusztowań aluminiowych.



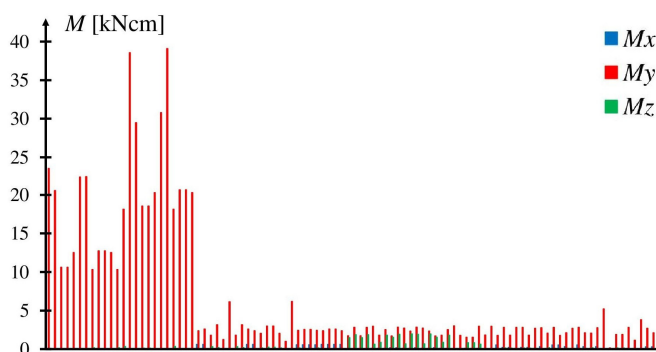
Rys. 4.20 Prętowy model platformy roboczej: a) schemat statyczny b) przemieszczenia konstrukcji

Konstrukcja rusztowania została obciążona zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie [63] obciążeniem w postaci obciążenia użytkowego przyłożonego do pomostu roboczego, połową obciążenia użytkowego w obrębie pomostu zabezpieczającego, obciążeniem wynikającym z oddziaływania wiatru, oraz uwzględniono ciężar własny. W konstrukcji zastosowano podpory przegubowe modelujące oparcie rusztowania na gruncie, jak również zakotwienie w obrębie ściany.



Rys. 4.21 Zestawienie sił występujących w połączeniach stojak-rygiel

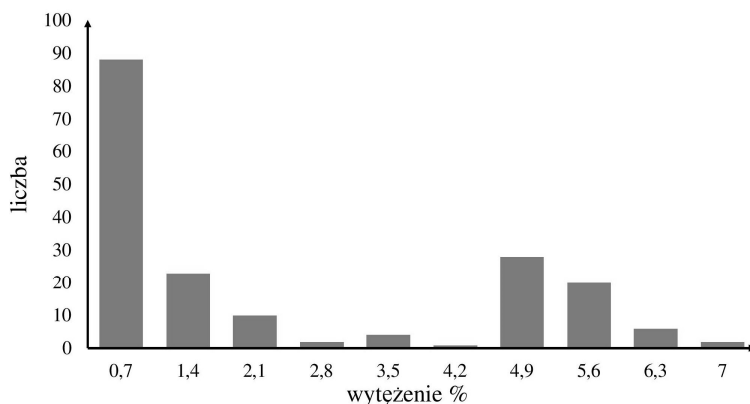
W wyniku przeprowadzonych analiz zestawiono obciążenia występujące w obrębie typowego węzła rusztowania (Rys. 4.21, Rys. 4.22). W analizowanej konstrukcji występowały 184 połączenia typu rygiel-rura stojaka, dla których sporządzono wykresy.



Rys. 4.22 Zestawienie momentów występujących w połączeniach stojak-rygiel

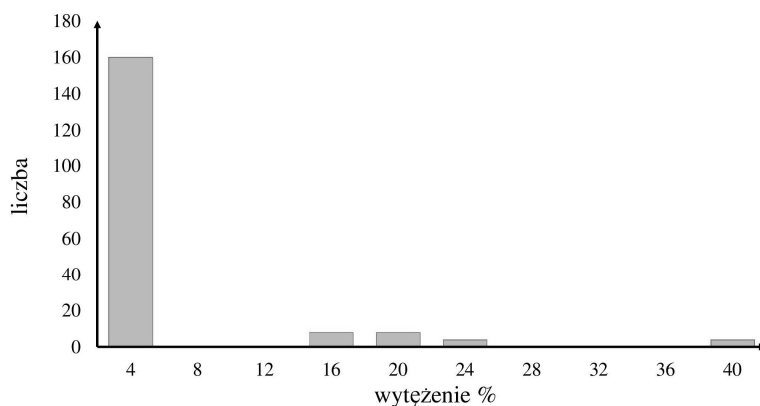
Jak możemy zauważyć na zestawieniach, głównymi przywęzłowymi siłami wewnętrznymi znacznie większymi od pozostałych są siła tnąca V_z , siła normalna N_x oraz moment zginający M_y . W przypadku siły tnącej V_y oraz momentu zginającego M_z oraz momentu skręcającego M_x wyężenie węzła nie przekracza 2% procent nośności obliczeniowej uwzględniającej częściowe współczynniki bezpieczeństwa γ_M i γ_F .

W celu zobrazowania poziomu wyężenia stworzono histogramy obrazujące rozkład wyężenia w przypadku poszczególnych form obciążenia. Zestawienie obejmowało wszystkie węzły konstrukcji. W przypadku siły normalnej N_x (Rys. 4.23) wyężenie węzła ogranicza się do wartości 7% nośności węzła.



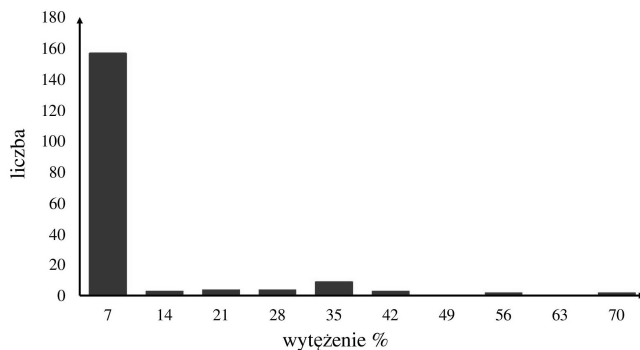
Rys. 4.23 Rozkład wykorzystania nośności poszczególnych węzłów w przypadku siły N_x

W przypadku siły V_z wytężenie węzła osiągało wartość 40% (Rys. 4.24), natomiast w przypadku momentu zginającego M_y 70% (Rys. 4.25). Najbardziej wytężonymi węzłami są węzły rygli, na których oparte są pomosty robocze. W pozostałych węzłach wartości wytężenia wynikają głównie z ciężaru własnego rygli.



Rys. 4.24 Rozkład wartości wykorzystania nośności węzłów w przypadku siły V_z

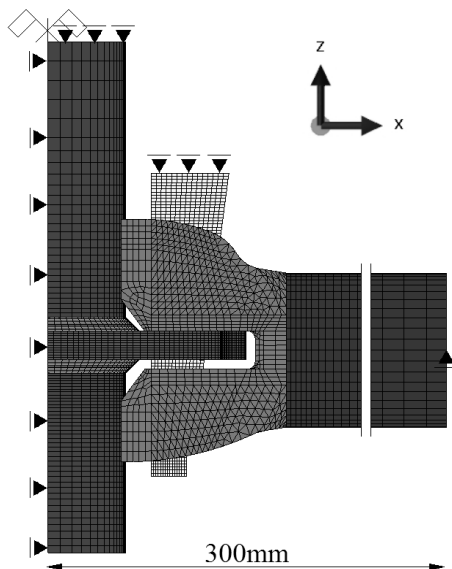
Ponieważ głównymi przywęzłowymi siłami wewnętrznymi, występującymi w węzłach rusztowań są siła normalna N_x , siła tnąca V_z oraz moment zginający M_y , to szczegółowe analizy numeryczne będą obejmowały formy obciążenia węzła, modelujące wymienione siły wewnętrzne. W przypadku pozostałych form obciążenia wytężenie węzła wynosi poniżej 2% nośności obliczeniowej.



Rys. 4.25 Rozkład wartości wykorzystania nośności węzłów w przypadku momentu zginającego M_y

4.3.1 Analiza numeryczna węzła obciążonego momentem zginającym M_y

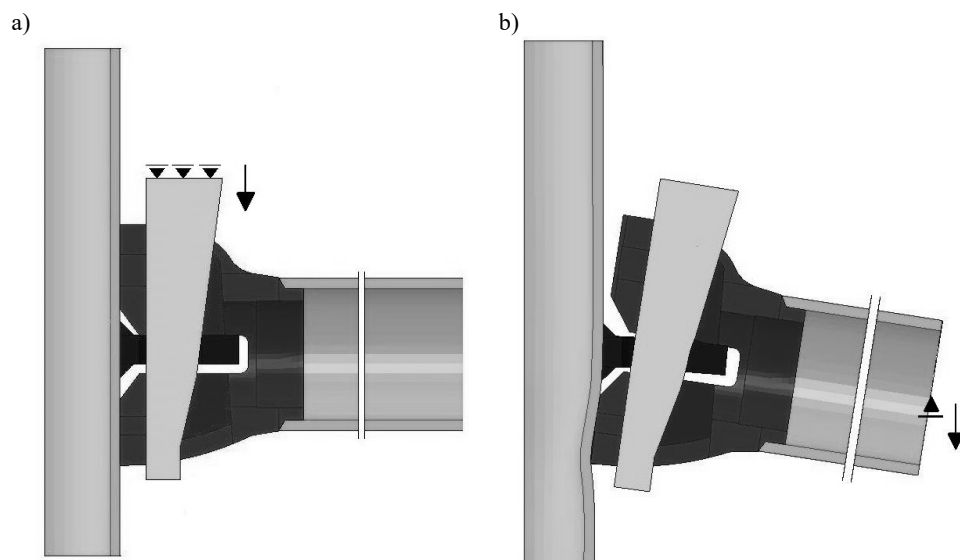
Przeprowadzając analizy numeryczne węzła, obciążonego momentem M_y , wykorzystano symetrię układu i analizowano połowę schematu zastosowanego w badaniach laboratoryjnych. W obrębie płaszczyzny symetrii zastosowano podpory blokujące możliwość przesuwu na kierunku X , natomiast w obrębie końca rury stojącej zastosowano podpory blokujące możliwość przesuwu w kierunku pionowym Z (Rys. 4.26).



Rys. 4.26 Warunki brzegowe modelu węzła obciążonego momentem zginającym M_y

Proces obciążania węzła momentem M_y został podzielony na dwa etapy (Rys. 4.27). W pierwszym etapie dokonywano wbicia klina w obręb rozety. Wbicie klina zastało zamodelowane jako proces obciążenia statycznego, natomiast głębokość wbicia została dobrana na podstawie szeregu przeprowadzonych analiz. Drugim etapem obciążania węzła było wprowadzenie przemieszczenia na końcu rury rygla, w odległości 300 mm od płaszczyzny symetrii układu. Porównanie wyników uzyskanych na drodze analiz numerycznych w stosunku do badań laboratoryjnych polegało na porównaniu przebiegu zależności moment-obrót. Przejęto taką samą procedurę wyznaczania wartości momentu jak w przypadku badań laboratoryjnych. Wartość momentu M_y określano na podstawie wzoru 3.3, natomiast wartość kąta obrotu φ_y na podstawie wzoru 3.5. Wartości sił oraz przemieszczeń odczytywano bezpośrednio z miejsca wprowadzenia podpór, ulegających przemieszczeniu, zlokalizowanych na końcu rury rygla.

Pierwsze uzyskane wyniki skłoniły autora do przeprowadzenia szeregu analiz w celu określenia wpływu współczynnika tarcia oraz głębokości wbicia klina na uzyskane wyniki. Określenie współczynnika tarcia jest zagadnieniem skomplikowanym szczególnie w przypadku powierzchni, w obrębie których dochodzi do uplastycznienia. Należy również pamiętać, że powierzchnie kontaktu nie były w żaden sposób przygotowywane a próbki węzła pochodziły bezpośrednio od producenta. W Tab. 4.3 przedstawiono parametry wybranych analiz numerycznych, natomiast na Rys. 4.28 przedstawiono uzyskane wyniki zależności moment M_y -obrót φ_y .



Rys. 4.27 Etapy obciążania węzła momentem M_y : a) wbicie klina,
b) zginanie w płaszczyźnie pionowej

Jako parametr określający zgodność otrzymanych wyników, zastosowano procentowy wymiar błędu wyliczany jako stosunek różnicy pól wykresów otrzymanych w badaniach laboratoryjnych i analiz numerycznych zgodnie ze wzorem:

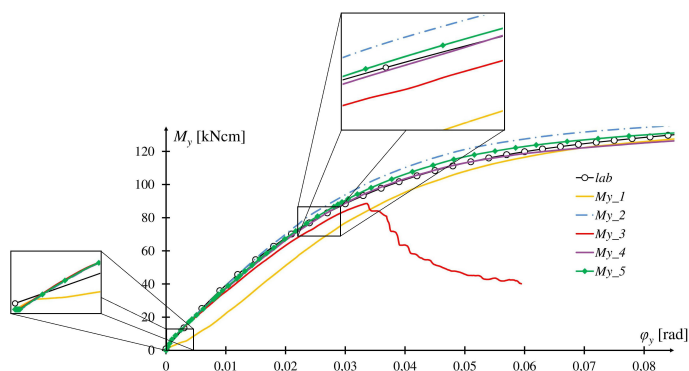
$$\Delta = \frac{\int_0^{\varphi_y} |M_a - M_l| d\varphi_y}{\int_0^{\varphi_y} M_l d\varphi_y}, \quad (4.1)$$

gdzie M_a jest to wartość momentu uzyskanego na drodze analiz numerycznych, natomiast M_l jest to wartość momentu uzyskanego w trakcie badań laboratoryjnych przy zadanym kącie obrotu φ_y .

