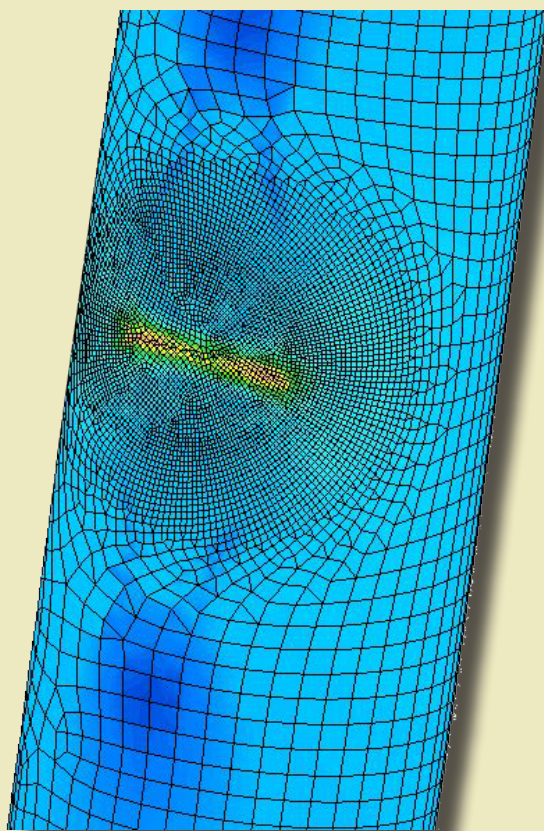




*Aleksander Robak*

## Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność



Lublin 2020

Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych  
elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność

# Monografie – Politechnika Lubelska



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

Aleksander Robak

# Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
Lublin 2020

Recenzenci:

dr hab. inż. Bartosz Miller, prof. Politechniki Rzeszowskiej

dr hab. inż. Katarzyna Rzeszut, prof. Politechniki Poznańskiej

Redakcja i skład: Aleksander Robak

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2020

ISBN: 978-83-7947-435-6

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
[www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa](http://www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa)  
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin  
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmietowicza 1/1

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Nakład: 50 egz.

## SPIS TREŚCI

Streszczenie.....	7
Abstract.....	9
Zestawienie najważniejszych symboli i skrótów .....	11
1 Wprowadzenie .....	13
1.1 Typy rusztowań budowlanych .....	13
1.2 Obciążenia rusztowań budowlanych.....	16
1.3 Problem naukowy .....	18
2 Wpływ uszkodzeń i imperfekcji w konstrukcjach stalowych na ich nośność .....	19
2.1 Uszkodzenia konstrukcji stalowych .....	19
2.2 Przegląd badań uszkodzeń rur stalowych.....	22
2.3 Wybrane badania rusztowań .....	26
2.4 Geometryczne imperfekcje rusztowań budowlanych.....	30
2.5 Weryfikacja modeli numerycznych .....	31
2.6 Podsumowanie .....	32
3 Identyfikacja uszkodzeń w ramowych rusztowaniach budowlanych .....	33
3.1 Metodologia zbierania danych o uszkodzeniach.....	33
3.2 Grupy elementów .....	34
3.3 Podział uszkodzeń elementów rusztowań .....	36
3.4 Zestawienie ilościowe uszkodzeń .....	46
3.5 Podsumowanie .....	48
4 Badania laboratoryjne uszkodzeń ram.....	49
4.1 Cel i zakres badań .....	49
4.2 Badanie laboratoryjne wycinka rury .....	50
4.3 Badania laboratoryjne całej ramy.....	56
4.4 Podsumowanie .....	66
5 Badania numeryczne ram rusztowań budowlanych.....	67
5.1 Analiza numeryczna wycinka stojaka .....	67
5.1.1 Przygotowanie modelu wycinka stojaka.....	67
5.1.2 Opis badań numerycznych fragmentów rur .....	69
5.1.3 Porównanie wyników badań laboratoryjnych i numerycznych wycinka rury .....	74
5.2 Analiza numeryczna pełnej ramy .....	82
5.2.1 Przygotowanie modelu i opis analizy .....	82
5.2.2 Weryfikacja modeli numerycznych ramy .....	85

5.2.3	Analizy numeryczne ram.....	93
5.3	Podsumowanie analiz numerycznych ram .....	99
6	Analiza numeryczna konstrukcji rusztowania budowlanego.....	101
6.1	Numeryczny model prętowy ramy .....	101
6.2	Warianty obliczeń .....	104
6.2.1	Przypadki obciążeń.....	104
6.2.2	Lokalizacja uszkodzeń.....	106
6.2.3	Imperfekcje geometryczne.....	109
6.2.4	Wysokość konstrukcji.....	111
6.3	Wyniki obliczeń statycznych .....	111
6.4	Podsumowanie analiz numerycznych całego rusztowania.....	117
7	Podsumowanie i wnioski .....	119
8	Bibliografia.....	122

## STRESZCZENIE

### **Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność**

W pracy przeanalizowano aktualny stan wiedzy na temat uszkodzeń eksploatacyjnych konstrukcji stalowych. Szczególną uwagę poświęcono rusztowaniom budowlanym. Dokonano opisu badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych prowadzonych przez inne ośrodki badawcze. W literaturze przedmiotu nie odnaleziono ani badań, ani symulacji zachowania elementów konstrukcyjnych rusztowań z uszkodzeniami eksploatacyjnymi.

W przeprowadzonych w ramach pracy badaniach wykazano występowanie wielu różnych typów uszkodzeń ramowych rusztowań budowlanych. Opisane w pracy to takie, które występowały bardzo często na wielu obiektach, więc można stwierdzić, że są charakterystycznymi dla danego elementu. Dokonano klasyfikacji i zwrócono uwagę na uszkodzenia mogące mieć istotny wpływ na nośność rusztowań oraz bezpieczeństwo ich użytkowania. Dokonano zestawienia liczbowego uszkodzeń na poszczególnych obiektach, z którego wynika, że niemal 70% konstrukcji rusztowań jest wznoszona także z elementów, które stwarzają zagrożenie dla ich nośności lub bezpieczeństwa użytkowania. W ramowych rusztowaniach budowlanych, głównymi elementami nośnymi są stojaki ram. W elementach tych, podczas eksploatacji występuje największe wyężenie elementu powodowane obciążeniem pionowym i poziomym. W związku z tym, w pracy wykonano analizę wpływu uszkodzeń stojaków na nośność rusztowania.

Badania laboratoryjne podzielono na dwie grupy. Pierwszą grupą badań jest obciążenie wycinka stojaka o długości 40 cm, osiową siłą ściskającą lub rozciągającą. W badaniach tych określano wpływ uszkodzenia w postaci punktowego wgęcia rury na nośność elementu. Próba rozciągania pozwoliła na stwierdzenie, że uszkodzenia o przyjętym do badań zakresie wielkości mają zaniedbywalny wpływ na nośność elementu. Natomiast podczas próby ściskania wykazano zmniejszenie nośności rury. Druga grupa badań laboratoryjnych została wykonana na całych ramach. W badaniach tych analizowano wpływ uszkodzenia w postaci łukowego wyęcia stojaka na nośność elementu. Podczas badań stwierdzono, że defekt o tej samej wielkości, zlokalizowany w płaszczyźnie ramy, powoduje znacznie mniejsze obniżenie nośności niż taki sam, w którym przemieszczenie wywołane deformacją jest prostopadłe do płaszczyzny ramy.

Wszystkie przeprowadzone w laboratorium badania znalazły swoje odwzorowanie w modelach numerycznych. Przeprowadzone analizy numeryczne na modelach wycinków stojaków ramy złożonych z elementami powłokowych wykazały, że wyniki uzyskiwane z obliczeń, w których uszkodzenia w postaci punktowego wgęcia są modelowane tylko i wyłącznie poprzez uwzględnienie



geometrii uszkodzenia, nie w pełni odwzorowują zachowanie rzeczywistego elementu poddanego obciążeniu. Dlatego w pracy zaproponowane zostały metody wprowadzenia zmian grubości elementów w modelu numerycznym. Przeprowadzone symulacje numeryczne całych ram wykazały, że wygięcia stojaków są istotne dla nośności rusztowań, a przede wszystkim następuje wzrost momentów zginających i w konsekwencji wzrost naprężeń normalnych. Analizy numeryczne pełnych ram, poza odwzorowaniem badań laboratoryjnych, rozszerzono o warianty, w których badano: wpływ wielkości uszkodzenia, sposobu zamocowania stojaków ramy oraz charakterystyk geometrycznych i materiałowych stojaków. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że połączenie pomiędzy ramami z zastosowaniem trzpieni można traktować jako połączenie sztywne.

Wykonane w pracy obliczenia całych konstrukcji rusztowań pokazują, jak duży wpływ na wielkość naprężeń normalnych mogą mieć uszkodzenia w postaci łukowego wygięcia stojaka ramy. W pracy wykazano, że w celu uzyskania wiarygodnej oceny wpływu uszkodzeń na konstrukcję rusztowania, obliczenia należy przeprowadzić z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i materiałowej. W obliczeniach całej konstrukcji analizowano wpływ lokalizacji i liczebności uszkodzeń wprowadzonych do konstrukcji, normowych i rzeczywistych imperfekcji geometrycznych, normowych wariantów obciążenia oraz wysokości rusztowania na wielkość naprężeń normalnych.

Celem przeprowadzonych badań oraz analiz numerycznych jest zwiększenie poziomu wiedzy na temat wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych na nośność głównych elementów konstrukcyjnych w rusztowaniach budowlanych. Uzyskane informacje wpłyną pozytywnie na poziom bezpieczeństwa zarówno na etapie montażu, eksploatacji, jak i projektowania konstrukcji.

## **ABSTRACT**

### **Analysis of the influence of operating damages of scaffolding structure elements on the load Carrying capacity**

The current state of knowledge related to steel structures' operating damage was analyzed in the work. Special attention was devoted to scaffoldings used in civil engineering. A description of the laboratory tests and computer simulations carried out by other researchers was presented. In the subject bibliography, neither research nor simulation of the behavior of structural elements of scaffolding with operating damage, was found.

Several different types of damage to frame scaffoldings were presented in the study. Described in the work are those that occurred very often on many objects, so you can say that they are characteristic of the element. A classification was made, and attention was paid to damage that could have a significant impact on the load carrying capacity of the scaffoldings and the safety of their use. A quantitative analysis of damage was performed on each object, which shows that almost 70% of the scaffolding structures is assembled with use of elements which pose a risk to its load carrying capacity or safety of use. Frame standards are the main supporting elements in the scaffolding structures. In the standards during operation, the highest effort of the element is caused by the vertical and horizontal loads. As a result, an analysis of the influence of the standard damage on the load capacity of scaffolding is carried out.

Laboratory studies are divided into two groups. The first test group is the load of the 40 cm standard section with axial compressive or tensile force. These studies determined the influence of a damage in the form of point inset in tube on the load carrying capacity of the element. The tension test made it possible to conclude that the damage in the accepted range of dimensions had neglectable influence the load carrying capacity of the element. However, a reduction of the load carrying capacity was observed during the compression test. A second group of laboratory tests was performed on the whole scaffolding frame. In these studies, the impact of damage in the form of an arc deflection of standard on the loading carrying capacity of the element was analyzed. During the tests it was found that a defect of the same magnitude located in the frame plane resulted in a significantly lower load carrying capacity reduction than similar defect in which the displacement caused by deformation is perpendicular to the plane of the frame.

All tests carried out in the test lab found their representation in numerical models. The numerical analyses carried out on the sections of the frame standards modeled by the shell elements showed that the results obtained from calculations, in which the damage in the form point insets is modelled only by consideration of the local damage geometry, does not fully reflect the behavior

of the real loaded element. Therefore, the methods for modification of thickness of elements in the numerical models were proposed in this work. Conducted numerical simulations of the entire frame showed that the deflections of the standards are important for the load carrying capacity of the scaffolding, and above all, they produce an increase in bending moments and consequently an increase in normal stresses. Numerical analyzes of full frames, in addition to the reflection of laboratory tests, were extended with variants in which the influence of the damage size, the way of frame standards mounting, and geometrical and material characteristics of the stands was investigated. The calculations showed that the connection between the frames with the use of mandrels can be treated as a rigid connection.

The calculations of the full scaffolding structures carried out in the work showed how much is the influence of the arch deflection of standards on the amount of normal stresses. The study showed that in order to obtain a reliable assessment of the impact of damage on the scaffolding structure, the calculation should be made considering geometric and material non-linearity. In calculations of the whole structure, the influence of location and number of damages introduced into the structure, standard and real geometrical imperfections, standard load variants and the scaffolding height, on the normal stress values were analyzed.

The purpose of the conducted research and numerical analyzes is to increase the level of knowledge on the influence of operational damage on the load carrying capacity of the main structural elements in scaffolding. The information obtained will have a positive impact on the level of security, both at the stage of assembly, operation and design of the scaffolding structures.

## ZESTAWIENIE NAJWAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW

$A$	– pole przekroju badanego elementu
$A_r$	– pole powierzchni elementu referencyjnego
$A_o$	– pole powierzchni elementu odkształconego
$A_i$	– pole powierzchni odniesienia do wyznaczenia obciążenia wiatrem
$c_s$	– współczynnik miejsca
$c_{fi}$	– współczynnik siły aerodynamicznej
$E$	– moduł sprężystości
$f_u$	– wytrzymałość stali na rozciąganie
$f_y$	– granica plastyczności stali
$g_r$	– grubość ścianki elementu modelu referencyjnego
$g_o$	– grubość ścianki elementu modelu odniesienia
$I$	– moment bezwładności przekroju
$M_{2,3}$	– moment zginający o wektorze zgodnym z osią lokalnego układu
$N$	– siła normalna
$P$	– obciążenie przykładane do próbek podczas badań laboratoryjnych
$P_a$	– wartość obciążenia uzyskanego na drodze analiz numerycznych
$P_l$	– wartość obciążenia uzyskanego w trakcie badań laboratoryjnych
$P_k$	– siła krytyczna
$P_{max}$	– maksymalna wartość obciążenia zarejestrowana w eksperymencie
$q_i$	– ciśnienie dynamiczne
$R_v$	– podatność stojaka na obciążenie pionowe
$u_{x,y,z}$	– przemieszczenie wzdłuż poszczególnych osi układu globalnego
$W_{2,3}$	– wskaźnik wytrzymałości względem osi lokalnego układu współrzędnych
$\beta$	– kąt nachylenia uszkodzenia względem płaszczyzny poziomej
$\varepsilon$	– odkształcenie
$\varepsilon_{sr}$	– średnie odkształcenie na zdefiniowanym odcinku

- $\varepsilon_{z-z}$  – odkształcenie wzdłuż kierunku osi z układu globalnego
- $\gamma_m$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa związany z materiałem
- $\gamma_f$  – częściowy współczynnik bezpieczeństwa wynikający z losowego charakteru oddziaływań
- $\varphi_{x,y,x}$  – kąt obrotu względem poszczególnych osi układu globalnego
- $\mu l$  – długość wyboczeniowa
- $\mu$  – współczynnik długości zależny od schematu zamocowania
- $\sigma$  – naprężenia normalne

# 1 WPROWADZENIE

Rusztowania budowlane obecne są niemal na każdym etapie procesu inwestycyjnego. Obecnie absolutną większość asortymentu wykorzystywanego na budowach stanowią rusztowania systemowe, czyli konstrukcje stworzone z prefabrykowanych elementów, w których jednoznacznie narzucone są wymiary głównej siatki konstrukcyjnej. W normie 8 możemy odnaleźć podstawowy podział ze względu na konstrukcję rusztowań. Szczegółowe podziały pod względem sposobu użytkowania, budowy konstrukcji, sposobu przenoszenia obciążeń czy też materiałów, z których wykonane są rusztowania budowlane, zostały omówione w pracy [2].

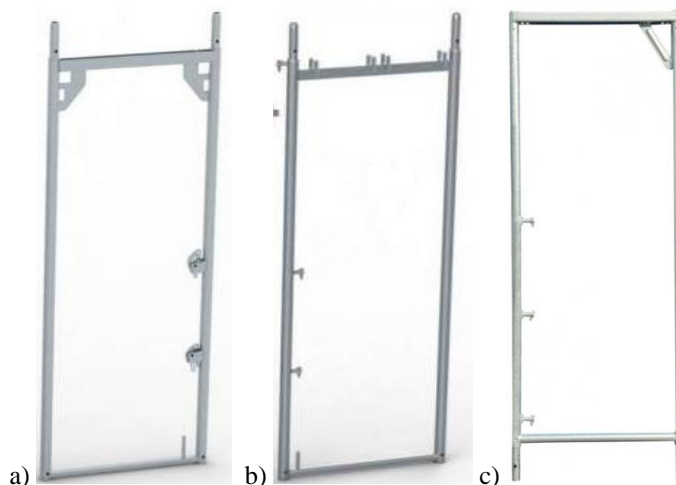
## 1.1 Typy rusztowań budowlanych

Spośród wszystkich typów rusztowań można wyłonić te, które odgrywają wiodącą rolę. W Polsce należą do nich na pewno rusztowania ramowe, które swoją popularność i powszechne stosowanie zawdzięczają prostocie i szybkości montażu oraz czynnikom ekonomicznym. Na rysunku 1.1 pokazano przykładową konstrukcję, wykonaną z elementów systemu ramowego rusztowań, w klasycznej roli, czyli wykorzystywane jako rusztowanie robocze podczas robót wykończeniowych elewacji zewnętrznej budynku mieszkalnego.



Rys. 1.1. Rusztowanie ramowe

Głównym elementem w tych systemach jest sztywna rama złożona z dwóch stojaków, czyli elementów pionowych oraz łączących je belek poziomych. Stojaki wykonane są z rury o średnicy 48,3 mm i długości 2,0 m, co jest standardem światowym. Rury te wykorzystywane są również w wielu innych elementach tworzących system, takich jak stężenia czy dźwigary kratowe. W zależności od materiału, systemu, czy też modelu rusztowania danego producenta, rury te mogą mieć jedynie różną grubość ścianki. Jeżeli chodzi o pozostałe elementy tworzące ramę, tu już można zauważyć zdecydowane różnice, zarówno w użytych kształtownikach, jak i w sposobie kształtowania węzła pomiędzy tymi elementami. Na rysunku 1.2 pokazano przykładowe schematy ram nośnych, jakie występują na polskim rynku.



Rys. 1.2. Ramy systemu ramowego rusztowań: a) Altrad-Mostostal, b) Plettac, c) Hünnebeck

Drugim wiodącym typem rusztowań są rusztowania modułowe. Konstrukcje tworzone z elementów systemów modułowych pod względami ekonomicznymi oraz szybkości montażu i demontażu są zdecydowanie mniej konkurencyjne względem rusztowań ramowych, jednak ich przewagą jest wszechstronność i uniwersalność zastosowań na placach budowy. Największym atutem jest to, że swoją budową przystosowane są do tworzenia konstrukcji przestrzennych o niemal dowolnych kształtach, oraz to że podesty robocze mogą być tworzone na dowolnej wysokości, a nie w odstępach dokładnie dwumetrowych, jak w przypadku rusztowań ramowych. Podstawowym elementem nośnym tych rusztowań są pionowe stojaki. Jest to pojedyncza rura o średnicy zewnętrznej 48,3 mm i długości od 0,5 m do 4,0 m długości z przyspawanymi rozetami, za pośrednictwem których dołączane są elementy poziome. W systemie modułowym zarówno pozostałe elementy konstrukcyjne takie jak, poziome rygle i stężenia, jak i wiele elementów uzupełniających system, także jest wykonana

z rur o tej samej średnicy zewnętrznej. Na rysunku 1.3 pokazano przykładowe konstrukcje, wykonane z elementów systemu modułowego.



Rys. 1.3. Przykłady rusztowań modułowych

Trzecim typem rusztowań wartym wyróżnienia są rusztowania rurowo-złączkowe. Są to rusztowania niesystemowe, niezwykle popularne między innymi w Wielkiej Brytanii czy w Chinach, a na mniejszą skalę użytkowane również w Polsce. Podobnie do systemu modułowego, rusztowania rurowo-złączkowe charakteryzują się dużą uniwersalnością zastosowań, lecz ich montaż jest zdecydowanie trudniejszy i bardziej pracochłonny. Duża pracochłonność spowodowana jest występowaniem wielu złączy śrubowych między poszczególnymi elementami. Największą zaletą tych rusztowań jest to, że składają się one z niewielkiej liczby elementów podstawowych. Podobnie, jak we wcześniej opisanych rodzajach rusztowań, podstawowym kształtownikiem tworzącym elementy konstrukcyjne jest rura o średnicy zewnętrznej 48,3 mm. Gładkie rury o różnej długości nie są wyposażone tutaj na stałe w żadne dodatkowe elementy. Poprzez zastosowanie złączy wzdłużnych i poprzecznych tworzone są pola robocze, które nie mają narzuconych precyzyjnie wymiarów tak, jak w rusztowaniach systemowych. Dużym minusem tego typu rusztowań jest konieczność wykonywania projektów indywidualnych w odniesieniu do każdego montowanego rusztowania.

W niniejszej pracy wszystkie analizy zostaną przeprowadzone na elementach wybranego systemu ramowego. Rusztowania wykonane z elementów systemu ramowego najczęściej wykorzystywane są jako rusztowania robocze, których podstawową funkcją jest zapewnienie bezpiecznego miejsca pracy oraz bezpiecznego dojścia, odpowiednio do wykonywanej pracy [3]. Zgodnie z definicją



zamieszczoną w normie 8, rusztowania te są konstrukcjami podtrzymującymi pomosty robocze zdolne do bezpiecznego przenoszenia ciężaru znajdujących się na nich ludzi oraz niezbędnych materiałów, narzędzi i sprzętu.

## 1.2 Obciążenia rusztowań budowlanych

Funkcja rusztowania decyduje o obciążeniach konstrukcji, i tak w przypadku ramowych rusztowań roboczych podstawowym obciążeniem jest ciężar własny, szczególnie w przypadku wysokich konstrukcji. Należy zwrócić uwagę, że rusztowania ramowe są przystosowane do osiągnięcia bardzo dużych wymiarów. Standardowe układy konstrukcyjne opisane w instrukcjach montażu poszczególnych producentów dopuszczają stawianie konstrukcji, w zależności od systemu i producenta, o wysokości od 24,0 m do nawet 60,0 m bez konieczności wykonywania dodatkowych obliczeń statycznych. Drugim bardzo istotnym obciążeniem rusztowań jest obciążenie eksploatacyjne, czyli ciężar ludzi przebywających na rusztowaniu oraz materiałów i urządzeń potrzebnych do wykonania realizowanych prac. Oddziaływanie na rusztowanie wspomnianych obciążeń sumuje się na poszczególnych poziomach i jest przekazywane pionowo w dół poprzez stojaki, wywołując największe ściskanie u podstawy konstrukcji przy stosunkowo niewielkich wartościach zginania elementów. Momenty zginające nie są przekazywane z pomostów na inne elementy konstrukcyjne z uwagi na charakter zastosowanego połączenia. Zarówno pomosty, poręcze, jak i stężenia są zamocowane przegubowo do elementów ram.

Trzecim podstawowym obciążeniem rusztowań jest oddziaływanie wiatru. Właściwe przyjęcie obciążenia wiatrem jest niezwykle ważne na etapie projektowania. Wiatr zgodnie z normami [3] i [4] należy uwzględniać oddzielnie w dwóch kierunkach poziomych: prostopadle do płaszczyzny zewnętrznej rusztowań i wzdłuż płaszczyzny rusztowania. W literaturze nie ma zbyt wielu danych o działaniu wiatru na rusztowania. Głównie podawane są informacje na temat testów w tunelach aerodynamicznych. W pracach [5] oraz [6] przedstawione zostały badania w tunelu aerodynamicznym w odniesieniu do modeli rusztowań przymocowanych do budynku średniej wielkości. Poddane badaniu rusztowania były pokryte nieprzepuszczalnymi dla wiatru panelami. Badanie obejmowało budynek z różnymi otworami, od całkowitego wypełnienia do 80% wypełnienia elewacji otworami (modelując w ten sposób budynek szkieletowy podczas wznoszenia) oraz różne układy rusztowań. W artykule [7] opisano badania w tunelu aerodynamicznym przeprowadzone na sześciennych modelach budynków i modelach rusztowań otaczających sześcian. Pokazano, że wyniki uzyskane z badań w tunelu na przyjętym modelu są bardziej zbliżone do stanu faktycznego, niż wyniki symulacji opartych o komputerową mechanikę płynów (Computational Fluid Dynamics). Na tej podstawie w pracy zaproponowano wartości współczynników aerodynamicznych. Badania interferencji aerodynamicznej, spowodowanej sąsiednim budynkiem, rusztowań umieszczonych przy

jednej, dwóch lub trzech ścianach, w zależności od odległości sąsiedniego budynku i kąta natarcia wiatru, zostały przedstawione w pracach [6] i [8]. W pracach [9] i [10] autorzy na podstawie testów modelowych w tunelu aerodynamicznym i symulacji CFD sformułowali zalecenia dotyczące przepisów normowych. Sprawdzili także różne modele CFD zastosowane do symulacji przepływu wokół układu budynku z rusztowaniem. Testy przeprowadzone w tunelu aerodynamicznym przedstawiono również w pracy [11]. Badania te dotyczyły rusztowań stosowanych w Azji i zlokalizowanych przy budynkach wysokich, dla których efekt oddziaływania wiatru może być szczególnie znaczący, zwłaszcza jeśli rusztowanie jest umieszczone na wysokości 150 m nad terenem. Autorzy pracy [11] skoncentrowali się na współczynnikach aerodynamicznych służących do obliczania sił pochodzących od wiatru. Współczynniki te wyznaczano w oparciu o testy modelowe oraz na podstawie pomierzonych drgań rusztowań, które wywoływane są przez wiatr i zostały opisane przy pomocy teorii drgań losowych. Badania w tunelu aerodynamicznym w odniesieniu do wartości ciśnienia wiatru oddziaływującego na rusztowania pokazano także w pracy [12]. Podczas testów rozważano przypadki, w których rusztowanie zostało umieszczone na całej powierzchni jednej lub dwóch ścian budynku oraz na częściach dwóch ścian. Autorzy określili kąt natarcia wiatru, przy którym uzyskano maksymalne ciśnienie wiatru na rusztowania. Podstawowym celem wszystkich powyższych prac było dokładne określenie rozkładu ciśnienia, które powinno być przykładane podczas projektowania konstrukcji w celu zamodelowania obciążenia wiatrem.

Poziome obciążenie wiatrem w przypadku ramowych rusztowań roboczych nie powoduje dużego wzrostu sił wewnętrznych w głównych elementach konstrukcyjnych. Występują jednak schematy kotwienia, w których kotwy w jednym pionie rozmieszczone są nawet co 8 m. W takim przypadku oddziaływanie wiatru powoduje wychylenie konstrukcji od pionu pomiędzy punktami kotwienia, czego skutkiem jest wzrost sił wewnętrznych także w elementach pionowych. W przypadku konstrukcji rusztowań osłoniętych siatką ochronną lub plandeką, gdzie oddziaływanie wiatru ma zdecydowanie największy wpływ, siły pochodzące od obciążenia wiatrem za pośrednictwem poziomych elementów ram przekazywane są na kotwy i bezpośrednio na budynek, przy którym zmontowane jest rusztowanie. Obciążenie to oczywiście może spowodować nawet zniszczenie konstrukcji w sytuacji błędnego zaprojektowania lub wykonania mocowania. Awaria taka najczęściej rozpoczyna się od oderwania rusztowania na krawędzi elewacji budynku. Następnie wyrwane są kolejne kotwy co skutkuje przewróceniem całego rusztowania.

Ze względu na temat pracy, należy zwrócić uwagę także na obciążenia wyjątkowe pojawiające się podczas eksploatacji rusztowań. Rusztowania na placu budowy często zlokalizowane są przy tymczasowych ciągach komunikacyjnych, co wiąże się z ryzykiem uderzenia przez pojazdy mechaniczne. Innym zagrożeniem tego typu jest ciężki sprzęt budowlany, realizujący zadania w pobliżu

rusztowania lub upadek z wysokości przedmiotów o znacznej masie. Są to oczywiście zdarzenia o charakterze incydentalnym i ciężko jest przewidzieć wielkość takiego obciążenia. Niestety w przypadku wystąpienia takiego zdarzenia, nawet jeżeli nie dochodzi do awarii całej konstrukcji, to najczęściej pojedyncze elementy obciążone zostają trwałymi uszkodzeniami.

Podczas badań prowadzonych na placach budów stwierdzono, że użytkowane rusztowania posiadają różnego rodzaju uszkodzenia. Nie istnieją jednak żadne szczegółowe wytyczne, według których można by było przeprowadzić ocenę stanu technicznego i eliminować z dalszego użytkowania elementy, które faktycznie wpływają na bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji. Obecnie właściciele rusztowań dokonują takiej selekcji według własnych subiektywnych kryteriów, co powoduje, że z jednej strony do użytkowania mogą być dopuszczane elementy stwarzające niebezpieczeństwo, a z drugiej, że eliminowane są elementy, które mimo wystąpienia defektów niewielkiej wielkości, mogłyby być uznane za pełnowartościowe.

### **1.3 Problem naukowy**

Jednoznacznie stwierdzono, że elementy wykorzystywane do tworzenia konstrukcji rusztowań posiadają uszkodzenia. Rusztowania z uwagi na stawiane im podstawowe wymagania chronią bezpieczeństwo ludzi, czyli coś niezwykle cennego, na co należy zwracać szczególną uwagę podczas realizacji każdego przedsięwzięcia. Dlatego należy sprawdzić, czy jest możliwe warunkowe dopuszczenie do dalszego użytkowania elementów posiadających uszkodzenia oraz w jakich sytuacjach jest to możliwe. Odpowiedzią na pytanie będzie rozwiązanie problemu badawczego, którym jest określenie wpływu uszkodzeń na nośność głównych elementów konstrukcyjnych roboczych rusztowań ramowych. Następnie, na tej podstawie, opracowane zostaną wytyczne dotyczące uwzględniania uszkodzeń elementów konstrukcyjnych rusztowań podczas projektowania wspomagane przez zaawansowane analizy numeryczne, a także odnoszące się do możliwości dalszego użytkowania rusztowania, w którym uszkodzenia wystąpiły w trakcie użytkowania.

## **2 WPLYW USZKODZEŃ I IMPERFEKCJI W KONSTRUKCJACH STALOWYCH NA ICH NOŚNOŚĆ**

Analiza wpływu uszkodzeń elementów rusztowań na ich nośność została poprzedzona studiami literatury, dotyczącymi opisów i analiz występowania uszkodzeń w konstrukcjach stalowych ze szczególnym uwzględnieniem uszkodzeń elementów rurowych. Przeprowadzono także przegląd badań i analiz prowadzonych przez inne ośrodki naukowe, których przedmiotem były rusztowania budowlane. Następnie wyszukano opisy z zakresu uwzględniania uszkodzeń w modelach numerycznych stalowych elementów konstrukcyjnych oraz metod weryfikacji wyników uzyskanych z analiz numerycznych. Badania własne oraz przegląd dostępnej literatury z omówionego zakresu pozwoliły na określenie, jakie z uszkodzeń występujących w konstrukcjach mają zastosowanie także w przypadku rusztowań budowlanych. Na podstawie odszukanych opisów badań zaplanowano przebieg własnych testów laboratoryjnych oraz ustalono najbardziej istotne wielkości, które powinny być rejestrowane podczas przeprowadzonych eksperymentów.

### **2.1 Uszkodzenia konstrukcji stalowych**

Konstrukcje stalowe posiadają wiele zalet, które często przesądzają o ich stosowaniu w realizowanych obiektach. Jednocześnie wymagają one dużej dokładności zarówno w zakresie projektowania, jak i podczas realizacji na placu budowy. Niedostatek precyzji jest często przyczyną błędów projektowych i wykonawczych. W pracy [39] opisano przykładowe, najczęściej popełniane błędy wykonawcze. Przytoczone przykłady dotyczyły błędów w zabezpieczeniach antykorozyjnych, które w dłuższej perspektywie powodują obniżenie nośności konstrukcji. Opisano także błędy przy kształtowaniu połączeń, które w niektórych przypadkach zmieniały schemat statyczny konstrukcji, co jest niezwykle niebezpieczne i nigdy nie powinno mieć miejsca. W artykule zwrócono uwagę na jakość wykonania połączeń spawanych realizowanych na placu budowy. Spawanie jest jedną z najczęstszych metod łączenia elementów stalowych w praktyce przemysłowej. Głównymi zaletami tej technologii są duża szybkość produkcji w połączeniu z niskimi kosztami oraz zazwyczaj wysoka elastyczność i niezawodność. Spawanie jest jednak wysoce złożonym procesem metalurgicznym, i w związku z tym połączenia te są podatne na występowanie wad i nieciągłości materiałowych, co może prowadzić do uszkodzenia konstrukcji i zmniejszenia jej trwałości. W konsekwencji połączenia spawane są ważnym polem zastosowań zagadnień mechaniki pękania, chociaż ich zastosowanie jest bardziej złożone niż w przypadku konstrukcji jednorodnych. W artykule [13]

przedstawiony został aktualny stan wiedzy z zakresu zastosowań zagadnień mechaniki pęknięcia w połączeniach spawanych. Jest to bardzo rozległe opracowanie omawiające konkretne działy mechaniki pęknięcia, które należy wziąć pod uwagę przy analizie połączeń spawanych. Określono także eksperymentalnie wytrzymałości na pęknięcie spoin oraz propagację pęknięć zmęczeniowych. Przedstawiono również analityczne rozwiązania, dotyczące określenia siły powodującej propagację pęknięć. W przypadku rusztowań budowlanych wiele z tych błędów nie występuje z uwagi na fakt, że prefabrykowane elementy rusztowań wykonywane są na zaawansowanych technicznie stanowiskach w fabrykach, co pozwala na uzyskanie niezwykle wysokiej jakości. Natomiast na budowie elementy łączone są ze sobą za pomocą połączeń klinowych, wsuwanych, zaciskowych lub skręcanych, gdzie jedynym parametrem odbiegającym od wartości zalecanych może być siła, z jaką realizowane jest dane połączenie.