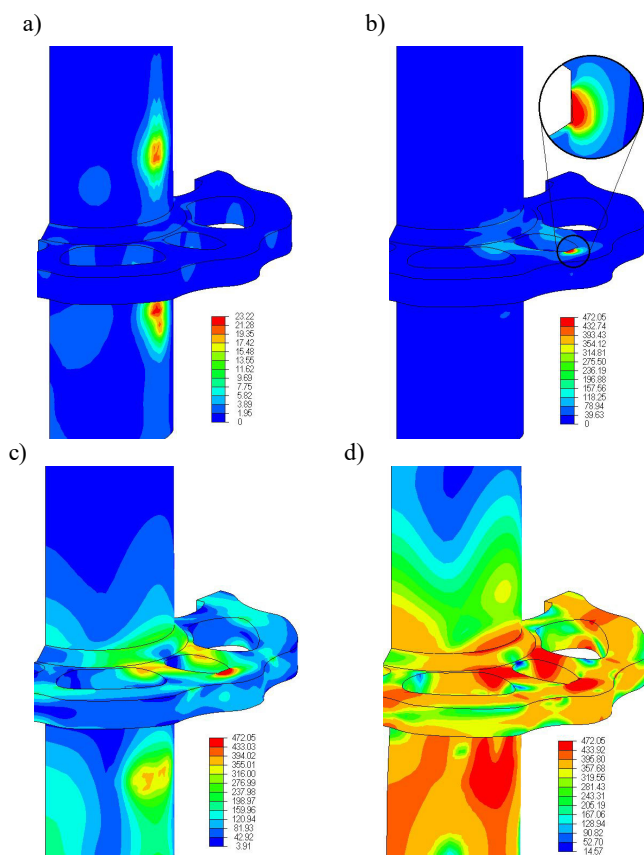
W przypadku wbicia klina na głębokość 0,1 mm zauważono duże różnice wyników już w początkowej fazie obciążania węzła (wykres M_y_1). Zwiększając głębokość wbicia klina uzyskano większą zgodność wyników, jednakże współczynnik tarcia na poziomie 0,15 wywoływał zbyt dużą sztywność węzła (wykres M_y_2). Zmniejszenie współczynnika tarcia do wartości 0,05 powodowało wysunięcie klina z rozety a tym samym utratę połączenia (wykres M_y_3). Największą zgodność wyników badań i obliczeń uzyskano stosując różne współczynniki tarcia dla poszczególnych powierzchni (wykres M_y_4). Konieczność zróżnicowania wartości współczynnika tarcia μ mogła wynikać z niedokładności montażu, jak również różnej chropowatości poszczególnych powierzchni uzyskanych po procesie cynkowania. Zróżnicowanie współczynników tarcia w obrębie jednego węzła wydaje się być podejściem niewłaściwym, dlatego też ostatecznie przyjęto współczynnik tarcia pomiędzy poszczególnymi elementami na poziomie $\mu = 0,10$. Zależności moment-obrót uzyskane przy założeniu współczynnika tarcia $\mu = 0,10$ oraz głębokości wbicia klina na poziomie 2 mm obrazuje wykres M_y_5 .

Tab. 4.3 Parametry analizy numerycznej węzła obciążonego momentem M_y

powierzchnia kontaktu (Rys. 4.18)	współczynnik tarcia				
	μ				
	M_y_1	M_y_2	M_y_3	M_y_4	M_y_5
1	0,10	0,15	0,05	0,05	0,10
6	0,10	0,15	0,05	0,15	0,10
5	0,10	0,15	0,05	0,10	0,10
7	0,10	0,15	0,05	0,10	0,10
głębokość wbicia klina [mm]	0,1	2,0	2,0	2,0	2,0
Δ [%]	9,44	5,70	utracono połączenie	1,12	1,88

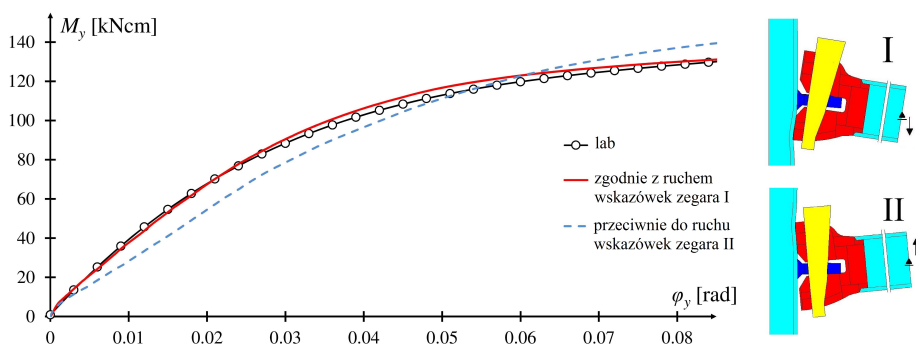


Rys. 4.28 Porównanie wyników zależności moment-obrót uzyskanych przy różnych parametrach analizy węzła obciążonego momentem M_y



Rys. 4.29 Rozkład naprężeń zredukowanych HMH [MPa] w obrębie rozety oraz rury stojak w kolejnych etapach obliczeń: a) wcięcie klina na głębokość 0,02 mm, b) wcięcie klina na głębokość 2 mm, c) obrót rygla o 0,015 rad, d) obrót rygla o 0,135 rad

Ponieważ w trakcie wykonywania badań laboratoryjnych do znacznych odkształceń plastycznych dochodzi w obrębie rozety oraz rury stojaka, na Rys. 4.29 przedstawiono rozkład naprężeń w poszczególnych krokach obliczeniowych. W obrębie rozety do przekroczenia granicy plastyczności doszło już po wbiciu klina na głębokość 2 mm. Obszar wzrastał wraz ze zwiększaniem wartości kąta obrotu rygła. W literaturze [78] możemy odnaleźć badania laboratoryjne obejmujące zginanie węzła w płaszczyźnie pionowej zgodnie z ruchem wskazówek zegara, jak również przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, po ustaleniu parametrów analizy, przeprowadzono symulację z przeciwnym zwrotem momentu M_y (Rys. 4.30). Węzeł w początkowej fazie obciążenia wykazuje mniejszą sztywność w przypadku obrotu przeciwnego do ruchu wskazówek zegara. W dalszej fazie obciążania sztywność wzrasta i jest większa niż w przypadku obrotu zgodnego z ruchem wskazówek zegara. Różnica ta wynika z większej powierzchni kontaktu pomiędzy głowicą rygła z rurą stojaka w przypadku, gdy do kontaktu dochodzi w części nad rozetą. Ponieważ zginaniu o zwrocie przeciwnym niż ruch wskazówek zegara towarzyszy siła pionowa skierowana w górę, może dojść do utarty połączenia na skutek wysunięcia się klina.

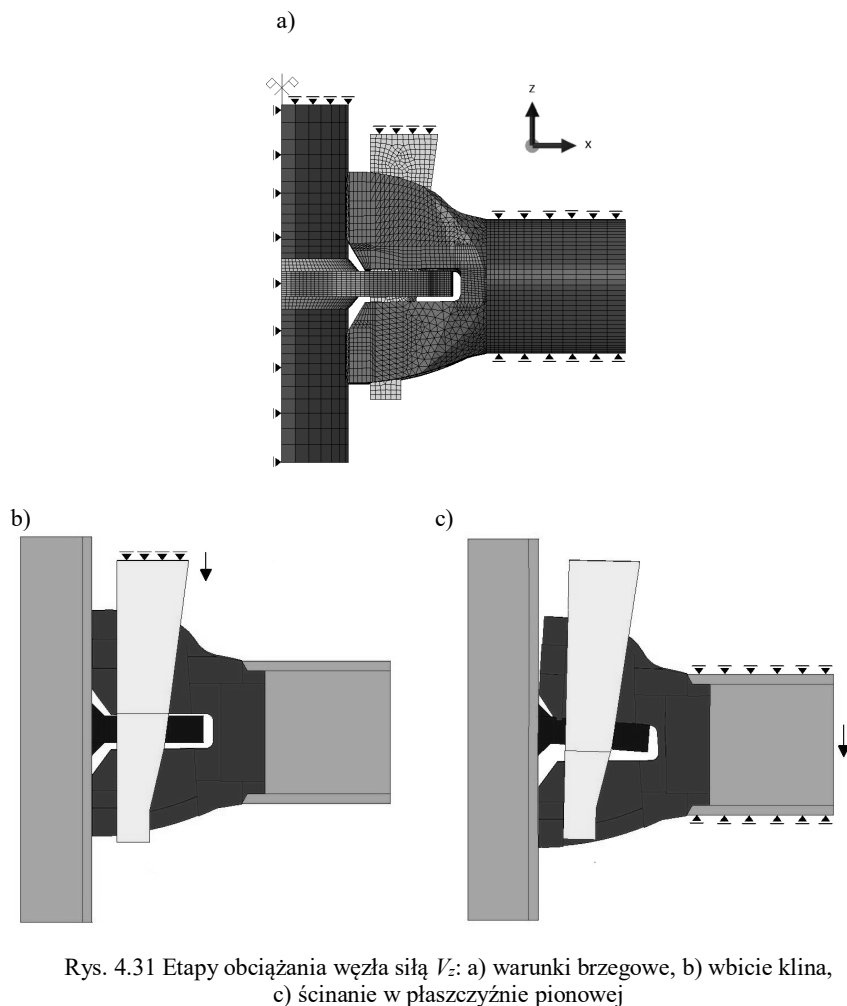


Rys. 4.30 Porównanie wyników badań i obliczeń w zależności od zwrotu momentu zginającego M_y

4.3.2 Analiza numeryczna węzła obciążonego siłą V_z

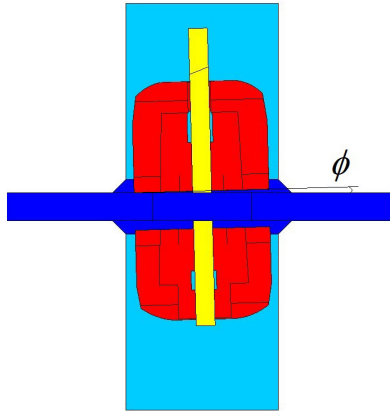
W przypadku węzła obciążonego siłą V_z zastosowano taką samą procedurę przykładania obciążenia. Również wykorzystano symetrię układu, przy czym zadano inne warunki brzegowe. W obrębie końca rury rygła zastosowano podpory blokujące możliwość przesuwu w kierunku pionowym. Zastosowane podpory stanowiły odwzorowanie warunków sztywnych uchwytów zastosowanych w badaniach laboratoryjnych. Proces obciążania węzła podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie dokonywano wbicia klina w otwór rozety. Ze względu na brak dokładnej kontroli zagłębienia klina

w rozecie podczas badań laboratoryjnych, przeprowadzono analizy z trzema głębokościami wbicia klina: 0 mm, 1 mm oraz 2 mm. Podobnie, jak w przypadku obciążenia węzła momentem M_y , już wbicie klina powodowało miejscowe uplastycznienie talerzyka w obrębie otworu. Kolejnym etapem obciążania było przemieszczenie rury, znajdującej się w masywnym uchwycie prasy (Rys. 4.31).



Rys. 4.31 Etapy obciążania węzła siłą V_z : a) warunki brzegowe, b) wbicie klina, c) ścinanie w płaszczyźnie pionowej

Rozbieżności wyników analiz numerycznych i laboratoryjnych wymusiły wprowadzenie kolejnego parametru, jakim był kąt obrotu głowicy rygła ϕ (Rys. 4.32). Rozpatrywano trzy przypadki niedokładności wykonania lub zmontowania węzła polegającego na obrocie głowicy rygła o kąt równy: 0° , $0,75^\circ$ oraz $1,5^\circ$.



Rys. 4.32 Kąt obrotu głowicy rygla ϕ

Jako parametr określający zgodność otrzymanych wyników tak, jak w przypadku momentu M_y , zastosowano procentowy wymiar błędu wyliczany jako stosunek różnicy pól wykresów otrzymanych w badaniach laboratoryjnych i analiz numerycznych zgodnie ze wzorem:

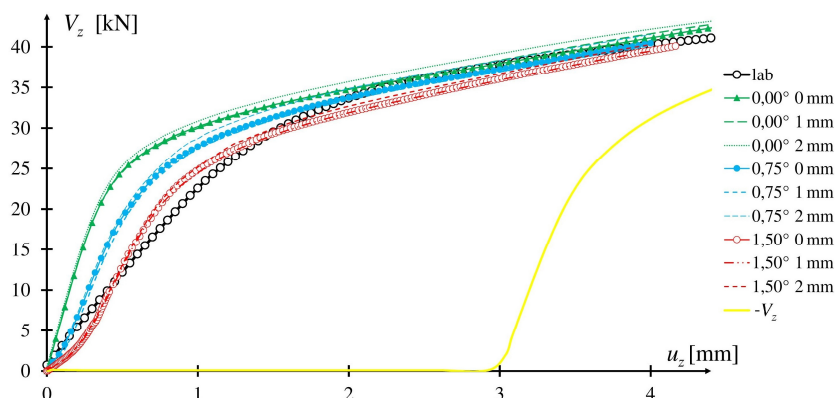
$$\Delta = \frac{\int_0^{u_z} |F_a - F_l| du_z}{\int_0^{u_z} F_l du_z}, \quad (4.2)$$

gdzie F_a – wartość siły uzyskanej na drodze analiz numerycznych, natomiast F_l – wartości siły uzyskanej w trakcie badań laboratoryjnych przy zadanym przemieszczeniu u_z . Uzyskane wyniki przedstawiono w Tab. 4.4. Najmniejszą różnicę o wartości 2,46% uzyskano w przypadku obrotu główki rygla o $1,5^\circ$ i wbiciu rygla na głębokość 2 mm.