Innym problemem podczas realizacji projektów konstrukcji stalowych są imperfekcje geometryczne. Praca [40], gdzie opisano problemy związane z budową zbiorników o dużych pojemnościach, stawia na pierwszym planie problemy wykonawcze związane z zapewnieniem odpowiedniego kształtu powłoki obiektu oraz określenie dopuszczalnych imperfekcji geometrycznych konstrukcji powłokowej, jakie można uznać za bezpieczne dla przyszłej, wieloletniej, eksploatacji obiektów. Podobny problem występuje podczas wznoszenia konstrukcji rusztowań. Ze względu na smukłość pojedynczych elementów, jak i całej konstrukcji, w analizach bardzo często wprowadzane są globalne imperfekcje geometryczne. Przez imperfekcje geometryczne rozumie się tutaj odchylenia węzłów rzeczywistej konstrukcji od projektowanego modelu „idealnego”, w którym wszystkie elementy są poziome lub pionowe. Wychylenie od pionu takiej konstrukcji ma duży wpływ na rozkład sił wewnętrznych, w ekstremalnych sytuacjach może wręcz zmieniać jej schemat statyczny. Dlatego w kolejnych rozdziałach pracy poświęcono sporo uwagi temu aspektowi.

Uszkodzenia w konstrukcjach stalowych powstają również pod wpływem oddziaływań termicznych w warunkach pożaru budynku. W pracy [41] autorzy opisują analizę trzech przypadków stalowych hal uszkodzonych w pożarze, różniących się konstrukcją i skalą uszkodzeń pożarowych. We wszystkich badanych przypadkach skutki pożaru uzewnętrznili się w postaci mniej lub bardziej nasilonych imperfekcji geometrycznych lokalnych i globalnych. Projekty wykonawcze remontów powypadkowych omawianych budynków opracowano na podstawie modelowania komputerowego układów prętowych płaskich lub przestrzennych, z uwzględnieniem pomierzonych imperfekcji geometrycznych. W pracy doktorskiej [42] przedmiotem rozważań było wykorzystanie metod numerycznych (Metody Elementów Skończonych, Metody Różnic Skończonych i Metody Objętości Skończonych) w analizie konstrukcji stalowej narażonej na obciążenie termiczne w czasie pożaru. Autor pracy [42] zwraca uwagę, że doskonałą weryfikacją wyników obliczeń wytrzymałości-

wych konstrukcji w warunkach pożaru jest ich porównanie z wynikami wizji lokalnej pomieszczeń dotkniętych działaniem ognia i obserwacji deformacji zniszczonych w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury elementów konstrukcyjnych.

Konstrukcje stalowe wystawione na działanie warunków atmosferycznych są narażone na występowanie korozji. Nawet stal ocynkowana może doświadczać korozji po zużyciu ochrony galwanicznej. W konsekwencji korozji zmniejsza się przekrój elementów konstrukcyjnych, a ich nośność jest odpowiednio mniejsza. W praktyce, gdy element jest skorodowany, podczas kontroli szacuje się pozostałą część przekroju poprzecznego skorodowanych elementów w celu podjęcia decyzji o dalszych działaniach zapewniających bezpieczne użytkowanie konstrukcji. Istnieje wiele typów korozji. Najbardziej podstawowe to: korozja jednolita, wżerowa i korozja szczelinowa. W artykule [14] przedstawiono porównanie wyników z eksperymentu, badającego zachowania kątowników równoramiennych pod wpływem osiowego obciążenia ściskającego odpowiednio dla próbek skorodowanych i próbek nieposiadających uszkodzeń. Wskazano też praktyczne zalecenia, odnośnie oceny nośności skorodowanych elementów ściskanych. Badania, dotyczące wyboczenia skorodowanych kątowników poddanych sile ściskającej, przedstawiono także w pracy [15]. Badania eksperymentalne uzupełnione są tu o analizy numeryczne, w których korozję modeluje się poprzez redukcję grubości elementu. Na podstawie uzyskanych wyników została także opracowana uproszczona metoda projektowania. Wyniki analiz numerycznych uwzględniających uszkodzenia korozyjne przedstawione zostały również w pracy [16], przy czym modelowana tu była rura gazociągu, która obciążona jest ciśnieniem wewnętrznym. Badano dodatkowo, jaki wpływ na nośność elementów ma proporcja wymiarów uszkodzenia (głębokość do powierzchni) oraz wzajemne położenie dwóch uszkodzeń.

Zmęczenie materiału można definiować jako uszkodzenie powodowane przez powtarzające się lub zmienne obciążenie, które jednak co do wartości nigdy nie przekracza wartości dopuszczalnej dla danego materiału. Zarówno konstrukcje, jak i w szczególności urządzenia i elementy maszyn, często pracują w warunkach obciążeń zmiennych w czasie (cyklicznych, okresowo zmiennych, losowych). Wywołuje to odpowiadające danym obciążeniom zmiany naprężenia i odkształceń nazywanych naprężeniami lub odkształceniami zmęczeniowymi. W konsekwencji, po przekroczeniu pewnego stanu naprężenia i pewnej granicznej liczby cykli (odpowiadającej progowi naprężenia zmęczeniowego), prowadzi to do wystąpienia złożonego splotu zjawisk i zmian nazywanych zmęczeniem materiału (zmianami zmęczeniowymi). Powstające wskutek zmiennych obciążeń mikroszczeliny sukcesywnie rozwijają się i kumulują prowadząc do pęknięcia zmęczeniowego i zniszczenia elementu lub urządzenia. W procesie zmęczenia można wyróżnić dwie charakterystyczne fazy:

- inicjacja pęknięć, w której pojawiają się lokalne efekty (szczeliny, pęknięcia) dotyczące ziaren materiału (skala mezoskopowa),
- rozwój pęknięć i zniszczenie, w której powstałe zmiany są obserwowalne w skali makroskopowej.

Z punktu widzenia liczby cykli, które badana struktura jest w stanie przenieść według pracy [43], proces zmęczenia materiału można podzielić na trzy zakresy:

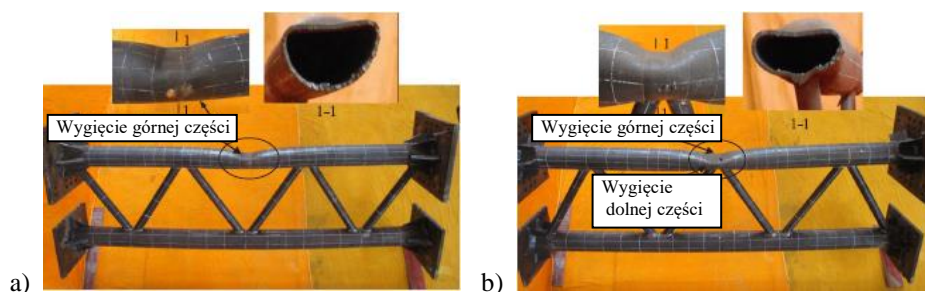
- quasi-statyczne – od  $\frac{1}{4}$  do  $10^3 \div 10^4$  cykli,
- niskocyklowe – od  $10^4$  do  $10^5$  cykli,
- wysokocyklowe – powyżej  $10^5$  cykli.

W przypadku konstrukcji rusztowań obciążenia mają charakter statyczny lub co najwyżej quasi-statyczny, a dodatkowo elementy rusztowań podczas eksploatacji w większości osiągają bardzo niski stopień wykorzystania przekroju. Tymczasowy charakter konstrukcji powoduje, że elementy o wysokim poziomie wyężenia w kolejnej konfiguracji, po kolejnym montażu, mogą być zupełnie inaczej obciążone. Dodatkowo fakt, iż nie odnaleziono żadnych publikacji z zakresu obciążeń zmęczeniowych rusztowań ramowych, może świadczyć, że uszkodzenia tego typu mają znikomy wpływ na elementy ramowych rusztowań budowlanych.

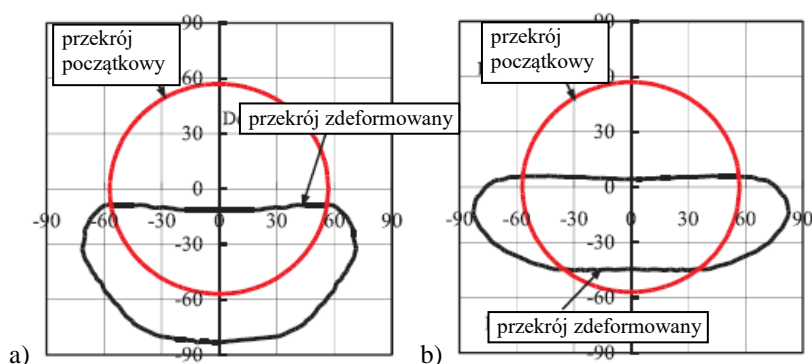
## 2.2 Przegląd badań uszkodzeń rur stalowych

Tak jak pisano na wstępie, głównym elementem konstrukcyjnym większości elementów rusztowań, niezależnie od systemu, są rury. W związku z tym uszkodzeniom tego typu profili został poświęcony niniejszy podpunkt.

W pracy [38] przedstawiono eksperymentalne badania zachowania dwóch kratowych, rurowych dźwigarów stalowych, poddanych obciążeniom udarowym, o tej samej energii uderowej. Obie próbki uderzone zostały w środku swojej rozpiętości w rurowe pasy, jednak zostały obrócone tak, że w pierwszej ramie uderzenie zlokalizowane było w środku przęsła pomiędzy węzłami dźwigara, a w drugiej bezpośrednio w węzeł kratownicy. Próbki z zaznaczonym miejscem uderzenia, po przeprowadzeniu doświadczenia, pokazano na rysunku 2.1. W pracy [38] omówiona jest odpowiedź konstrukcji na uderzenie, czyli forma odkształcenia rur obu dźwigarów, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu miejsc uderzenia. Obie próbki doznają znacznych deformacji miejscowych w strefie uderzenia, jednak w próbce pierwszej zaobserwowano znacznie większe deformacje niż w dźwigarze, gdzie uderzenie zrealizowano w okolicy połączenia z krzyżulcami. Schematy kształtów przekrojów poprzecznych przed i po uderzeniu pokazano na rysunku 2.2. Istotnym wnioskiem z tych badań jest to, że jednakowe oddziaływanie zewnętrzne w zależności od punktu jego przyłożenia może powodować różne formy uszkodzenia, a te same formy jak na przykład deformacja przekroju poprzecznego mogą znacząco różnić się kształtem.



Rys. 2.1. Elementy podane badaniu [38]: a) uderzenie w przęśle dźwigara, b) uderzenie w węzeł dźwigara

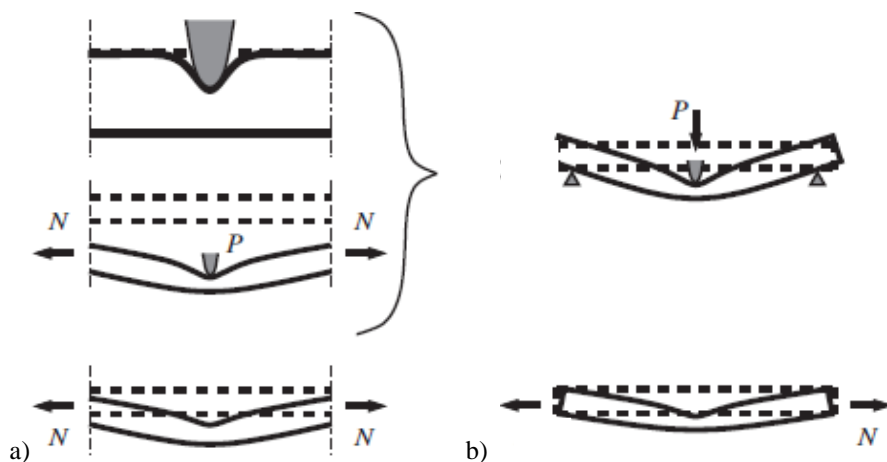


Rys. 2.2. Kształt przekroju poprzecznego pasów dźwigara przed i po badaniu w miejscu uderzenia [38]: a) uderzenie w przęśle dźwigara, b) uderzenie w węzeł dźwigara

W pracy [44] opisano przeprowadzone testy udarności i rozciągania rur wykonanych ze stali rurociąkowej X65. Na rysunku 2.3 po lewej stronie przedstawiono schematycznie zachowanie rzeczywistego elementu poddanego obciążeniu bocznemu, natomiast po prawej stronie przedstawiono przyjęty schemat modelu w przeprowadzonym eksperymencie. Linie przerywane pokazują początkową pozycję badanej rury, natomiast linie ciągłe pokazują przemieszczenia. Na rysunku 2.4 pokazano stanowisko badawcze, gdzie po lewej stronie próbka przygotowana jest do obciążenia, modelującego uderzenie siłą boczną, po prawej natomiast do próby rozciągania.

Prostowanie rur po uderzeniu zawsze powodowało pęknięcia. Badanie powierzchni pęknięcia po uderzeniu, która pokazana jest na rysunku 2.5, ujawniło pęknięcia kruche, które umiejscowione było po stronie uderzenia. Natomiast powierzchnie pęknięć, które pojawiły się podczas rozciągania, uległy dużym odkształceniom plastycznym. Należy dodać jednak, że w opisanym badaniu autorzy rozważali bardzo duże deformacje elementu spowodowane uderzeniem bocznym.





Rys. 2.3. Badania uderności i rozciągania rurociągów [44]: a) schemat rzeczywistego przypadku, b) model eksperymentu

Jak widać na rysunku 2.4 b testowi rozciągania poddawany jest element, w którym z powodu uderzenia doszło do niemal całkowitego spłaszczenia przekroju. We własnych badaniach, realizowanych w ramach niniejszej rozprawy, mimo że przewidziano zdecydowanie mniejsze wartości odkształceń wynikających z oddziaływań bocznych, także zdecydowano się przeprowadzić próbę rozciągania na wycinkach rur.

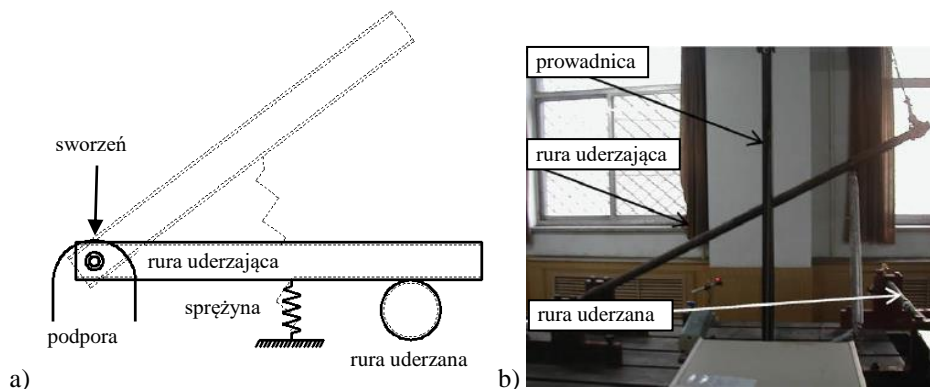


Rys. 2.4. Stanoowisko badawcze [44]: a) próba obciążenia modelującego uderzenie siłą boczną, b) próba rozciągania



Rys. 2.5. Strefa uderzenia [44]

W pracy [45] pokazano eksperymenty i symulacje numeryczne, opisujące zjawiska zachodzące podczas uderzenia rury o rurę. Schemat eksperymentu i zdjęcie, na którym widać próbki podczas testu, pokazane zostały na rysunku 2.6. Jak widać, jedna z rur (wahadłowa) na jednym z końców została zamocowana przegubowo, natomiast drugi, swobodny jej koniec uderza w prostopadle ustawioną, podpartą na obu końcach rurę, w środku jej rozpiętości. W badaniu uwzględniono różne miejsca uderzenia na rurze wahadłowej oraz różne grubości ścianki rur. Eksperyment inicjowano poprzez naciągnięcie sprężyny zaczepionej do rury zamocowanej przegubowo, a następnie następowało zwolnienie naciągu. Wykonano siedem prób, a użyte próbki były wykonane z bezszwowych rur stalowych o dwóch różnych grubościach ścianki 1 mm i 3 mm.



Rys. 2.6. Badania uderzenia rura-rura [45]: a) schemat stanowiska, b) realizacja badań

Symulacje numeryczne przeprowadzono za pomocą programu LS-DYNA. Następnie porównano wyniki eksperymentu i symulacji numerycznych, wykazując dobrą zgodność. Uderzenie rury o rurę jest problemem nieliniowym, który obejmuje złożone zjawiska takie, jak kontakt, spłaszczenie przekroju poprzecz-

nego z powodu miejscowego zgniatania, zakrzywiania osi rury, itp. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie cennych wniosków. Wyniki eksperymentu pokazują, że wiele czynników wpływa na zachowanie się elementów podczas uderzenia rurą o rurę. Gdy grubościenna rura zamocowana przegubowo uderza w cienkościenną rurę docelową, to rura uderzająca nie wykazuje deformacji, podczas gdy nieruchoma rura odkształca się znacząco. Jeśli rura uderzająca i rura docelowa mają tę samą grubość ścianki, forma zniszczenia zmienia się wraz z lokalizacją punktu uderzenia i prędkością uderzenia. Ostateczne odkształcenia zaobserwowane w badaniach można podzielić na dwie grupy: miejscowe wgniecenia w strefie uderzenia i obrót segmentów rur wokół strefy uderzenia, w której powstaje załamanie. Korelacja między wynikami uzyskanymi programem FE LS-DYNA a wynikami eksperymentalnymi z przeprowadzonych testów pokazuje, że symulacja numeryczna prawidłowo przedstawiła dynamiczne zjawisko uwzględniające plastyczne właściwości rur, w tym czas odkształcenia, przebieg i głębokość lokalnego wgięcia w punkcie uderzenia. Badanie numeryczne pokazuje, że położenie punktu uderzenia na rurze uderzającej ma bardzo istotny wpływ na uzyskiwane wyniki, podczas gdy inne parametry uderzenia pozostają stałe. Większość energii jest rozpraszana lokalnie w obszarze uderzenia i w sekcjach załamań, gdzie moment zginający osiąga wysokie wartości. Zjawisko to nie powinno zostać pominięte przy opracowywaniu modelu oddziaływania rury na rurę. Należy też podkreślić, że w badaniu eksperymentalnym nie zaobserwowano pęknięcia żadnej z rur.

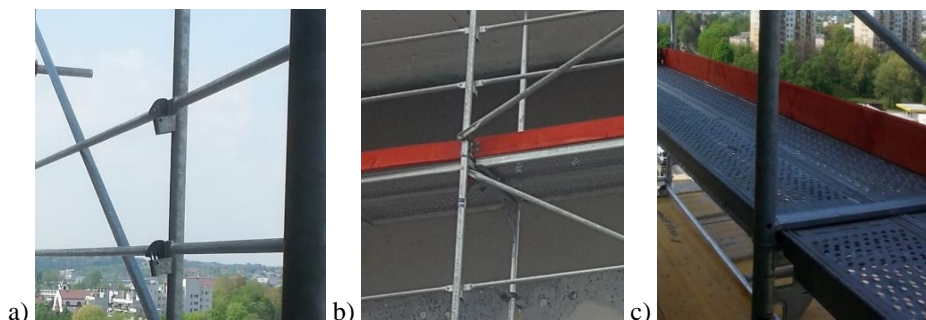
W dostępnej literaturze odnaleziono wiele przykładów badań dotyczących badań rur z uwzględnieniem ubytków korozyjnych (por. np. [46] i [47]), oraz wpływu uderzeń bocznych (por. [48], [49], [50]). Jednak wszystkie one dotyczyły rur o znacznie większej średnicy, najczęściej obciążonych ciśnieniem wewnętrznym, co powoduje, że przedstawione tam wnioski nie mają bezpośredniego przełożenia na problemy rozważane w ramach niniejszej rozprawy.

## **2.3 Wybrane badania rusztowań**

W publikacjach naukowych można odnaleźć stosunkowo dużo pozycji na temat badań rusztowań budowlanych. Bardzo obszerny przegląd i podsumowanie badań z ostatnich czterdziestu lat, dotyczących konstrukcji rusztowań, przedstawił autor pracy [17]. W powstałych wcześniej pracach [18] i [19] można znaleźć podobne, jednak mniej obszerne zestawienia.

Bardzo ważnym tematem, podejmowanym przez naukowców, są badania związane z węzłami rusztowań. Dokładne procedury związane z określaniem nośności węzłów rusztowań zostały zawarte w normach [30] i [31]. Dużym problemem jest określenie sztywności połączeń między elementami, zwłaszcza jeżeli chodzi o systemy rusztowań modułowych. Zagadnienia z tym związane zostały poruszone między innymi w takich pracach, jak [27], [32], [33], [34], [35]. W przypadku elementów konstrukcyjnych rusztowań ramowych sytuacja ta

jest dużo prostsza do zdefiniowania, ponieważ zarówno stężenia, poręcze, a także pomosty są zamocowane obustronnie przegubowo. Na rysunku 2.7 pokazano kolejno od lewej połączenie stężeń, poręczy i pomostów z ramą.



Rys. 2.7. Przegubowe połączenia głównych elementów konstrukcyjnych rusztowania ramowego: a) poręcz, b) stężenie, c) pomosty

Natomiast poszczególne elementy tworzące ramę połączone są ze sobą na sztywno za pomocą spawów. W przypadku wybranego do badań systemu górną poprzeczkę stanowi zimnogięty u-profil o małej grubości ścianki. W artykułach [36] i [37] opisano modelowanie połączeń wykonanych ze smukłych zimnogiętych profili. Wyróżniono dwa typy modeli elementów skończonych: model stworzony z elementów powłokowych i zmodyfikowany model prętowy. Model powłokowy, w którym precyzyjnie uwzględniono geometrię przekrojów poprzecznych profili, symuluje pólshtywne zachowanie połączeń powodowane lokalną niestabilnością przekroju. W modelu prętowym natomiast wprowadzono elementy o sztucznie obniżonej sztywności w celu uwzględnienia niestabilności przekroju. Autorzy dokonali porównania uzyskanych wyników z symulacji numerycznych z wynikami uzyskanymi doświadczalnie i wykazali dobrą ich zgodność.

Ze w względu na temat niniejszej pracy, bardzo ciekawe wydają się badania, pokazane w pracy [20]. Są to badania nieniszczące przeprowadzone na pełnowymiarowej konstrukcji. Jest to przykład wykorzystania systemu ramowego rusztowania jako elementu wsporczego dla drewnianej konstrukcji deskowania. Podczas testu obciążania, mieszanka betonowa była zastąpiona workami z piaskiem. W literaturze znane są przypadki katastrof rusztowań wykorzystywanych w ten sposób, których powodem są uderzenia boczne [21]. Skutkiem takich oddziaływań jest wygięcie stojaka lub stojaków. Dlatego z całą pewnością można stwierdzić, że uszkodzenia tego typu występują w rusztowaniach, i nawet jeżeli takie zdarzenie nie spowoduje bezpośrednio katastrofy, to może stanowić zagrożenie dla prawidłowego funkcjonowania rusztowania. W pracy [20] analizowano, jaki wpływ na siły wewnętrzne w stojakach mają różne warianty obciążenia. Podczas wszystkich przeprowadzonych badań na ramach rusztowa-

niowych zamocowano czujniki tensometryczne mierzące wartości odkształceń pionowych na stojakach, co pozwalało określić wartości sił w poszczególnych punktach konstrukcji od zadanego obciążenia w kolejnych krokach obciążeniowych. Po stworzeniu map rozkładu sił w stojakach stwierdzono, że nawet przy obciążeniu równomiernym wartości sił nie rozkładały się proporcjonalnie na poszczególne stojaki. Ten efekt może dodatkowo potęgować występowanie uszkodzeń w elementach rusztowań. Dodatkowo stwierdzono, że największe siły w stojakach występują podczas betonowania, a nie po całkowitym obciążeniu. Wyniki eksperymentalne, uzyskane z prostokątnego układu rusztowania obciążonego równomiernie, posłużyły do weryfikacji modelu numerycznego opisanego w pracy [22] i użytego do analiz układów rusztowań w kształcie litery L oraz U o różnych liczbach modułów. Stworzone modele wykorzystano do przeprowadzenia szeregu symulacji z obciążeniami równomiernymi, nierównomiernymi oraz z obciążeniem przyrostowym, z których wyciągnięto wnioski odnośnie do nośności rusztowań podporowych w różnych sytuacjach projektowych.

Inny przypadek badań pełnowymiarowych rusztowań jest pokazany w pracach [23] i [24]. W obu pracach przedstawiono badania przeprowadzone na rusztowaniach o konstrukcji rurowo-złączkowej, które są bardzo popularne między innymi w Wielkiej Brytanii. Konstrukcja, zaprezentowana w pierwszej pracy, posiadała standardowe stężenia w płaszczyznach pionowych, w drugiej pracy konstrukcja pozbawiona była stężeń. Obciążenie, w przeciwieństwie do wcześniej przedstawionych badań z pracy [20], przykładano za pomocą siłownika hydraulicznego i układu belek stalowych ułożonych na stalowych głowicach, opartych na pionowych rurach konstrukcji. Z uwagi na wymiary konstrukcji i względy bezpieczeństwa, badania prowadzono tylko do momentu spadku siły, nie doprowadzano całkowitego zniszczenia. Testom poddano szereg układów rusztowań, różniących się między sobą rozstawem konstrukcyjnych elementów pionowych oraz poziomych, wysokością całej konstrukcji, a także wysokością rury u podstawy oraz głowic górnych. We wnioskach określono wpływ poszczególnych parametrów na nośność konstrukcji. Badania na pełnowymiarowej konstrukcji rusztowań podporowych opisano także w pracy [25]. W tym przypadku do budowy konstrukcji wsporczej użyto elementów systemu modułowego. Badana konstrukcja o wymiarach  $3,6\text{ m} \times 3,6\text{ m} \times 9,9\text{ m}$ , posiadała stężenia pionowe w wybranych polach oraz platformę na szczycie, którą zabezpieczono przed możliwością przesuwu w kierunkach poziomych przy pomocy zestawu rolek rozpartych o poziome belki. Obciążenie, podobnie jak w pierwszym przytoczonym przykładzie, czyli w pracy [20], realizowano na pomocą worków z piaskiem i elementów betonowych, układanych symetrycznie na platformie, aż do momentu utraty nośności i całkowitego zniszczenia. W trakcie badań na stojakach zamontowano także czujniki tensometryczne mierzące odkształcenia w kierunku pionowym na stojakach konstrukcji. Na podstawie odczytów z tensometrów i znanej wartości obciążenia, szacowano

wartości sił normalnych w pionowych elementach. Dodatkowo, mierzono poziome przemieszczenia z użyciem technik geodezyjnych.

W artykule [26] zaproponowano metodę monitorowania rusztowania ostrzegającą przed przeciążeniem i zniszczeniem konstrukcji wsporczych. W celu uniknięcia awarii zalecono monitorowanie dwóch parametrów: siły osiowej i przesunięć bocznych, co jest zgodne z wartościami mierzonymi w pozostałych przykładach dotyczących badań rusztowań podporowych w pełnej skali. Proponowane dopuszczalne siły osiowe i przemieszczenia, jak również położenia urządzeń do monitorowania, które mają być zainstalowane na użytkowanej konstrukcji, są oparte na analizie wyników eksperymentów laboratoryjnych przeprowadzonych na rusztowaniach w pełnej skali.

Jednak ze względu na możliwości laboratoriów ośrodków badawczych oraz koszty, częściej wykonywane są badania podstawowych pojedynczych modułów o wysokości nie większej niż dwa lub trzy poziomy rusztowania. W pracy [27] przeprowadzono szereg badań pojedynczych układów systemu modułowego rusztowań. Rozpatrzono warianty modułów ze stężeniami pionowymi oraz bez, a także oparcia rusztowania na podłożu o różnych poziomach pod parami stojaków oraz z różną lokalizacją połączeń pomiędzy stojakami. Podczas badań, w celu oszacowania sił osiowych w stojakach i stężeniach, użyto tensometrów elektrooporowych. Dokonywano też pomiaru przemieszczeń poziomych przy użyciu czujników LVDT. Jeszcze ciekawsze w kontekście niniejszej rozprawy wydają się badania opisane w pracy [28]. Po pierwsze dlatego, że badania przeprowadzone zostały na segmentach wykonanych z elementów rusztowań ramowych. Są to badania o szerokim spektrum problemów. Obejmowały różne konfiguracje zarówno, jeżeli chodzi o wysokość i liczbę poziomów, jak i liczbę modułów. Ponadto są to jedyne badania, w których starano się uwzględnić wpływ uszkodzeń elementów rusztowań na ich nośność. Uwzględnienie uszkodzeń niestety polegało jedynie na pozyskaniu losowo wybranych, wielokrotnie użytkowanych elementów pozyskanych bezpośrednio z budowy. W pracy nie określono, jakie dokładnie miały one uszkodzenia. Dodatkowo, jednym z wariantów badań było ponowne obciążenie układu stworzonego z elementów, które już raz było poddane badaniu. Należy podkreślić, że wszystkie badania przerywano dopiero w momencie wyboczenia i całkowitej utraty nośności, co z pewnością powodowało trwałe odkształcenia w części elementów. Uzyskane wyniki wykazały, że rusztowania złożone z elementów używanych, posiadających uszkodzenia, miały nośność mniejszą niż elementy nowe, ale większą niż elementy nowe pozyskane z przeprowadzonych testów niszczących, i poddane ponownemu obciążeniu. Ten sam autor z częściowo innym zespołem prowadził wcześniej podobne badania, opisane w pracy [29]. Badania te były prowadzone na typowych wieżach podporowych, charakteryzujących się dużo większymi przekrojami elementów, niż przekroje elementów rusztowań systemowych. W badaniach tych również obciążano te same elementy dwukrotnie i skupiono

się przede wszystkim na wariantach dotyczących wysokości podstawek i górnych głowic.

## 2.4 Geometryczne imperfekcje rusztowań budowlanych

Konstrukcje budowlane w zasadzie nie występują w idealnej geometrii. W trakcie procesu ich wznoszenia istnieje wiele czynników wpływających na wprowadzanie niedoskonałości geometrycznych. Rusztowania budowlane są szczególnie narażone na wystąpienie tego zjawiska. Spowodowane jest to tym, że proces wznoszenia rusztowań jest stosunkowo szybki. Dodatkowo kontrola prawidłowego kształtowania konstrukcji ogranicza się do użycia przez montażyistów krótkiej poziomicy. Jak wiadomo, takie narzędzia nie gwarantują wysokiej precyzji, szczególnie w przypadku bardzo wysokich konstrukcji. Bardzo często kontrola wychylenia z pionu rusztowania odbywa się na zasadzie utrzymywania stałej odległości od budowli, przy której jest wznoszone rusztowanie. Niestety, skuteczne jest to tylko w przypadku prostych elewacji. Dlatego istnieją zalecenia opisujące sposób uwzględnienia imperfekcji w ramowych konstrukcjach stalowych, które zamieszczono w normie [55]. Zalecenia te w odniesieniu do rusztowań zostały uściślone w normie [3]. W pracy [34] przedstawiono wyniki badań imperfekcji lokalnych, a także globalnych imperfekcji przechyłowych. Badania te prowadzone były w trakcie eksploatacji rusztowań na terenie Australii. Maksymalne pomierzone wartości imperfekcji w tych badaniach to 2,8 mm/m. Należy jednak zaznaczyć, że badania te odbywały się na rusztowaniach podporowych. W trakcie badań przeprowadzonych przez autora niniejszej pracy w Polsce na rusztowaniach fasadowych uzyskano zdecydowanie wyższe wartości imperfekcji, które na konkretnych przykładach zostaną przedstawione w dalszej części pracy. Badania te zostały przeprowadzone z użyciem technik geodezyjnych i opisane zostały w pracy [57]. W pracach [58] i [59] zamieszczono bardzo obszerne analizy numeryczne, w których uwzględniono wpływ imperfekcji geometrycznych na pracę statyczno-wytrzymałościową typowych rusztowań fasadowych. W opracowaniach tych imperfekcje wprowadzano do konstrukcji według dwóch metod zgodnie z procedurami normowymi. Pierwsza metoda polega na przesunięciu węzłów modelu numerycznego na poziomie pomostów o zadaną wielkość imperfekcji. Przesunięcia te powinny być realizowane zgodnie z kierunkiem dominującego obciążenia poziomego, przy czym przemieszczenia węzłów na kolejnych poziomach powinny mieć przeciwny zwrot. W przedstawionych obliczeniach analizowane były przesunięcia o wartości wychylenia do 4 cm. Oznacza to, że maksymalne analizowane wielkości są czterokrotnie większe do tych zalecanych przez normę [3]. W drugiej metodzie przesunięcia węzłów wprowadzane do modelu numerycznego są zgodnie z kierunkiem przemieszczeń uzyskanych z analizy stateczności układu nieodkształconego. Po przeprowadzeniu analizy stateczności wyszukiwany był węzeł o maksymalnym wypadkowym przesunięciu. Następnie

modyfikowano geometrię układu tak, aby model rusztowania przyjął kształt zgodny z formą wyboczenia dla najniższego uzyskanego z obliczeń mnożnika siły krytycznej. W tym przypadku także analizowano przesunięcia o wielkości do 4 cm. We wnioskach prac [58] i [59] ich autorzy podkreślają, że analizowane przez nich wartości wprowadzonych imperfekcji nie zagrażają nośności typowego rusztowania fasadowego o regularnej budowie. Jednak oba analizowane przypadki powodowały wzrost wartości naprężeń w głównych elementach konstrukcyjnych. Wyniki, prowadzonych między innymi przez autora pracy, pomiarów imperfekcji geometrycznych w ramach projektu opisanego w kolejnym punkcie pracy wykazały, że wielkości pomierzonych odchyłek są zdecydowanie większe. Dodatkowo ich rozkład po wysokości rusztowania jest daleki od tych opisanych w normach. Dlatego w dalszej części pracy wykonano analizy numeryczne uwzględniające występowanie imperfekcji geometrycznych i w szczególności sprawdzono, jaki wpływ na stan naprężenia w rusztowaniu ma jednocześnie występowanie imperfekcji globalnych oraz uszkodzeń stojaków ramy.