Tab. 4.4 Wartości błędu uzyskane na drodze analiz numerycznych w stosunku do badań laboratoryjnych

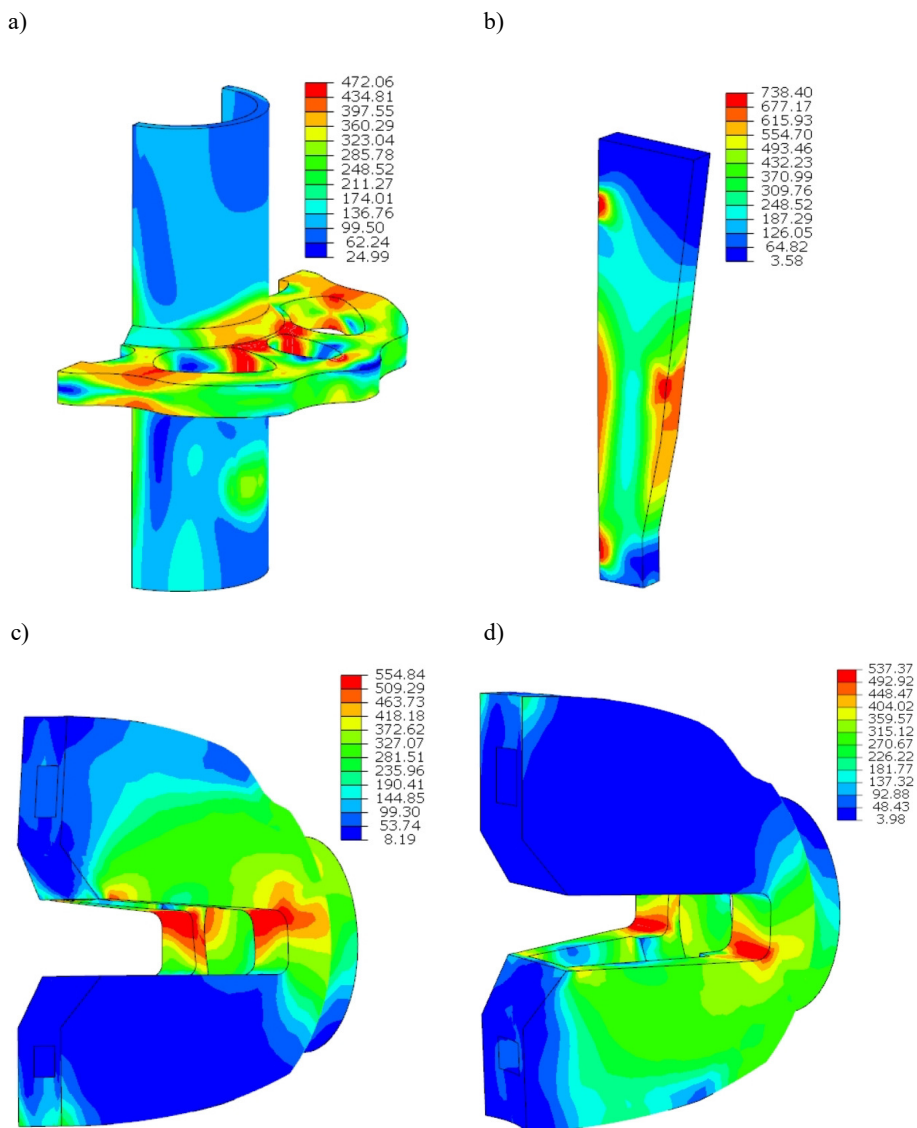
Kąt obrotu głowicy rygla ϕ [°]	Głębokość wbicia klina [mm]		
	0	1	2
	Δ [%]		
0,00	6,75	7,04	8,59
0,75	3,81	3,68	4,80
1,50	3,06	3,01	2,46

Największy wpływ na uzyskane wyniki ma niedokładność montażu w postaci obrotu głowicy rygla (Rys. 4.33). Różnice są zauważalne szczególnie w początkowej fazie obciążenia, w której przebieg zależności siła V_z -przeszyczenie u_z jest uzależniony od powierzchni kontaktu pomiędzy głowicą rygla i rozetą. W przypadku braku obrotu głowicy powierzchnia kontaktu jest powierzchnią stałą, natomiast w przypadku obrócenia głowicy powierzchnia wzrasta w każdym kroku powodując wzrost sztywności węzła co możemy zauważyć na wykresie. Powierzchnia kontaktu podczas wykonywania badań laboratoryjnych nie była w żaden sposób przygotowywana i jej powierzchnia nie jest powierzchnią idealnie płaską i równą, jak ma to miejsce w modelu numerycznym. Jak możemy zauważyć na wykresie, wbicie klina ma wpływ na kształt wykresu jedynie w zakresie dużych odkształceń plastycznych. W przypadku znacznych odkształceń dochodzi do rozginania głowicy rygla, w trakcie którego w przenoszeniu obciążeń bierze udział klin.



Rys. 4.33 Porównanie wyników zależności siła-przeszyczenie uzyskanych przy różnych parametrach analizy węzła obciążonego siłą V_z

W obrębie głowicy rygla koncentrację naprężeń możemy zaobserwować w strefie naroża przewężenia głowicy (Rys. 4.34). Miejsce maksymalnych naprężeń pokrywa się z miejscem występowania pęknięć zaobserwowanych w trakcie badań laboratoryjnych. W ramach potwierdzenia przypuszczeń, iż węzeł nie powinien być obciążany siłą V_z w przeciwnym kierunku (siła skierowana w górę) przeprowadzono symulację takiego obciążenia. Jej wyniki zostały zobrazowane na Rys. 4.33 za pomocą żółtej linii opisanej jako „ $-V_z$ ”. Na wykresie możemy zauważyć, że w zakresie przeszczeń do 3 mm węzeł praktycznie nie przenosi obciążeń. Fakt ten wynika z różnicy grubości rozety wynoszącej 9 mm w stosunku do przewężenia w obrębie głowicy rygla o wartości 12 mm. Przerwa, o wartości 3 mm, występująca pomiędzy rozetą a głowicą rygla powoduje luz w początkowej fazie obciążenia.



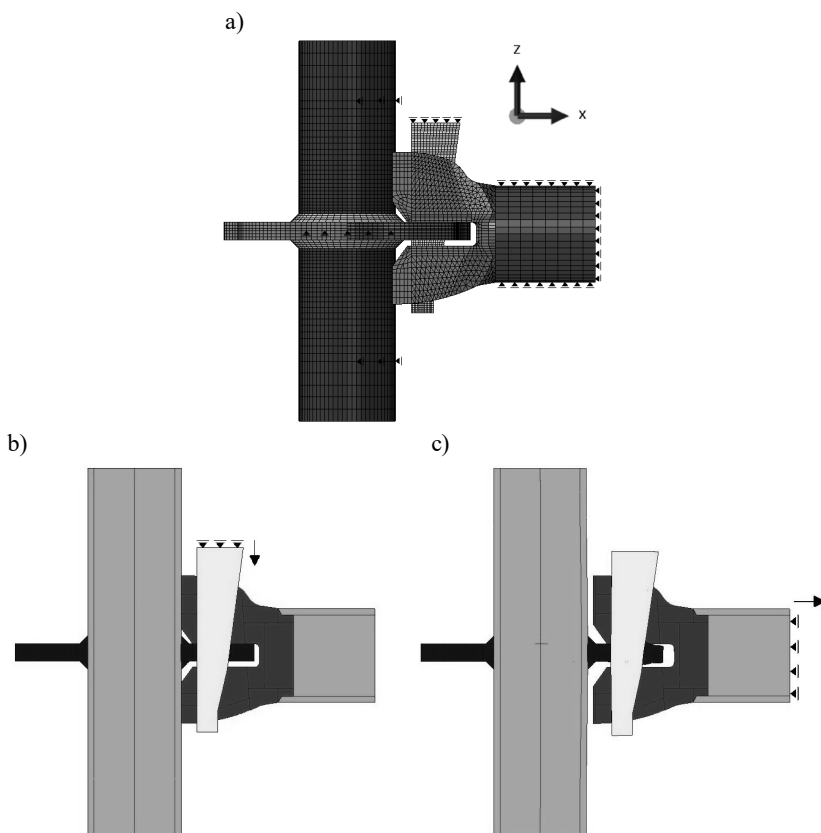
Rys. 4.34 Rozkład naprężeń zredukowanych HMH [MPa] spowodowany obciążeniem węzła siłą V_z w obrębie: a) rozety, spoin i rury rygła, b) klina, c) głowicy rygła, d) głowicy rygła spowodowany obciążeniem węzła siłą V_z skierowaną w górę

Dopiero po uzyskaniu kontaktu pomiędzy rozetą i głowicą rygła węzeł zaczyna przenosić obciążenie. W przypadku obciążenia w postaci siły skierowanej w górę, do koncentracji naprężeń, a tym samym potencjalnego miejsca uszkodzenia głowicy dochodzi w dolnej części przewężenia, występującego

w głowicy rygla (Rys. 4.34). Projektując konstrukcję rusztowania nie możemy dopuszczać do sytuacji, w której przywężłowa siła pionowa V_z jest skierowana w górę. W typowych konstrukcjach rusztowania taka sytuacja nie będzie miała miejsca, jednakże projektując nietypowe konstrukcje rusztowań należy ten fakt uwzględnić.

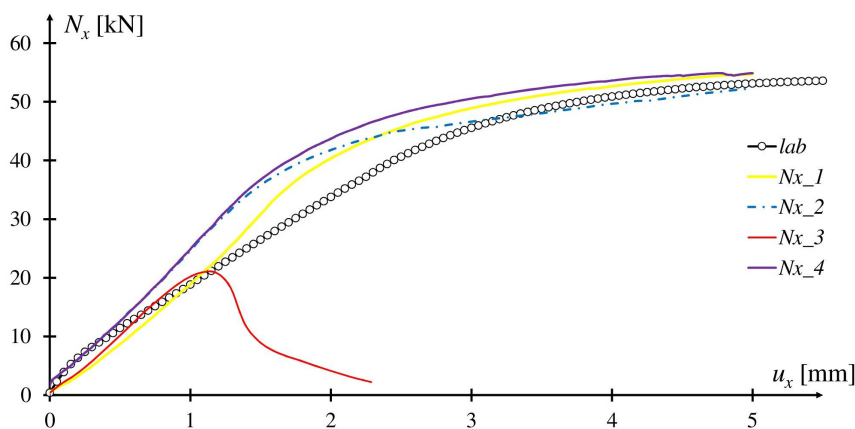
4.3.3 Analiza numeryczna węzła obciążonego siłą N_x

W celu odwzorowania zachowania węzła i porównania otrzymanych wyników analiz numerycznych z wynikami uzyskanymi na drodze badań laboratoryjnych w przypadku węzła obciążonego siłą N_x , model numeryczny składa się z pełnej rury stojaka wraz z przyspawaną rozetą (Rys. 4.35). W zastosowanym uchwycie nie występowała symetria układu w kierunku obciążania węzła, dlatego też rura stojaka mogła podlegać przemieszczeniu (wygięciu) w kierunku przyłożonego obciążenia.



Rys. 4.35 Etapy obciążania węzła siłą N_x : a) warunki brzegowe, b) wbicie klina, c) rozciąganie rygla

W obrębie rury stojaka zastosowano podpory blokujące możliwość przesuwu w kierunku X w rozstawie odpowiadającym rozstawowi obejm uchwytów. Podpory zostały zadane tylko z jednej strony rury, dzięki czemu możliwe było przemieszczenie rury w obrębie rozety. W obrębie rury zadano również dodatkowe podpory blokujące możliwość przesuwu w kierunku Z . Podpory umieszczono w poziomej osi symetrii rury stojaka, w obrębie której przemieszczenie na kierunku Z wynosi 0 ze względu na symetrię uchwytu. Proces obciążania węzła podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie dokonywano wbicia klina w otwór rozety (Rys. 4.35 b). Kolejny etapem obciążania było przemieszczenie rury rygla znajdującej się w uchwycie prasy (Rys. 4.35 c).

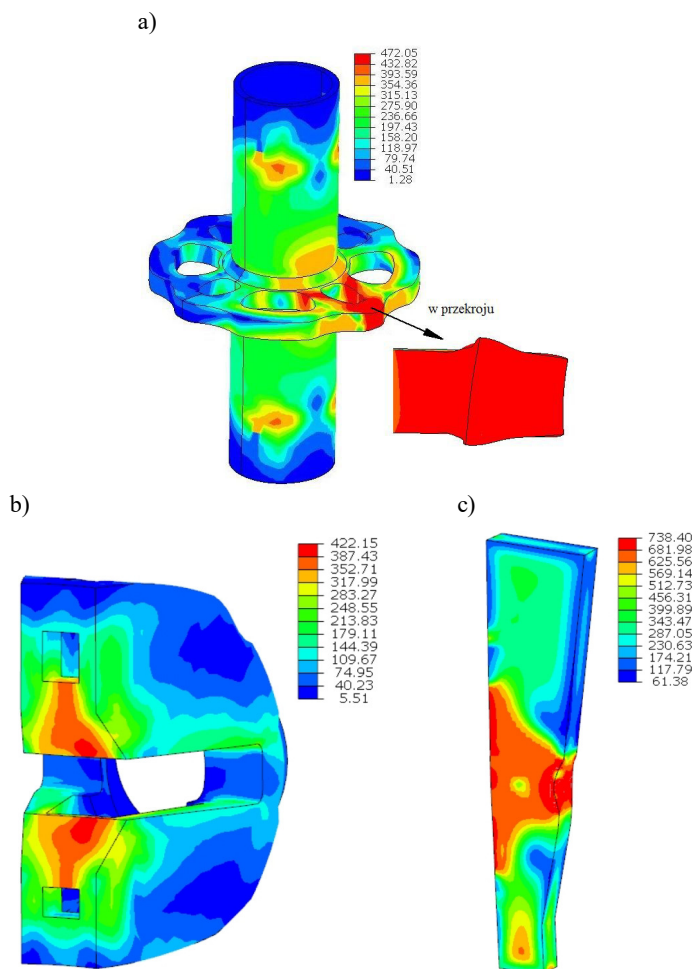


Rys. 4.36 Porównanie wyników zależności siła-przemieszczenie uzyskanych przy różnych parametrach analizy węzła obciążonego siłą N_x

Tak, jak w przypadku węzła obciążonego momentem M_y , przeprowadzono szereg analiz mających na celu wskazanie wpływu parametrów analizy na uzyskane wyniki. Na Rys. 4.36 przedstawiono przykładowe wykresy zależności siła N_x -przemieszczenie u_x uzyskane w wyniku przeprowadzonych analiz numerycznych porównane z wynikami badań laboratoryjnych. Tak, jak miało to miejsce w przypadku obciążenia węzła momentem M_y , jeżeli wbicie klina jest zbyt małe (wykres Nx_1) uzyskujemy rozbieżności wyników już w początkowej fazie obciążania. Zwiększając głębokość wbicia klina do wartości 2 mm uzyskano zgodność w początkowej fazie obciążenia. Natomiast zbyt mały współczynnik tarcia μ umożliwiał wysunięcie klina a tym samym spadek sztywności połączenia (wykres Nx_2). W przypadku zbyt małego współczynnika tarcia μ na poziomie 0,05, oraz wbicia klina na głębokość 1 mm w trakcie obciążania dochodzi do niebezpiecznej sytuacji polegającej na utracie połączenia w wyniku wysunięcia klina z otworu rozety (wykres Nx_3).

Wprowadzając współczynnik tarcia na poziomie $\mu = 0,1$ oraz wbijając klin na głębokość 2 mm tak, jak miało to miejsce w przypadku momentu zginającego M_y , uzyskano przebieg zależności siła N_x -przemieszczenie u_x oznaczony jako Nx_4 . W przypadku przytoczonych parametrów, błąd określony na podstawie wzoru 4.2 wyniósł 13,66%.

W przypadku węzła obciążonego siłą N_x badania laboratoryjne przeprowadzono do pełnego zniszczenia węzła. Zaobserwowano trwałe zmiany w postaci miejscowego uplastycznienia stali w miejscu styku klina oraz rozety. Podczas rozciągania zniszczeniu ulega rozeta. Forma zniszczenia ma postać ściecia otworu rozety poprzez klin.



Rys. 4.37 Rozkład naprężeń zredukowanych HMH [MPa] spowodowany obciążeniem węzła siłą N_x w obrębie: a) rozety, spoin i rury rygla, b) głowicy rygla, c) klina

Trwałym odkształceniom ulega klin w miejscu bezpośredniego oddziaływania na rozetę. Takie same zmiany zaobserwowano w analizach numerycznych. Rozeta ulega znacznym odkształceniom plastycznym. W trakcie obciążania strefa przekroczenia naprężeń, powodujących nieodwracalne odkształcenia plastyczne zwiększa się. Ponieważ dalsze obciążanie węzła wywoływało pęknięcia w obrębie rozety, analizy numeryczne przeprowadzano do momentu uzyskania przemieszczenia głowicy rygla na poziomie 5 mm. Wyniki rozkładu naprężeń uzyskane po osiągnięciu przemieszczenia na poziomie 5 mm przedstawiono na Rys. 4.37.

4.4 Obciążenia wielokrotne

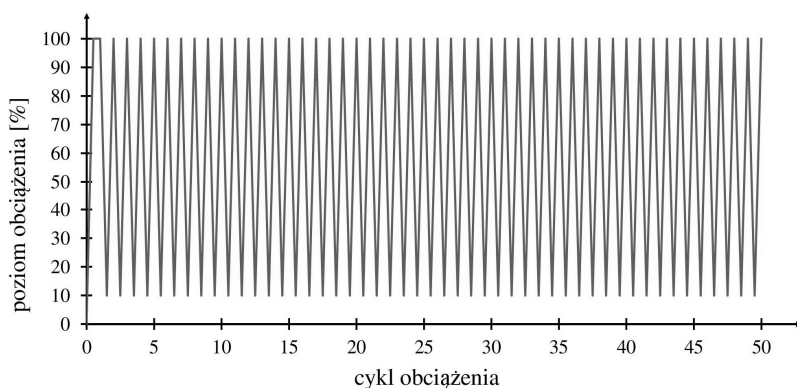
Rozpatrywany węzeł nie jest typowym węzłem konstrukcji stalowej. Połączenie uzyskiwane w węźle ma charakter nietrwały i jest uzależnione od geometrii łączonych elementów. Deformacje zachodzące w obrębie węzła mogą wpływać na jakość uzyskiwanego połączenia a tym samym na stateczność całej konstrukcji. Ponieważ te same elementy składowe konstrukcji rusztowania mogą być użyte wielokrotnie, konieczne jest opracowanie metody określenia stopnia zużycia elementów, pozwalającej na jednoznaczne stwierdzenie czy elementy mogą być użyte ponownie. Problematyka wielokrotności wykorzystania tych samych elementów rusztowania w różnych konstrukcjach obejmuje zarówno proces wielokrotnego wytworzenia połączenia poprzez wbicie klina w otwór rozety, jak również wielokrotne obciążenie konstrukcji. Ponieważ już w trakcie montażu występują obszary uplastycznienia rozety, proces ten jest również formą obciążenia węzła. Analizy numeryczne węzła obciążonego wielokrotnie zostały przeprowadzone na modelu węzła wykalibrowanego na podstawie badań laboratoryjnych, przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy. Niezależnie od formy obciążenia przyjęto stały współczynnik tarcia $\mu = 0,1$ dla wszystkich powierzchni kontaktu, oraz głębokość wbicia klina na poziomie 2 mm. W przypadku wskazanych parametrów analizy uzyskano zadawalające wyniki symulacji pracy węzła pod wpływem rozpatrywanych form obciążenia.

4.4.1 Zachowanie węzła pod wpływem wielokrotnego obciążenia

Pierwszą rozważoną formą obciążenia wielokrotnego było wielokrotne wbicie klina w otwór rozety, do którego dochodzi w trakcie każdego montażu rusztowania. Konieczne jest sprawdzenie czy zmiany w obrębie rozety, wywołane wbiciem klina, nie mają charakteru przyrostowego.

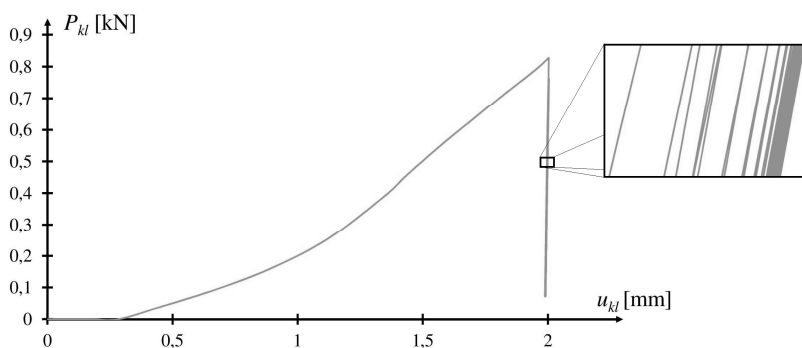
Model numeryczny wykorzystywany do zbadania wielokrotnego wbicia klina, obejmował geometrię wszystkich elementów węzła. Proces obciążania i odciażania węzła został przeprowadzony pięćdziesięciokrotnie. Pierwszy cykl wbicia klina zamodelowano poprzez przemieszczenia klina o 2 mm, zgodnie z założeniami analizy uzyskanymi w wyniku kalibracji modelu. Po uzyskaniu zadanego przemieszczenia odczytano wartość siły a następnie zastąpiono

obciążenie w postaci przemieszczenia siłami przyłożonymi do klina. Kolejnym krokiem było odciążenie układu do wartości siły stanowiącej 10% obciążenia powodującego przemieszczenie klina o 2 mm. Następnie wykonano 49 cykli obciążenia i odciążenia klina w zakresie od 10% do 100% obciążenia (Rys. 4.38).



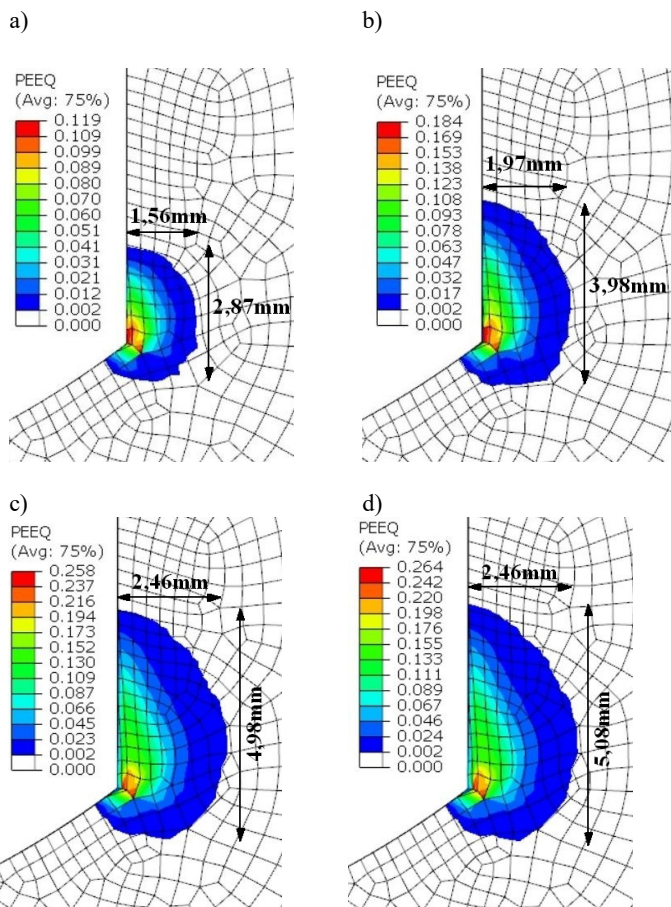
Rys. 4.38 Proces wielokrotnego obciążania klina symulującego wielokrotne wbicie w otwór rozety

W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano wykres zależności pomiędzy siłą przyłożoną do klina P_{kl} i przemieszczeniem klina u_{kl} (Rys. 4.39). Pomimo wielokrotnego przyłożenia obciążenia do klina jego przemieszczenie wzrasta w bardzo małym zakresie wynoszącym 0,004 mm.



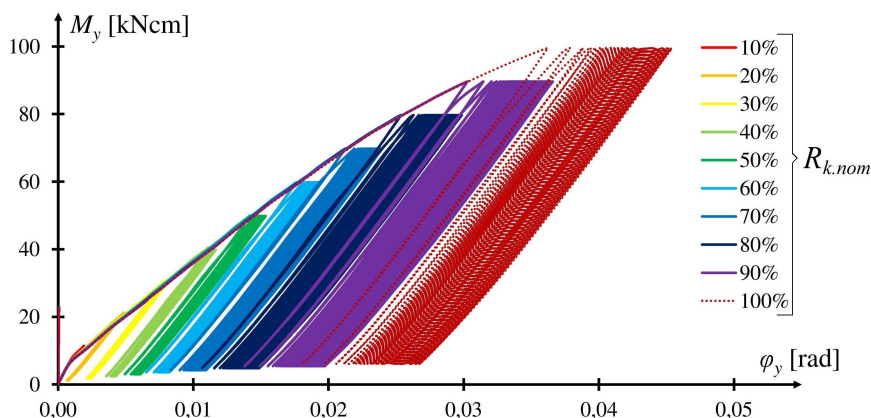
Rys. 4.39 Przyrost przemieszczeń klina przy wielokrotnym obciążaniu

Obszar odkształceń w obrębie rozety, wykraczających poza zakres sprężystej pracy materiału z jakiego została wykonana rozeta, pomimo 50-krotnego wbicia klina ulega niewielkiej zmianie (Rys. 4.40 c i d) w stosunku do zmian zachodzących w trakcie wbijania na głębokość 2 mm (Rys. 4.40 a-c).



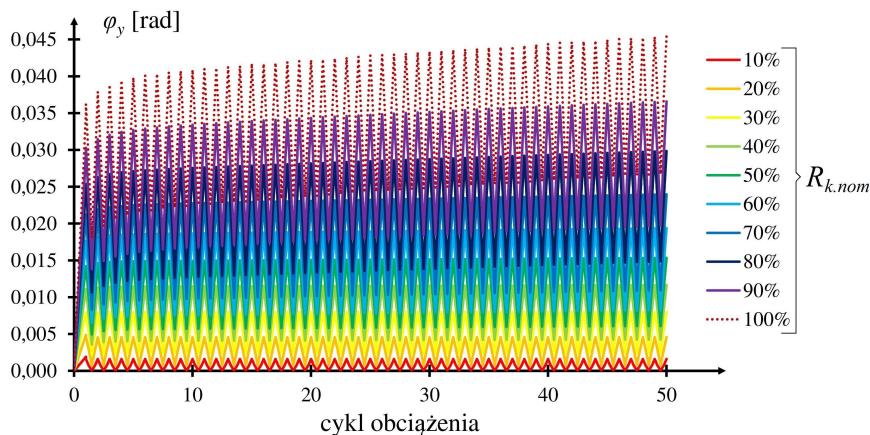
Rys. 4.40 Obszar odkształceń plastycznych w obrębie rozety: a) wbitcie na głębokość 1 mm, b) wbitcie na głębokość 1,5 mm, c) wbitcie na głębokość 2,0 mm, d) pięćdziesiąty cykl wbitcia na głębokość 2,0 mm

Kolejną formą obciążenia, dla której analizowano wpływ wielokrotności obciążenia, był moment zginający w płaszczyźnie pionowej M_y . Proces wielokrotnego obciążenia obejmował jednokrotne wbitcie kłina i 50-krotne obciążenie węzła momentem M_y . Analiz dokonywano na skalibrowanym modelu opisanym w rozdziale 4.3.1 przy założeniu głębokości wbitcia kłina na poziomie 2 mm i przyjęciu stałego współczynnika tarcia $\mu = 0,1$ dla wszystkich powierzchni kontaktu. Analiz dokonywano w zakresie obciążenia do charakterystycznej wartości nośności $R_{k,nom}$, wynoszącej w przypadku momentu w płaszczyźnie pionowej 97,56 kNcm. Węzeł poddawano wielokrotnemu obciążeniu, przy czym przyłożone obciążenie stanowiło procentową wartość nośności określonej na podstawie badań laboratoryjnych. Zachowano 10% skok wartości obciążenia (Rys. 4.41).