## 2.5 Weryfikacja modeli numerycznych

Weryfikacja modelu to porównanie wyników modelowania z systemem rzeczywistym lub z modelem wzorcowym z punktu widzenia ich zgodności z wynikami badań doświadczalnych lub z wiedzą teoretyczną. W odniesieniu do złożonych układów, jakimi są konstrukcje rusztowań przedstawione w odnalezionych w dostępnej literaturze opisach, weryfikacja odbywała się na podstawie badań na rzeczywistych układach. W pracy [60] przedstawiono analizy numeryczne przeprowadzone na modelu zweryfikowanym badaniami laboratoryjnymi na rzeczywistych konstrukcjach, które zostały opisane w innych pracach. Wyniki tych analiz porównano z zaleceniami normowymi obowiązującymi w Australii i Stanach Zjednoczonych. Zgodność z wzorami zawartymi w tych normach uzyskano po zmniejszeniu wartości granicznych obciążeń, uzyskanych jako wynik analiz numerycznych, z uwzględnieniem współczynnika 0,9. Autorzy tej pracy podkreślają, że współczynnik może przyjąć ostatecznie inną wartość, ponieważ w dalszych pracach należy uwzględnić wielokrotność użytkowania elementów i pojawiające się z tego powodu niekorzystne efekty, takie jak obniżenie sztywności połączeń. W pracy [25] opisano badania w różnych konfiguracjach układu, a na ich podstawie w modelu numerycznym dobrano parametry połączenia pomiędzy poszczególnymi elementami rusztowania. W pracy [22] model numeryczny został zweryfikowany na podstawie badań prostokątnego układu rusztowania opisanego w pracy [20]. Po weryfikacji modelu, w ramach tej pracy symulacje rozszerzono o szereg przypadków konstrukcji o różnej wielkości i kształcie.

W innych konstrukcjach niż rusztowania, także powszechną praktyką jest weryfikacja modelu numerycznego na podstawie pomiarów na rzeczywistej



konstrukcji. Na przykład w pracy [61] przedstawiono wyniki analiz przeprowadzonych na modelu sprężonej belki żelbetowej. Był to model jednego z głównych elementów konstrukcyjnych mostu żelbetowego. Model belki aktualizowano na podstawie pomiarów przemieszczeń i drgań własnych na rzeczywistym elemencie, w którym wprowadzano uszkodzenia polegające na przerywaniu kolejnych cięgien sprężających. Model zweryfikowany na podstawie tych badań ostatecznie miał wspomagać proces monitoringu stanu konstrukcji całego mostu. Tak jak w tym przypadku, w niniejszej pracy, ze względu na brak możliwości przeprowadzenia eksperymentu na pełnowymiarowej konstrukcji rusztowania, weryfikację modelu zaplanowano na podstawie testów pojedynczych ram i wycinków stojaków.

## **2.6 Podsumowanie**

Na podstawie przedstawionych badań można stwierdzić, że uszkodzenia mają istotny wpływ na nośność konstrukcji stalowych, a więc także będą miały wpływ na nośność rusztowań budowlanych. Mimo eliminacji elementów uszkodzonych podczas ich okresowych przeglądów pomiędzy użyciem ich w kolejnych realizacjach, elementy posiadające uszkodzenia występują w rzeczywistych konstrukcjach. Jednocześnie to zagadnienie nie było szeroko rozpatrywane w literaturze przedmiotu do tej pory. Dlatego w pracy podjęto problem nośności wpływu uszkodzeń elementów rusztowań ramowych na nośność całej konstrukcji rusztowania.

### **3 IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ W RAMOWYCH RUSZTOWANIACH BUDOWLANYCH**

Inwentaryzacja uszkodzeń elementów rusztowań ramowych była częścią projektu realizowanego przez konsorcjum jednostek naukowych z Lublina, Łodzi i Wrocławia. Celem projektu było opracowanie modelu oceny ryzyka wystąpienia katastrofy lub sytuacji niebezpiecznej podczas prac z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. Dane przedstawione w tym punkcie pracy uzyskano na podstawie inwentaryzacji rzeczywistych konstrukcji w trakcie ich eksploatacji. Badania realizowano w różnych regionach na terenie niemal całej Polski [55]. Badania tego typu były również tematem prac naukowych zespołów z Hiszpanii [51] oraz Stanów Zjednoczonych [52]. Podczas realizacji własnych badań jednoznacznie stwierdzono, że elementy wykorzystywane do tworzenia konstrukcji rusztowań posiadają uszkodzenia. Uszkodzenia w rusztowaniach mogą powstać na skutek miejscowego przeciążenia spowodowanego nierównomiernym rozkładem obciążenia. Jednak wydaje się, że dużo częściej uszkodzenia powodowane są wystąpieniem obciążenia wyjątkowego, pojawiającego się podczas eksploatacji rusztowań. Rusztowania na placu budowy często zlokalizowane są przy tymczasowych ciągach komunikacyjnych, co wiąże się z ryzykiem uderzenia przez pojazdy mechaniczne. Innym zagrożeniem tego typu jest ciężki sprzęt budowlany realizujący zadania w pobliżu rusztowania lub upadek z wysokości przedmiotów o znacznej masie. Są to oczywiście zdarzenia o charakterze incydentalnym i ciężko jest przewidzieć wartość takiego obciążenia. Niestety, w przypadku wystąpienia takiego zdarzenia, nawet jeżeli nie dochodzi do awarii całej konstrukcji, to najczęściej pojedyncze elementy posiadają trwałe uszkodzenia. Innym czynnikiem mającym bardzo duży wpływ na stan techniczny elementów rusztowań jest tymczasowość konstrukcji, do budowy których są wykorzystywane. Wiaże się to z częstym procesem montażu i demontażu, w niektórych przypadkach nawet co kilka dni. W trakcie tych procesów szczególnie narażone na uszkodzenia są połączenia między elementami. Do powstawania uszkodzeń dochodzi też podczas transportu i towarzyszącym jemu załadunku i rozładunku elementów.

#### **3.1 Metodologia zbierania danych o uszkodzeniach**

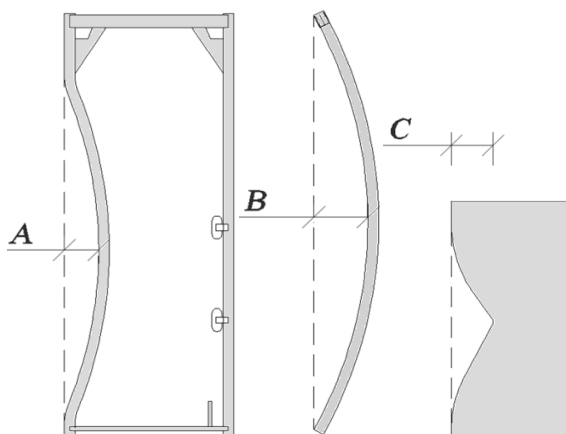
Inwentaryzacja uszkodzeń elementów rusztowań była jednym z wielu zadań realizowanych przez stworzone zespoły badawcze w ramach wspomnianego projektu. Ponieważ badania rusztowań na placu budowy były realizowane przez różne zespoły z różnych ośrodków naukowych, a dodatkowo nawet w ramach jednego zespołu zadania nie były ściśle przypisane do konkretnych osób, zachodziła potrzeba opracowania instrukcji i wytycznych, według których powinno przebiegać to zadanie. Autor niniejszej pracy stworzył więc arkusze

pozwalające na intuicyjną realizację zadania przez każdego z członków zespołu badawczego. Stworzone wytyczne systematyzują zbierane dane oraz pozwalają na zestawienie wszystkich zbieranych danych i umożliwiają dokładniejszą analizę dotyczącą oceny stanu technicznego użytkowanych rusztowań. Podstawą instrukcji było wydzielenie czterech grup elementów. Podział ten już sam w sobie sugerował ważność poszczególnych elementów rusztowań, co skutkowało większą precyzją przy wyszukiwaniu i oznaczaniu wad w tych elementach, w których mogą one mieć największe znaczenie. Oczywistym jest, że poza rodzajem uszkodzenia, bardzo istotnym czynnikiem jest jego wielkość. Jedną z podstawowych wytycznych podczas gromadzenia danych było to, że uszkodzenie ma być widoczne „gołym okiem”, czyli że jego występowanie można stwierdzić bez użycia przyrządów pomiarowych. Wydaje się, że uwzględnienie w zestawieniach ilościowych uszkodzeń o niewielkich wymiarach lub zasięgu mogłoby prowadzić do przekłamań i formułowania niewłaściwych wniosków. Dlatego autor wytycznych (autor niniejszej pracy) zdecydował, że inwentaryzacji podlegać będą tylko uszkodzenia o wielkości mogącej mieć istotny wpływ na nośność konstrukcji oraz bezpieczeństwo jej użytkowania.

### 3.2 Grupy elementów

Pierwszą grupą elementów, w której wyszukiwano uszkodzenia były ramy stalowe. Według stworzonych wytycznych w ramach stalowych szczególną uwagę należało zwrócić na uszkodzenia stojaków ramy. Według schematu pokazanego na rysunku 3.1 wartościami mierzonymi były:

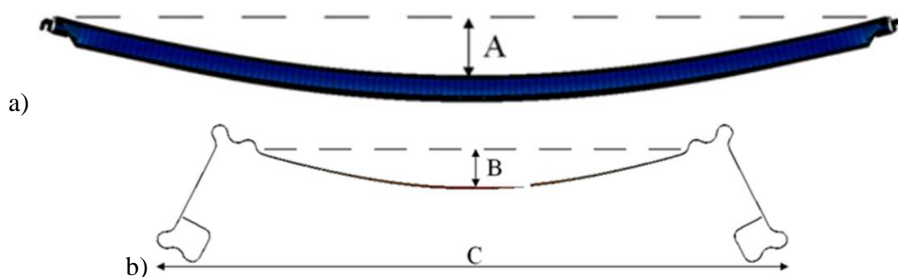
- wygięcie stojaka w płaszczyźnie ramy, oznaczone jako A,
- wygięcie stojaka z płaszczyzny ramy, oznaczone jako B,
- deformacja przekroju poprzecznego rury stojaka (wgięcie), oznaczona jako C.



Rys. 3.1. Schemat uszkodzeń stojaka ramy stalowej

Następnie wyszczególnione zostały uszkodzenia w postaci korozji oraz pęknięć i nieciągłości materiałowych kształtowników oraz w szczególności, połączeń spawanych. Kolejny krok podczas oględzin elementów, to zwrócenie uwagi na kompletność elementu. Chodzi tu głównie o ruchome elementy, takie jak trzpienie czy sworznie mocujące pozostałe elementy do ramy. Ostatnią rubryką w arkuszu uszkodzeń ram stalowych była rubryka podpisana „inne uszkodzenia”. Wszystkie zanotowane uszkodzenia poza opisem z wymiarami dokumentowane były poglądową fotografią.

Drugą grupę badanych komponentów rusztowań stanowiły pomosty. W rusztowaniach ramowych występują dwa podstawowe typy pomostów. Ich podstawową różnicą jest materiał, z którego są wykonane. Wyróżniamy pomosty, które wykonane są w całości z metalu z perforowanych zimno giętych blach, oraz pomosty wykonane z drewna z metalowymi okuciami w strefie połączenia z ramą. Oczywiście tak odmienna budowa poszczególnych typów pomostów determinuje powstawanie zupełnie innych uszkodzeń. Jednak w obu przypadkach najpierw sprawdzano, czy pomosty posiadają trwałe odkształcenia plastyczne, powodujące ugięcie osi podłużnej pomostu. Uszkodzenie takie schematycznie pokazano na rysunku 3.2, gdzie wielkość tego uszkodzenia w arkuszu oznaczano jako A. Dwa pozostałe mierzone parametry (B i C) dotyczyły już tylko pomostów stalowych. Są to wielkości trwałych odkształceń plastycznych przekrojów poprzecznych pomostów. Następnie, podobnie jak w przypadku ram stalowych, wyróżniono uszkodzenia w postaci korozji oraz pęknięć i nieciągłości materiałowych oraz pozostawiono rubrykę na niezdefiniowane uszkodzenia, które zdaniem osoby przeprowadzającej badanie, mają istotny wpływ na wypełnianie funkcji danego elementu.



Rys. 3.2. Uszkodzenia pomostów: a) ugięcie wzdłuż pomostu, b) ugięcie w poprzek pomostu

W trzeciej grupie elementów znalazły się stężenia i poręcze. Umieszczono je tam razem, ze względu na podobieństwo w budowie. We wszystkich systemach oba te elementy wykonane są z rury. Różnią się między sobą zakończeniami, które stanowią połączenie z ramą. Podobnie jak w poprzednich grupach, szczególną uwagę w arkuszu zwrócono na zakrzywienie osi elementu, zarówno

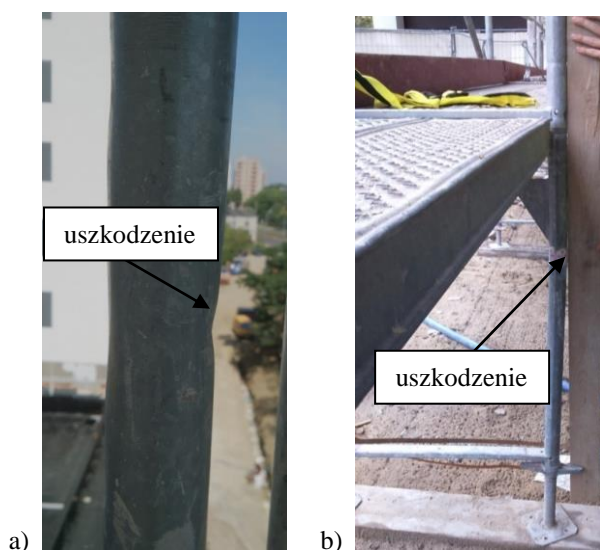
w płaszczyźnie oraz z płaszczyzny rusztowania oraz kolejno na: korozję, pęknięcia, kompletność połączeń oraz inne widoczne uszkodzenia.

W trzech pierwszych grupach ujęto wszystkie główne, zarazem najliczniejsze grupy elementów rusztowań ramowych. W czwartej natomiast znalazły się pozostałe elementy, które stanowią najczęściej uzupełnienie systemu i są zdecydowanie mniej liczne. Dodatkowo, bardzo często w systemach różnych producentów mogą mieć różną budowę i kształt, co powoduje brak możliwości klasyfikacji uszkodzeń elementów tej grupy, dlatego też w tej grupie powstały ogólne zalecenia i każde uszkodzenie było indywidualnie opisywane.

### 3.3 Podział uszkodzeń elementów rusztowań

We wszystkich grupach wymienionych w poprzednim podpunkcie, poszczególne uszkodzenia, które zostały zidentyfikowane na danym typie elementów, mogą mieć różny wpływ na jego właściwości. Dlatego autor opracował też podział, który wskazuje na istotność danego typu uszkodzeń ze względu na funkcjonalność rusztowań. W ramach tego podziału wyszczególniono trzy grupy.

Pierwszą grupę stanowią uszkodzenia, które swoim występowaniem powodują zagrożenie obniżenia nośności całej konstrukcji, co w konsekwencji może prowadzić do awarii rusztowania lub wręcz katastrofy budowlanej. Zdecydowanie stwarzające największe niebezpieczeństwo są uszkodzenia stojaka ramy jako podstawowego elementu nośnego. Należy zwrócić uwagę, że podczas eksploatacji rusztowań spośród wszystkich elementów to właśnie stojaki najczęściej są elementami o największym wyężeniu.



Rys. 3.3. Uszkodzenia stojaka ramy stalowej: a) punktowe wgęście, b) zakrzywienie osi stojaka

Podczas prowadzonych badań, wykazano bardzo dużą różnorodność uszkodzeń w ramach stalowych. Spowodowane jest to tym, że element jest zbudowany z kilku różnych kształtowników, a także elementów uzupełniających. Do pierwszej omawianej grupy zakwalifikowano uszkodzenia stojaków ramy w postaci deformacji przekroju poprzecznego rury (punktowego wgięcia), pokazanego na rysunku 3.3a. Uszkodzenia tego typu powstają na skutek punktowego, dynamicznego oddziaływania zewnętrznego. Drugim typem uszkodzenia jest zakrzywienie osi rury. Uszkodzenie takie pokazano na rysunku 3.3b. Warto dodać, że jeżeli dochodzi do tworzenia się pierwszego z przedstawionych uszkodzeń nie w okolicy węzła ramy, to dochodzi do jednoczesnego występowania drugiego typu spośród wymienionych uszkodzeń. W takiej sytuacji dochodzi do wzmocnienia efektów, wpływających niekorzystnie na nośność konstrukcji.



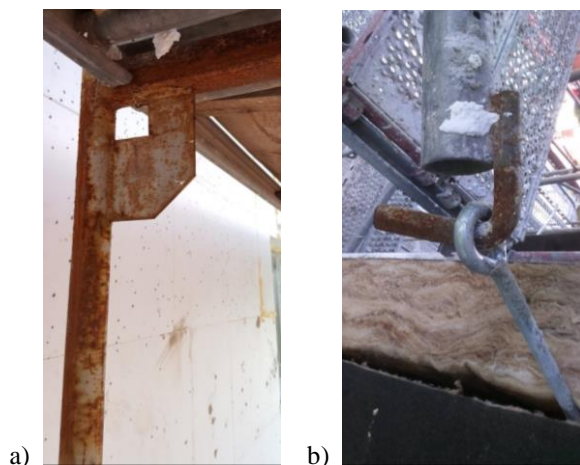
Rys. 3.4. Uszkodzenia stężenia pionowego: a) zakrzywienie osi rury, b) punktowe wgięcie

Kolejnym podstawowym elementem, w którym uszkodzenia mogą być niezwykle groźne, są stężenia pionowe. Stężenia pionowe wykonane są z rur gładkich a między poszczególnymi systemami różnią się tylko kształtem i rodzajem mocowań zlokalizowanych na ich końcach. Uszkodzenia zakwalifikowane do pierwszej grupy, zidentyfikowane w stężeniach, są w zdecydowanej większości bliźniacze do tych obserwowanych na stojakach ram. Głównie mamy do czynienia z wygięciem osi rury stężenia, a także z punktowymi deformacjami. Stojaki ram mają stałą długość wynoszącą 2,0 m. Dodatkowo bardzo często połączenia w ramie między pionowymi a poziomymi elementami są kształtowane z użyciem dużych blach węzłowych co powoduje zmniejszenie długości wybocheniowej. Natomiast rury stężeń, w najczęściej używanych modułach mają długość około 3,5 m i nie są w żaden sposób wzmacniane. Ponadto w wielu systemach stężenia wykonane są z rur o mniejszej średnicy niż stojaki

ram. Wszystko to powoduje, że elementy te są bardziej smukłe i przez to zdecydowanie bardziej narażone na wyboczenie i uszkodzenia mechaniczne, na przykład podczas transportu. Na rysunku 3.4a pokazano stężenie, na którym widać dwa wygięcia stężenia w jednej płaszczyźnie w dwóch przeciwnych kierunkach. Najprawdopodobniej spowodowane jest to próbą „prostowania” elementu posiadającego bardzo duże uszkodzenie, które uniemożliwiało montaż.

Co ciekawe, w stężeniach nie odnotowano żadnych uszkodzeń innego typu. W innych elementach rusztowań, w których występują połączenia sworzniowe, śrubowe lub klinowe, bardzo często spotyka się elementy niekompletne. Świadczyć to może o tym, że pod tym względem do stężeń przykładą się większą wagę i nie dopuszcza się do użytkowania wybrakowanych elementów.

Kolejnym uszkodzeniem zakwalifikowanym do pierwszej grupy jest korozja. Wszystkie stalowe elementy rusztowań są zabezpieczone antykorozyjnie poprzez ocynkowanie. Jest to zdecydowanie jeden z najskuteczniejszych i najtrwalszych środków ochrony antykorozyjnej.

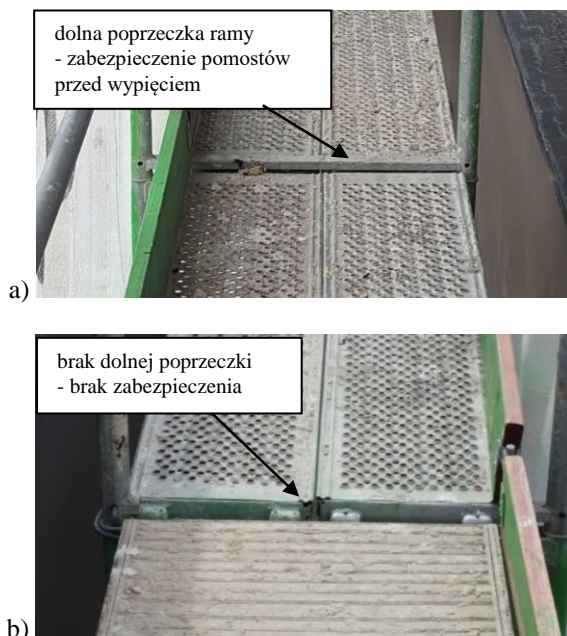


Rys. 3.5. Korozja na elementach rusztowań: a) rama stalowa, b) łącznik kotwiący

Podczas badań wykryto różne stopnie skorodowania elementów. Korozja w elementach rusztowań najczęściej zapoczątkowana jest miejscowymi mechanicznymi uszkodzeniami powłoki ochronnej. Zdarzają się też przypadki wadliwego wykonania powłoki ochronnej, co skutkuje pokryciem się korozją całych elementów lub znacznych jej części. Początkowe fazy korozji powierzchniowej oczywiście można by zaliczyć do kolejnych opisywanych grup, czyli o mniejszym znaczeniu dla nośności konstrukcji. Jednakże z biegiem czasu korozja w elementach postępuje i sytuacja taka, jak pokazana na rysunku 3.5a, gdzie korozja zaczyna mieć charakter wżerowy, zdecydowanie wpływa na obniżenie nośności elementów, w tym też tych najważniejszych ze względu na nośność i stateczność całej konstrukcji. Szczególnie niebezpieczne wydaje się

występowanie korozji na połączeniach spawanych i elementach o mniejszych przekrojach, tak jak pokazano na rysunku 3.5b na przykładzie łącznika kotwiącego, którego hak i połączenie z rurą jest pokryte korozją. Zmniejszenie nośności takiego połączenia, zlokalizowanego w newralgicznym punkcie, także może prowadzić do awarii lub katastrofy.

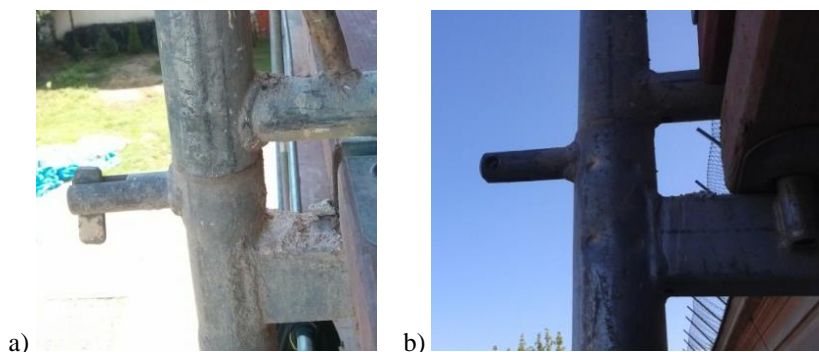
Ostatnim, wyszczególnionym rodzajem uszkodzeń w tej grupie jest niekompletność elementów. Wśród tych uszkodzeń, jednym z najliczniej występujących, jest brak dolnej poprzeczki ramy. Jak udało się ustalić, jest to celowe działanie montażystów i dochodzi do niego w sytuacji, kiedy dolna poprzeczka ramy koliduje z elementami konstrukcji budynku, zlokalizowanymi u podstawy konstrukcji (np. murek, który można objąć stojakami po usunięciu dolnej poprzeczki). Niestety, po demontażu rusztowania elementy te nie są eliminowane z dalszego użytku, a traktowane jako pełnowartościowe i używane ponownie. Działanie to jest do tego stopnia celowe, że pozostawiany jest niewielki odcinek dolnej poprzeczki z trzpieniem, do którego mocowane są drewniane krawężniki. Czyli założeniem montażystów jest wykorzystanie ponownie elementu, nie tylko w tego typu szczególnych sytuacjach, ale jak każdy inny kompletny element w kolejnym układzie rusztowania w zupełnie innej lokalizacji. Na rysunku 3.6a pokazano ramę na środkowym poziomie rusztowania z dolną poprzeczką, czyli jest to poprawna sytuacja. Natomiast rysunek 3.6b przedstawia to samo rusztowanie, ale w jednym z miejsc, w którym zamontowano ramę z wyciętą dolną poprzeczką.



Rys. 3.6. Dolna poprzeczka ramy: a) rama kompletna, b) rama z wyciętą dolną poprzeczką



W pierwszym momencie można by pomyśleć, że brak dolnej poprzeczki nie powoduje żadnych niekorzystnych efektów. Nie jest to typowy element konstrukcyjny przenoszący obciążenia. Jest ona elementem pomocniczym, którego brak przy standardowym obciążeniu konstrukcji rusztowania nie powoduje wyraźnego wzrostu sił w podstawowych elementach konstrukcyjnych. Dolna poprzeczka jest swego rodzaju ściągiem i zapewnia współpracę obu stojaków ramy podczas obciążenia, a także ma wpływ na schemat zamocowania stojaków. Nie można też zapominać, że element ten pełni jedną bardzo ważną funkcję, a mianowicie blokuje możliwość przesuwu pionowego pomostów. Brak tego elementu powoduje możliwość swobodnego wypięcia się pomostu, które może być spowodowane oddziaływaniem wiatru prostopadle do powierzchni pomostu lub innymi oddziaływaniami zewnętrznymi, powodującymi odkształcenia konstrukcji. Pomosty w rusztowaniach ramowych pełnią funkcję stężeń poziomych. Dlatego wypięcie się pomostu powoduje zmianę schematu statycznego konstrukcji, co w konsekwencji może prowadzić do sytuacji niebezpiecznych.



Rys. 3.7. Mocowanie stężenia pionowego: a) kompletne, b) uszkodzone

Bardzo podobne zagrożenie powoduje niekompletność mocowania stężenia pionowego. Na rysunku 3.7a pokazano kompletne mocowanie. Montaż stężenia polega na nasunięciu odpowiedniego otworu, znajdującego się na końcu stężenia, na przyspawany do ramy trzpień. Możliwość wypięcia się stężenia jest blokowana przez samoczynnie opadającą zawleczkę. Brak tego małego elementu (rysunek 3.7b) stwarza możliwość wystąpienia bardzo niebezpiecznej sytuacji.

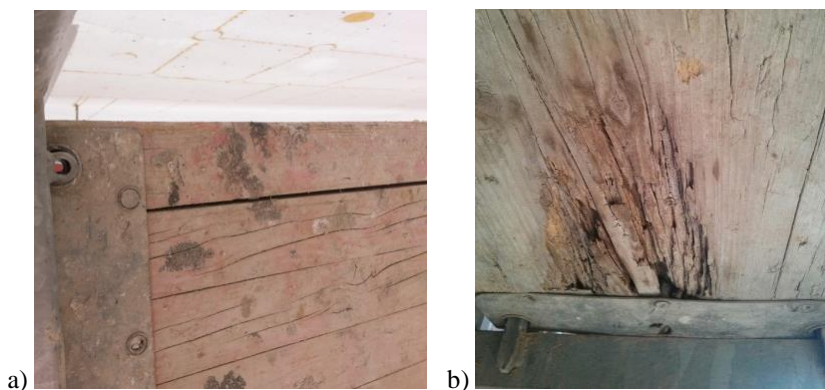
Drugą grupę stanowią uszkodzenia, które swoim występowaniem nie wpływają na nośność konstrukcji. Uszkodzenia te nawet, jeżeli doprowadzą do zniszczenia któregoś z elementów, to mają bardzo lokalny zasięg. Nadal są to bardzo niebezpieczne uszkodzenia i ich obecność stwarza bezpośrednie zagrożenie dla życia i zdrowia, przebywających na rusztowaniu osób. W tej grupie zdecydowanie największe niebezpieczeństwo stanowią uszkodzenia pomostów. Elementy te w rusztowaniach stanowią bezpośrednie oparcie dla wszystkich pionowych obciążeń zewnętrznych, w tym dla ludzi. Za pośrednictwem pomo-

stów obciążenia przekazywane są na inne elementy konstrukcyjne. W trakcie badań prowadzonych na budowach, we wszystkich rodzajach pomostów zidentyfikowano uszkodzenia mające bezpośredni wpływ na ich nośność.



Rys. 3.8. Złamany pomost drewniany

Podczas badań, poza elementami posiadającymi uszkodzenia, wykryto pomosty zniszczone, takie jak ten drewniany, pokazany na rysunku 3.8. Taka awaria niestety jest bardzo trudna do usunięcia, ponieważ pomostu ze środkowego pola nie można w łatwy sposób wyjąć i podmienić. W tym celu należałoby zdemontować wszystkie ramy powyżej pomostu, co w przypadku rusztowania z pokazanym zniszczonym pomostem oznaczałoby konieczność rozebrania niemal całego rusztowania. W takiej sytuacji najczęściej, jeżeli jest to możliwe, należy skutecznie wyłączyć z użytkowania strefę stwarzającą niebezpieczeństwo oraz zamontować poziome stężenie, które zapewni sztywność poziomą rusztowania utraconą przy okazji tej awarii. Niestety w praktyce okazało się, że w tym przypadku ograniczono się tylko do zwrócenia uwagi pracownikom na to miejsce. Uszkodzenia pomostów drewnianych, których konsekwencją są takie zdarzenia, to głównie korozja drewna, przykładowo pokazana na rysunku 3.9b, oraz rozszczepianie się elementów drewna klejonego (rysunek 3.9a).



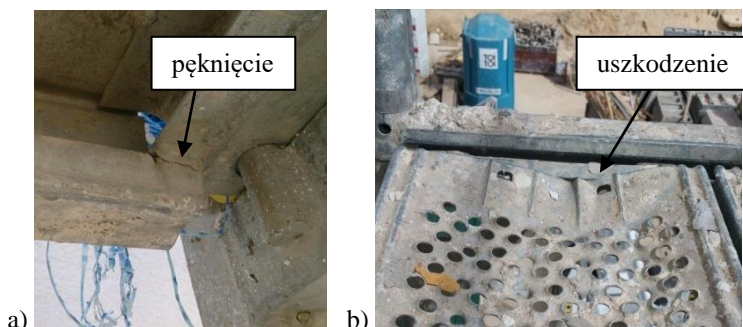
Rys. 3.9. Uszkodzenia pomostów drewnianych: a) rozszczepienie elementów tworzących pomost, b) korozja drewna

W przypadku pomostów stalowych zaobserwowano bardzo dużą liczbę trwałych odkształceń plastycznych, powodujących ugięcia wzdłuż, jak i w poprzek pomostu. Przykładowe uszkodzenia tego typu, spowodowane najprawdopodobniej upadkiem dużej masy z wysokości, pokazano na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Uszkodzenie pomostu stalowego

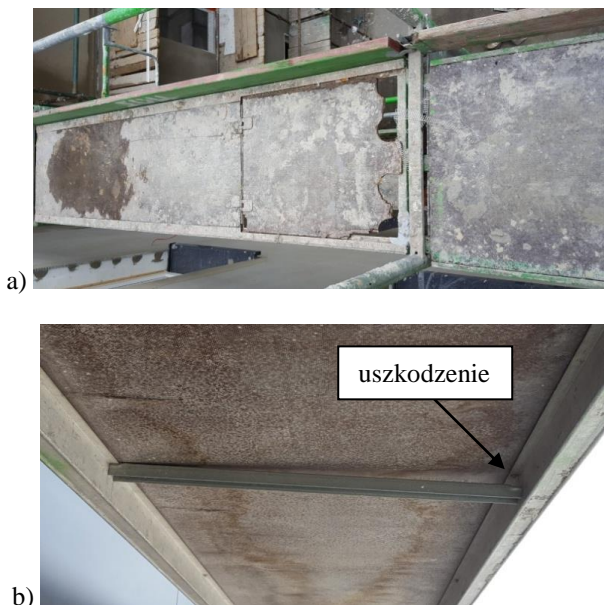
Jednak w przypadku tych pomostów, dużo bardziej niebezpieczne wydają się uszkodzenia w strefie zamocowania pomostu na ramie, a w szczególności uszkodzenia takie, jak pokazane na rysunku 3.11, czyli pęknięcia spoin oraz deformacje elementów, powodujące rozłączanie się elementów.