Rys. 4.41 Wykres zależności moment M_y -obrót φ_y w przypadku wielokrotnego obciążenia węzła momentem M_y przy różnych poziomach obciążenia węzła

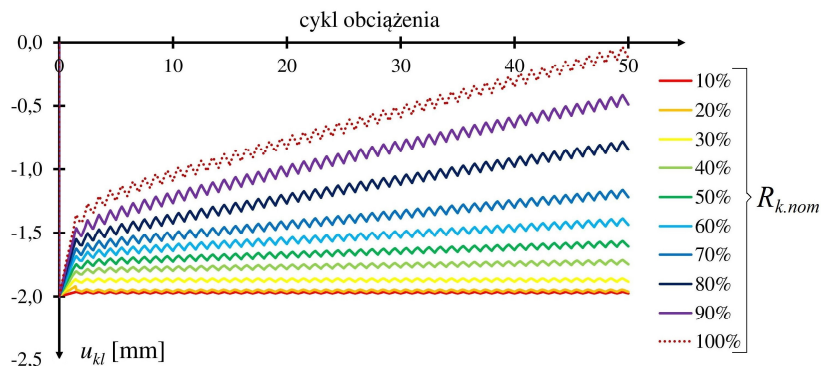
Na Rys. 4.41 możemy zauważyć, że w przypadku obciążenia wielokrotnego wartości przemieszczeń w postaci kąta obrotu narastają pomimo przyłożenia tej samej wartości obciążenia. Do 20% zakresu dopuszczalnego obciążenia, przyrost przemieszczeń w kolejnym cyklu obciążenia jest pomijalnie mały. W przypadku kolejnych cykli obciążenia węzła obciążeniem wynoszącym 100% jego nośności, przyrost przemieszczeń jest wyraźny (Rys. 4.42).



Rys. 4.42 Wartości kąta obrotu φ_y w kolejnych cyklach przy różnych poziomach obciążenia węzła momentem zginającym M_y

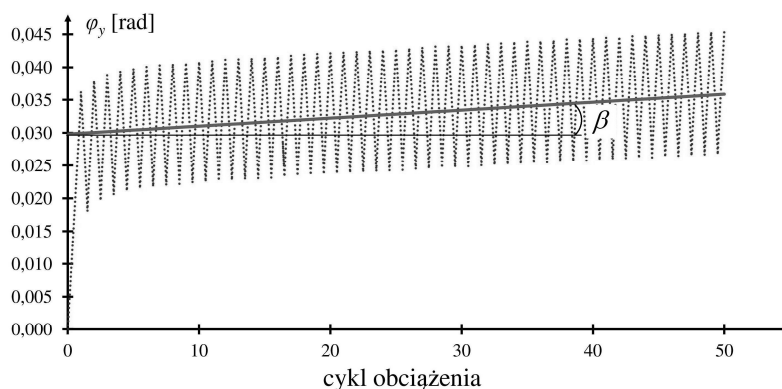
Wzrost przemieszczeń jest spowodowany wysuwaniem się klina z otworu rozety w kolejnych cyklach obciążenia. Przy pięćdziesiątym cyklu obciążenia węzła wartością dopuszczalną dochodzi do wysunięcia klina do poziomu przed

jego wbiciem, czyli do poziomu 0 mm (Rys. 4.43). W przypadku obciążenia wynoszącego 20% obciążenia dopuszczalnego nie dochodzi do wysunięcia klina.



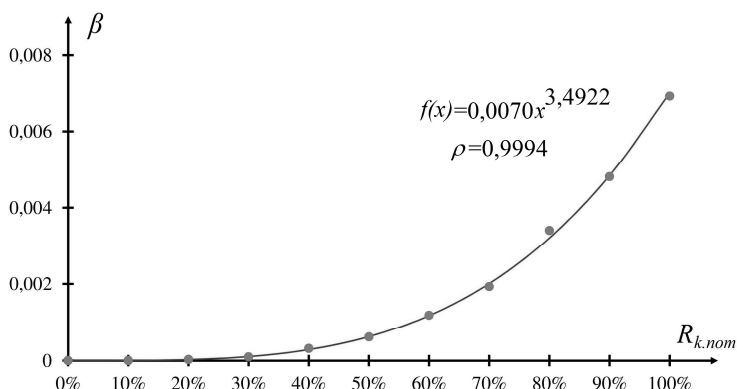
Rys. 4.43 Przesunięcie klina u_{kl} w kolejnych cyklach przy różnych poziomach obciążenia węzła momentem zginającym M_y

W celu określenia zależności pomiędzy przyrostem przemieszczeń i wielokrotnie przyłożonym obciążeniem stanowiącym procentową wartość nośności, wyznaczono parametr β określający kąt zawarty pomiędzy linią poziomą i dopasowaną funkcją liniową w obrębie wzrostu przemieszczeń (Rys. 4.44). Problematyka doboru funkcji, w celu opisanie zjawisk fizycznych, została przedstawiona w pracy [20]. Autorzy wskazali kryteria, jakimi należy się kierować, ażeby uzyskać jak najprostszy model zachowujący jednocześnie dokładność odwzorowania.



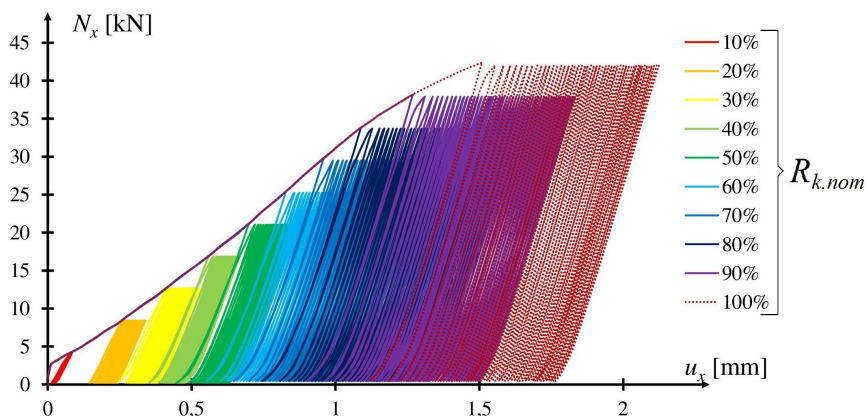
Rys. 4.44 Graficzna interpretacja parametru β

Parametr β został określony dla każdego przypadku obciążenia przedstawionego na Rys. 4.42. Dla uzyskanych wyników, przedstawionych na Rys. 4.45, dokonano aproksymacji za pomocą funkcji potęgowej postaci $f(x) = ax^b$. W przypadku wartości $a = 0,0070$ oraz $b = 3,4922$ współczynnik korelacji Pearsona wynosi $\rho = 0,9994$. Podjęto również próbę dopasowania funkcji w postaci $f(x) = a + b/(c-x)$, jednakże uzyskana funkcja w zakresie małych wartości zmiennej x uzyskiwała wartości ujemne.

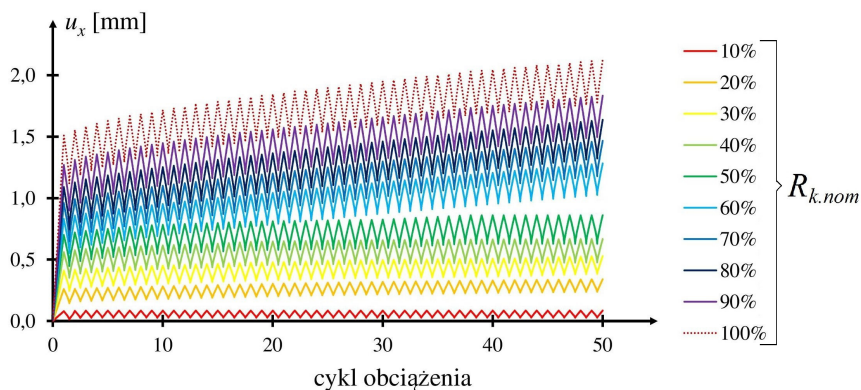


Rys. 4.45 Wartość parametru β w zależności od poziomu obciążenia węzła momentem zginającym M_y

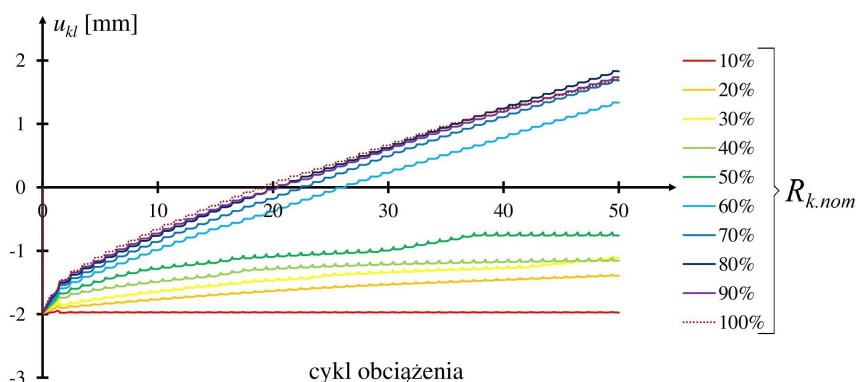
Analogiczne analizy wykonano w przypadku węzła obciążonego siłą N_x . Wyniki zostały przedstawione na Rys. 4.46÷Rys. 4.48.



Rys. 4.46 Wykres zależności siła N_x -przemieszczenie u_x w przypadku wielokrotnego obciążania węzła siłą N_x przy różnych poziomach obciążenia węzła

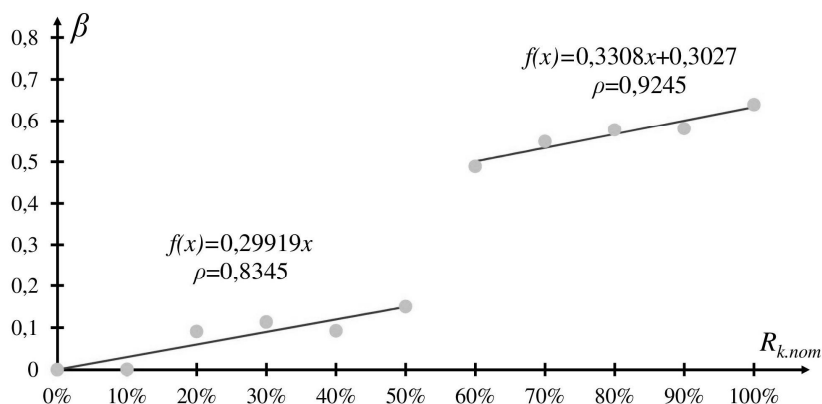


Rys. 4.47 Wartości przemieszczenia u_x w kolejnych cyklach przy różnych poziomach obciążenia węzła siłą N_x



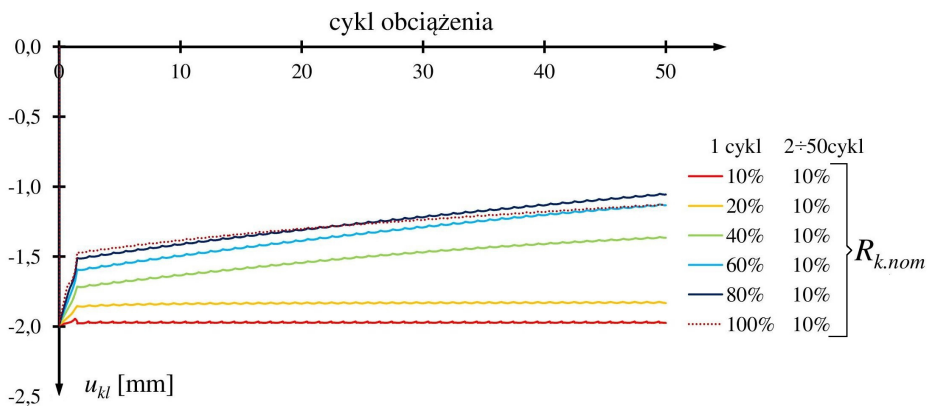
Rys. 4.48 Przemieszczenie klina u_{kl} w kolejnych cyklach przy różnych poziomach obciążenia węzła siłą N_x

W przypadku siły N_x możemy zauważyć znacznie większy przyrost przemieszczeń niż w przypadku momentu M_y . Do wysuwania klina dochodzi już w przypadku 20% obciążenia dopuszczalnego. Możemy również zauważyć gwałtowny wzrost przemieszczeń w przedziale między 50% a 60% wartości dopuszczalnej co nie miało miejsca w przypadku momentu M_y . Do wysunięcia klina dochodzi po 27 cyklach obciążenia węzła siłą wynoszącą 60% wartości dopuszczalnej. W przypadku obciążenia węzła siłą wynoszącą 100% wartości dopuszczalnej, do niebezpiecznego wysunięcia klina dochodzi już po 20 cyklu obciążenia. Stosując ten sam parametr w postaci kąta β uzyskano zależności, przedstawione na Rys. 4.49.



Rys. 4.49 Wartość parametru β w zależności od poziomu obciążenia węzła siłą N_x

Dla uzyskanych wyników przedstawionych na Rys. 4.49 dokonano aproksymacji za pomocą dwóch funkcji liniowych $f(x) = ax + b$, uzyskując współczynnik korelacji Pearsona odpowiednio $\rho = 0,8345$ oraz $\rho = 0,9245$. W typowych konstrukcjach rusztowań wartość siły normalnej N_x występującej w ryglach nie przekracza 10% nośności węzła, dzięki czemu w większości przypadków nie dochodzi do wysunięcia klina.

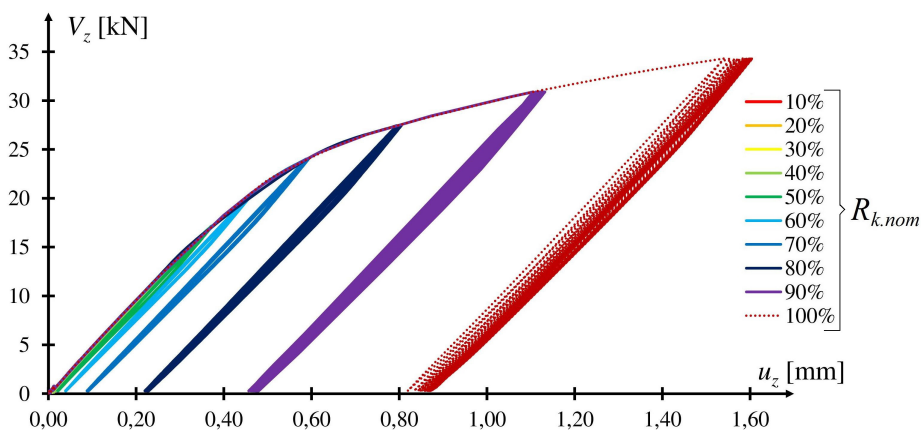


Rys. 4.50 Przesunięcie klina u_{kl} , przy różnych poziomach obciążenia siłą N_x w pierwszym cyklu i obciążeniu stanowiącym 10% nośności węzła w cyklach kolejnych

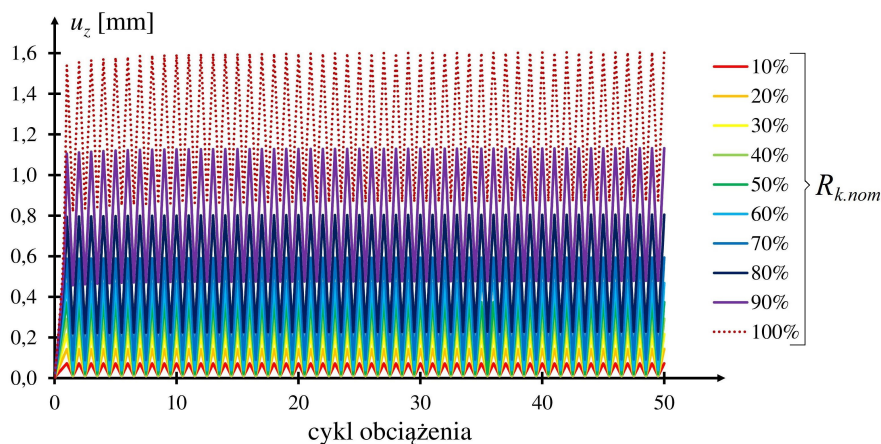
Ponieważ w trakcie analiz pojawiły się wątpliwości dotyczące wartości współczynnika tarcia, w celu sprawdzenia czy zachowanie klina jest uzależnione tylko od wartości współczynnika tarcia, przeprowadzono analizy obejmujące

pojedyncze wbicie klina, jednokrotne obciążenie węzła siłą odpowiadająca procentowej wartości obciążenia dopuszczalnego i wielokrotne przyłożenie obciążenia wynoszącego 10% wartości dopuszczalnej. Analizy przeprowadzono dla węzła obciążonego siłą N_x . Na Rys. 4.50 możemy zaobserwować, że pomimo wielokrotnego obciążania węzła siłą stanowiącą tylko 10% nośności węzła, dochodzi do wysunięcia klina. Taka sytuacja nie miała miejsca w przypadku poprzednich analiz. Zmiany geometrii powierzchni kontaktu klina i rozety wywołane jednokrotnym obciążeniem większym niż 40% nośności negatywnie wpływają na zachowanie węzła. Na efekt związany z wysunięciem klina mają więc wpływ co najmniej dwa elementy: wartość współczynnika tarcia μ oraz zmiany geometrii w obrębie rozety spowodowane obciążeniem.

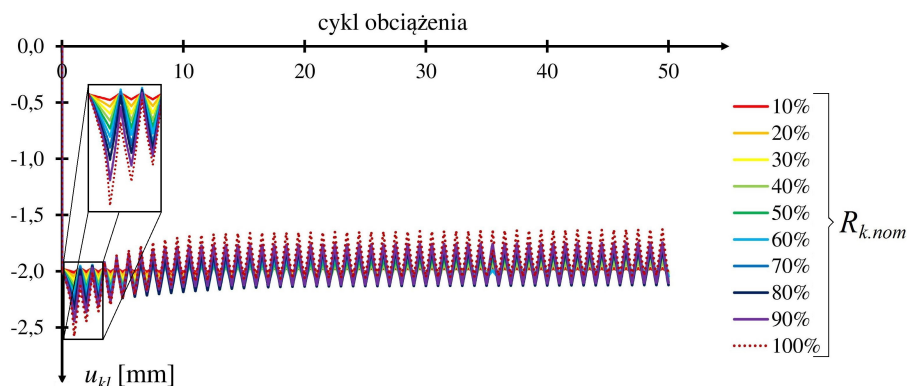
Analizy wielokrotnego obciążenia przeprowadzono również w przypadku obciążenia w postaci siły V_z , będącej jedną z głównych form obciążeń, występujących w typowym rusztowaniu. Ponieważ zwrot siły jest zgodny ze zwrotem wbijania klina, nie zaobserwowano zjawiska polegającego na wysuwaniu się klina. W pierwszym cyklu obciążenia przemieszczenie klina wzrasta ponieważ dochodzi do przemieszczenia rozety. W obrębie kontaktu pomiędzy głowicą rygla i klinem występuje tarcie, dlatego też wraz z przemieszczeniem głowicy następuje przemieszczenie klina. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na Rys. 4.51÷Rys. 4.53. W stosunku do momentu M_y oraz siły N_x przemieszczenia, spowodowane wielokrotnym obciążeniem węzła siłą V_z , wzrastają w niewielkim stopniu. W przypadku obciążenia na poziomie 100% wartości $R_{k.nom}$ przyrost przemieszczeń po 50 cyklach wynosi 0,065 mm.



Rys. 4.51 Wykres zależności siła V_z -przemieszczenie u_z w przypadku wielokrotnego obciążania węzła siłą V_z przy różnych poziomach obciążenia węzła



Rys. 4.52 Wartości przemieszczenia u_z w kolejnych cyklach przy różnych poziomach obciążenia węzła siłą V_z

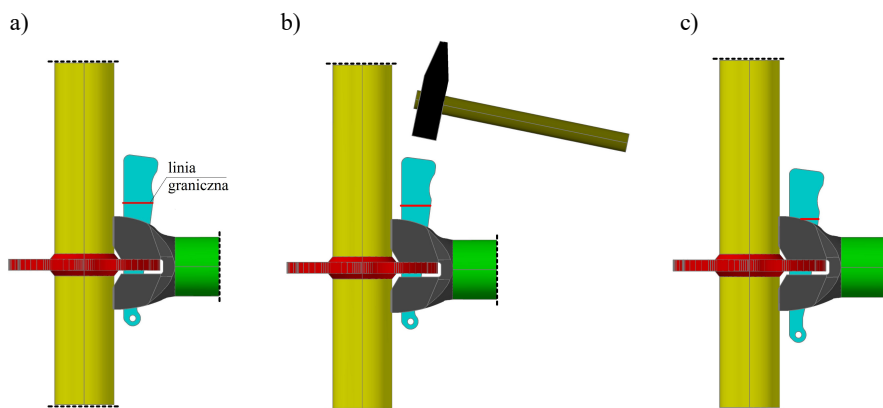


Rys. 4.53 Przesunięcie klina u_{kl} w kolejnych cyklach przy różnych poziomach obciążenia węzła siłą V_z

4.4.2 Określenie kryterium możliwości ponownego użycia elementów

Ponieważ w trakcie pracy konstrukcji rusztowania nie ma możliwości bezpośredniej kontroli obciążeń, jakim są poddane węzły, konieczne jest opracowanie kryterium umożliwiającego określenie możliwości ponownego użycia tych samych elementów. Węzeł poddany obciążeniu dopuszczalnemu ulega deformacjom, szczególnie w obrębie rozety. Zmiany w postaci pęknięć spoin lub pęknięć w obrębie głowic rygla jednoznacznie dyskwalifikują dany element z ponownego użycia. Tego typu zmiany są łatwe do zdiagnozowania w trakcie wizualnych przeglądów elementów, które powinny być przeprowadzane przez firmy dystrybuujące elementami rusztowań.

Obciążenia w postaci momentu zginającego w płaszczyźnie pionowej M_y oraz siły normalnej N_x powodują zmiany w obrębie rozety, jednakże w zakresie wartości dopuszczalnych nie wywołują zmian w postaci pęknięć jednoznacznie dyskwalifikujących elementy z ponownego użycia. Zachodzące zmiany mają charakter odkształceń plastycznych, których interpretacja nie jest jednoznaczna. Sposób weryfikacji przydatności elementów powinien być łatwy w ocenie i jednoznaczny. Dlatego też, jako parametr określający możliwość ponownego użycia danego elementu, zaproponowano głębokość wbicia klina. W wyniku zmian geometrii, zachodzących w obrębie rozety wywołanych obciążeniem, klin ma możliwość większego zagłębienia. Możliwość zagłębienia klina powyżej wartości dopuszczalnej oznacza, że węzeł podlegał obciążeniom przewyższającym wartości dopuszczalne a tym samym nie powinien być ponownie wbudowany w nową konstrukcję rusztowania.

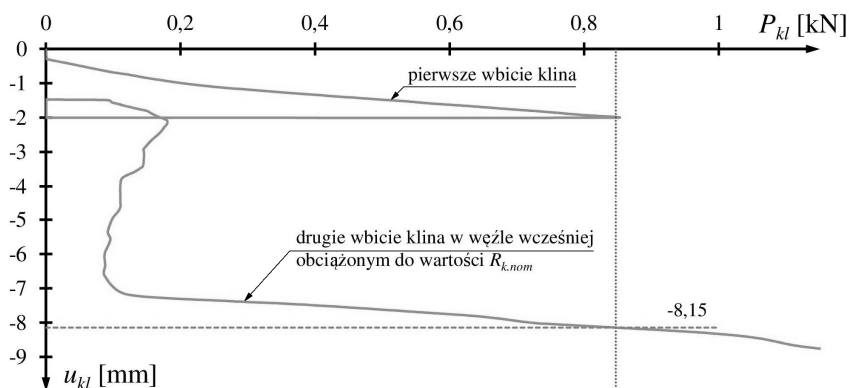


Rys. 4.54 Proces weryfikacji ponownego użycia elementu rusztowania: a) klin z naniesioną linią graniczną, b) wytworzenie połączenia poprzez wbicie klina, c) weryfikację zagłębienia klina

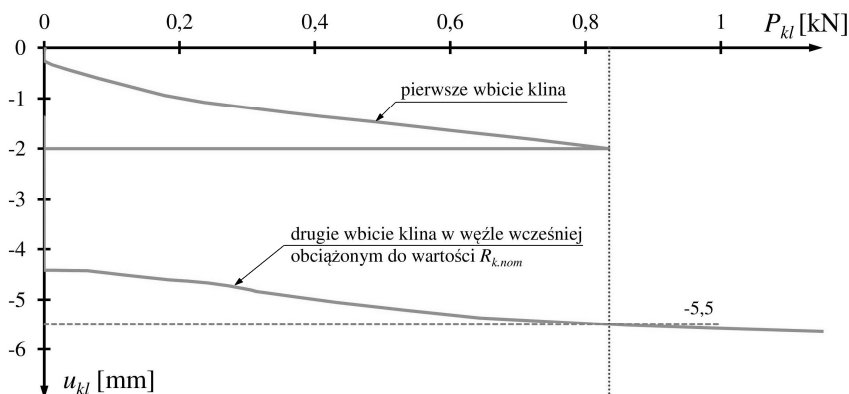
Graniczna wartość zagłębienia klina mogłaby być наносzona bezpośrednio na powierzchnię boczną klina w postaci linii (Rys. 4.54 a). Osoba przeprowadzającą kontrolę elementów rusztowań przeprowadzałaby próbny montaż polegający na wbiciu klina w otwór rozety (Rys. 4.54 b). Jeżeli klin ulegnie zagłębieniu powyżej linii granicznej (Rys. 4.54 c), element nie powinien być ponownie wbudowany w konstrukcję, ponieważ w trakcie poprzedniego użytkowania uległ przeciążeniu. W przypadku stwierdzenia, że klin ulega zbyt dużemu zagłębieniu, stojak z przyspawaną rozetą powinien zostać wycofany z obiegu. Do weryfikacji może służyć wzorcowy rygiel wyposażony w klin z naniesioną linią graniczną.

W celu określenia położenia linii granicznej w obrębie klina przeprowadzono analizy numeryczne obejmujące pojedyncze wbicie klina, obciążenie węzła do wartości dopuszczalnej, odciążenia oraz ponowne wbicie klina. Ponieważ

największe zniszczenia w obrębie rozety występują w przypadku obciążenia siłą N_x oraz momentem zginającym w płaszczyźnie pionowej M_y , analizy przeprowadzono dla obu przypadków obciążenia. W wyniku przeprowadzonych analiz, przy założeniu tej samej siły jak w przypadku pierwszego wbicia, klin ulega wbiciu na głębokość 8,15 mm w przypadku siły N_x (Rys. 4.55) oraz 5,5 mm w przypadku momentu M_y (Rys. 4.56). Ponieważ w trakcie użytkowania rusztowania węzeł może podlegać różnym formom obciążenia jako wartość graniczną przyjęto wartość mniejszą wynoszącą 5,5 mm. Proponowaną linię graniczną należałoby nanieść w odległości 5,5 mm powyżej górnej krawędzi rygla przy swobodnym złożeniu węzła (bez wbijania).