Rys. 3.11. Uszkodzenia pomostów stalowych w strefie oparcia: a) pęknięcie spoiny, b) deformacja blachy perforowanej

Innym podstawowym typem pomostów, występującym w rusztowaniach ramowych, są pomosty przejściowe. Są to pomosty dwukrotnie szersze od wymienionych wcześniej, z tego też powodu mają konstrukcję aluminiowo-sklejkową, dzięki czemu są znacznie lżejsze. Ich budowa opiera się na aluminiowej ramie i cienkim poszyciu sklejkowym. Pomosty te zbudowane są w ten sposób, że pozwalają na wymianę najbardziej wrażliwego elementu, jakim jest cienka warstwa sklejkowej, która bardzo łatwo ulega zniszczeniom mechanicznym. Jednak jak widać na rysunku 3.12a, czynność ta nie zawsze jest wykonywana. Tak jak w przedstawionym przypadku widać, że kłapa wejściowa wykonana ze

sklejki jest w bardzo złym stanie i ewidentnie stwarza zagrożenie. Innym bardzo groźnym uszkodzeniem tych pomostów jest pękanie połączeń pomiędzy elementami. Na rysunku 3.12b pokazano uszkodzenie w postaci jednostronnego oderwania się belki, podtrzymującej poszycie sklejkowe.

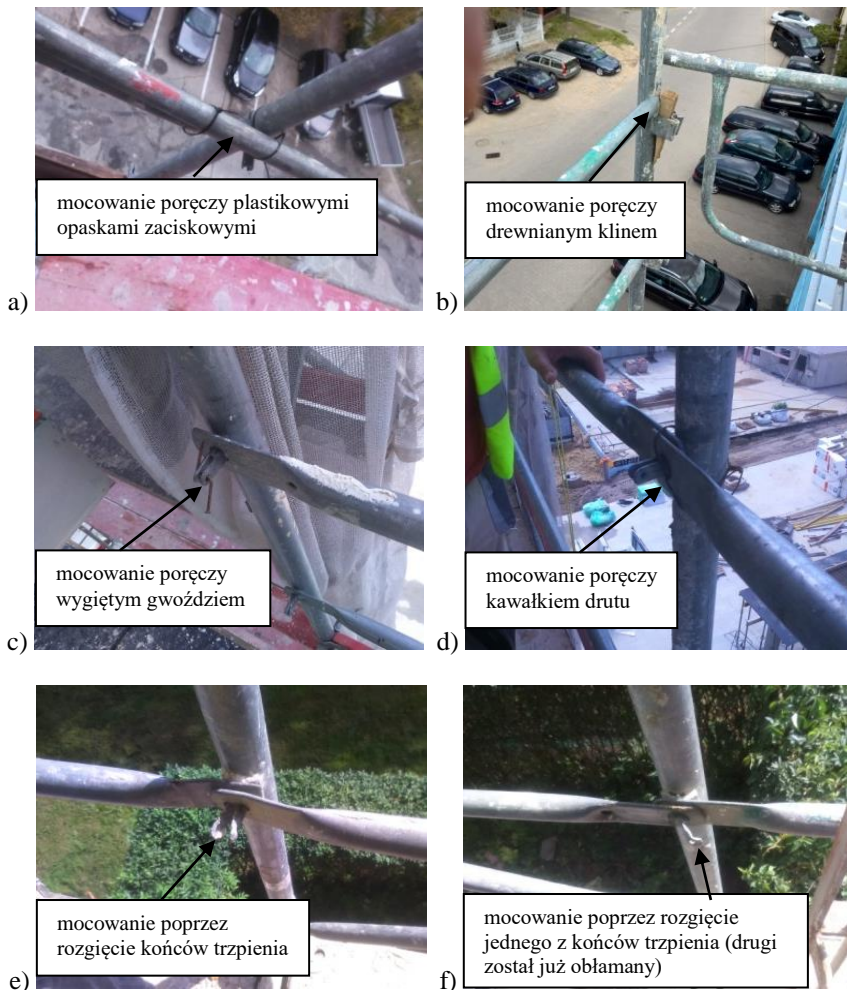


Rys. 3.12. Uszkodzenia pomostów przejściowych: a) braki w poszyciu sklejkowym, b) oderwanie belki podtrzymującej poszycie

Do drugiej grupy zakwalifikowano również uszkodzenia ram stalowych, polegające na braku elementów ruchomych, służących do mocowania poręczy. Konstrukcja rusztowania może być zmontowana bez poręczy. Jedynym zadaniem poręczy w rusztowaniach jest ochrona ludzi przed upadkiem, dlatego obowiązkowo są montowane w każdej strefie rusztowania przeznaczonej do przebywania ludzi. Wady mocowania poręczy stanowią dość liczną grupę uszkodzeń, mimo że są uszkodzeniami, które w łatwy sposób można naprawić i w ten sposób całkowicie wyeliminować zagrożenie, jakie się z nimi wiąże. Na rysunku 3.13 pokazano kilka sytuacji, w których mocowanie poręczy jest niekompletne. Jak widać na rysunkach 3.13(a-d) uszkodzone mocowanie zostało zastąpione kolejno: plastikową opaską, drewnianym klinem, wygiętym gwoździem, kawałkiem drutu stalowego. Wszystko to są rozwiązania prowizoryczne, i można odnieść wrażenie, że monterzy taki problem rozwiązują za pomocą tego, co aktualnie mają pod ręką. Nie wiadomo, jak takie rozwiązanie zachowa się w sytuacji obciążenia elementu, na przykład gdy pracownik gwałtownie szarpnie poręcz przewracając się. Dlatego sytuacja taka nie powinna mieć miejsca, ponieważ stwarza potencjalne zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi,



k którzy mogą mieć złudne poczucie bezpieczeństwa. Na rysunku 3.13e pokazano sytuację, w której blokadę przed zsunieniem poręczy z trzpienia zrealizowano przez rozgięcie jego końców. Rozwiązanie takie oczywiście też nie gwarantuje w pełni bezpiecznego użytkowania, a dodatkowo w celu zdjęcia poręczy końce poręczy trzeba z powrotem przegiąć. Kilkukrotne powtórzenie tej czynności skutkuje oczywiście pojawieniem się pęknięć, a w konsekwencji obłamaniem elementów trzpienia, tak jak pokazano na rysunku 3.13f. Takie postępowanie niestety prowadzi do sytuacji, w której mocowania nie da się już w łatwy sposób naprawić.



Rys. 3.13. Uszkodzenia mocowania poręczy

Trzecią, ostatnią grupę stanowią uszkodzenia elementów rusztowań, które nie stwarzają zagrożeń dla nośności konstrukcji oraz bezpieczeństwa jej użytkowania, a jedynie obniżają jego walory estetyczne. Uszkodzenia te mogą ewentualnie wpływać na subiektywne odczucie bezpieczeństwa użytkowników. Występują one głównie w elementach zabezpieczających i najczęściej, jeżeli się pojawiają, to na dużej liczbie elementów.



Rys. 3.14. Uszkodzenia krawężników zabezpieczających.

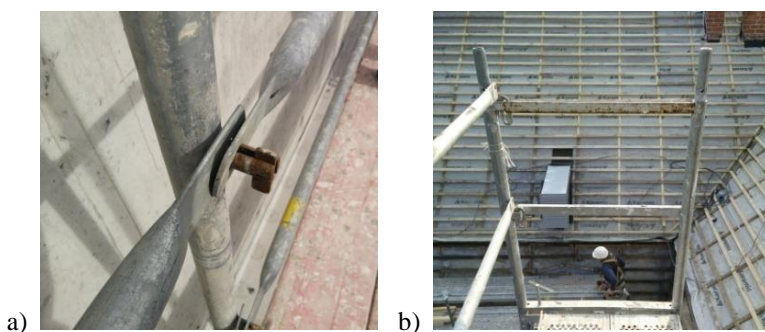
Do takich uszkodzeń z całą pewnością można zaliczyć ubytki na krawędzi oraz pęknięcia wzdłużne krawężników zabezpieczających (rysunek 3.14). Elementy te przeciwdziałają spadaniu narzędzi lub materiałów, pozostawionych przy krawędzi pomostów. Nie przenoszą one niemal żadnych obciążeń, dlatego występowanie wspomnianych uszkodzeń nawet we wszystkich elementach nie powoduje zmniejszenia ich wartości użytkowych. Ponieważ są to dość duże elementy, to ich zła kondycja może doprowadzić do niesłusznej zaniżonej oceny stanu technicznego całej konstrukcji.



Rys. 3.15. Uszkodzenia poręczy

Podobnie jak w przypadku krawężników, duża liczba uszkodzeń w poręczach może powodować wrażenie złego stanu technicznego rusztowania, tym bardziej, że tutaj mamy odczynienia z elementami stalowymi, które uważane są za dużo

trwalsze od drewnianych. Podczas badań wykazano bardzo dużą liczbę uszkodzeń w tych elementach, polegających głównie na wygięciu (zakrzywienie osi rury) oraz wgięciu (deformacji punktowej) (rysunek 3.15). W wielu przypadkach na jednym elemencie znajdowało się kilka takich uszkodzeń. Niemniej jeżeli poręcz jest prawidłowo zamocowana, to uszkodzenia tego typu nie wpływają na jej właściwości użytkowe. Ostatnim uszkodzeniem zaliczonym do tej grupy jest korozja powierzchniowa o małym zasięgu. Korozja zaliczona została już do pierwszej grupy, jednak tam mówiono o głównych elementach konstrukcyjnych, które podczas użytkowania posiadają duży stopień wykorzystania przekroju. Przykład korozji, która nie ma wpływu na nośność rusztowania i bezpieczeństwo użytkowania jest pokazany na rysunku 2.16, gdzie korozja powierzchniowa o bardzo małym zasięgu występuje na elemencie poziomym ramy czołowej i trzpieniu mocującym poręcz. Jednak tak, jak napisano poprzednio, korozja jest zjawiskiem postępującym i z czasem te uszkodzenia mogą przekształcić się w stwarzające zagrożenie, szczególnie w przedstawionym przypadku mocowania poręczy.

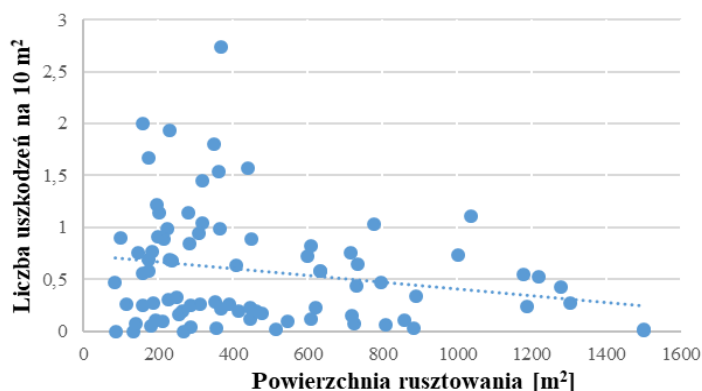


Rys. 2.16. Korozja powierzchniowa elementów zabezpieczających: a) trzpień mocujący poręcz, b) poprzeczka ramy czołowej

### 3.4 Zestawienie ilościowe uszkodzeń

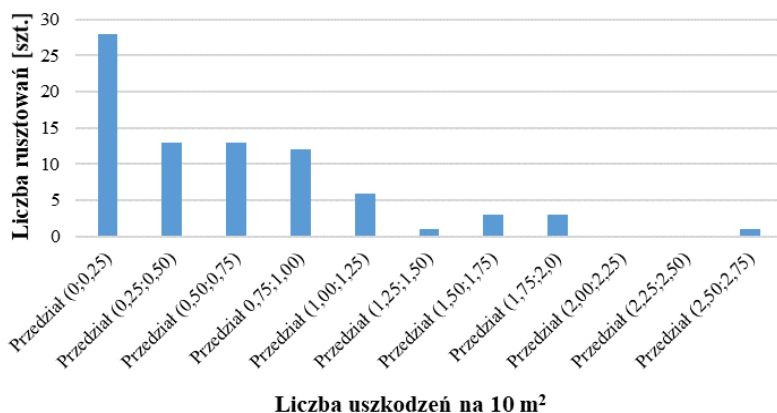
Zebrane podczas badań dane dotyczące występowania uszkodzeń w rusztowaniach ramowych, zestawiono i pokazano na rysunku 3.17, gdzie na osi poziomej oznaczono wielkość powierzchni badanych rusztowań. Należy zwrócić uwagę, że realizowane badania, ze względu na bardzo szeroki zakres wykonywanych czynności na danej budowie, obejmowały tylko jedną elewację traktowaną jako reprezentatywną dla wybranego budynku. Bardzo często na budowie „takie samo rusztowanie” znajdowało się na innych elewacjach oraz innych budynkach w obrębie danej inwestycji. Przez stwierdzenie „takie samo rusztowanie” rozumie się, że miało jednego właściciela, było wykorzystywane w tym samym celu i w ogólnej ocenie miało taki sam stopień zużycia. Dlatego najbardziej właściwe wydaje się podawanie liczby uszkodzeń w przeliczeniu na

jednostkę powierzchni. Na rysunku 3.17 przyjęto, że jednostkową powierzchnią będzie  $10 \text{ m}^2$ , i w odniesieniu do takiej powierzchni zestawiono średnie liczby zidentyfikowanych uszkodzeń. Należy wspomnieć, że podstawowymi wymiarami modułu rusztowań ramowych jest  $2,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$ . Oznacza to, że wynik około 1,5 na osi pionowej wykresu pokazanego na rysunku 3.17 oznacza, że statystycznie w każdym module danego rusztowania występowało uszkodzenie, a jak zostało powiedziane na wstępie, rejestrowane były tylko uszkodzenia o wielkości mogącej mieć istotny wpływ na nośność i bezpieczeństwo rusztowań oraz widoczne „gołym okiem”.



Rys. 3.17. Liczba uszkodzeń zidentyfikowanych w rusztowaniach

Wykres pokazany na rysunku 3.18 jest przekształceniem poprzedniego. Na osi poziomej oznaczono tu podział na grupy uzależnione od liczby uszkodzeń na jednostkę powierzchni z dokładnością do 0,25. Na osi pionowej natomiast oznaczono liczebność danej grupy.



Rys. 3.18. Liczba rusztowań z uszkodzeniami



W zestawieniu uwzględniono dane pochodzące z 80 rusztowań. Jak widać najliczniejsza jest grupa pierwsza. Do tej grupy zaliczamy rusztowania, które nie mają uszkodzeń lub jest ich naprawdę niewiele, czyli jest to grupa rusztowań, o której można by powiedzieć, że problem uszkodzeń elementów jej nie dotyczy. Rusztowania zaliczone do tej grupy stanowią zaledwie jedną trzecią wszystkich analizowanych, co świadczy, że problem występowania uszkodzeń w elementach rusztowań jest bardzo poważny.

### 3.5 Podsumowanie

W przeprowadzonych badaniach wykazano występowanie wielu różnych typów uszkodzeń. Te przytoczone w niniejszym rozdziale pracy to takie, które występowały bardzo często na wielu obiektach, więc można stwierdzić, że są charakterystycznymi dla danego elementu. Dokonano klasyfikacji i zwrócono uwagę na uszkodzenia mogące mieć istotny wpływ na nośność rusztowań oraz bezpieczeństwo ich użytkowania. Z zestawienia liczby uszkodzeń na poszczególnych obiektach wynika, że niemal 70% konstrukcji rusztowań jest wznoszona między innymi z elementów, które stwarzają zagrożenie dla jej nośności lub bezpieczeństwa użytkowania. W zestawieniu tym wyraźnie widać także, że na większych przebadanych rusztowaniach, występuje zdecydowanie mniejsza liczba uszkodzeń przypadających na jednostkową powierzchnię. Na tej podstawie można stwierdzić, że duże konstrukcje wykonywane są z elementów w lepszym stanie technicznym.

Elementy z wadami, polegającymi na ich niekompletności, powinny być eliminowane z użytku do czasu naprawy. Inaczej jest z niezwykle często występującymi uszkodzeniami w postaci wygięcia kształtowników. Wady takiej nie da się usunąć, a zaobserwowane próby takiego działania kończyły się wprowadzeniem kolejnego zakrzywienia osi rury, nieznacznie korygującego pierwotne uszkodzenie. Dlatego w tym przypadku należy określić wpływ danego uszkodzenia na wytrzymałość elementu, a następnie określić ewentualną dopuszczalną wielkość uszkodzenia w danym elemencie, po przekroczeniu której element należy bezwzględnie i trwale eliminować z dalszego użytkowania.

Najważniejszymi elementami rusztowań są stojaki ram. W związku z tym w dalszej części pracy wykonano analizę wpływu uszkodzeń stojaków na nośność rusztowania.

## **4 BADANIA LABORATORYJNE USZKODZEŃ RAM**

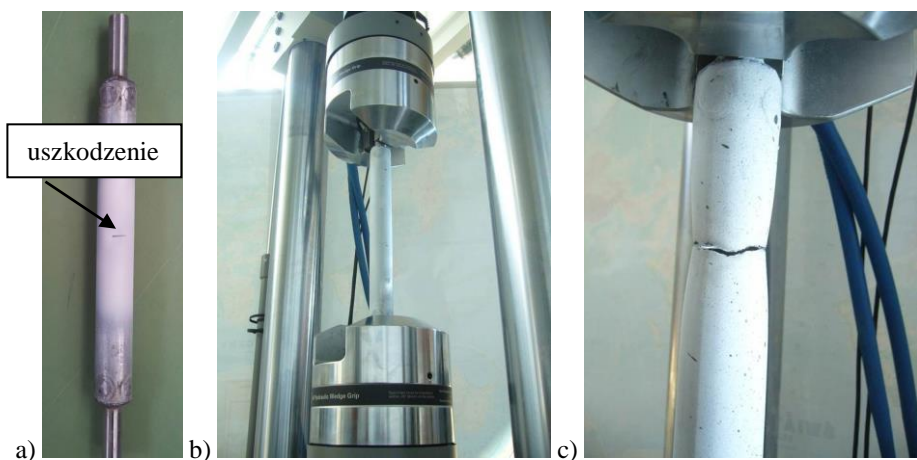
Badania laboratoryjne są najlepszym sposobem sprawdzenia zachowania elementu konstrukcyjnego pod wpływem określonego oddziaływania zewnętrznego. Podczas badań wykonywanych na rzeczywistych elementach uzyskujemy informacje na temat newralgicznych punktów badanego elementu lub ich układu. Dlatego niezmiennie ważny jest dobór oraz lokalizacja czujników mierzących kluczowe parametry podczas testu. Charakter obciążenia powinien być dobrany tak, aby wiernie odwzorowywać pracę elementu w warunkach eksploatacji. Badania laboratoryjne dodatkowo są najczęściej koniecznym elementem wprowadzenia produktu na rynek. Dlatego istnieją zalecenia normowe dotyczące stanowisk badawczych, schematów zamocowania, a także układów, w jakich poszczególne elementy powinny być badane. Ten ostatni aspekt, czyli badanie ramy w zestawie elementów eliminował możliwość zastosowania tych zaleceń podczas badań zaplanowanych i zrealizowanych w ramach niniejszej pracy. Aby precyzyjnie określić wpływ uszkodzenia na nośność danego elementu należy obciążeniu poddać pojedynczy element. W przeciwnym przypadku będziemy mogli mówić o wpływie uszkodzenia na pewien konkretny układ elementów, gdyż ten sam układ z wprowadzonym identycznym uszkodzeniem, a o zmienionych wymiarach, będzie dawał inne wyniki. Dodatkowo im większy układ, tym więcej połączeń między elementami, a z tym związane jest pojawianie się problemów wynikających z niedokładności montażu, i w efekcie zdecydowanie większym rozrzutem w uzyskiwanych wynikach. Wymusiło to konieczność stworzenia stanowisk dostosowanych do badania pojedynczych elementów lub nawet ich fragmentów z wykorzystaniem dostępnych pras wytrzymałościowych.

### **4.1 Cel i zakres badań**

Głównym celem przeprowadzonych badań laboratoryjnych było przeanalizowanie zachowania się stojaków ramy pod wpływem obciążenia wywołującego ich osiowe ściskanie. W ramach wszystkich realizowanych badań przeprowadzono próby na elementach nieposiadających uszkodzeń. Wyniki z takiego testu traktowano jako referencyjne. W kolejnych etapach badań oraz późniejszych analizach, wszystkie wyniki były porównywane do tych uzyskanych z testów, przeprowadzonych na elementach bez uszkodzeń. Przeprowadzono dwa rodzaje badań. W pierwszym, oddziaływaniu siły osiowej poddano wycinek stojaka. W tym przypadku badano wpływ uszkodzenia w formie miejscowego zakrzywienia ścianki rury wywołanego punktowym obciążeniem. W drugim teście, oddziaływaniu poddano całą ramę. Test ten posłużył do analizy wpływu uszkodzenia w formie zakrzywienia osi stojaków ramy.

## 4.2 Badanie laboratoryjne wycinka rury

W badaniach zachowania wycinków rury obciążeniu poddawano elementy o długości 50 cm. Próbkę do badań zostały pobrane ze stojaka ramy. Ograniczone możliwości, dotyczące mocowania próbek w dostępnej i wykorzystanej do badań prasy wytrzymałościowej, wymusiły stworzenie dotaczanych pełnych elementów stalowych. Średnica tych elementów z jednej strony była dopasowana do wewnętrznej średnicy badanego wycinka stojaka. Z drugiej strony element ten był zakończony trzpieniem o średnicy dopasowanej do szczęk zaciskowych. Elementy po wsunięciu w próbkę zostały z nią połączone za pomocą spawów. Kompletny element, przygotowany do próby rozciągania, został pokazany na rysunku 4.1a.



Rys. 4.1. Próba rozciągania rury z uszkodzeniem: a) próbka, b) rura na stanowisku badawczym, c) forma zniszczenia próbki

Na rysunku 4.1b pokazano natomiast próbkę zamontowaną w prasie wytrzymałościowej. Rozwiązanie to okazało się skuteczne, ponieważ jak widać na rysunku 4.1c, zniszczenie badanego elementu następowało w środku próbki a nie w miejscach zamocowania. W miejscu zniszczenia wyraźnie widać także charakterystyczne przewężenie, które powstaje podczas prób rozciągania stali niskowęglowych.

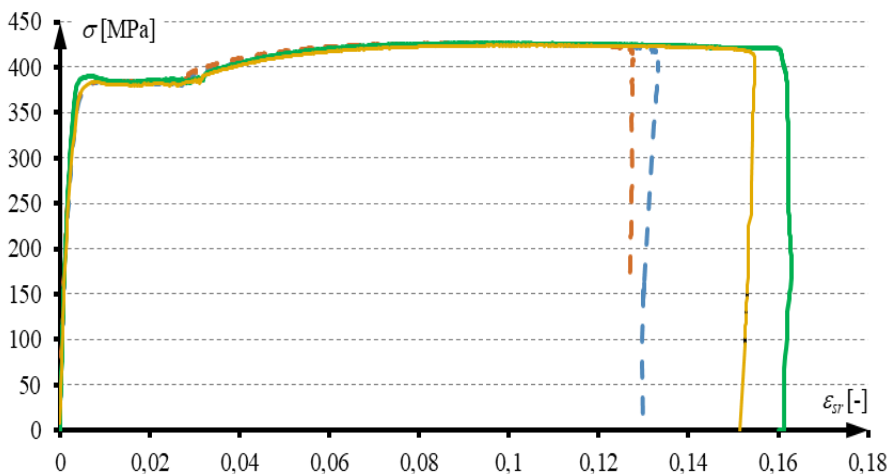
W pierwszej serii badań głównym celem było określenie charakterystyk materiałowych. Podczas próby, przykładanie obciążenia było sterowane przemieszczeniem głowicy prasy o stałej prędkości przesuwu. W przypadku siły rozciągającej badania przerywano w momencie zerwania próbki. Bliźniacze badania zostały już wcześniej wykonane na Politechnice Lubelskiej przez M. Pieńko i opisane w pracy [53]. Badania te różnią się jedynie tym, że we wcześniejszych badaniach do pomiaru odkształceń użyto ekstensometru,

a w przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy użyto systemu optycznego pomiaru odkształceń ARAMIS. Badania zostały wykonane na czterech próbkach, a wyniki z przeprowadzonych badań zestawiono na rysunku 4.2 w formie zależności odkształcenie  $\varepsilon_{sr}$  – naprężenie  $\sigma$ . Gdzie naprężenie wyznaczono na podstawie równania:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

gdzie:  $P$  – wartość siły zarejestrowana przez prasę wytrzymałościową,  $A$  – pole przekroju poprzecznego rury. Odkształcenie zostało wyznaczone w taki sam sposób, jak podczas próby ściskania i zostało opisane w dalszej części tego punktu pracy.

Na rysunku 4.2 liniami przerywanymi oznaczono próbki, w których przed badaniami wytworzono uszkodzenie, natomiast liniami ciągłymi oznaczono próbki w stanie nienaruszonym.



Rys. 4.2. Wyniki otrzymane z próby rozciągania: linie ciągłe – próbki w stanie nienaruszonym, linie przerywane – próbki z wprowadzonym uszkodzeniem.

Przy takim zestawieniu zaobserwowano bardzo dużą zgodność wszystkich wyników. Różnice pomiędzy poszczególnymi próbkami mieszczą się w zakresie błędu statystycznego. Pozwala to na stwierdzenie, że występowanie punktowego uszkodzenia w postaci zagięcia ścianki rury bez przerywania jej ciągłości nie ma istotnego wpływu na nośność takiego elementu podczas oddziaływania osiowej siły rozciągającej. Zmniejsza się jedynie ciągłość próbki, ponieważ dochodzi do inicjacji pęknięcia w miejscu uszkodzenia. Na podstawie średniej z wyników tego eksperymentu, do obliczeń komputerowych opisanych w dalszej części pracy, przyjęto wartości: modułu sprężystości  $E = 196$  GPa, granicę plastyczności  $f_y = 380$  MPa oraz granicę wytrzymałości  $f_u = 424$  MPa.

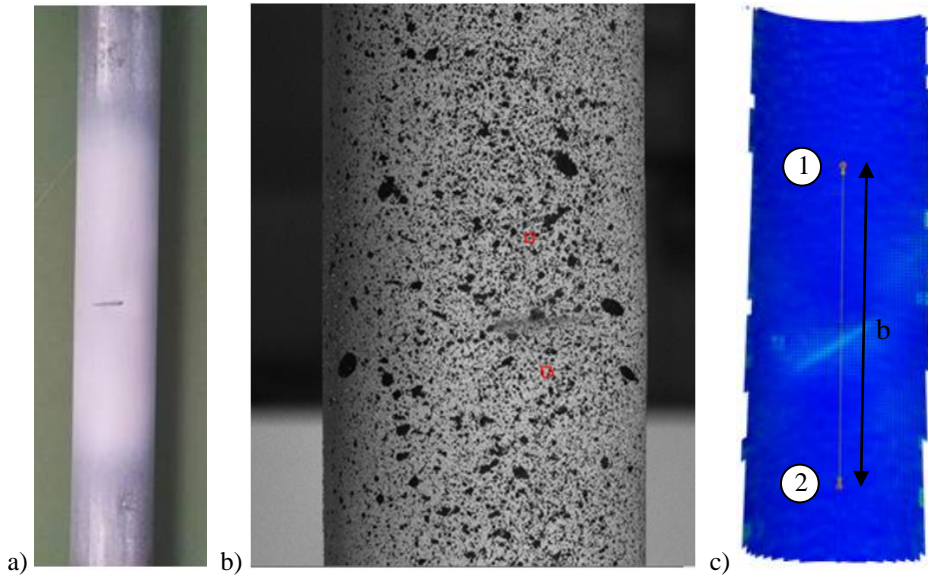
W następnej kolejności przeprowadzono badanie, w którym wycinki rur z uszkodzeniem poddano działaniu siły ściskającej. Eksperyment, w którym próbka jest poddana działaniu osiowej siły ściskającej, wymagał przygotowania przegubowych uchwytów zapobiegających przekazywaniu momentu zginającego na szczęki prasy wytrzymałościowej. Moment ten pojawiał się w późniejszych fazach doświadczenia. Na rysunku 4.3 pokazano uchwyt zastosowany w przeprowadzanych badaniach.



Rys. 4.3. Przegubowe zamocowanie próbki

Każde wprowadzenie do układu pomiarowego takich elementów obarcza eksperyment dodatkowymi błędami, dotyczy to szczególnie przemieszczeń rejestrowanych przez prasę na początku badania. Spowodowane jest to „układaniem” się elementów wprowadzonych do układu badawczego. Uzyskane w ten sposób informacje nie mogą być porównywane z precyzyjnymi wynikami otrzymywanymi podczas symulacji numerycznych. Dlatego przebieg badania w prasie wytrzymałościowej MTS zaplanowano z jednoczesną rejestracją odkształceń przez system optycznego pomiaru odkształceń ARAMIS. W tym celu na próbkę naniesione zostały powłoki malarskie. Pierwsza z nich, biała, jest kontrastem dla bardziej istotnej drugiej, czarnej warstwy, która naniesiona na próbkę jest w postaci „nakropkowania”. Na rysunku 4.4a i b pokazano kolejne fazy przygotowania próbki przed testem. Oprogramowanie wykorzystanego systemu optycznego, na podstawie zarejestrowanego obrazu analizuje wzajemne przemieszczenia punktów, i na tej podstawie wyznaczone są odkształcenia na powierzchni próbki. Przykładowy obraz uzyskany z takiej analizy został pokazany na rysunku 4.4c. Dokładnie takiej wielkości obszar był rejestrowany

i analizowany przez system optyczny. Jak widać próbka została przygotowana w prawidłowy sposób. Świadczy o tym fakt, że w stworzonym obrazie nie ma nieciągłości w centrum analizowanego obszaru, a na krawędziach dokładność jest naturalnie dużo mniejsza, szczególnie w przypadku analizowania elementów o zakrzywionej powierzchni.