Rys. 4.55 Graniczna głębokość wbicia klina po jednokrotnym obciążeniu węzła dopuszczalną siłą N_x



Rys. 4.56 Graniczna głębokość wbicia klina po jednokrotnym obciążeniu węzła dopuszczalnym momentem zginającym M_y

4.5 Podsumowanie analiz numerycznych

Przeprowadzone analizy numeryczne dostarczyły informacji na temat wrażliwości modelu na parametry początkowe analizy związane ze zjawiskiem tarcia, jak również głębokością wbicia klina. Wskazano również wpływ niedokładności wykonania połączenia na zachowanie węzła. Nierówności, występujące na powierzchni łączonych elementów, jak również niezachowanie równoległości powierzchni, uniemożliwiają uzyskanie pełnej powierzchni kontaktu w pierwszej fazie obciążenia.

Wyniki zależności siła-przemieszczenie oraz moment-obrót w początkowej fazie są uzależnione od głębokości wbicia klina. W przypadku węzłów rusztowań rurowo-złączkowych w normie [72] jednoznacznie określono wartość momentu dokręcenia na poziomie 50 Nm. Za pomocą klucza dynamometrycznego możliwa jest dokładna kontrola jakości wytworzonego połączenia. W przypadku połączenia uzyskiwanego poprzez wbicie klina nie ma wytycznych co do wartości siły jaką należy przyłożyć do klina. Jedyną wytyczną, jaką możemy znaleźć w katalogach producentów jest określenie masy młotka na poziomie 500 g, za pomocą którego należy wbijać klin. Wbijając klin za pomocą młotka, o określonej masie, nie mamy dokładnej kontroli nad przyłożoną siłą a tym samym nad głębokością wbicia.

Wielokrotne wbicie klina w otwór rozety, przy założeniu stałej siły wbicia, nie powoduje zmiany geometrii w obrębie klina oraz rozety a tym samym nie wpływa negatywnie na jakość uzyskanego połączenia.

Wielokrotne obciążanie węzła negatywnie wpływa na jego sztywność. Zmiany wywołane obciążeniem węzła na poziomie 60% obciążeń dopuszczalnych zarówno w przypadku siły N_x jak i momentu M_y powodują zmiany w geometrii rozety. Ponowne obciążenie węzła nawet w niedużym zakresie obciążenia mogą powodować wysunięcie klina a tym samym wzrost przemieszczeń.

Ponieważ nie ma możliwości kontroli poziomu wyężenia elementów w trakcie użytkowania konstrukcji rusztowania, opracowano parametr w postaci granicznej głębokości klina na poziomie 5,5 mm świadczącej o co najmniej jednokrotnym obciążeniu węzła do wartości granicznej. Parametr ten może zostać wykorzystany przez użytkowników jako parametr określający przydatność elementu w dalszym użytkowaniu.

Stworzone modele numeryczne mogą być wykorzystane do analiz węzłów w przypadku nietypowych konstrukcji, w których węzeł podlega znacznym obciążeniom. Rozwiązania zastosowane w trakcie budowania modelu mogą być wykorzystane w trakcie generowania modeli węzłów innych systemów rusztowań.

5 Podsumowanie i wnioski ogólne

W ramach niniejszej pracy zaprojektowano i wykonano uchwyty badawcze węzła rusztowania, umożliwiające przeprowadzenie badań na ogólnodostępnych maszynach wytrzymałościowych. Ograniczenie liczby elementów, poddawanych obciążeniu, wyeliminowało niepożądane efekty związane z jednoczesnym występowaniem wielu zjawisk, jak ma to miejsce w trakcie badania całego pola rusztowania. Prosta budowa i minimalna liczba elementów ulegających zniszczeniu w znacznym stopniu ograniczyła koszty badań, jak również czas ich wykonania.

Przeprowadzono badania materiałów, z jakich wykonane są poszczególne elementy węzła. Każdy z elementów węzła wykazał inne charakterystyki materiałowe, a w szczególności głowica rygla będąca odlewem. Wytwarzanie węzłów z elementów o różnych charakterystykach materiałowych jest nietypowe dla konstrukcji stalowych. Z powodu składania węzłów z gotowych komponentów dochodzi do tego zjawiska we wszystkich systemach. Na szczególną uwagę zasługuje głowica, ponieważ ma znacznie mniejszy moduł Younga i wykazuje kruchość co znacznie wpływa na pracę węzła.

Przeprowadzono również kompleksowe badania, obejmujące wszystkie formy obciążenia występujące w węźle rusztowania budowlanego, w którym połączenie uzyskiwane jest za pomocą klina. Analizując poszczególne formy zniszczenia węzła wskazano jego newralgiczne elementy, co może stanowić dane porównawcze w analizach uszkodzeń, występujących w rzeczywistych konstrukcjach. W przypadku poszczególnych form obciążenia zniszczeniu ulegały:

- N_x – rozeta oraz klin,
- V_y – rura stojaka (w niewielkim stopniu),
- V_z – głowica rygla,
- M_x – rozeta,
- M_y – rura stojaka oraz rozeta,
- M_z – rozeta oraz klin.

Na podstawie badań laboratoryjnych określono nośności węzła dla poszczególnych form obciążenia zgodnie z procedurami opisanymi w normie [65] uwzględniającymi kryterium zniszczenia elementu. Największą nośność węzeł wykazuje w przypadku obciążenia siłą N_x oraz obciążenia momentem M_y .

Określono charakter uzyskiwanego połączenia wraz z określeniem sztywności węzła. W odniesieniu do badanego węzła w przypadku zginania w płaszczyźnie poziomej oraz skręcania połączenie należy traktować jako przegubowe, natomiast w płaszczyźnie pionowej połączenie ma charakter połączenia półsztywnego o sztywności 3374 kNcm/rad. W przypadku rozpatrywanego systemu rusztowania nie stwierdzono wyraźnych luzów

w początkowej fazie obciążania. Różnica sztywności w trakcie odciązania w stosunku do sztywności uzyskiwanej w trakcie obciążania wynika z odkształceń plastycznych zachodzących w obrębie węzła przy niewielkim zakresie obciążenia.

Kolejnym etapem badań były analizy numeryczne. Stworzono model numeryczny węzła, umożliwiający obciążenie węzła dowolną formą obciążenia. Model wykalibrowano na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych. W przypadku nietypowych i skomplikowanych konstrukcji może on zostać wykorzystany do analiz wytrzymałościowych przy zadanych formach obciążenia.

Analizy numeryczne zostały przeprowadzone dla różnych parametrów początkowych związanych z kontaktem oraz dokładnością wykonanego połączenia. Diametralny wpływ na właściwości uzyskanego połączenia ma głębokość wbicia klina, decydująca o sztywności połączenia w początkowej, najbardziej newralgicznej, fazie obciążenia.

Na podstawie badań numerycznych wskazano wpływ wielokrotności obciążenia na zachowanie węzła. Ze względu na występujące odkształcenia plastyczne, w przypadku nietypowych konstrukcji konieczne jest zmniejszenie dopuszczalnych obciążeń o 40% z uwagi na zmiany zachodzące w węźle pod wpływem wielokrotności obciążenia. W przeciwnym wypadku w trakcie długotrwałego użytkowania rusztowań może dojść do poluzowania klina i utraty połączenia. Obciążenie węzła do wartości dopuszczalnej powoduje odkształcenia w obrębie rozety a tym samym może spowodować „poluzowanie” klina i utratę połączenia.

Projektując konstrukcje rusztowań wykonanych z elementów systemu modułowego typu ROTAX należy zwrócić uwagę na zwrot sił przywęzłowych, szczególnie w przypadku siły pionowej V_z . Zwrot siły nie jest dowolny a węzeł wykazuje luz w przypadku obciążenia skierowanego w górę.

Ponadto w pracy określono parametr umożliwiający weryfikację dalszej przydatności węzła i możliwości jego ponownego wbudowania w konstrukcję rusztowania. Ponieważ w trakcie użytkowania nie da się stwierdzić, jakim obciążeniom podlegała konstrukcja rusztowania, parametrem określającym przydatność węzła do dalszej eksploatacji jest głębokość wbicia klina. Jeżeli możliwe jest zagłębienie klina na głębokość 5,5 mm, oznacza to, że węzeł podlegał granicznemu obciążeniu podczas użytkowania we wcześniejszych konstrukcjach i nie powinien być powtórnie wbudowany w konstrukcję. Parametr ten jest łatwy do zweryfikowania w trakcie montażu i możliwe jest naniesienie linii bezpośrednio na klin, oznaczającej maksymalne dopuszczalne zagłębienie klina.

Analizy zostały wykonane dla węzła stalowego rusztowania modułowego ROTAX, jednakże przedstawione metody badawcze i opracowane stanowiska mogą być wykorzystane do badań węzłów innych systemów rusztowań budowlanych. Tworząc modele numeryczne węzłów rusztowań należy zwrócić

uwagę na możliwość występowania różnic w charakterystykach materiałowych poszczególnych elementów węzła, niedokładności montażu węzła, współczynnik tarcia oraz głębokość wbicia klina.

Metoda określania przydatności węzła na podstawie głębokości wbicia klina może być stosowana również w innych systemach rusztowań. W literaturze takich szczegółowych badań nie ma, i wydaje się uzasadnione, aby ze względów bezpieczeństwa przeprowadzono szczegółowe badania węzłów rusztowań w pełnym zakresie obciążeń.

Bibliografia

- [1] Albermani F., Goh G. Y., Chan S. L., *Lightweight bamboo double layer grid system*, Engineering Structures, vol. 29, p. 1499–1506, 2007.
- [2] Bąk R., Burczyński T., *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [3] Baker T. J., *Automatic mesh generation for complex three-dimensional regions using a constrained delaunay triangulation*, Engineering with Computers, vol. 175, p. 161–175, 1989.
- [4] Beale R. G., Godley M. H. R., *Numerical Modeling of tube and fitting access scaffold systems*, Advanced Steel Construction, vol. 2, p. 199–223, 2006.
- [5] Błazik-Borowa E., Gontarz J., *The influence of the dimension and configuration of geometric imperfections on the static strength of a typical fascade scaffolding*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 16, p. 269–281, 2016.
- [6] Błazik-Borowa E., Pieńko M., Robak A., Borowa A., Jamińska-Gadomska P., *Analysis of ledger-stand joints in the aluminum modular scaffold*, Archives of Civil Engineering, vol. 63, p. 17–31, 2017.
- [7] Błazik-Borowa E., Robak A., *Numerical models of scaffolding decks and their applications*, International Journal of Civil Engineering, vol. 15, p. 979–989, 2017.
- [8] Błazik-Borowa E., Szer J., *Analiza etapów tworzenia i użytkowania rusztowań z uwagi na bezpieczeństwo użytkowników*, Budownictwo i Architektura, vol. 13, s. 333–340, 2014.
- [9] Błyskal E., Ślęczka L., *Badania doświadczalne rozciąganych kątowników łączonych za pomocą jednej śruby*, Czasopismo Inżynierii Ładowej Środowiska i Architektury, vol. 63, s. 323–330, 2016.
- [10] Borysiak M., Krawczyk Z., *Poprawa jakości trójwymiarowych siatek czworosściennych używanych do analiz metodą elementów skończonych przy użyciu programu Stellar*, Prace Instytutu Elektrotechniki, vol. 249, s. 143–154, 2011.
- [11] Brito V. L. de, Pena A. N., Pimentel R. L., Brito J. L. V. de, *Modal Tests and Model Updating for Vibration Analysis of Temporary Grandstand*, Advances in Structural Engineering, vol. 17, p. 721–734, 2014.
- [12] Brooker D. C., Ronalds B. F., *Prediction of ductile failure in tubular steel members using ABAQUS.*, Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, vol. IV, p. 45–50, 2001.
- [13] Bućko S., Jodłowski H., *Powstawanie odkształceń plastycznych w belkach poddanych czystemu zginaniu*, Acta Mechanica et Automatica, vol. 4, s. 16–20, 2010.

- [14] Chan S. L., Zhou Z. H., Chen W. F., Peng J. L., Pan A. D., *Stability analysis of semirigid steel scaffolding*, Engineering Structures, vol. 17, p. 568–574, 1995.
- [15] Chandrangsou T., Rasmussen K. J. R., *Investigation of geometric imperfections and joint stiffness of support scaffold systems*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 67, p. 576–584, 2011.
- [16] Chandrangsou T., Rasmussen K. J. R., *Structural modelling of support scaffold systems*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 67, p. 866–875, 2011.
- [17] Chen X., Li X., Yu A., Ren W., Li Q., *Analysis on nonlinear mechanical performance of disk-pin joint in the demountable grandstands of Suzhiu Word Table Tennis Championships*, Progress in Steel Building Structures, vol. 19, p. 25–34, 2017.
- [18] Chu A. Y. T., Chan S. L., Chung K. F., *Stability of modular steel scaffolding systems – theory and verification*, Proceedings of the International Conference on Advances in Building Technology, p. 621–628, 2002.
- [19] Cimellaro G. P., Domaneschi M., *Stability analysis of different types of steel scaffolds*, Engineering Structures, vol. 152, p. 535–548, 2017.
- [20] Czarnecki L., Sokołowska J. J., *Material model and revealing the truth*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol. 63, p. 7–14, 2015.
- [21] Dobrzański L. A., *Podstawy nauki o materiałach i metaloznastwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2002.
- [22] Dz.U. 2003 Nr 47 poz. 401, *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 lutego 2003r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy podczas wykonywania robót budowlanych*, 2003.
- [23] Guo X., Xiong Z., Luo Y., Qiu L., Liu J., *Experimental investigation on the semi-rigid behaviour of aluminium alloy gusset joints*, Thin-Walled Structures, vol. 87, p. 30–40, 2015.
- [24] Halperin K. M., McCann M., *An evaluation of scaffold safety at construction sites*, Journal of Safety Research, vol. 35, p. 141–150, 2004.
- [25] Ignatowski P., Wrzosek M., *Rusztowania – bezpieczne narzędzie czy śmiertelne zagrożenie – przepisy i praktyka*, XXV Konferencja Naukowo- Techniczna, Awarie Budowlane, s. 93–110, 2011.
- [26] Ilcik J., Arora V., Dolejs J., *Design of new scaffold anchor based on the updated finite element model*, Engineering Structures, vol. 118, p. 334–343, 2016.
- [27] Irtaza H., Beale R. G., Godley M. H. R., *A wind-tunnel investigation into the pressure distribution around sheet-clad scaffolds*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 103, p. 86–95, 2012.