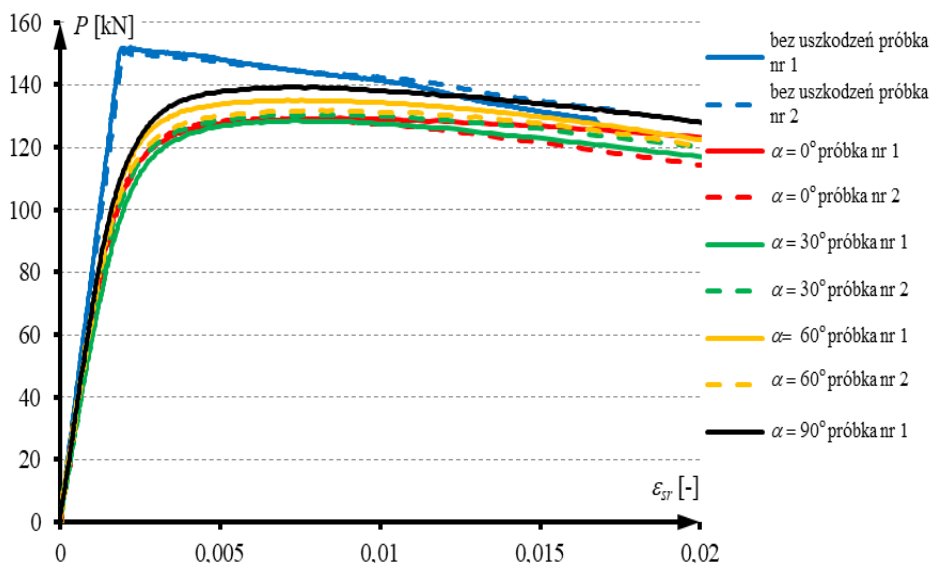
Rys. 4.4. Próbkę przygotowaną do badań z wykorzystaniem systemu optycznego pomiaru odkształceń: a) rura, b) przybliżenie okolicy uszkodzenia, c) obraz uzyskany z analizy przeprowadzonej przez system optyczny ARAMIS

Wyniki otrzymane z próby ściskania, przedstawiono na rysunku 4.5. Na wykresie tym pokazano zależność siły zarejestrowanej przez prasę podczas testu do odkształcenia średniego. Wartość odkształcenia średniego ustalono na podstawie pomiaru zmiany odległości pomiędzy dwoma wybranymi punktami zgodnie z równaniem:

$$\varepsilon_{sr} = \frac{u_{z2} - u_{z1}}{b} \quad (2)$$

gdzie  $b$  jest to odległość między wybranymi punktami przed obciążeniami, a  $u_{z1}$  i  $u_{z2}$  są wartościami przemieszczeń pod wpływem obciążenia. Punkty te były usytuowane w odległości  $b = 8$  cm w pierwszym kroku testu. Dla każdej próbki wybierano punkty, które były powyżej i poniżej w równej odległości od uszkodzenia. Przykładową lokalizację punktów pokazano na rysunku 4.4c. Na rysunku 4.5 zestawione zostały wyniki pomiarów w odniesieniu do dwóch próbek bez uszkodzenia oraz siedmiu próbek z uszkodzeniami. Wytworzone

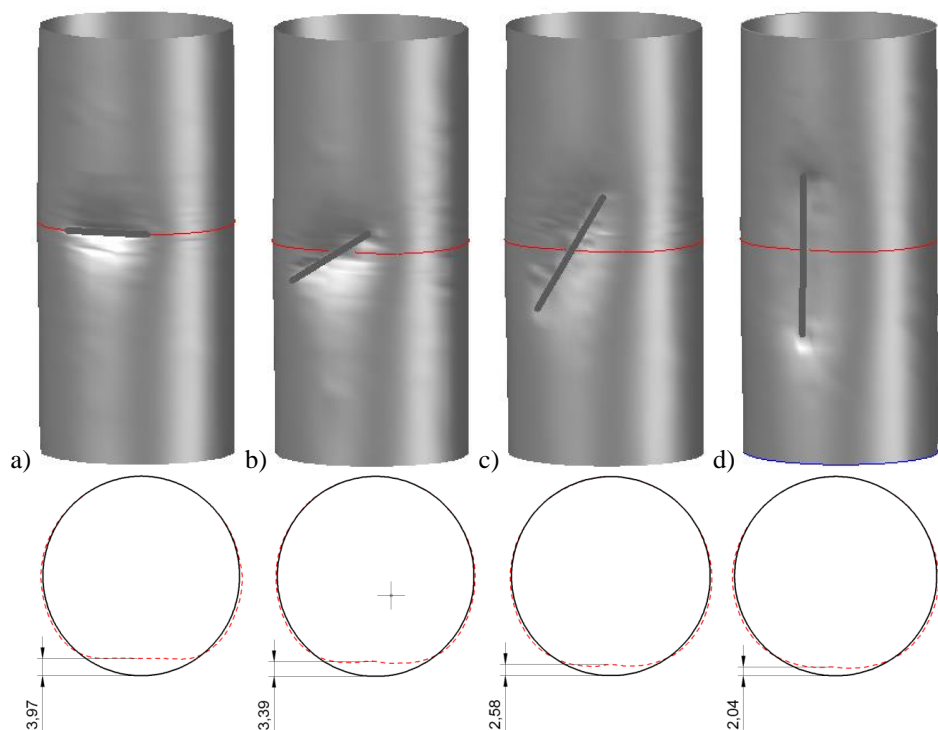
uszkodzenia zróżnicowano pod względem nachylenia osi uszkodzenia względem płaszczyzny przekroju poprzecznego rury, czyli płaszczyzny poziomej podczas badania. W poszczególnych próbkach oś uszkodzenia, mierząc od kierunku poziomego, była nachylona pod kątem  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  oraz  $90^\circ$ . Na wykresie pokazanym na rysunku 4.5 widać, że w próbkach z uszkodzeniami uzyskano mniejszą wartość siły maksymalnej. Zaobserwować można też zmianę nachylenia wykresu w zakresie sprężystym badania, co świadczy o tym, że uszkodzenia powodują zwiększenie podatności elementu. Uszkodzenie powoduje też brak występowania wyraźnego punktu załamania na wykresie. Element bez uszkodzeń podczas przeprowadzonej próby jest ściskany osiowo równomiernie w całym przekroju, a zniszczenie próbki jest definiowane jako utrata możliwości przenoszenia zwiększającego się obciążenia w wyniku wyboczenia. W próbkach z uszkodzeniem problem jest bardziej skomplikowany i dochodzi do nakładania się kilku efektów, dlatego podczas obciążenia tych próbek nie ma wyraźnego punktu, który oznaczałby utratę nośności.



Rys. 4.5. Wyniki otrzymane z próby ściskania rury

Zgodnie z przewidywaniami widać też, że im kąt pomiędzy osią elementu a osią uszkodzenia jest mniejszy, tym wartość siły maksymalnej, uzyskanej w pomiarach, jest większa. Inaczej mówiąc, uszkodzenia wzdłuż osi elementu są mniej niebezpieczne niż uszkodzenia prostopadłe do osi elementu. Należy dodać, że wszystkie analizowane tutaj uszkodzenia zostały spowodowane dokładnie taką samą siłą. Jednak jak się okazało, oddziaływanie zewnętrzne o tej samej wartości, przy różnym kącie nachylenia elementu wywołujące wgłębienie

względem osi rury, może powodować uszkodzenia, które będą miały mniejszy lub większy wpływ na nośność elementu i jego zachowanie podczas obciążenia.



Rys. 4.6. Schematy wytworzonego uszkodzenia: a) uszkodzenie nachylone pod kątem  $\alpha = 0^\circ$ , b) uszkodzenie nachylone pod kątem  $\alpha = 30^\circ$ , c) uszkodzenie nachylone pod kątem  $\alpha = 60^\circ$ , d) uszkodzenie nachylone pod kątem  $\alpha = 90^\circ$

Na rysunku 4.6 przedstawiono schematy wytworzonych uszkodzeń na rurach. Po lewej pokazana jest rura z uszkodzeniem nachylonym pod kątem  $\alpha = 0^\circ$ , w kolejnych nachylenie się zwiększa i po prawej mamy rurę z uszkodzeniem nachylonym pod kątem  $\alpha = 90^\circ$ . Pod każdym schematem uszkodzenia umieszczono także widok przekroju poprzecznego poprowadzonego przez środek uszkodzenia. Na przekroju tym zaznaczono czerwoną przerywaną linią kształt przekroju poprzecznego po wygenerowaniu uszkodzenia, natomiast czarną ciągłą linią oznaczono kształt rury w stanie nienaruszonej. Dodatkowo na schemacie zaznaczono maksymalną wielkość przesunięcia punktu na powierzchni rury dla każdego z analizowanych przypadków. Jak widać, istnieje wyraźna zależność pomiędzy kształtem uszkodzenia a deformacją przekroju poprzecznego wywołaną oddziaływaniem zewnętrznym o tej samej wielkości. Na podstawie pierwszego przeprowadzonego eksperymentu można stwierdzić, że dla nośności elementu najbardziej niekorzystne punktowe uszkodzenia to



takie, w których obserwujemy największą deformację powierzchni rury do jej środka.

### 4.3 Badania laboratoryjne całej ramy

Kolejnym zrealizowanym w ramach pracy badaniem było badanie wytrzymałościowe całych ram systemu ramowego rusztowań w prasie Zwick Roell. Podobnie, jak w przypadku wcześniej opisanych badań, najpierw obciążeniu poddano element nieposiadający uszkodzeń. Wyniki z tego testu traktowano jako referencyjne dla kolejnych siedmiu elementów, w których wytworzono uszkodzenia. W badaniach tych analizowano wpływ uszkodzeń w postaci wygięcia osi na nośność i pracę statyczną stojaka. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na dalszą analizę wpływu wygięcia stojaka zarówno w płaszczyźnie ramy, jak i z płaszczyzny ramy, a także na określenie wpływu wielkości uszkodzenia.

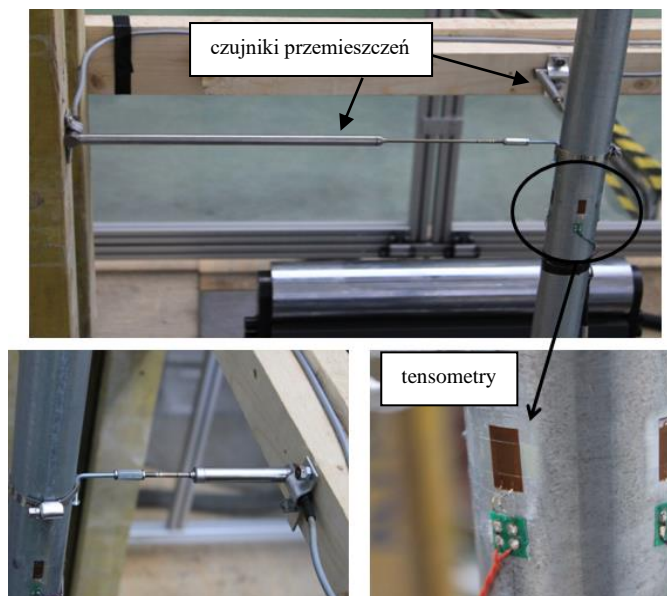


Rys. 4.7. Stanowisko do badań pełnej ramy systemu fasadowego rusztowań

Ze względu na stosunkowo duże wymiary oraz bardzo dużą smukłość takich elementów, bardzo ważne jest precyzyjne ustawienie ram względem prasy i powtarzalność tego procesu. W tym celu stworzono specjalne stanowisko. Do podstawy prasy przykręcono specjalnie przygotowaną do tego celu płytę stalową z wspawanymi trzpieniami pochodzącymi z ramy rusztowania. Montaż kolej-

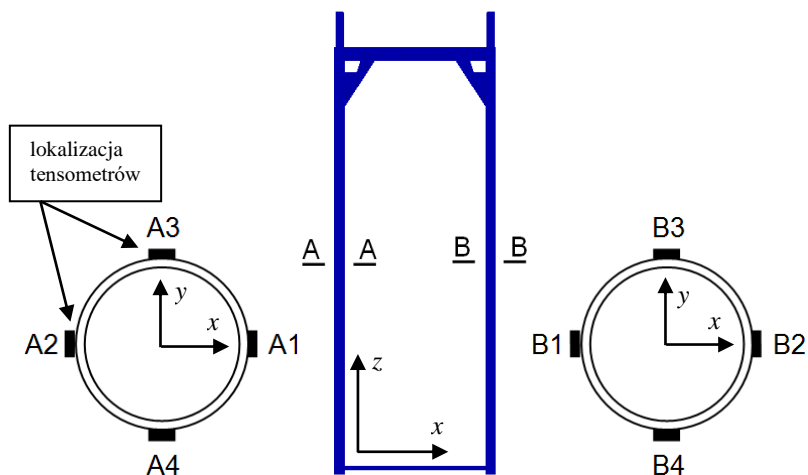
nich elementów polegał na ich nasunięciu na przygotowaną podstawę i ustawieniu ramy w pionie. Pozwoliło to na jednakowe ustawienie wszystkich badanych elementów centralnie pod trawersem prasy, który przekazuje obciążenia. Błachę z trzpieniami zastosowano także dlatego, aby sytuacja pomiarowa wiernie odwzorowała zamocowanie elementu w rzeczywistych konstrukcjach rusztowań. Drugim ważnym aspektem uwzględnionym w stanowisku badawczym jest sposób przyłożenia obciążenia. Na rysunku 4.7 pokazano stanowisko badawcze wraz ze zmontowanym elementem. Obciążenie na element jest przekazywane za pośrednictwem czerwonej belki. Belka ta ma znacznie większą sztywność niż elementy badanej ramy. Jest to dwuteownik wspawany w dolny odcinek ramy rusztowaniowej. Belka ta jest nasuwana na trzpień badanego elementu dokładnie w taki sam sposób, jak kolejna rama w rzeczywistych konstrukcjach rusztowań. Belka obciążona na środku przekazuje siłę równomiernie na oba stojaki.

Na rysunku 4.8 przedstawiono aparaturę pomiarową zastosowaną podczas badań ramy. Na każdym ze stojaków ramy w odległości 95 cm od podstawy przyklejono zestaw czterech jednokierunkowych tensometrów elektrooporowych. W badaniu zastosowano tensometry foliowe TFs 5/120. Tensometry były przyklejane do elementu za pomocą kleju cyjanoakrylowego, po przygotowaniu powierzchni poprzez kolejno: wyrównanie, uszorstnienie, odtłuszczenie i neutralizację, zgodnie z zaleceniami producenta. Wszystkie tensometry podczas badania służyły do pomiaru odkształcenia w kierunku pionowym.



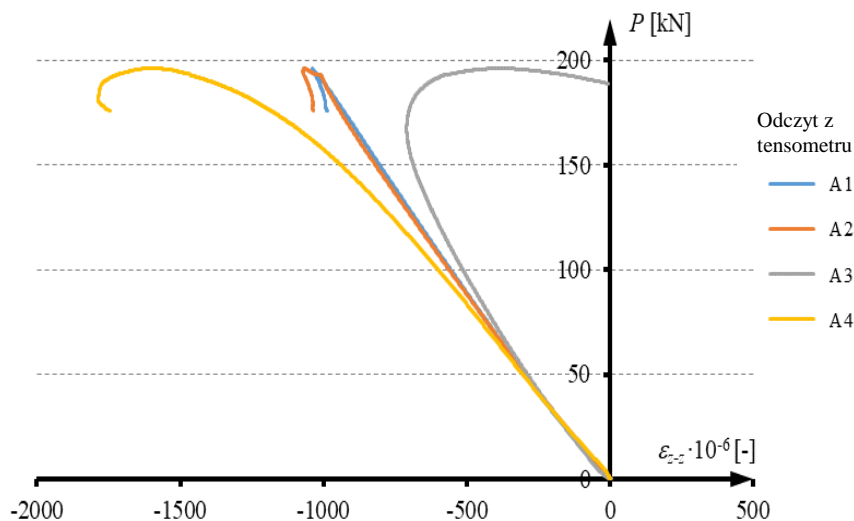
Rys. 4.8. Aparatura pomiarowa zmontowana na ramie podczas badań

Dodatkowo na jednym ze stojaków zamontowano zestaw dwóch czujników przemieszczeń, umieszczonych na wysokości 105 cm od podstawy. Czujniki te zastosowano w celu pomiaru przemieszczeń poziomych stojaka w płaszczyźnie ramy oraz prostopadłych do płaszczyzny ramy. Podczas testu ramy z uszkodzeniem czujniki przemieszczeń umieszczone zostały na stojaku, na którym zostało wytworzone uszkodzenie. Wszystkie wyniki pomiarów łącznie z siłą, zarejestrowane zostały za pomocą analizatora sygnału. Dane zarejestrowane przez wszystkie wspomniane wyżej czujniki były użyte do weryfikacji modeli numerycznych w dalszej części pracy. Na rysunku 4.9 schematycznie zaznaczono rozmieszczenie tensometrów na ramie, w obrębie każdego ze słupków.

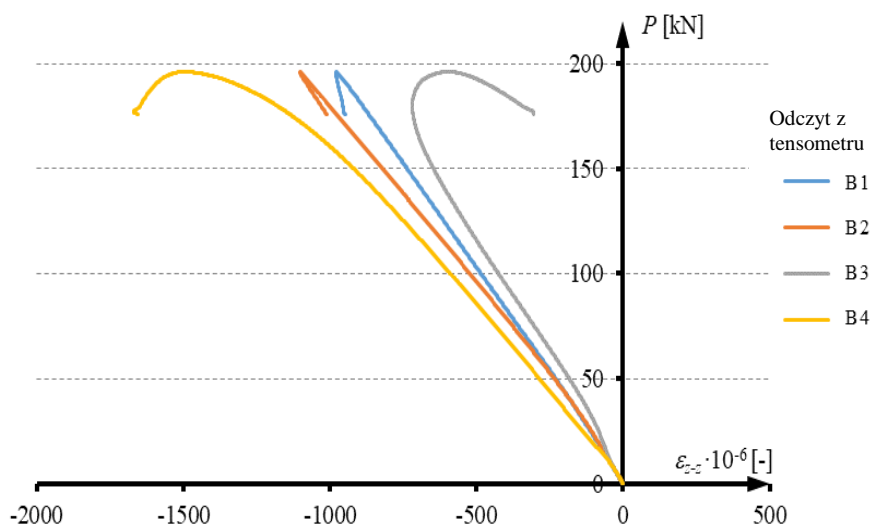


Rys. 4.9. Schemat rozmieszczenia tensometrów na ramie

Wykresy pokazane na rysunku 4.10 i 4.11 przedstawiają wartości odkształceń odczytanych z tensometrów w zależności od siły, zarejestrowanej podczas obciążenia fabrycznie nowej ramy pozbawionej uszkodzeń. Na wykresie pokazanym na rysunku 4.10 umieszczono wyniki z wszystkich tensometrów zamontowanych na jednym słupku ramy, natomiast na rysunku 4.11 umieszczono wyniki z wszystkich tensometrów zamontowanych na drugim stojaku tej samej ramy. Oznaczenia poszczególnych czujników na wykresach przyjęto zgodnie z oznaczeniami pokazanymi na rysunku 4.9.



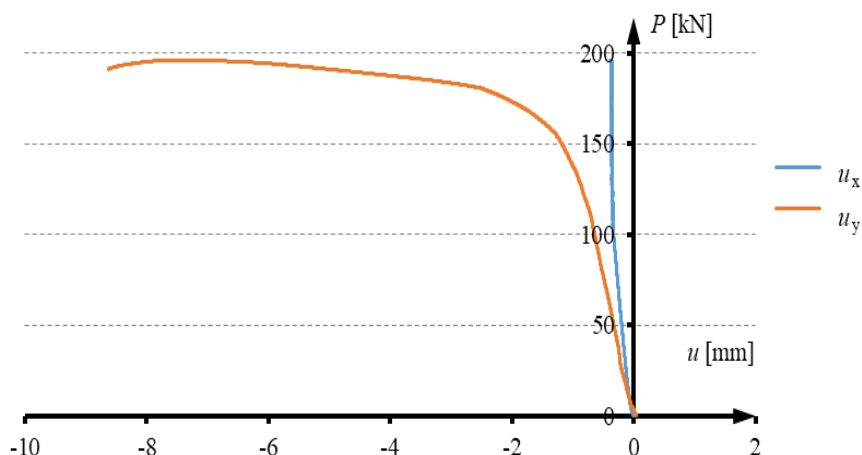
Rys. 4.10. Wynik pomiaru zależności siła-odkształcenie na stojaku A w ramie bez uszkodzeń



Rys. 4.11. Wynik pomiaru zależności siła-odkształcenie na stojaku B w ramie bez uszkodzeń

Z obserwacji układu pomiarowego oraz przeprowadzonej wstępnej analizy numerycznej wynika, że ze względu na symetrię geometrii układu pomiarowego oraz obciążenia, wartości zarejestrowane w obu stojakach w tensometrach, oznaczonych tymi samymi liczbami, powinny być takie same. Różnice między poszczególnymi odczytami wynikają z niedokładności stanowiska badawczego (pionowość układu, umiejscowienie tensometru względem osi słupka, geometryczne odchyłki produkcyjne elementów poddanych obciążeniu), których mimo

staranności wykonania pomiarów nie udało się w pełni uniknąć. Na obu stojakach, w odpowiadających sobie tensometrach, charakter przebiegu badania jest oczywiście taki sam. Obserwujemy jednak pewien rozrzut w uzyskiwanych wynikach. Należy podkreślić, że próba z elementem bez uszkodzeń wydaje się najłatwiejsza do przeprowadzenia i w przypadku pozostałych przebadanych elementów także można się spodziewać pewnych niedoskonałości w uzyskiwanych wynikach.



Rys. 4.12. Wyniki pomiaru przemieszczeń poziomych stojaka B ramy bez uszkodzeń

Poza pomiarem odkształceń na stojakach za pomocą tensometrów, podczas badania mierzono także przemieszczenia poziome jednego ze stojaków. Pomiaru dokonywano za pomocą dwóch czujników przemieszczeń. Oba czujniki zawsze były montowane na stojaku „B”. Poza powyżej przedstawionym przypadkiem to właśnie w tym stojaku wytwarzano uszkodzenia. Pierwszy czujnik o zakresie pomiarowym 20 mm zamontowany był tak, by mierzyć wartość przemieszczenia w płaszczyźnie ramy. Według przyjętego układu współrzędnych są to przemieszczenia zgodne z kierunkiem osi  $x$  ( $u_x$ ). Natomiast drugi czujnik o zakresie pomiarowym 200 mm mierzył przemieszczenia w tym samym punkcie, ale w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy, czyli zgodny z kierunkiem osi  $y$  ( $u_y$ ). Na wykresie pokazanym na rysunku 4.12, przedstawiono wartości zarejestrowanych w ten sposób przemieszczeń, pochodzące z testu ramy bez uszkodzeń. Jak widać, czujnik zlokalizowany w płaszczyźnie ramy (na wykresie jest to przebieg oznaczony  $u_x$ ) podczas całego badania wskazywał wartości bliskie zeru, które można określić jako „szum” czujnika. Oznacza to, że stojaki zgodnie z przewidywaniami podczas tego testu prawie nie doznają deformacji w tym kierunku. Natomiast czujnik mierzący przemieszczenia prostopadłe do płaszczyzny ramy (na wykresie oznaczony jako  $u_y$ ) od samego początku wskazywał niewielki liniowy przyrost przemieszczenia. Jest on prawdopodobnie

wywołany wcześniej wspomnianymi niedoskonałościami układu pomiarowego. Pomiar ten tłumaczy wcześniej pokazane odczyty z tensometrów nr 3 i 4 w stojaku B na rysunku 4.11. Można tam zauważyć już od samego początku pomiaru różnicę rejestrowanych wartości w stosunku do odczytów z tensometrów nr 1 i 2. Świadczy to o tym, że podczas badania, w tym stojaku pojawiło się niewielkie zginanie prawdopodobnie spowodowane mimośrodowym przyłożeniem siły. Pod koniec badania na czujniku obserwujemy gwałtowny wzrost przemieszczeń, co potwierdza spodziewaną formę zniszczenia, czyli wyboczenie się stojaków z płaszczyzny ramy.

Zniszczenie elementu kojarzy się z gwałtownymi procesami destrukcyjnymi takimi jak zerwanie, pęknięcie czy zmiżdżenie. W przypadku obciążenia ramy rusztowaniowej zniszczenie przebiega inaczej. Jako zniszczenie definiujemy sytuację, w której dochodzi do braku możliwości przenoszenia przez element zwiększającego się obciążenia. Podczas przeprowadzonych testów, gdy obciążenie realizowano poprzez liniowy przyrost przemieszczeń trawersu prasy wytrzymałościowej jako granicę nośności uznaje się sytuację, w której występuje maksymalna siła rejestrowana przez prasę. Po przekroczeniu tego punktu obserwujemy spadek rejestrowanej siły. W przypadku próby ściskania tak smukłych elementów granica nośności najczęściej nie jest wyraźnie zaznaczona na wykresach. Jak się okazało, w elementach z uszkodzeniami, w wyniku pojawiania się dodatkowych momentów zginających, ta granica jest jeszcze mniej wyraźna.

Wartość maksymalnej siły, powodującej zniszczenie, w bardzo dużym stopniu zależy od schematu zamocowania elementu. Zakładając, że podczas badania stojaki ramy poddane są działaniu osiowej siły ściskającej, a ewentualne pojawiające się zginanie można uznać za pomijalnie małe to stan naprężenia w przekroju opisać można wzorem (1).

Podstawiając do równania (1) za  $P$ , siłę niszczącą uzyskaną z testu równą 204,2 kN, a za  $A$ , pole powierzchni obu stojaków, czyli 7,736 cm<sup>2</sup> uzyskujemy wartość naprężenia równą 263,9 MPa. Jest to wartość zdecydowanie niższa niż granica plastyczności stali, z której wykonana jest rama. Dlatego, w tym przypadku, to nie wytrzymałość materiału decyduje o nośności badanego elementu, a utrata stateczności przy sile o wartości zbliżonej do wyznaczonej ze wzoru:

$$P_k = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (3)$$

gdzie:  $E$  – moduł sprężystości,  $I$  – moment bezwładności,  $\mu$  – współczynnik długości zależny od schematu zamocowania,  $l$  – długość elementu. W pracy [53] znajduje się dokładny opis matematyczny tego zjawiska i wzór na siłę krytyczną, który podano tu jako wzór (3). Dla pręta obustronnie zamocowanego przegubowo, współczynnik długości wyboczeniowej wynosi  $\mu=1$ . Podstawiając do równania (3) wszystkie stałe oraz taką wartość współczynnika,

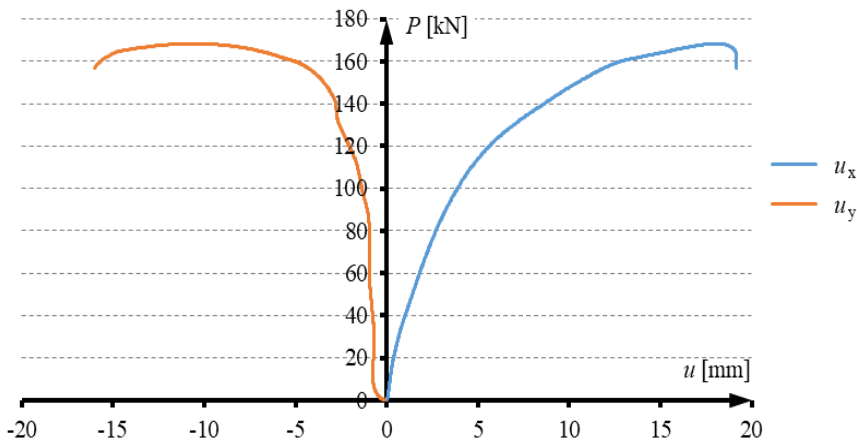
otrzymujemy siłę krytyczną o wartości 97,6 kN. Jest to wartość zdecydowanie niższa od siły powodującej zniszczenie elementu podczas badania. Natomiast dla pręta obustronnie utwierdzonego współczynnik  $\mu$  przyjmuje wartość równą 0,5. Podstawienie tej wartości do równania daje wynik 390,3 kN, co znowu jest wartością znacznie przekraczającą wartość uzyskaną z badań. Jest to także wartość zdecydowanie większa od wartości obciążenia, która powoduje pełne uplastycznienie materiału w przekroju. Wzór (3) obowiązuje oczywiście dla pręta o stałym przekroju. W przypadku ramy to założenie nie jest spełnione, gdyż stojaki na pewnych odcinkach są wzmocnione przez elementy poprzeczne. Jednak wpływ tych elementów jest na tyle niewielki, że wzór ten można traktować jako bardzo bliskie przybliżenie. Z obliczeń tych wynika, że podczas przeprowadzonych badań, zamocowania stojaków ramy nie można traktować ani jako obustronnego utwierdzenia, ani jako zamocowania przegubowego. Wynika z tego, że mamy do czynienia z sytuacją pośrednią, co jest bardzo ważnym wnioskiem przed próbą odwzorowania eksperymentu przy użyciu modelowania numerycznego, która będzie przeprowadzona w dalszej części pracy.

Poza przedstawionym wyżej elementem, badaniu poddano jeszcze 7 ram. W tych elementach zostały wytworzone uszkodzenia w postaci wygięcia jednego ze stojaków ramy. W czterech z nich wygięcie zrealizowano w płaszczyźnie ramy, a w pozostałych trzech z płaszczyzny ramy. Jeżeli chodzi o wielkość uszkodzeń, wprowadzonych do elementów poddanych obciążeniu podczas badań, to zaplanowano, że maksymalna wielkość trwałych deformacji na stojaku będzie wynosić około 40 mm. Decyzja ta spowodowana była wywiadem przeprowadzonym wśród pracowników firm zajmujących się wypożyczaniem rusztowań. W firmach tych ramy o uszkodzeniach takiej wielkości i większych były eliminowane z dalszego użytkowania. Co ciekawe, nie były one eliminowane trwale, tylko odsprzedawane małym, prywatnym przedsiębiorcom. Teoretycznie mniejsze firmy wykorzystują te elementy do budowy mniejszych konstrukcji o niskim stopniu wyężenia elementów. W praktyce, elementy te faktycznie dalej są użytkowane we wszystkich możliwych układach, w których mogą występować także duże wyężenia poszczególnych elementów.

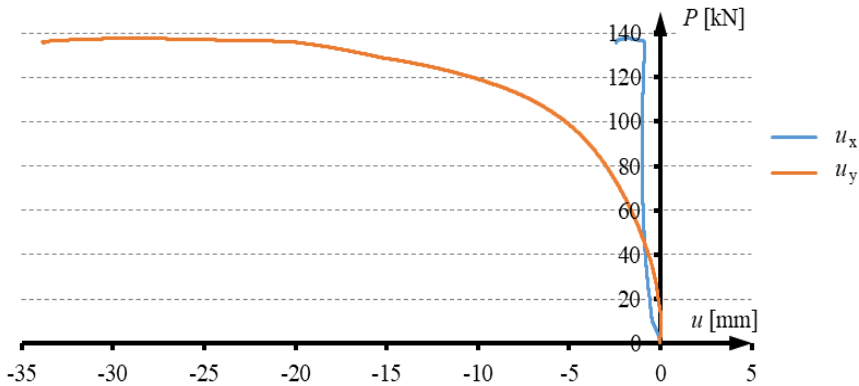
Ostatecznie, w badaniach obciążeniu poddano jeden element nieposiadający uszkodzeń. Przebadano także trzy elementy z uszkodzeniem o wielkości 38mm, w dwóch z nich uszkodzenie było zrealizowane w płaszczyźnie ramy, a w trzeciej z płaszczyzny ramy. Przebadano też cztery elementy z pośrednią wielkością uszkodzeń, dwa z uszkodzeniem o wielkości 24 mm, znajdującym się w płaszczyźnie ramy, a także z wytworzonymi uszkodzeniami o kierunku prostym do płaszczyzny ramy o wielkościach 18 mm i 24 mm.

W pracy przedstawione zostały wyniki dla ramy z uszkodzeniem o wielkości 24 mm. Na rysunkach od 4.13 do 4.18 pokazano wyniki przeprowadzonych badań dla tych dwóch wybranych ram z uszkodzeniami. Pierwsze trzy z nich przedstawiają wykresy z wynikami dla ramy z uszkodzeniem w płaszczyźnie

ramy. Rysunek 4.13 przedstawia przemieszczenia poziome rejestrowane przez czujniki przemieszczeń. Jak widać czujnik oznaczony jako  $u_x$ , czyli ten, który mierzy poziome przemieszczenia stojaka w płaszczyźnie ramy, inaczej niż we wcześniej przedstawionym przypadku, naturalnie pokazywał zdecydowanie większe wartości w całym zakresie badania. Jest to oczywiste, ponieważ uszkodzenie w elemencie powoduje wystąpienie momentu zginającego w stojaku, a to powoduje wzrost przemieszczenia w tym kierunku. Drugi z czujników na tym stojaku od początku i przez większą część badania nie wykazywał przyrostu przemieszczeń. Niewielki przyrost na samym początku badania jest wywołany „układaniem się elementu” pod obciążeniem w początkowej jego fazie. To samo zjawisko możemy zaobserwować na rysunku 4.14, z tą różnicą, że na przeciwnych czujnikach.

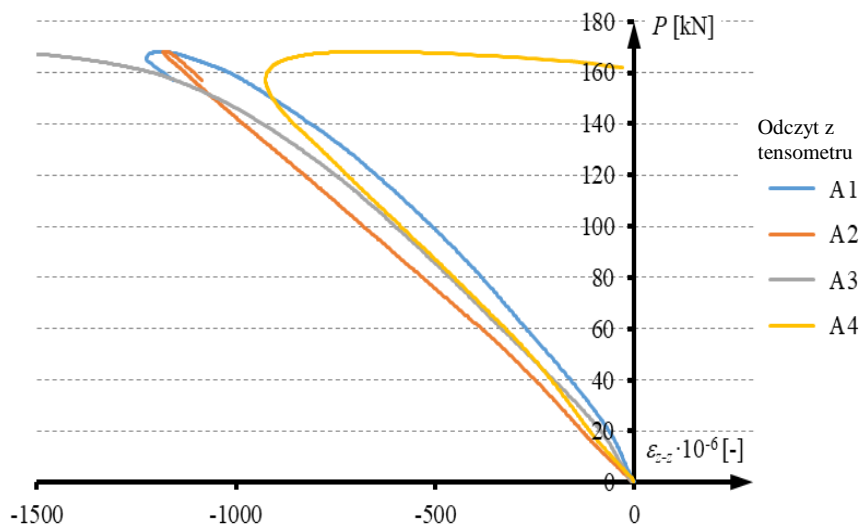


Rys. 4.13. Wyniki pomiaru przemieszczeń poziomych stojaka B ramy z wygięciem w płaszczyźnie ramy o wielkości 24 mm

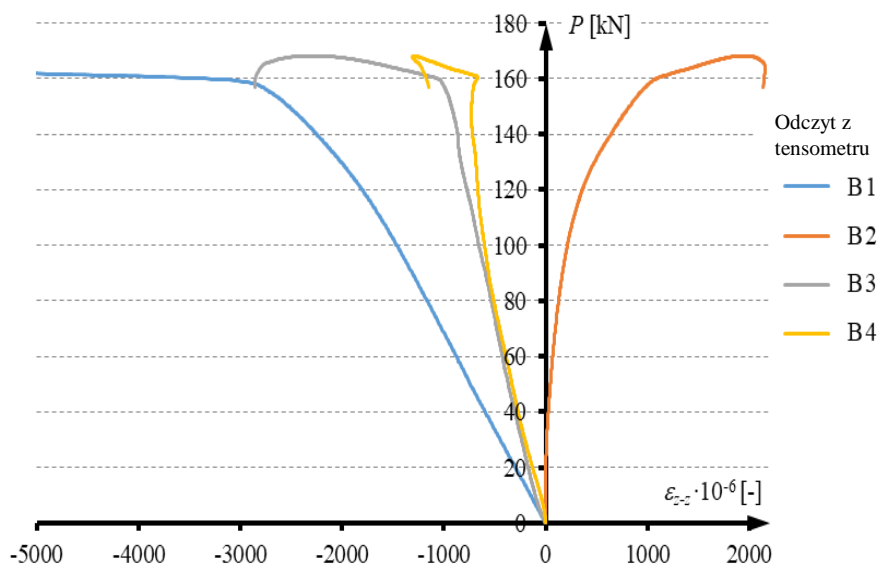


Rys. 4.14. Wyniki pomiaru przemieszczeń poziomych stojaka B ramy z wygięciem w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy o wielkości 24 mm

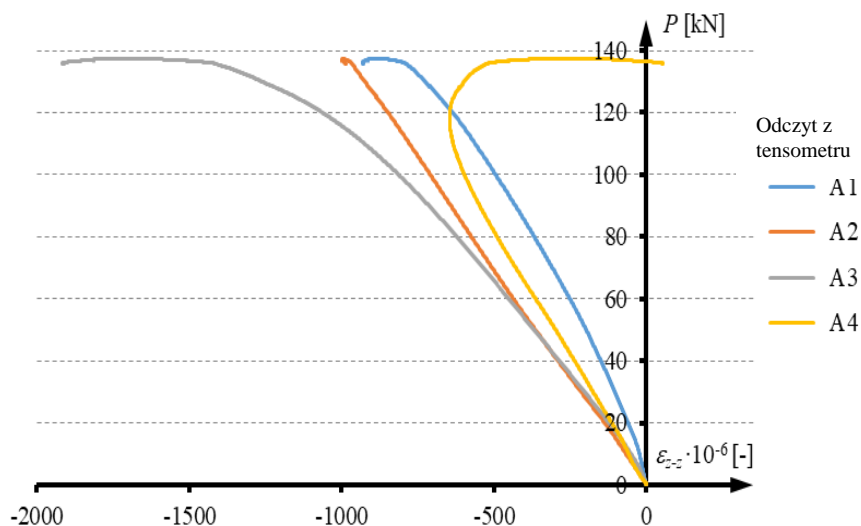




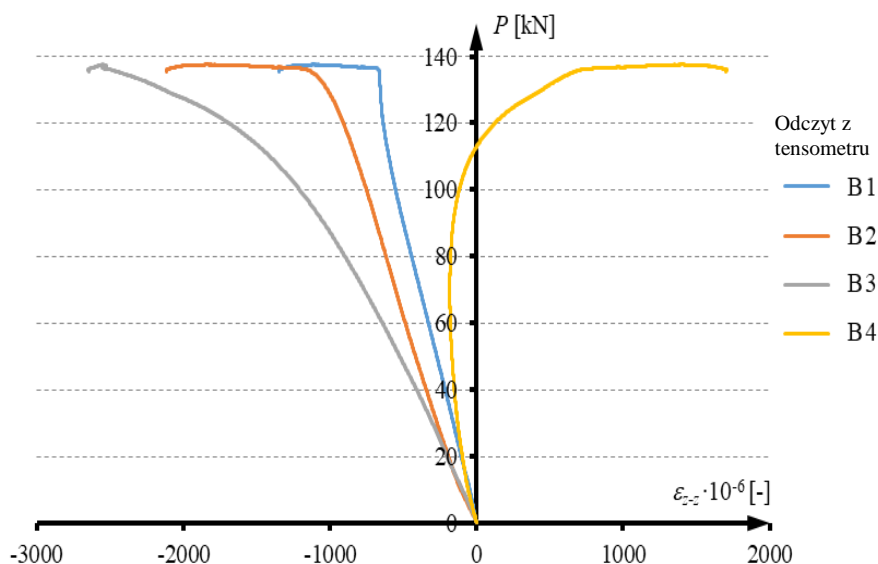
Rys. 4.15. Wynik pomiaru zależności siła-odkształcenie na stojaku A w ramie z wygięciem w płaszczyźnie ramy o wielkości 24 mm



Rys. 4.16. Wynik pomiaru zależności siła-odkształcenie na stojaku B w ramie z wygięciem w płaszczyźnie ramy o wielkości 24 mm



Rys. 4.17. Wynik pomiaru zależności siła-odkształcenie na stojaku A w ramie z wygięciem w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy o wielkości 24 mm



Rys. 4.18. Wynik pomiaru zależności siła-odkształcenie na stojaku B w ramie z wygięciem w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy o wielkości 24 mm

Wartości odkształceń ze słupka A pokazano na rysunku 4.15 oraz na rysunku 4.17. Jak widać przebieg linii opisujący wartości z poszczególnych czujników rozmieszczonych na tym stojaku w obu przypadkach jest zgodny z tym, co mogliśmy zaobserwować w ramie bez uszkodzeń. To znaczy, że na wszystkich

odczytach przez większość badania obserwujemy równomierny przyrost odkształceń ściskających, przy zachowaniu zbliżonych do siebie wartości na wszystkich czujnikach. Na koniec, tak jak poprzednio w parze czujników oznaczonych numerami 3 i 4, na jednym odczycie obserwujemy gwałtowny wzrost, a na drugim odczycie gwałtowny spadek wartości odkształcenia. Oznacza to utratę stateczności elementu z formą wyboczenia, w której stojaki wyginają się w kierunku prostopadłym do płaszczyzny elementu, czyli że forma zniszczenia elementu mimo wprowadzenia uszkodzenia pozostała bez zmian. Uwagę zwracają jedynie wartości z czujnika A1 na rysunku 4.17. W całym przebiegu wyraźnie różnią się od pozostałych, co może oznaczać, że wynik z tego tensometru obciążony jest dodatkowym błędem i należy go odrzucić z dalszej analizy. Na stojaku B, czyli tym, na którym wprowadzone zostało uszkodzenie, możemy zaobserwować istotne zmiany w odniesieniu do wyników ramy bez uszkodzenia. Tutaj zdecydowanie zauważalny jest efekt działania momentu zginającego spowodowanego występowaniem uszkodzenia. Moment ten powoduje znaczną, pogłębiającą się w trakcie badania różnicę w odczytach na czujnikach leżących na kierunku uszkodzenia. To właśnie ten efekt decyduje o zmniejszeniu nośności całej ramy.

## 4.4 Podsumowanie

Przeprowadzone badania dostarczyły dużo informacji o zachowaniu elementów podczas obciążenia siłą ściskającą ram rusztowań ramowych. W badaniach fragmentów rur potwierdzono charakterystyki materiałowe rury, z której zrobione są stojaki ramy, co ma kluczowe znaczenie przy tworzeniu modeli i analizie numerycznej. Podczas analizy wyników uzyskanych z testów przeprowadzonych na wycinkach rury stwierdzono, że w przypadku uszkodzeń punktowych największe znaczenie ma głębokość deformacji przekroju rury. Zaobserwowano także, że mimo występowania uszkodzenia w badanej próbce poddanej działaniu osiowej siły ściskającej, układ wykazuje bardzo duży zakres sprężysty pracy. Zwrócono jednak uwagę na zmianę nachylenia wykresu w zakresie sprężystym. Decyduje o tym występowanie lokalnych momentów zginających i ma to wpływ na odkształcenia elementu podczas obciążenia.

Po przeprowadzonych testach na pełnych ramach rusztowań z uszkodzeniami widać, że tego typu defekt ma znaczący wpływ zarówno na rozkład, jak i wielkości ekstremalne odkształceń, a co za tym idzie nośność elementu. Stwierdzono, że defekt o tej samej wielkości zlokalizowany w płaszczyźnie ramy powoduje znacznie mniejsze obniżenie nośności niż taki sam, w którym deformacja jest prostopadła do płaszczyzny ramy. Ze względu na błędy jakie mogą występować podczas pomiarów, dalsza analiza wpływu uszkodzeń zostanie wykonana za pomocą obliczeń na modelach numerycznych zweryfikowanych w badaniach.

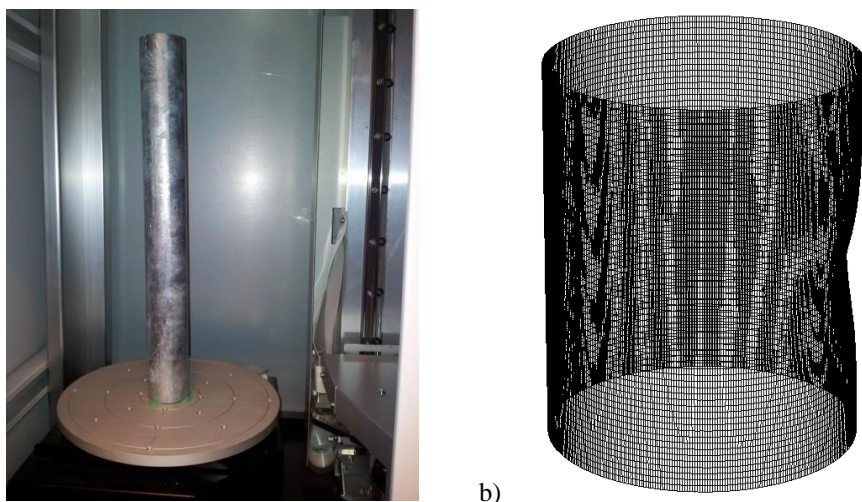
## **5 BADANIA NUMERYCZNE RAM RUSZTOWAŃ BUDOWLANYCH**

Precyzyjne modele numeryczne są często niezbędne zarówno podczas projektowania nowych konstrukcji, a także podczas określania stanu konstrukcji istniejących. Dokładne odwzorowanie złożonej konstrukcji możliwe jest tylko w pewnym zakresie. Ze względu na ograniczenia występujące przy modelowaniu i analizie numerycznej często zachodzi potrzeba stosowania pewnych uproszczeń. Stopień zastosowanych uproszczeń ma wpływ na rodzaj i jakość uzyskiwanych wyników. Analizy wykonane w niniejszej pracy w pierwszym kroku służyły do odwzorowania przeprowadzonych badań. Następnie na tak zweryfikowanych modelach przeprowadzono serię analiz, uwzględniających zmianę wielkości uszkodzenia i jego wpływu na uzyskiwane wyniki. Następnie modele te będą używane do weryfikacji stworzonych modeli o znacznie większym stopniu uproszczenia.

### **5.1 Analiza numeryczna wycinka stojaka**

#### **5.1.1 Przygotowanie modelu wycinka stojaka**

Przygotowanie modelu numerycznego ram zostało poprzedzone opracowaniem metody modelowania uszkodzenia w postaci punktowego wgięcia. Pierwszym etapem opracowania modelu numerycznego uszkodzenia było skanowanie rur z uszkodzeniami w skanerze przestrzennym. Skanowanie każdej próbki przeprowadzono bezpośrednio po wygenerowaniu uszkodzenia, jeszcze przed zamontowaniem uchwytów, pozwalających na przeprowadzenie badania w prasie wytrzymałościowej. Celem skanowania było uzyskanie bardzo precyzyjnych informacji o geometrii defektu. Podejście takie pozwala na określenie geometrii uszkodzenia z dokładnością nawet do 0,1 mm. Dodatkowo, korzystając ze skanera przestrzennego, uwzględniamy nie tylko wielkość i usytuowanie samego uszkodzenia względem osi próbki, ale także takie efekty jak spłaszczenie przekroju poprzecznego w okolicach wytworzonego uszkodzenia oraz zagięcie osi kształtownika. Efektem działania skanera są współrzędne chmury punktów, opisujących zewnętrzną powierzchnię analizowanej próbki. Na rysunku 5.1 pokazano próbkę przed skanowaniem wewnątrz skanera 3D oraz wizualizację skanowanego obszaru przetworzoną przez oprogramowanie skanera.

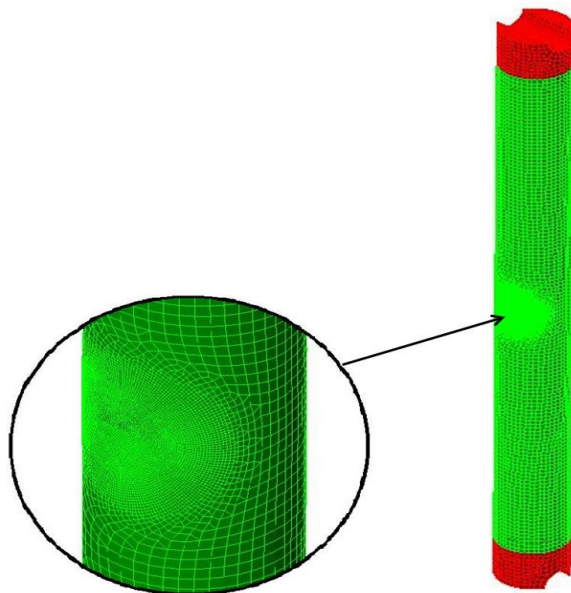


Rys. 5.1. Skanowanie uszkodzenia na wycinku stojaka: a) widok próbki w skanerze, b) wynik skanowania

Wyeksportowany plik ze współrzędnymi punktów wczytano do programu Autodesk AutoCAD. Tam, na podstawie wczytanych punktów, stworzono poziome warstwicę poprzez połączenie punktów leżących na jednym poziomie krzywą sklejaną zwaną splajnem (ang. *spline*). Następnie wykonano skalowanie obiektu w płaszczyznach poziomych na poszczególnych przekrojach tak, aby powierzchnia modelu znalazła się w środku grubości płaszcza rury. W kolejnym etapie stworzono model powłoki poprzez skorzystanie z funkcji „wyciągnięcie złożone”. Funkcja ta tworzy powierzchnię pomiędzy wskazanymi przekrojami. W tym przypadku były to krzywe sklepane poprowadzone przez wczytane punkty. Wspomniane wcześniej skalowanie przekrojów jest niezbędne, gdyż ze skanera uzyskujemy informacje o zewnętrznej powierzchni skanowanej próbki, natomiast w programie obliczeniowym, chcąc zamodelować próbki powierzchniowymi elementami powłokowymi, należy wprowadzić geometrię próbki w powierzchni środkowej elementów. Dwukierunkowe skalowanie względem osi rury na poszczególnych przekrojach w pełni rozwiązuje ten problem. Po wytworzeniu powierzchni o odpowiedniej geometrii na obu jej końcach utworzono także bryły, które modelowały mocowania umożliwiające umieszczenie próbki w prasie wytrzymałościowej. Ostatnim krokiem w przygotowaniu modelu było wczytanie utworzonej powłoki oraz brył bezpośrednio do wykorzystywanego programu obliczeniowego, którym w przypadku niniejszej pracy był Autodesk Simulation Multiphysics w wersji 2013.

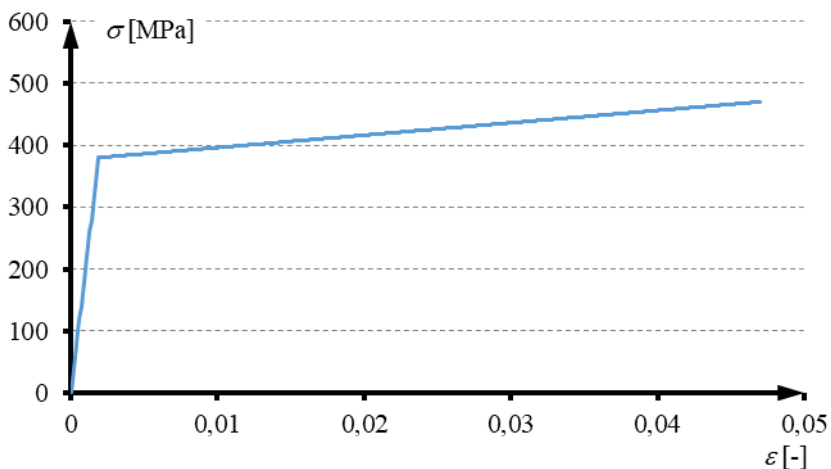
### 5.1.2 Opis badań numerycznych fragmentów rur

W programie obliczeniowym, w obrębie wczytanej powłoki i brył, automatycznie wytworzono siatkę metody elementów skończonych za pomocą generatora siatek programu.



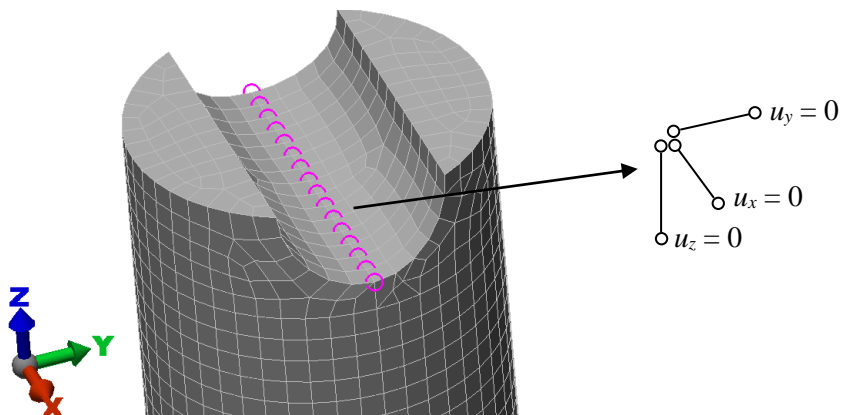
Rys. 5.2. Model numeryczny

W procesie dyskretyzacji modelu w miejscu spodziewanych koncentracji naprężeń, czyli w obrębie uszkodzenia zwiększono liczbę elementów skończonych (zagęszczenie siatki). Model wraz z obszarem, w którym zagęszczono siatkę, pokazano na rysunku 5.2. Do budowy modelu fragmentu rury z uszkodzeniem użyto elementów powłokowych oraz elementów 3D, które w bibliotece programu Autodesk Simulation Multiphysics funkcjonują odpowiednio pod nazwami *Shell* oraz *Brick*. Elementy powłokowe są elementami powierzchniowymi o sześciu stopniach swobody (trzy przesunięcia i trzy obroty) w każdym węźle, zaś elementy przestrzenne mają trzy stopnie swobody (trzy przesunięcia) w każdym węźle. W badaniach numerycznych zastosowano nieliniową analizę statyczną uwzględniającą zarówno nieliniowość materiałową, jak i geometryczną. Przyjęto model materiału z liniowym wzmocnieniem, który pokazano na rysunku 5.3. Charakterystyki materiałowe przyjęto na podstawie badań opisanych w pkt. 4.2.



Rys. 5.3. Model materiału

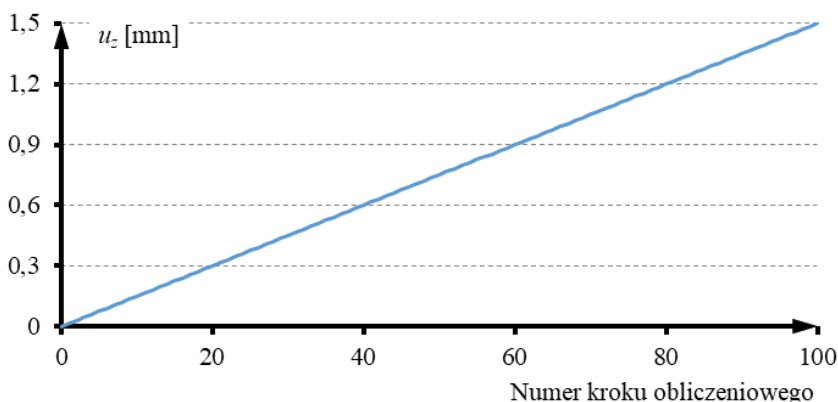
Warunki brzegowe zdefiniowano w ten sposób, żeby model miał swobodę obrotu względem osi  $x$  globalnego układu współrzędnych (rysunek 5.4). Zrealizowano to przy pomocy podpór realizujących blokadę przesuwu we wszystkich trzech kierunkach. Podpory te zostały rozmieszczone liniowo wzdłuż krawędzi przecinającej oś podłużną stojaka. Zamocowanie takie zastosowano na jednym z końców elementu. Schemat tego zamocowania przedstawiono na rysunku 5.4. Na drugim końcu analizowanego elementu przyjęto taki sam układ podpór, z tą różnicą, że zablokowano dwa poziome stopnie swobody  $u_x$  i  $u_y$ , natomiast na kierunku pionowym  $u_z$  pozostawiono możliwość ruchu.



Rys. 5.4. Schemat warunków brzegowych modelu wycinka stojaka

W celu, jak najdokładniejszego odwzorowania sytuacji pomiarowej, obciążenie do modelu przykładano sterując przemieszczeniem. Obciążenie

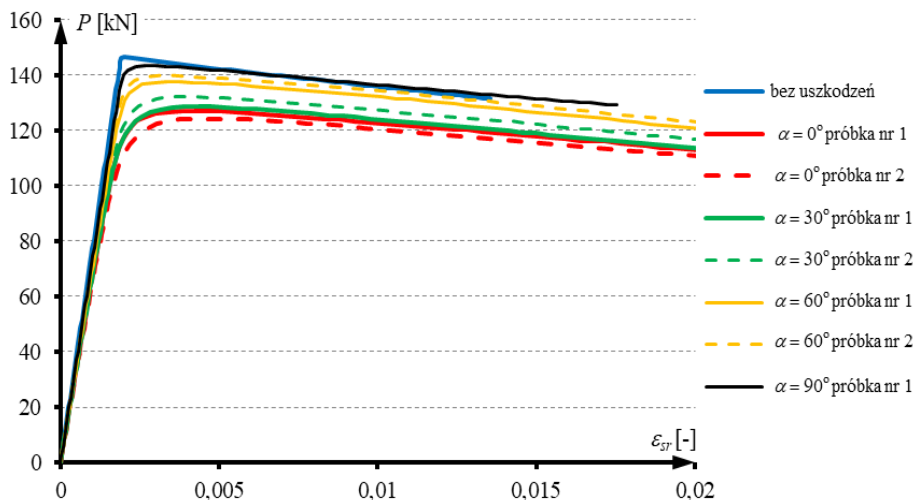
zrealizowano za pomocą wymuszenia geometrycznego w węzłach. Wymuszenie to wprowadzono w tych węzłach, w których zdefiniowano podpory bez blokady przemieszczeń w kierunku pionowym wzdłuż osi  $z$ . Obciążenie miało zdefiniowany liniowy charakter przyrostu. W każdym z kroków obliczeniowych wartość przemieszczenia zwiększano o 0,015 mm. Wykres zmian obciążenia w poszczególnych krokach pokazano na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Przyrost obciążenia w kolejnych krokach obliczeniowych

W ramach pracy, stworzono modele numeryczne wszystkich próbek przebadanych w laboratorium. Pierwszą przeprowadzoną analizą była symulacja obciążenia elementu bez uszkodzeń. W tym przypadku analizę numeryczną przeprowadzono oczywiście na jednym modelu i w dalszej części pracy wyniki z tej symulacji będą porównywane z dwoma próbkami bez uszkodzeń przebadanymi w laboratorium. W pozostałych przypadkach każda z przebadanych próbek miała swoje odwzorowanie w osobnym modelu. Mimo że uszkodzenia w dwóch próbkach były wytworzone taką samą siłą, przyłożoną pod tym samym kątem, to nieznacznie się one od siebie różniły. W przypadku próbek z uszkodzeniami, obliczenia przeprowadzono w odniesieniu do modeli, w których uszkodzenia były wprowadzone trzema metodami. W pierwszym początkowym modelu, próbę odwzorowania doświadczenia zaplanowano jedynie poprzez wprowadzenie precyzyjnych danych dotyczących geometrii w obrębie uszkodzenia. Oś rury natomiast przyjęto jako linię prostą. Wyniki z tego etapu symulacji pokazano na rysunku 5.6. Wartość  $\varepsilon_{sr}$  w obliczeniach została wyznaczona tak samo, jak w badaniach laboratoryjnych, czyli ustalono ją na podstawie pomiaru zmiany odległości pomiędzy dwoma punktami zgodnie z równaniem (2). Punkty wybrane do wyznaczenia  $\varepsilon_{sr}$  na poszczególnych próbkach w obliczeniach miały dokładne takie same położenie, jak punkty w badaniach laboratoryjnych.





Rys. 5.6. Zależności siła-skrócenie względne uzyskane w obliczeniach ściskania rur, uwzględniających kształt uszkodzenia

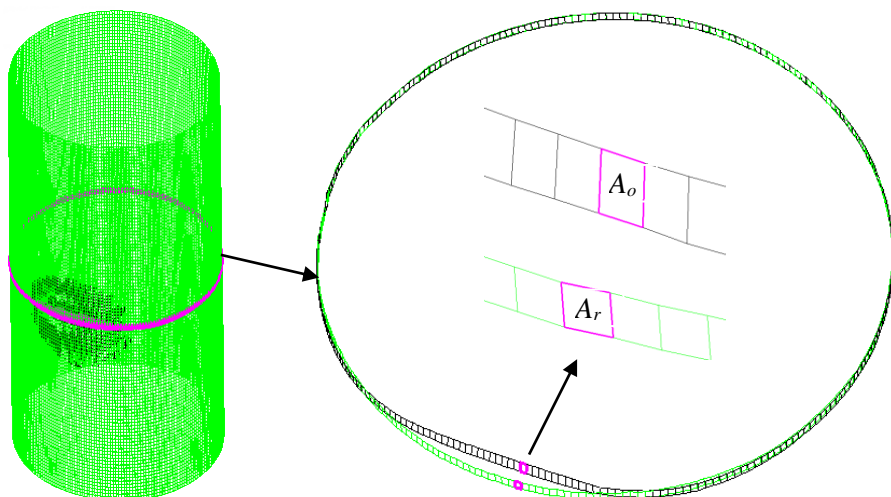
Następnie rozważono dwie inne metody modelowania uszkodzenia. Do stworzonych modeli początkowych za pomocą pierwszej metody, wprowadzono dodatkowe modyfikacje. W obu kolejnych metodach uwzględniono zmianę grubości ścianki rury w miejscu uszkodzenia oraz dodatkowo na podstawie danych ze skanera, uwzględniono zakrzywienie osi rury. Strzałka wychylenia wspomnianego zakrzywienia, w żadnej z analizowanych próbek nie przekroczyła wartości 1,5 mm. Geometria uzyskana podczas skanowania rury przed badaniem przedstawia zewnętrzną powierzchnię rury w formie współrzędnych punktów, znajdujących się na poziomach rozłożonych co 1 mm. Skanowanie zostało wykonane na odcinku 10 cm, czyli uzyskano 101 poziomów punktów. Na podstawie skrajnych, górnego i dolnego, poziomów punktów wygenerowany został referencyjny model pozbawiony uszkodzeń. Promień rury został obliczony na podstawie dziesięciu skrajnych poziomów skanowania na każdym jej końcu (w tej strefie wygenerowane uszkodzenie nie ma znaczącego wpływu na geometrię przekroju poprzecznego rury). Następnie każdy punkt modelu pochodzący ze skanowania rzutowano wzdłuż promienia na powierzchnię rury modelu referencyjnego. W ten sposób obliczono odległości poszczególnych punktów przed i po wygenerowaniu uszkodzenia, rysunku 5.

Opracowano dwa sposoby wprowadzania uszkodzonego obszaru do modelu numerycznego. W drugim modelu uwzględnianie uszkodzeń opiera się na zmianie powierzchni elementów odkształconych  $A_o$  modelu skanowanej rury w odniesieniu do powierzchni referencyjnej  $A_r$ , odpowiadających im elementów w modelu nie uwzględniającym uszkodzenia. Obliczone zostały stosunki

powierzchni odpowiadających sobie elementów. Na tej podstawie, zachowując objętość materiału, dobrano grubość każdego elementu ze wzoru:

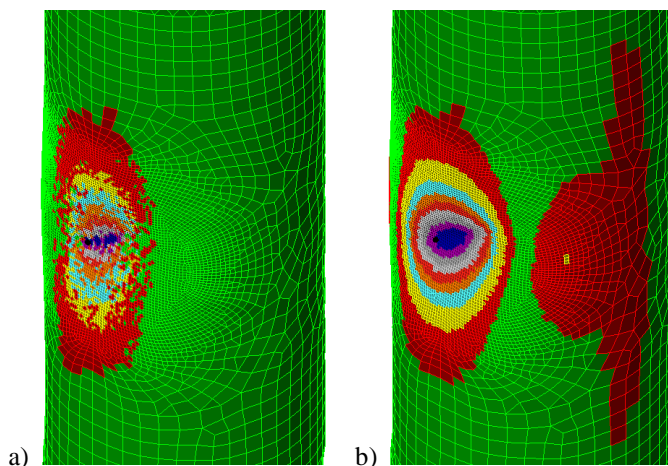
$$g_o = \frac{A_r g_r}{A_o} \quad (4)$$

gdzie:  $g_r$  – grubość ścianki elementu modelu referencyjnego,  $g_o$  – grubość ścianki elementu modelu odniesienia,  $A_r$  – pole powierzchni elementu modelu referencyjnego,  $A_o$  – pole powierzchni elementu modelu odkształconego. Na rysunku 5.7 pokazano przykładową parę elementów, dla których wykonano taką analizę. Ostatecznie w modelu nie definiowano grubości osobno dla każdego elementu, tylko stworzono 10 przedziałów grubości elementów, do których przypisano poszczególne elementy.



Rys. 5.7. Porównanie pól powierzchni w modelu referencyjnym i modelu odkształconym w celu doboru grubości elementu w miejscu uszkodzenia

Do budowy trzeciego modelu zastosowano metodę uproszczoną, która oparta jest o przemieszczenia węzłów rury odkształconej w stosunku do referencyjnej powierzchni. Im większe przemieszczenia elementu w uszkodzeniu, tym większa została wprowadzona zmiana grubości rury. Następnie, podobnie jak w modelu drugim, utworzono 10 przedziałów z liniowym spadkiem grubości zaczynając od nominalnej grubości ścianki rury, czyli 2,7 mm. Grubość w pozostałych przedziałach dla każdej próbki osobno, została dobrana tak, aby objętość materiału w całym modelu była taka sama, jak w modelu nieposiadającym uszkodzenia. Na rysunku 5.8 pokazano podział na grupy elementów w modelu numerycznym przykładowej próbki.

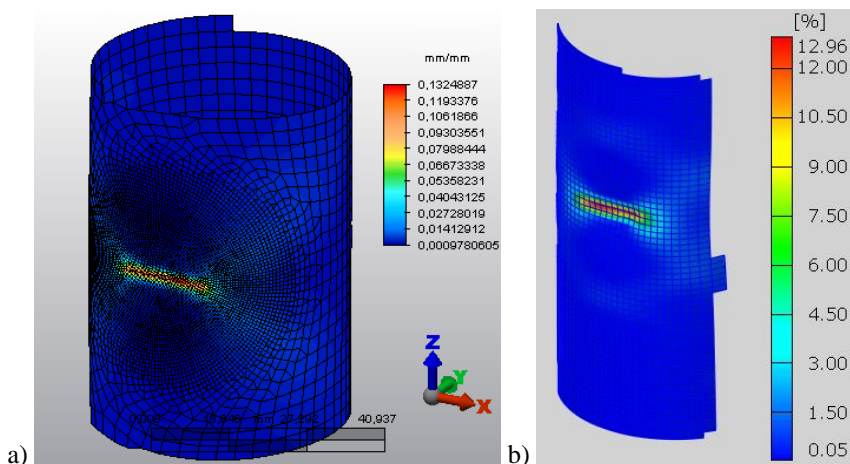


Rys. 5.8. Podział na grupy elementów w modelach numerycznych wycinka stojaka: a) druga metoda modelowania uszkodzenia, b) trzecia metoda modelowania uszkodzenia

W dalszej części pracy modele rur z uszkodzeniami modelowanymi metodą pierwszą będą nazywane modelami V1, metodą drugą – modelami V2 i metodą trzecią – modelami V3.