- [28] Jia L., Liu H., Chen Z., Liu Q., Wen S., *Mechanical properties of right-angle couplers in steel tube-coupler scaffolds*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 125, p. 43–60, 2016.
- [29] Kałuziński D., Mańko Z., *Uszkodzenia rusztowań w czasie budowy nowych wiaduktów nad autostradą A18*, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna, Awarie Budowlane, s. 895–902, 2007.
- [30] Kłoda Ł., Łusiak T., Samborski S., *Analiza wytrzymałości masztu wirnika nośnego wiatrakowca metoda elementów skończonych*, Prace Instytutu Lotnictwa, vol. 3, s. 49–57, 2014.
- [31] Kowalewski Z. L., Dietrich L., Kopeć M., Szymczak T., *Nowoczesne systemy optyczne w badaniach mechanicznych - budowa, działanie, zastosowanie*, XXII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 2016.
- [32] Kozłowski A., Giżejowski M., Ślęczka L., Pisarek Z., Saleh B., *Experimental investigations of the joint behaviour - Robustness assesment of steel and steel-concrete composite frames*, 6th European Conference on Steel and Composite Structures, 2011.
- [33] Król P. A., Papadopoulos-Woźniak M., Wójt J., *Badania podatnych węzłów zaczepowych rygiel-słup w stalowych regałach magazynowych wysokiego składowania*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, vol. 60 (2/13), s. 153–174, 2013.
- [34] Kuo C. C., Peng J. L., Yen T., Chan S. L., *Experimental study of modular falsework system with wooden shores under various path loads*, Advances in Structural Engineering, vol. 11, p. 369–382, 2008.
- [35] Lightfoot E., Bhula D., *A test rig for scaffold couplers*, Materials and Structures, vol. 10, p. 168–173, 1977.
- [36] Liu C., He L., Wu Z., Yuan J., *Experimental study on joint stiffness with vision-based system and geometric imperfections of temporary member structure*, Journal of Civil Engineering and Management, vol. 24, p. 43–52, 2018.
- [37] 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*, Advanced Steel Construction, vol. 6, p. 949–962, 2010.
- [38] Liu H., Jia L., Wen S., Liu Q., Wang G., Chen Z., *Experimental and theoretical studies on the stability of steel tube-coupler scaffolds with different connection joints*, Engineering Structures, vol. 106, p. 80–95, 2016.
- [39] Liu H., Zhao Q., Wang X., Zhou T., Wang D., Liu J., Chen Z., *Experimental and analytical studies on the stability of structural steel tube and coupler scaffolds without X-bracing*, Engineering Structures, vol. 32, p. 1003–1015, 2010.

- [40] Ma H. H., Issa A. M., Fan F., Adeoti G. O., *An experimental and numerical study of a semi-rigid bolted-plate connections (BPC)*, Thin-Walled Structures, vol. 88, p. 82–89, 2015.
- [41] Mao C. J., Chiou Y. J., Hsiao P. A., Ho M. C., *Fire response of steel semi-rigid beam–column moment connections*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 65, p. 1290–1303, 2009.
- [42] Milojkovic B., Beale R. G., Godley M. H. R., *Determination of the factors of safety of standard scaffold structures*, Advances in Steel Structures (ICASS '02), p. 303–310, 2002.
- [43] Misztela A., *Modelowanie charakterystyk obciążeniowych połączeń konstrukcyjnych rusztowań*, Przegląd Mechaniczny, vol. nr 5, s. 19–26, 2011.
- [44] Ostrowski K., Kozłowski A., *Rotation capacity of bolted flush end-plate stiffened beam-to-column connection*, Civil and Environmental Engineering Reports, vol. 25, p. 173–184, 2017.
- [45] Paczkowska T., Wróblewski T., *Okoliczności i przyczyny katastrofy rusztowania Bosta 70*, XXV Konferencja Naukowo- Techniczna, Awary Budowlane, s. 865–872, 2011.
- [46] Peng J. L., Chan S. L., Wu C. L., *Effects of geometrical shape and incremental loads on scaffold systems*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 63, p. 448–459, 2007.
- [47] Peng J. L., Chen K. H., Chan S. L., Chen W. T., *Experimental and analytical studies on steel scaffolds under eccentric loads*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 65, p. 422–435, 2009.
- [48] Peng J. L., Ho C. M., Chan S. L., Chen W. F., *Stability study on structural systems assembled by system scaffolds*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 137, p. 135–151, 2017.
- [49] Peng J. L., Ho C. M., Chen C., Yang Y. Bin, *Experimental study on load capacities of isolated heavy-duty scaffolds used in construction*, Advanced Steel Construction, vol. 10, p. 248–273, 2014.
- [50] Peng J. L., Ho C. M., Lin C. C., Chen W. F., *Load-carrying capacity of single-row steel scaffolds with various setups*, Advanced Steel Construction, vol. 11, p. 185–210, 2015.
- [51] Peng J. L., Pan A. D. E., Chan S. L., *Simplified models for analysis and design of modular falsework*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 48, p. 189–209, 1998.
- [52] Peng J. L., Pan A. D., Rosowsky D. V., Chen W. F., *High clearance scaffold systems during construction—I. Structural analysis and development of design guidelines*, Engineering Structures, vol. 18, p. 247–257, 1996.

- [53] Peng J. L., Pan A. D., Rosowsky D. V., Chen W. F., *High clearance scaffold systems during construction—II. Structural analysis and development of design guidelines*, Engineering Structures, vol. 18, p. 258–267, 1996.
- [54] Peng J. L., Wu C. W., Chan S. L., Huang C. H., *Experimental and numerical studies of practical system scaffolds*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 91, p. 64–75, 2013.
- [55] Peng J. L., Yen T., Kuo C. C., Chan S. L., *Analytical and experimental bearing capacities of system scaffolds*, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, vol. 10, p. 82–92, 2009.
- [56] Pieńko M., Błazik-Borowa E., *Wykorzystanie rusztowań budowlanych do prac na wysokości podczas remontów obiektów przemysłowych*, Materiały Budowlane, vol. nr 10, s. 58–60, 2012.
- [57] Pieńko M., Błazik-Borowa E., *Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes*, Engineering Structures, vol. 48, p. 1–9, 2013.
- [58] Pieńko M., Robak A., *Patent nr 222699 Stanowisko do badań odkształceń elementów poziomych obciążonych równomiernie*, Biuletyn Urzędu Patentowego, s. 2221, 2016.
- [59] Pieńko M., Robak A., Błazik-Borowa E., *Scaffoldings used during the renovation of the Metropolitan Cathedral of St. John The Baptist and St. John The Evangelist in Lublin*, Civil And Environmental Engineering Reports, vol. 19, p. 79–86, 2015.
- [60] PN-EN 1004, *Ruchome rusztowania robocze wykonane z prefabrykowanych elementów konstrukcyjnych – Materiały, wymiary, obciążenia projektowe, wymagania bezpieczeństwa i warunki wykonania i ogólne zasady projektowania*, 2005.
- [61] PN-EN 12810-1, *Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – Część 1: Specyfikacja techniczna wyrobów*, 2003.
- [62] PN-EN 12810-2, *Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – Część 2: Specjalne metody projektowania konstrukcji*, 2003.
- [63] PN-EN 12811-1, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 1: Rusztowania Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania*, 2007.
- [64] PN-EN 12811-2, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 2: Informacje o materiałach*, 2008.
- [65] PN-EN 12811-3, *Tymczasowe urządzenia budowlane – Część 3: Obciążenia badawcze*, 2003.
- [66] PN-EN 12811-4, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 4: Daszki ochronne rusztowań – Wymagania dotyczące wykonania i konstrukcji wyrobu*, 2014.

- [67] PN-EN 12812, *Deskowanie – Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania*, 2008.
- [68] PN-EN 12813, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Wieże nośne z elementów prefabrykowanych – Szczegółowe metody konstruowania*, 2005.
- [69] PN-EN 15512, *Stalowe statyczne systemy składowania – Regały paletowe o zmiennej konfiguracji – Zasady projektowania konstrukcji*, 2011.
- [70] PN-EN 1993-1-8, *Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów*, 2005.
- [71] PN-EN 39, *Rury stalowe do budowy rusztowań – Warunki techniczne dostawy*, 2003.
- [72] PN-EN 74-1, *Złącza, sworznie centrującej podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 1: Złącza do rur – Wymagania i metody badań*, 2006.
- [73] PN-EN 74-2, *Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 2: Złącza specjalne – Wymagania i metody badań*, 2009.
- [74] PN-EN 74-3, *Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 3: Podstawki płaskie i sworznie centrujące – Wymagania i metody badań*, 2007.
- [75] PN-M-47900-1, *Rusztowania stojące metalowe robocze – Określenia, podział i główne parametry*, 1996.
- [76] PN-M-47900-2, *Rusztowania stojące metalowe robocze – Rusztowania stojakowe z rur*, 1996.
- [77] PN-M-47900-3, *Rusztowania stojące metalowe robocze – Rusztowania ramowe*, 1996.
- [78] Prabhakaran U., Beale R. G., Godley M. H. R., *Analysis of scaffolds with connections containing looseness*, Computers and Structures, vol. 89, p. 1944–1955, 2011.
- [79] Prabhakaran U., Godley M. H. R., Beale R. G., *Three-dimensional second order analysis of scaffolds with semi-rigid connections*, Weld World, vol. 50, p. 187–194, 2006.
- [80] Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, OWPW, Warszawa, 1993.
- [81] Robak A., Pieńko M., Błazik-Borowa E., *Examples of unusual construction scaffoldings used for renovation works of historic buildings*, Civil And Environmental Engineering Reports, vol. 18, p. 115–120, 2015.
- [82] Rubio-Romero J. C., Carmen Rubio Gámez M., Carrillo-Castrillo J. A., *Analysis of the safety conditions of scaffolding on construction sites*, Safety Science, vol. 55, p. 160–164, 2013.

- [83] Schneider K., Klusemann B., Bargmann S., *Automatic three-dimensional geometry and mesh generation of periodic representative volume elements for matrix-inclusion composites*, Advances in Engineering Software, vol. 99, p. 177–188, 2016.
- [84] Ślęczka L., Kozłowski A., *Design of beam-to-column joints in steel storage pallet racks by testing and by component method*, Archives of Civil Engineering, vol. 63, p. 1–30, 2008.
- [85] Szymczak T., Kowalewski Z., Brodecki A., *Determination of artificial defects in material under monotonic tension by the use of FEM and DIC methods*, Materials Today: Proceedings, vol. 3, p. 1171–1176, 2016.
- [86] Wang F., Tamura Y., Yoshida A., *Wind loads on clad scaffolding with different geometries and building opening ratios*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 120, p. 37–50, 2013.
- [87] Wang F., Tamura Y., Yoshida A., *Interference effects of a neighboring building on wind loads on scaffolding*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 125, p. 1–12, 2014.
- [88] Weesner L. B., Jones H. L., *Experimental and analytical capacity of frame scaffolding*, Engineering Structures, vol. 23, p. 592–599, 2001.
- [89] Whitaker S. M., Graves R. J., James M., McCann P., *Safety with access scaffolds: Development of a prototype decision aid based on accident analysis*, Journal of Safety Research, vol. 34, p. 249–261, 2003.
- [90] Yu W. K., Chung K. F., Chan S. L., *Structural instability of multi-storey door-type modular steel scaffolds*, Engineering Structures, vol. 26, p. 867–881, 2004.
- [91] Yu W. K., Chung K. F., Chan S. L., *Axial buckling of bamboo columns in bamboo scaffolds*, Engineering Structures, vol. 27, p. 61–73, 2005.
- [92] Yue F., Yuan Y., Li G., Ye K., Chen Z., Wang Z., *Wind load on integral-lift scaffolds for tall building construction*, Journal of Structural Engineering, vol. 131, p. 816–824, 2005.
- [93] Zamorowski J., Kowolik B., *Podatność węzłów na przesuw w konstrukcjach prętowych na przykładzie dwóch przekryć pawilonów wystawowych*, Przegląd Budowlany, vol. 7–8, s. 61–66, 2013.
- [94] Zhang H., Chandransu T., Rasmussen K. J. R., *Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems*, Structural Safety, vol. 32, p. 393–401, 2010.
- [95] Zhang H., Rasmussen K. J. R., *System-based design for steel scaffold structures using advanced analysis*, Journal of Constructional Steel Research, vol. 89, p. 1–8, 2013.
- [96] Zhang L., Wang C., Huo L., Song G., *Health monitoring of cuplock scaffold joint connection using piezoceramic transducers and time reversal method*, Smart Materials and Structures, vol. 25, p. 1–11, 2016.

- [97] Zhang L., Wang C., Song G., *Health status monitoring of cuplok scaffold joint connection base on wavelet packet analysis*, Hindawi Publishing Corporation. Shock and Vibration, vol. 15, p. 1–7, 2015.
- [98] Zienkiewicz O. C., *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa, 1972.
- [99] *Abaqus HTML Documentation*, 2013.