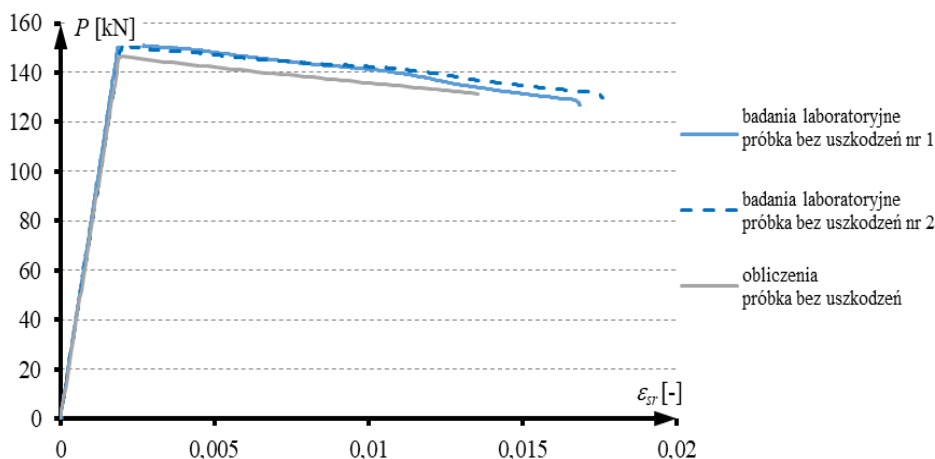
### 5.1.3 Porównanie wyników badań laboratoryjnych i numerycznych wycinka rury

W pierwszej kolejności porównano wyniki z badań przeprowadzonych na wycinkach stojaków. Na rysunku 5.9 zestawiono przykładowe mapy rozkładu odkształceń. Grafika po lewej stronie na rysunku 5.9 przedstawia wyniki uzyskane z analizy numerycznej. Wyniki te pochodzą z modelu V1, w którym uwzględniono jedynie kształt uszkodzenia bez wprowadzania dodatkowych zmian. Na rysunku po prawej natomiast pokazano obraz z testu przeprowadzonego na rzeczywistym elemencie w laboratorium, uzyskany z analizy programu, służącego do optycznego pomiaru odkształceń ARAMIS. Oba obrazy pochodzą z kroku obliczeniowego i etapu, w którym zarejestrowano maksymalną siłę. Jak widać zarówno rozkład naprężenia, jak i wielkości w charakterystycznych obszarach wykazują bardzo dużą zgodność. Zgodność taką zaobserwowano na wszystkich przebadanych próbkach.



Rys. 5.9. Rozkład odkształceń na próbce z uszkodzeniem nachylonym pod kątem  $\alpha = 0^\circ$ , a) analiza numeryczna, b) badanie laboratoryjne z użyciem optycznego systemu pomiaru odkształceń

Następnie porównano wyniki za pomocą zależności pomiędzy siłą a uśrednionymi odkształceniami. Wartość uśrednionego odkształcenia ustalono na podstawie pomiaru zmiany odległości pomiędzy parą punktów obejmujących obszar uszkodzenia. W pierwszej kolejności porównano wyniki elementów bez uszkodzeń.



Rys. 5.10. Porównanie wyników zależności siła-odkształcenie średnie, uzyskanych z analizy numerycznej i testu laboratoryjnego dla elementów bez uszkodzeń

W tym przypadku oczekiwano bardzo wysokiego poziomu zgodności. Jak widać na rysunku 5.10, w początkowych fazach eksperymentu, gdzie obserwu-

jemy liniową zależność siła-odkształcenie, różnice wartości uzyskanych z obliczeń w stosunku do tych z eksperymentu laboratoryjnego, nie są większe niż różnice pomiędzy poszczególnymi próbkami przebadanymi w rzeczywistości. Czyli można stwierdzić, że obliczenia w pełni odwzorowują przeprowadzony test.

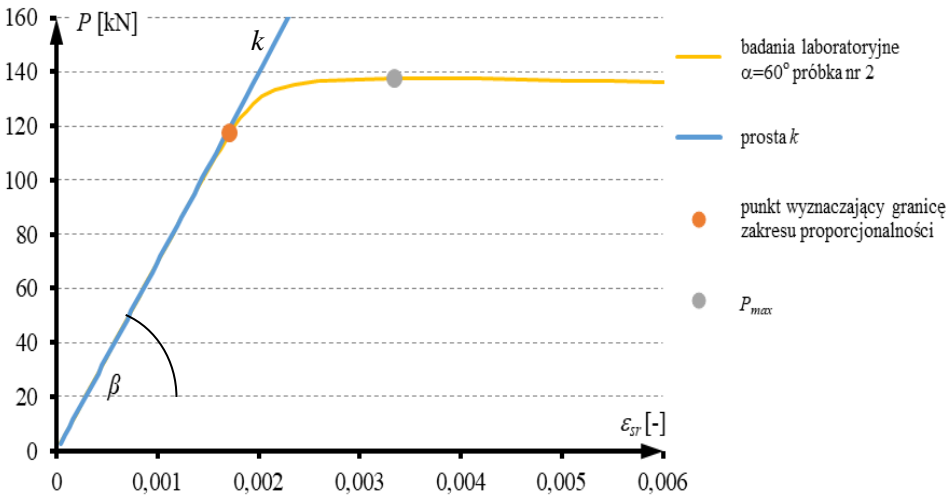
Zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i w obliczeniach, po osiągnięciu wartości siły krytycznej obciążenia obserwujemy gwałtowne załamanie na wykresie. Niewielka różnica pojawia się właśnie w maksymalnej wartości siły  $P$ , która powoduje zniszczenie elementu, definiowane jako brak zdolności do przenoszenia zwiększających się sił normalnych. Jednak różnica pomiędzy wartością uzyskaną z obliczeń a maksymalną z eksperymentu wynosi zaledwie 3,2%. Po przekroczeniu wartości maksymalnej siły i załamaniu wykresu także obserwujemy zgodność charakteru przebiegu wszystkich wykresów  $P$ - $\varepsilon_{sr}$ . Po przeanalizowaniu tego rysunku można stwierdzić, że wszystkie parametry modelu numerycznego zostały poprawnie przyjęte i zdefiniowane.

Następnie na rysunku 5.12, 5.13 i 5.14 przedstawiono takie samo porównanie, ale w odniesieniu do wyników uzyskanych dla elementów, w których zostało wytworzone uszkodzenie. Wyniki umieszczono na trzech rysunkach dla większej przejrzystości i ułatwienia ich analizy. Na wykresach tych zestawiono wyniki badań laboratoryjnych z wynikami obliczeń przeprowadzonymi na modelach V1, w których próbę odwzorowania doświadczenia zaplanowano jedynie poprzez wprowadzenie precyzyjnych danych dotyczących geometrii uszkodzenia. Wyniki z tego etapu porównania zestawiono także w tabeli 5.1.

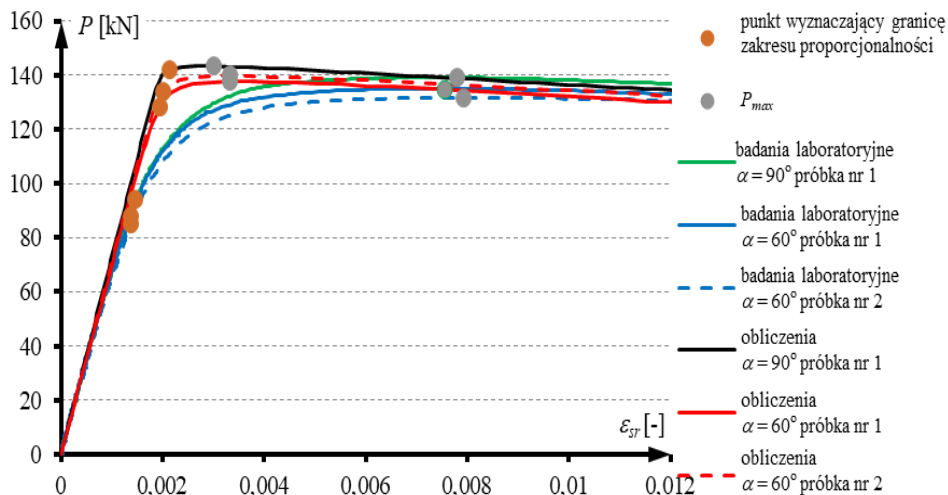
W otrzymanych zestawieniach wskazano trzy parametry określające zgodność uzyskanych wyników (rysunek 5.11). Pierwszym jest maksymalna siła ( $P_{max}$ ) w każdym z przypadków. Drugim jest tangens kąta  $\beta$ , gdzie  $\beta$  jest kątem nachylenia prostej  $k$ , wyznaczającej zakres proporcjonalności na wykresie. Trzecim jest punkt załamania wykresu, określający koniec zakresu proporcjonalności na wykresie. Równanie prostej  $k$  dla każdego z przypadków jest zgodne z równaniem linii trendu wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów dla wyników z zakresu siły 0-50 kN. Natomiast punkt, wyznaczający granicę zakresu proporcjonalności na wykresie, został wyznaczony na podstawie porównania  $\varepsilon_{sr}$  pomiędzy prostą  $k$  a otrzymanymi wynikami. Punkt wyznaczający granicę zakresu proporcjonalności we wszystkich przypadkach określono w miejscu, gdzie różnica odkształceń pomiędzy prostą  $k$  i wynikami analizowanego przypadku przekroczyła wartość  $1 \cdot 10^{-4}$ . Przykładowe graficzne przedstawienie parametrów określających zgodność porównania wybranego przypadku wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych, pokazano na rysunku 5.11.

Tab. 5.1. Porównanie wyników badań laboratoryjnych z wynikami obliczeń modeli V1

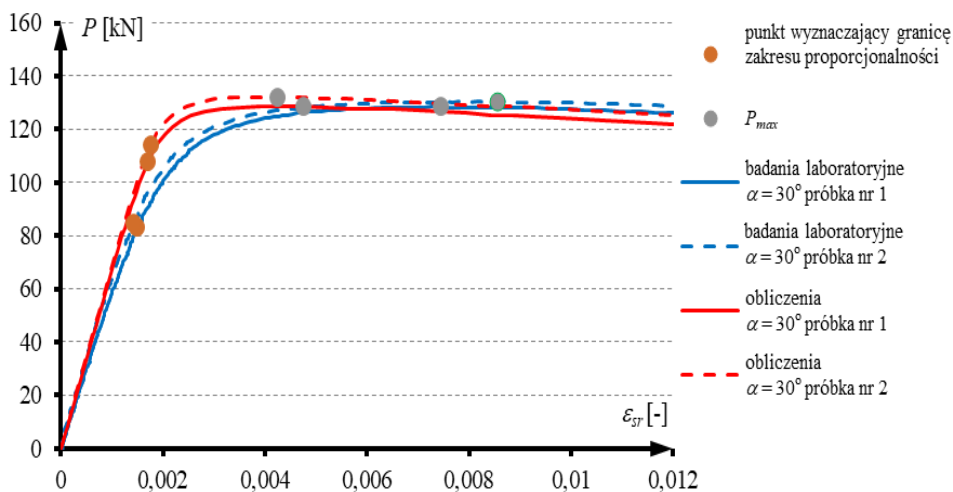
Próbka	Granica proporcjonalności badania [kN]	Granica proporcjonalności obliczenia [kN]	Granica proporcjonalności różnica [%]	$P_{max}$ badania [kN]	$P_{max}$ obliczenia [kN]	$P_{max}$ różnica [%]	$tg(\beta)$ badania [kN]	$tg(\beta)$ obliczenia [kN]	$tg(\beta)$ różnica [%]
Bez uszkodzeń nr 1	151,6	146,4	3,4	151,9	146,4	3,6	81134	76993	5,1
Bez uszkodzeń nr 2	150,2	146,4	2,5	150,5	146,4	2,7	77050	76993	0,1
$\alpha = 90^\circ$ nr 1	94,2	141,9	50,6	139,3	143,3	2,9	69368	72913	5,1
$\alpha = 60^\circ$ nr 1	88,1	128,4	45,7	135,1	137,6	1,9	68548	69758	1,8
$\alpha = 60^\circ$ nr 2	84,9	134	57,8	131,8	140	6,2	67070	71416	6,5
$\alpha = 30^\circ$ nr 1	83,3	108	29,7	128,5	128,6	0,1	62518	67363	7,7
$\alpha = 30^\circ$ nr 2	84,8	114	34,4	130,4	132,1	1,3	65054	69070	6,2
$\alpha = 0^\circ$ nr 1	76,8	109,4	42,4	129,3	127,1	1,7	68178	67302	1,3
$\alpha = 0^\circ$ nr 2	90,5	99,3	9,7	130,5	124,3	4,8	61245	65252	6,5



Rys. 5.11. Graficzne przedstawienie parametrów określających zgodność przy porównaniu wyników badań laboratoryjnych i obliczeń

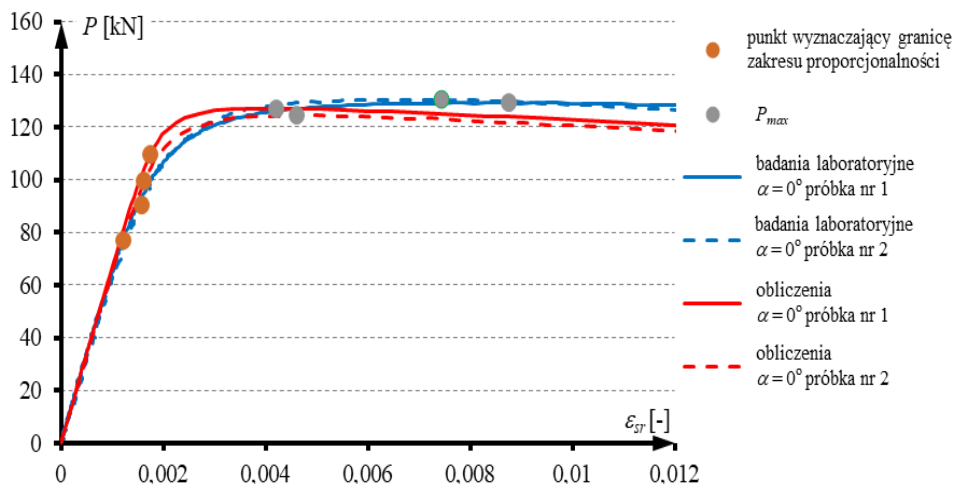


Rys. 5.12. Porównanie wyników zależności siła-odkształcenie średnie, uzyskanych z testu laboratoryjnego i analiz numerycznych modeli V1 elementów z uszkodzeniem  $\alpha = 90^\circ$  i  $\alpha = 60^\circ$



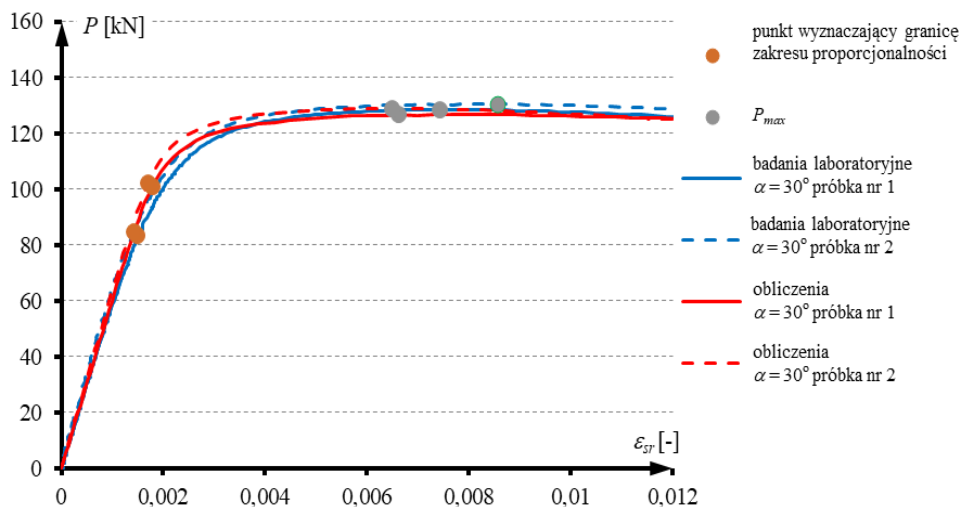
Rys. 5.13. Porównanie wyników zależności siła-odkształcenie średnie, uzyskanych z testu laboratoryjnego i analiz numerycznych modeli V1 elementów z uszkodzeniem  $\alpha = 30^\circ$

Jak widać na rysunku 5.12, rysunku 5.13 i rysunku 5.14, we wszystkich przypadkach uzyskano wysoką zgodność w początkowych fazach testu, czyli tam, gdzie mamy do czynienia z zależnością liniową. Bardzo istotny jest też fakt, że wartość spadku nośności rur posiadających uszkodzenia, względem elementu bez uszkodzeń, także jest porównywalny dla eksperymentu laboratoryjnego i numerycznego.



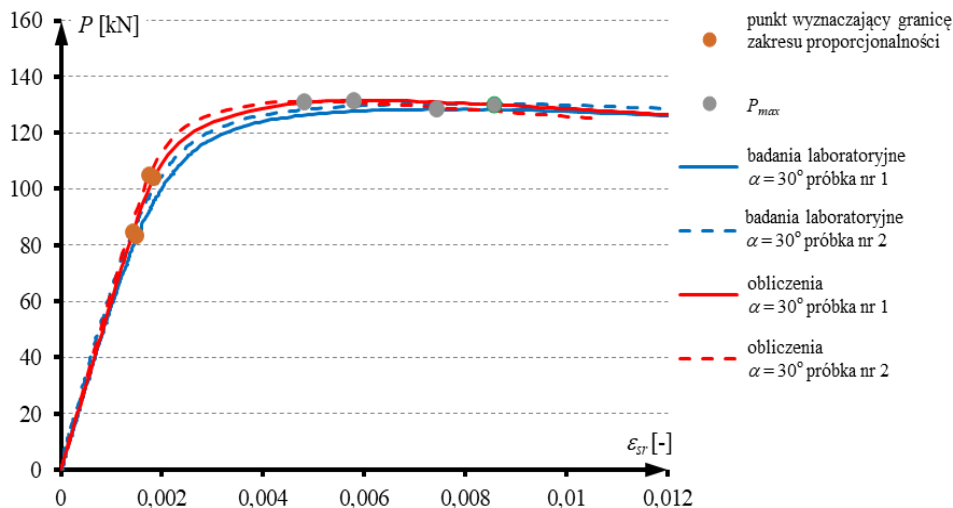
Rys. 5.14. Porównanie wyników zależności siła-odkształcenie średnie, uzyskanych z testu laboratoryjnego i analiz numerycznych modeli V1 elementów z uszkodzeniem  $\alpha = 0^\circ$

Jak widać na powyższych zestawieniach, wyniki pochodzące z analizy numerycznej na tym etapie wykazują charakter liniowy w większym zakresie przyłożonego obciążenia. Widać też wyraźnie, że zjawisko to jest bardziej dostrzegalne dla uszkodzeń, które wywołały mniejsze deformacje w elemencie. Wartości pokazane na rysunku 5.14, czyli wyniki dla rur z uszkodzeniami o największych wartościach deformacji, mają bardziej zbliżone wartości odpowiadające punktowi wyznaczającemu granicę zakresu liniowego.



Rys. 5.15. Porównanie wyników zależności siła-odkształcenie średnie, uzyskanych z testu laboratoryjnego i analiz numerycznych modeli V2 elementów z uszkodzeniem  $\alpha = 30^\circ$





Rys. 5.16. Porównanie wyników zależności siła-odkształcenie średnie, uzyskanych z testu laboratoryjnego i analiz numerycznych modeli V3 elementów z uszkodzeniem  $\alpha = 30^\circ$

Na rysunku 5.15 oraz rysunku 5.16 przedstawiono porównanie graficzne wyników, uzyskanych w badaniach laboratoryjnych z wynikami uzyskanymi odpowiednio dla modeli V2 i V3 wycinków stojaków ram w odniesieniu do elementu z uszkodzeniem o kącie nachylenia  $\alpha = 30^\circ$ .

W tabelach 5.2 i 5.3 zastawiono wartości liczbowe parametrów określających zgodność uzyskanych wyników obliczeń wykonanych w odniesieniu do modeli V2 i V3 z badaniami laboratoryjnymi dla wszystkich przebadanych próbek. Z zestawień tych wynika, że w obu przypadkach zmiany wprowadzone do modelu wyjściowego V1 spowodowały korzystny efekt z punktu widzenia zbieżności uzyskiwanych wyników. W obu przypadkach procentowe różnice między wynikami z badań laboratoryjnych i obliczeń spadły. Spadek ten jest zauważalny dla wszystkich trzech parametrów określających zgodność.

Należy jednak zauważyć, że wyższy poziom zgodności uzyskano stosując metodę redukcji grubości elementów w modelu V2. Szczególnie widoczne jest to na zestawieniach graficznych, gdzie możemy zaobserwować zgodność charakteru przebiegów w całym zakresie badanego odkształcenia. W wynikach uzyskanych dla modelu V2, w odróżnieniu od pozostałych modeli, dodatkowo obserwujemy też dużo większą zbieżność, jeżeli chodzi o wartości odkształceń, przy których występuje maksymalna siła.

Tab. 5.2. Porównanie wyników badań laboratoryjnych z wynikami obliczeń modeli V2

Próbka	Granica proporcjonalności badania [kN]	Granica proporcjonalności obliczenia [kN]	Granica proporcjonalności różnica [%]	$P_{max}$ badania [kN]	$P_{max}$ obliczenia [kN]	$P_{max}$ różnica [%]	$tg(\beta)$ badania [kN]	$tg(\beta)$ obliczenia [kN]	$tg(\beta)$ różnica [%]
$\alpha = 90^\circ$ nr 1	94,2	114,7	21,7	139,3	136,5	2,0	69368	67985	2,0
$\alpha = 60^\circ$ nr 1	88,1	111,1	26,1	135,1	133,8	1,0	68548	65527	4,4
$\alpha = 60^\circ$ nr 2	84,9	103,0	21,3	131,8	135,5	2,8	67070	66788	0,4
$\alpha = 30^\circ$ nr 1	83,3	101,1	21,3	128,5	126,7	1,4	62518	60256	3,6
$\alpha = 30^\circ$ nr 2	84,8	102,2	20,5	130,4	129,0	1,1	65054	64003	1,6
$\alpha = 0^\circ$ nr 1	76,8	96,8	26,1	129,3	128,8	0,4	68178	65500	3,9
$\alpha = 0^\circ$ nr 2	90,5	94,9	4,9	130,5	126,2	3,3	61245	61029	0,4

Tab. 5.3. Porównanie wyników badań laboratoryjnych z wynikami obliczeń modeli V3

Próbka	Granica proporcjonalności badania [kN]	Granica proporcjonalności obliczenia [kN]	Granica proporcjonalności różnica [%]	$P_{max}$ badania [kN]	$P_{max}$ obliczenia [kN]	$P_{max}$ różnica [%]	$tg(\beta)$ badania [kN]	$tg(\beta)$ obliczenia [kN]	$tg(\beta)$ różnica [%]
$\alpha = 90^\circ$ nr 1	94,2	114,7	21,8	139,3	138,1	0,8	69368	68869	0,7
$\alpha = 60^\circ$ nr 1	88,1	119,8	36,0	135,1	137,8	2,0	68548	67584	1,4
$\alpha = 60^\circ$ nr 2	84,9	103,1	21,4	131,8	137,8	4,6	67070	67789	1,1
$\alpha = 30^\circ$ nr 1	83,3	104,0	24,8	128,5	131,6	2,4	62518	60173	3,8
$\alpha = 30^\circ$ nr 2	84,8	105,0	23,9	130,4	131,1	0,5	65054	63980	1,7
$\alpha = 0^\circ$ nr 1	76,8	99,7	29,8	129,3	131,5	1,7	68178	65300	4,2
$\alpha = 0^\circ$ nr 2	90,5	97,6	7,9	130,5	126,2	3,3	61245	64241	4,9

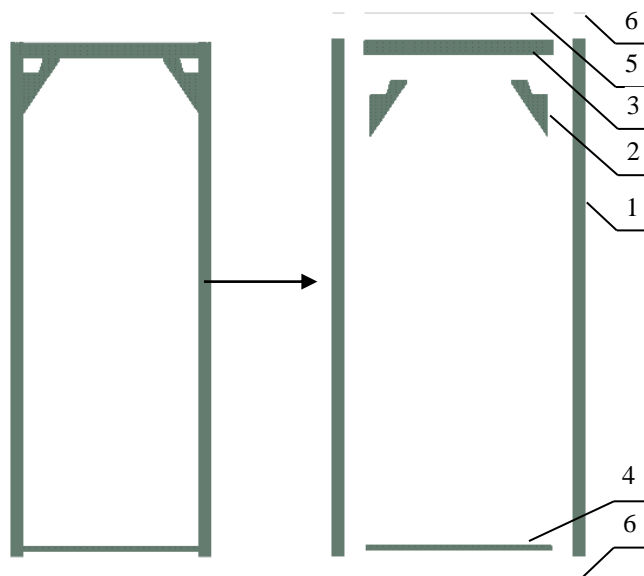
Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały, że wyniki uzyskiwane z obliczeń, w których uszkodzenia w postaci punktowego wgnięcia są modelowane

tylko i wyłącznie poprzez uwzględnienie geometrii uszkodzenia, nie w pełni odwzorowują zachowania rzeczywistego elementu poddanego obciążeniu. Obie zaproponowane metody wprowadzenia zmian grubości elementów w modelu numerycznym, w obrębie uszkodzenia powodują uzyskiwanie wyników o dużo wyższym stopniu zgodności. Najwyższą zgodność uzyskano w obliczeniach przeprowadzonych na modelu V2.

## 5.2 Analiza numeryczna pełnej ramy

### 5.2.1 Przygotowanie modelu i opis analizy

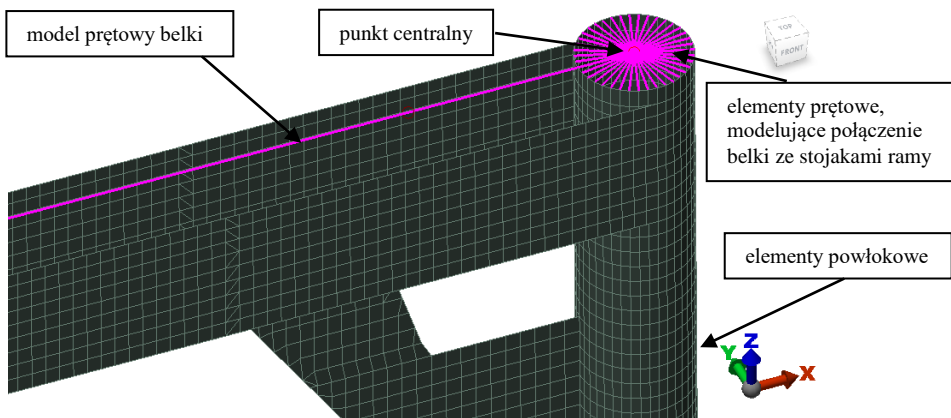
W przeciwieństwie do wcześniej opisanego modelu wycinka stojaka, model całej ramy od początku stworzony został w programie obliczeniowym. W procesie dyskretyzacji modelu nie stwierdzono potrzeby wyróżniania stref, w których potrzebne byłoby zagęszczanie siatki. W całym modelu zastosowano siatkę o wielkości boku oczka około 3-5 mm. Wszystkie elementy konstrukcyjne ramy zostały zamodelowane przy użyciu powierzchniowych elementów powłokowych, funkcjonujących w bibliotekach programu obliczeniowego Autodesk Simulation Multiphysics pod nazwą *Shell*. Fragmenty ramy zamodelowane za pomocą tych elementów zostały oznaczone na rysunku 5.17 numerami od 1 do 4. W modelu użyto także elementów prętowych. Elementami tymi zamodelowana została dodatkowa stalowa belka (nr 5 na rysunku 5.17), za pośrednictwem której w doświadczeniu siła z prasy wytrzymałościowej była przekazywana na stojaki ramy.



Rys. 5.17. Model numeryczny ramy rusztowaniowej

Podczas modelowania nie uwzględniono trzpieni ramy. W rzeczywistej konstrukcji elementy te służą do mocowania kolejnych ram jedna na drugiej. Zapewniają blokadę wzajemnego przesuwu poziomego kolejnych ram. W przypadku analizy pojedynczej ramy trzpienie nie przenoszą żadnych obciążeń, a pełnią tylko funkcję blokady przesuwu, która została uwzględniona przez zastosowanie odpowiednich podpór. Dlatego w obliczeniach pominięto je we wszystkich przeprowadzonych analizach. Kolejnym elementem, który pominięto w modelu numerycznym, są kasety mocujące poręcz. Najczęściej są one umieszczone tylko na jednym ze stojaków ramy. Jednak podobnie jak w przypadku trzpieni, nie mają wpływu na rozkład sił wewnętrznych w pozostałych elementach ramy.

Elementy prętowe w modelu numerycznym posłużyły również do zamodelowania oparcia belki stalowej na górnej krawędzi stojaka (nr 6 na rysunek 5.17). Stosowanie różnych elementów metody elementów skończonych wprowadza problemy związane z ich łączeniem. W tym przypadku zrealizowano to w ten sposób, że z węzłów znajdujących się na obwodzie górnej krawędzi stojaka, czyli na brzegu elementów powłokowych, poprowadzono elementy prętowe do wspólnego punktu, którym jest punkt wyznaczający oś stojaka. Taki układ promieniście rozchodzących się elementów z punktem centralnym w osi stojaka gwarantuje równomierny rozkład obciążenia na stojaki ramy. Eliminuje całkowicie zjawisko miejscowych deformacji, które często towarzyszą próbie połączenia elementów prętowych z powierzchniowymi w modelach numerycznych. Na rysunku 5.18 pokazano elementy prętowe zastosowane w modelu. Jest to przybliżenie górnego węzła modelu ramy.



Rys. 5.18. Elementy prętowe przekazujące obciążenie na stojaki ramy w modelu numerycznym

Dodatkowo takie rozwiązanie daje możliwość zamocowania przegubowego wierzchołka stojaka. Wstawienie blokady przesuwu w punkcie centralnym elementów prętowych pozostawia swobodę obrotu we wszystkich kierunkach.

Również w tym przypadku wyleminowany jest problem punktowego podparcia. Dlatego taki sam układ elementów został zastosowany przy podstawie ramy podczas modelowania oparcia całego elementu. W górnej części modelu, we wszystkich analizowanych przypadkach, zastosowano połączenie przegubowe pomiędzy elementem modelującym belkę stalową a elementami modelującymi jej oparcie na krawędzi stojaka.

Tak samo jak w przypadku fragmentów stojaka, analizę numeryczną całej ramy przeprowadzono z uwzględnieniem nieliniowości materiałowej oraz geometrycznej. Dla wszystkich elementów konstrukcyjnych ramy przyjęto model materiału z liniowym wzmocnieniem, który pokazano na rysunku 5.3. Charakterystyki materiałowe tych elementów przyjęto na podstawie badań opisanych w punkcie 4.2. Charakterystyki geometryczne i materiałowe elementów prętowych przyjęto, jak dla dwuteownika IPE200 wykonanego ze stali S235. Ponieważ taki kształtownik został wykorzystany podczas badań.

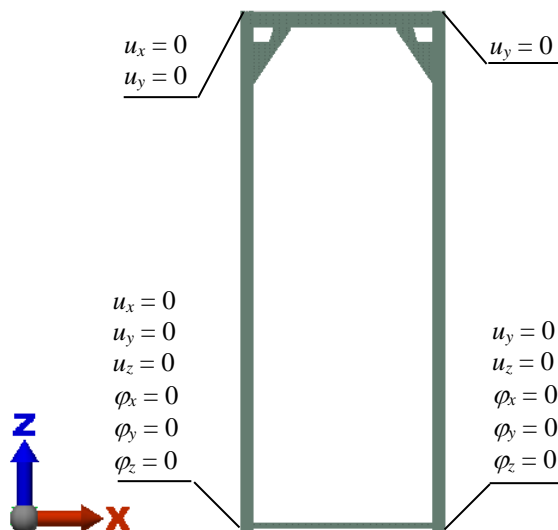
Warunki brzegowe w tym modelu różniły się od siebie w zależności od rozpatrywanego wariantu. Różnice polegały na blokowaniu rotacyjnych stopni swobody w różnych układach. Wszystkie blokady zarówno przesuwów, jak i obrotów, były realizowane w punktach centralnych dodatkowych elementów prętowych na obu końcach obu stojaków ramy.

Obciążenie do modelu ramy także tutaj przykładano sterując przemieszczeniem. Obciążenie zrealizowano przy pomocy zastosowania wymuszenia geometrycznego, zlokalizowanego na środku elementu prętowego, modelującego dodatkową belkę stalową. Obciążenie miało zdefiniowany liniowy charakter przyrostu, to znaczy wzrastało proporcjonalnie w każdym kolejnym kroku obliczeniowym. W każdym z kroków obliczeniowych wartość przemieszczenia zwiększano o 0,05 mm.

W ramach pracy stworzono modele numeryczne wszystkich ram rusztowańowych, które były przedmiotem badań w laboratorium. Wyjściową analizą była symulacja obciążenia elementu bez uszkodzeń. W kolejnych modelach wprowadzono uszkodzenie polegające na wygięciu jednego ze stojaków. Wygięcie to w modelu numerycznym realizowano poprzez przesunięcia węzłów. Wielkość przesunięcia była wprowadzana na podstawie pomiaru dokonywanego na każdym elemencie przed badaniem. Pomiaru dokonywano na całej długości stojaka co 5 cm z dokładnością do 0,1 mm.

Największym wyzwaniem przy tworzeniu modelu całej ramy było dobranie odpowiedniego zamocowania tak, aby wiernie odwzorować warunki podczas testu w laboratorium. Tak jak napisano przy analizie wyników z przeprowadzonych badań, podparcia ramy zdecydowanie nie można przyjąć jako obustronnie przegubowego, ani obustronnie sztywnego zamocowania. Mamy tutaj do czynienia z sytuacją pośrednią. Po wielu próbach z zastosowaniem blokad podatnych na stopniach obrotowych, wizualnej ocenie stanowiska badawczego oraz weryfikacji modelu na podstawie badań laboratoryjnych ustalono, że należy zastosować pełne utwierdzenie przy podstawie ramy i zamocowanie przegubowe

na górnej krawędzi stojaków. Schemat z blokadami poszczególnych stopni swobody, zastosowanymi w modelu, odwzorowującym przeprowadzone badania laboratoryjne, pokazano na rysunku 5.19. Drugim analizowanym wariantem w ramach niniejszej pracy są obliczenia z obustronnym zamocowaniem przegubowym ramy. Jest to najbardziej niekorzystna sytuacja, a ramy w rzeczywistych konstrukcjach w specyficznych, raczej bardzo rzadko występujących sytuacjach, ale jednak mogą pracować właśnie w takim schemacie statycznym. Daje to też dodatkowe informacje o wpływie jednakowego uszkodzenia na osłabienie elementu przy różnym schemacie zamocowania.



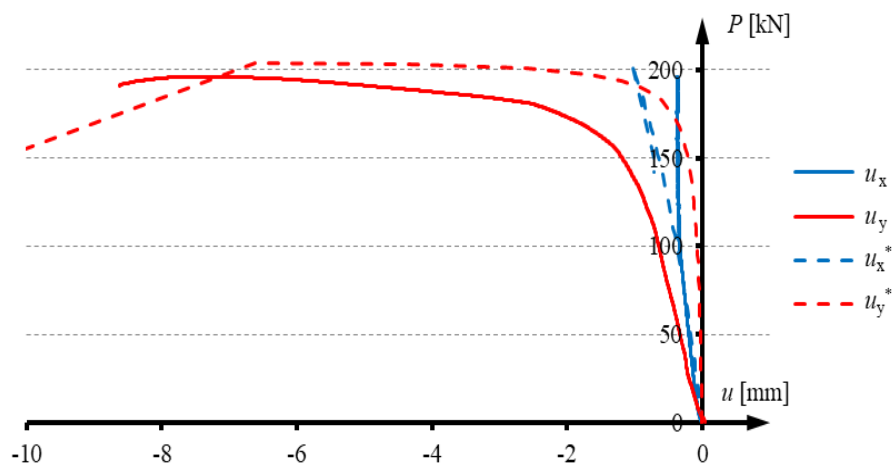
Rys. 5.19. Schemat zamocowania ramy w obliczeniach odwzorowujących sytuację pomiarową

Po zweryfikowaniu założeń modelu numerycznego, obliczenia rozszerzono o trzeci wariant, w którym analizowano wpływ rozważanych uszkodzeń na ramy, w których stojaki wykonane są z rury o tej samej średnicy zewnętrznej, czyli  $\varnothing 48,3$ , ale o zwiększonej grubości ścianki z 2,7 mm do 3,2 mm. Analizowano też czwarty wariant, w którym stojaki wykonane są z rury aluminiowej  $\varnothing 48,3 \times 4$ . Analizy te wykonano, ponieważ takie rozwiązania znacznie rzadziej, ale jednak funkcjonują na rynku rusztowań. Ze względów ergonomii pracy i odporności na oddziaływania chemiczne, rusztowania aluminiowe są coraz częściej używane w krajach Unii Europejskiej, dlatego można spodziewać się, że w przyszłości, w większym zakresie pojawiają się one również w Polsce.

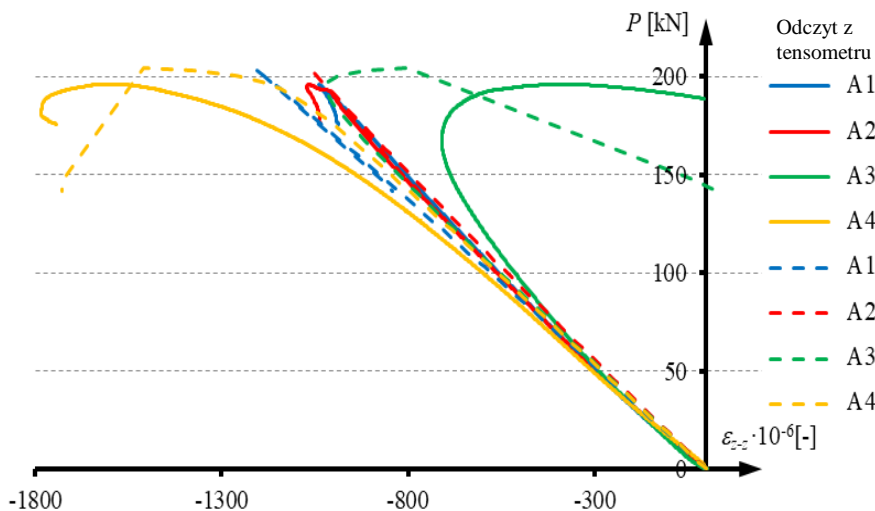
## 5.2.2 Weryfikacja modeli numerycznych ramy

Pierwszym etapem weryfikacji modeli ram rusztowań było porównanie wyników uzyskiwanych w analizie numerycznej z tymi rejestrowanymi na czujnikach podczas testu laboratoryjnego. Porównanie graficzne przedstawiono

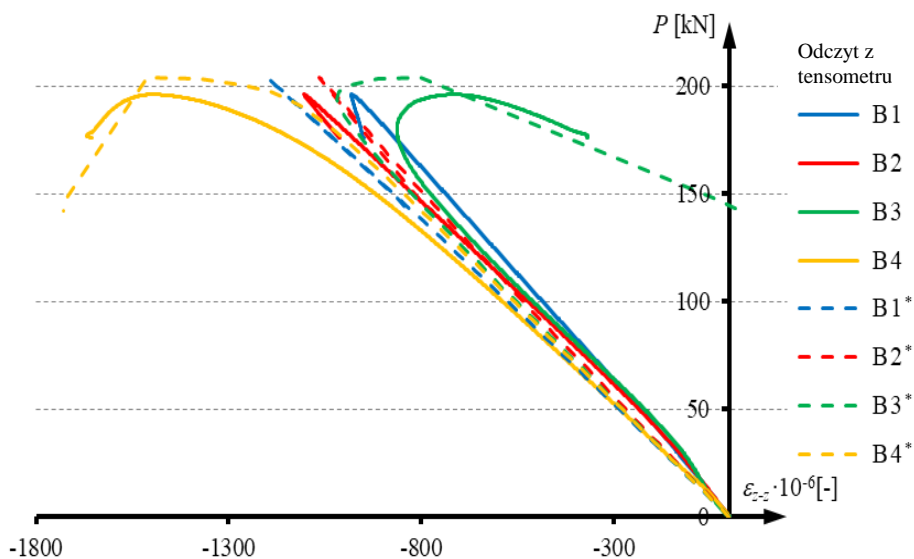
w postaci wykresów zależności siła-przemieszczenie  $P-u$  i siła-odkształcenie  $P-\varepsilon$  dla trzech wybranych ram. Pierwszą była rama referencyjna nieposiadająca żadnego uszkodzenia. Pozostałe dwie wybrane ramy posiadają uszkodzenie o wielkości 24 mm. Jest to uszkodzenie pośrednie w analizowanym zakresie wielkości. Na wszystkich wykresach, przedstawiających porównania pomiarów laboratoryjnych, wartości pochodzące z symulacji komputerowych oznaczono symbolem „\*” oraz linią przerywaną. Na rysunku 5.20 pokazano przemieszczenia w środku rozpiętości stojaka B ramy bez uszkodzeń. Kierunek  $x$  oznacza przemieszczenia w płaszczyźnie ramy. Jak widać na wykresie zarówno w badaniach, jak i w obliczeniach, na tym kierunku obserwujemy minimalny równomierny przyrost. Wartości końcowe na tym kierunku nie przekraczają 1 mm, więc można je uznać za nieistotne. W przypadku kierunku oznaczonego jako  $y$ , czyli odpowiadającego przemieszczeniom prostopadłym do płaszczyzny ramy, w początkowych fazach także obserwujemy niewielki przyrost przemieszczeń proporcjonalny do przyrostu siły. W wynikach pochodzących z obliczeń jest on mniejszy, jednak trzeba zwrócić uwagę na to, że mówimy tu o bardzo małych wartościach. Różnice te są spowodowane faktem, iż model numeryczny jest pozbawiony niedoskonałości, które towarzyszą testom na rzeczywistych elementach. Charakter przebiegu obu wykresów jest podobny.



Rys. 5.20. Porównanie zależności  $P-u$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku B ramy bez uszkodzeń



Rys. 5.21. Porównanie zależności  $P$ - $\varepsilon_{z-z}$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku A ramy bez uszkodzeń

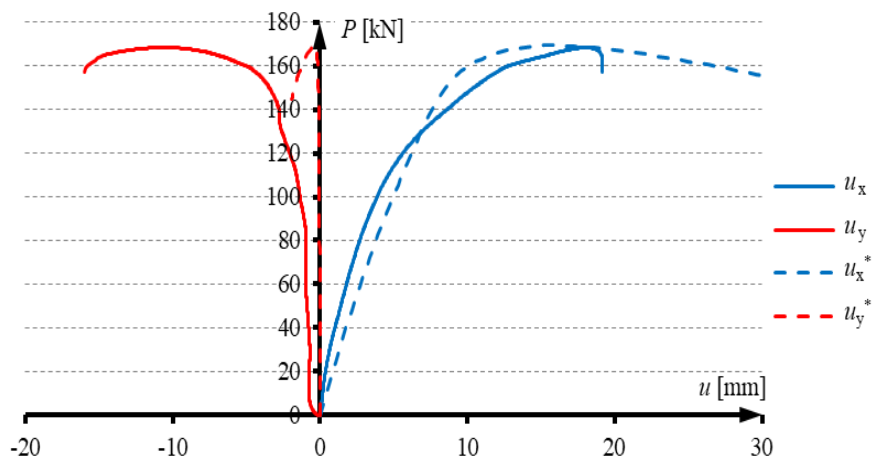


Rys. 5.22. Porównanie zależności  $P$ - $\varepsilon_{z-z}$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku B ramy bez uszkodzeń

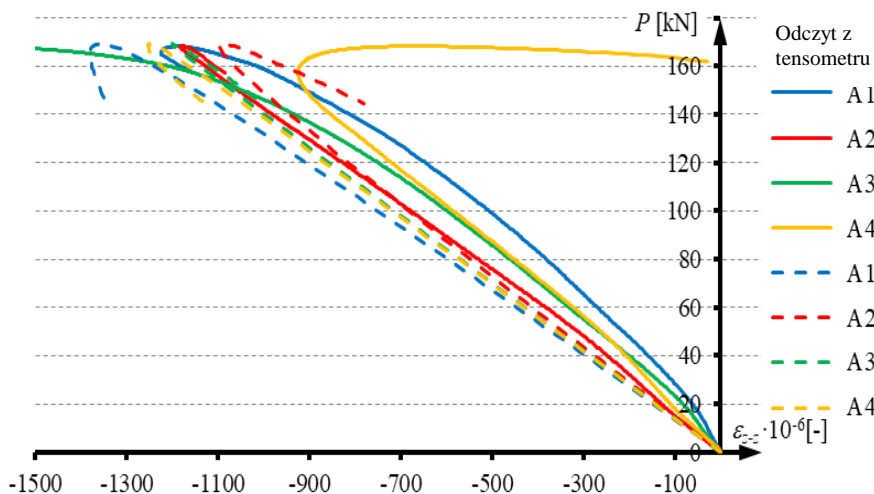
Na rysunku 5.21 i rysunku 5.22 umieszczono porównanie odkształceń w kierunku pionowym, odpowiednio, na stojaku A i B ramy. Teoretycznie, ze względu na symetrię układu względem przyłożonego obciążenia na obu stojakach powinniśmy, w odpowiadających sobie punktach, uzyskać identyczne odczyty.



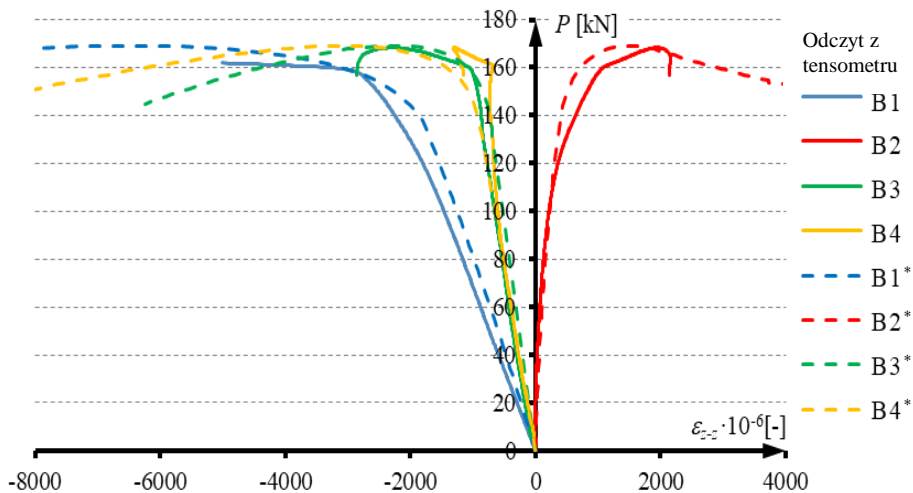
Jak widać na wykresach, taką sytuację obserwujemy w przypadku obliczeń. Wartości z badań nieznacznie różnią się między sobą, w szczególności w stojaku A, gdzie wykres reprezentujący odczyt z tensometru oznaczonego jako A3, od połowy przebiegu odchyła się od pozostałych wykresów. Na kolejnych wykresach (rysunek 5.23, 5.24 i 5.25) przedstawiono porównanie wyników ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy.



Rys. 5.23. Porównanie zależności  $P-u$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku B z ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy o wielkości 24 mm

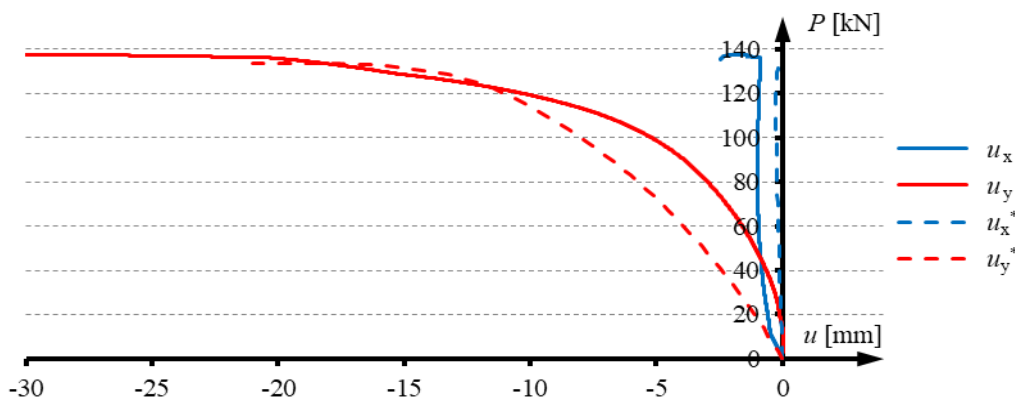


Rys. 5.24. Porównanie zależności  $P-\varepsilon_{\varepsilon-z}$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku A ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy o wielkości 24 mm

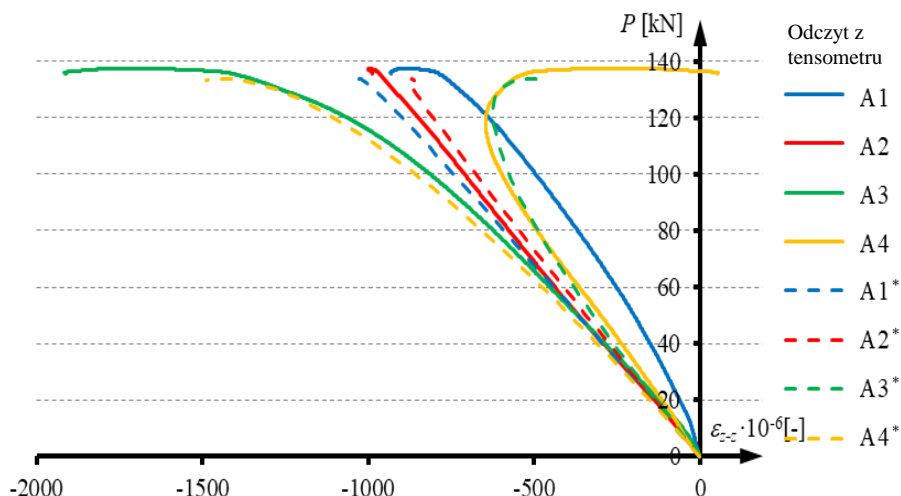


Rys. 5.25. Porównanie zależności  $P-\varepsilon_{z-z}$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku B ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy o wielkości 24 mm

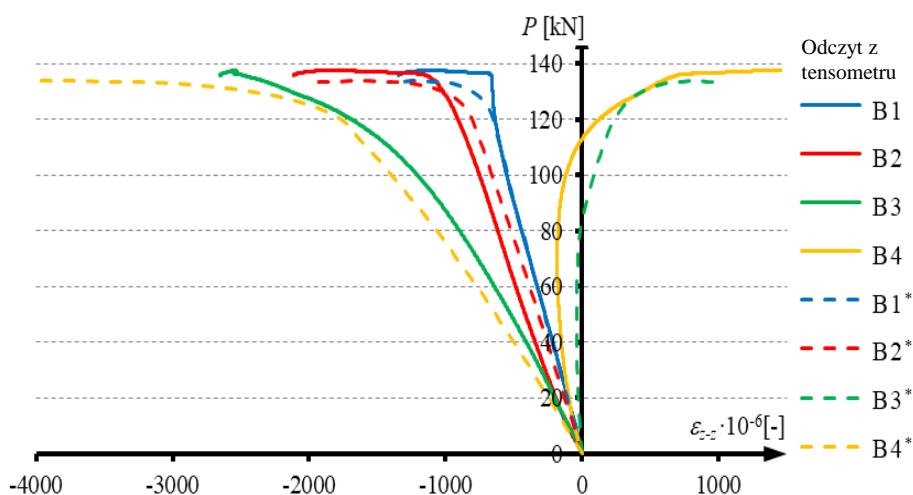
Z analizy tego zestawienia wynika, że tak jak w poprzednim przypadku, uzyskano dużą zgodność w większości punktów kontrolnych, a różnice na pojedynczych czujnikach tylko dowodzą słuszności użycia aż tylu czujników podczas testów laboratoryjnych. Pozwala to odrzucić wyniki takie, jak np. te z tensometru oznaczonego A1 na rysunku 5.27, które budziły wątpliwości zaraz po przeprowadzeniu badania. Bardzo podobnie wygląda sytuacja w przypadku uszkodzenia o tej samej wielkości, lecz zlokalizowanego w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy. Porównanie dla tego elementu pokazano na rysunku 5.26, 5.27 i 5.28.



Rys. 5.26. Porównanie zależności  $P-u$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku B z ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy o wielkości 24 mm



Rys. 5.27. Porównanie zależności  $P-\varepsilon_{z-z}$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku A ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy o wielkości 24 mm



Rys. 5.28. Porównanie zależności  $P-\varepsilon_{z-z}$  z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku B ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy o wielkości 24 mm

W porównaniach wszystkich przebadanych elementów uzyskano na tyle dobrą zbieżność wyników, że pozwoliło to na stwierdzenie, że wszystkie parametry oraz warunki brzegowe w modelach numerycznych ramy zostały prawidłowo dobrane

Poza zestawieniem graficznym, jako parametr określający zgodność otrzymanych wyników, przyjęto procentowy wymiar błędu wyliczany jako stosunek różnicy pól wykresów otrzymanych w badaniach laboratoryjnych i analizach numerycznych. W odniesieniu do wyników pochodzących z czujników przemieszczeń błąd jest liczony ze wzoru:

$$\Delta = \frac{\int_0^u |P_a - P_l| du}{\int_0^u P_l du} \quad (5)$$

Wartość błędu określano na podstawie pól z zakresu od początku przebiegu do uzyskania wartości maksymalnej siły w każdym z przypadków. W odniesieniu do wyników pochodzących z tensometrów błąd jest liczony ze wzoru:

$$\Delta = \frac{\int_0^{\varepsilon_{z-z}} |P_a - P_l| d\varepsilon_{z-z}}{\int_0^{\varepsilon_{z-z}} P_l d\varepsilon_{z-z}} \quad (6)$$

gdzie:  $P_a$  – jest to wartość parametru uzyskanego na drodze analiz numerycznych,  $P_l$  – jest to wartość parametru uzyskanego w trakcie badań laboratoryjnych. Wartości błędów wyznaczonych na podstawie równań (5) i (6), dla wszystkich przebadanych elementów, zestawiono w tabeli 5.4. Jak widać w tabeli tej pozostawiono miejsca bez wartości, głównie dotyczy to przemieszczeń. Związane jest to z tym, że w każdym z badań na jednym z czujników rejestrowane wartości są pomijalnie małe i są efektem szumu pomiarowego. Dlatego w ich przypadku zrezygnowano ze wstawiania wartości, które w rzeczywistości nie są miarodajne. Dodatkowo, ze względu na charakter rejestrowanych wartości, w przypadku czujników takich jak B4, zamontowanych na ramie z uszkodzeniem w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy, nie można dobrać wielomianu opisującego przebieg zmienności badanego parametru.

Poza omawianymi powyżej przemieszczeniami i odkształceniami, dokonano także porównania maksymalnej siły uzyskanej z analiz numerycznych w stosunku do siły powodującej zniszczenie przebadanych elementów. Wartości tych sił, a także procentowe różnice zestawiono w tabeli 5.5.

Tab. 5.4. Wartości błędu wynikające z porównanie wyników otrzymanych z badań laboratoryjnych z wynikami obliczeń modelach numerycznych

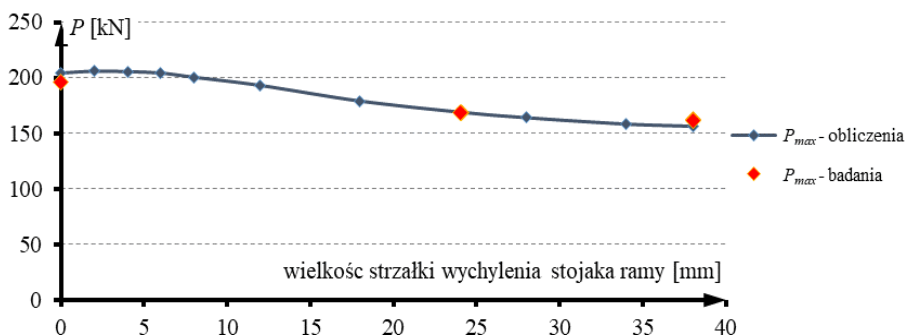
Oznaczenie czujnika	Elementy z uszkodzeniem w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy				Elementy z uszkodzeniem w płaszczyźnie ramy			
	$\Delta$ [%] - Rama z bez uszkodzeń	$\Delta$ [%] - Rama z uszkodzeniem o wielkości strzałki ugięcia stojaka równej 18mm	$\Delta$ [%] - Rama z uszkodzeniem o wielkości strzałki ugięcia stojaka równej 24mm	$\Delta$ [%] - Rama z uszkodzeniem o wielkości strzałki ugięcia stojaka równej 38mm	$\Delta$ [%] - Rama z uszkodzeniem o wielkości strzałki ugięcia stojaka równej 24mm - rama numer 1	$\Delta$ [%] - Rama z uszkodzeniem o wielkości strzałki ugięcia stojaka równej 24mm - rama numer 2	$\Delta$ [%] - Rama z uszkodzeniem o wielkości strzałki ugięcia stojaka równej 38mm - rama numer 1	$\Delta$ [%] - Rama z uszkodzeniem o wielkości strzałki ugięcia stojaka równej 38mm - rama numer 2
$u_x$	-	-	-	-	1,2	4,1	1,6	1,1
$u_y$	12,1	5,2	11,1	7,9	-	-	-	-
A1	1,9	4	29,2	5,6	11,5	4,7	3,6	8,2
A2	4,1	1,2	4,3	4,8	0,2	8,7	7	4,8
A3	13,1	8,9	3	2,3	10,9	14,6	4,9	6,1
A4	3,4	7,6	1,8	1,1	11,3	1,0	10,1	12
B1	2,7	1,3	4,2	6	5,8	4,8	5,9	7,9
B2	1,9	0,8	3	7,4	5,6	3,3	3,7	0,7
B3	9,7	-	6,8	5,1	6,2	2,8	8,8	6,2
B4	7,2	7,2	-	3,8	12,7	4,1	4	4,9

Tab. 5.5. Porównanie wartości maksymalnych sił uzyskanych podczas badań z maksymalną siłą uzyskaną z analizy numerycznej

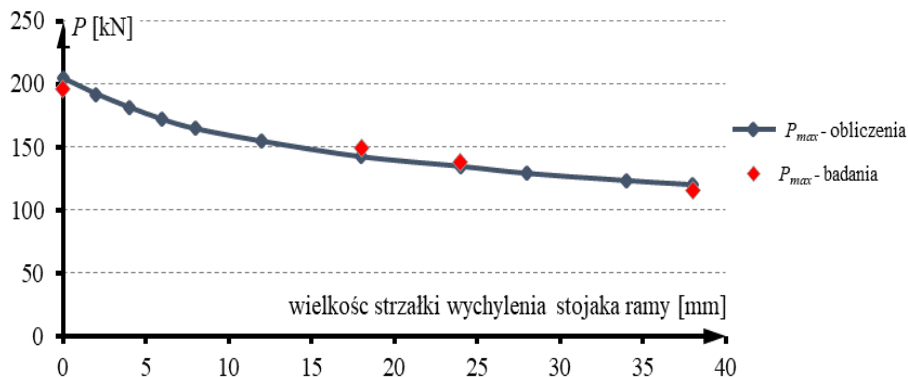
Wielkość strzałki wychylenia stojaka ramy [mm]	Maksymalna wartość siły uzyskana podczas badania [kN]	Maksymalna siła uzyskana z obliczeń [kN]	Różnica [%]
0	196,1	204,1	4,1
Uszkodzenia zlokalizowane w płaszczyźnie ramy			
24	168,9	169,2	0,2
24	168,2	169,2	0,6
38	162,4	156,5	3,6
38	161,5	156,5	3,1
Uszkodzenia zlokalizowane w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy			
18	148,7	142,3	4,3
24	137,5	134,7	2
38	115,4	120,2	4,2

### 5.2.3 Analizy numeryczne ram

Po analizie porównawczej i stwierdzeniu poprawności założeń analizy numerycznej, wykonano serie dodatkowych obliczeń. Stworzono modele, w których wprowadzono wygięcia stojaka o wartościach pośrednich w stosunku do tych, które były wytworzone na rzeczywistych elementach. Kształt wygięcia w poszczególnych modelach stworzono poprzez skalowanie na poszczególnych poziomach wartości wychylenia stojaka zmierzonych w przebadanych elementach. Wyniki tych symulacji w postaci zależności maksymalnej siły uzyskanej z obliczeń do wielkości uszkodzenia przedstawiono na rysunku 5.29, w odniesieniu do elementów z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy oraz na rysunku 5.30, w odniesieniu do elementów z uszkodzeniami w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy.



Rys. 5.29. Maksymalne wartości sił uzyskanych z obliczeń oraz badań laboratoryjnych, ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy



Rys. 5.30. Maksymalne wartości sił uzyskanych z obliczeń oraz badań laboratoryjnych ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy

Dodatkowo na każdym z tych wykresów zaznaczone zostały wartości uzyskane z badań, na podstawie których wykonano weryfikację modelu numerycznego. Jak widać wykresy te różnią się od siebie. Już po badaniach w laboratorium można było sformułować wniosek, że wygięcia stojaka o tej samej wartości w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy mają z znacznie większy wpływ na obniżenie nośności niż wygięcie w płaszczyźnie ramy. Na podstawie wyników symulacji można stwierdzić, że w przypadku uszkodzeń leżących w płaszczyźnie ramy istnieje pewien zakres wielkości, dla którego nie odnotowano spadku nośności elementu. W drugim przypadku widać, że już najmniejsze wprowadzone wygięcie (w przeprowadzonej analizie było to 2 mm) powoduje spadek maksymalnej wartości siły uzyskanej w obliczeniach. Dodatkowo, w tabelach 5.6 i 5.7 zamieszczono wartości, które są przekształceniem poniższych wykresów według wzoru:

$$\frac{|P_i - P_0|}{P_0} \cdot 100\% = \Delta \quad (7)$$

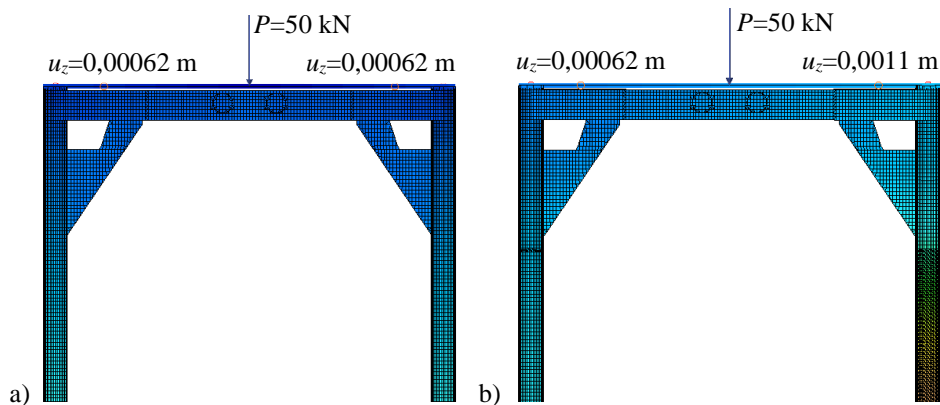
gdzie:  $P_i$  – wartość siły uzyskanej z analizy numerycznej przeprowadzonej na modelu uwzględniającym uszkodzenie w postaci wygięcia stojaka,  $P_0$  – wartość siły uzyskanej z analizy numerycznej przeprowadzonej na modelu bez uszkodzeń. Wartości  $\Delta$  pokazują procentową utratę nośności elementu z uszkodzeniem o danej wielkości w odniesieniu do elementu nieposiadającego uszkodzenia w każdym z analizowanych wariantów obliczeń.

Kolejnym, bardzo istotnym elementem zauważonym podczas przeprowadzonych analiz, jest wyraźnie zwiększona podatność stojaka, w którym wytworzone zostało uszkodzenie. Podczas przeprowadzonego testu podatność ta może zostać opisana równaniem:

$$R_v = \frac{\frac{1}{2}P}{u_z} \quad (8)$$

gdzie:  $R_v$  – podatność stojaka na obciążenie skierowane wzdłuż osi  $z$ ,  $P$  – wartość obciążenia przyłożonego do ramy,  $u_z$  – przemieszczenie pionowe wierzchołka stojaka.

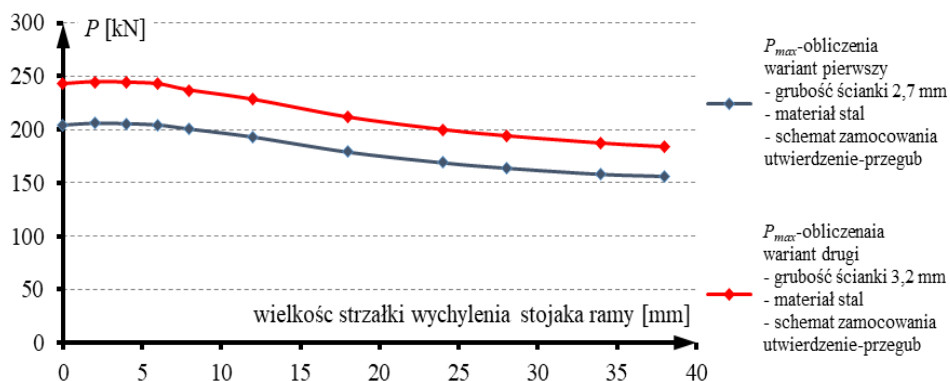
Na rysunku 5.31 przedstawiono wartości przemieszczeń górnej krawędzi stojaka przy obciążeniu o wartości 50 kN, czyli jest to jeszcze zakres sprężysty pracy konstrukcji. Po lewej umieszczono wyniki z obliczeń ramy bez uszkodzeń, po prawej – z uszkodzeniem w postaci wygięcia stojaka o wartości strzałki wychYLENIA równej 38 mm. Jak widać na tym rysunku, w trzech stojakach nieposiadających uszkodzenia obserwujemy dokładnie tę samą wartość przemieszczenia w kierunku pionowym. Natomiast na stojaku z uszkodzeniem uzyskano zdecydowanie większą wartość przemieszczenia. Podstawiając uzyskane wartości do równania (8) otrzymujemy odpowiednio podatność równą 8065,0 kN/m oraz 4545,5 kN/m, czyli obserwujemy niemal dwukrotny wzrost tego parametru. Fakt ten może się okazać bardzo istotny przy analizowaniu wpływu uszkodzenia w pojedynczej ramie na wartości sił uzyskiwanych w analizie całej konstrukcji rusztowania, które będą przeprowadzone w dalszej części pracy.



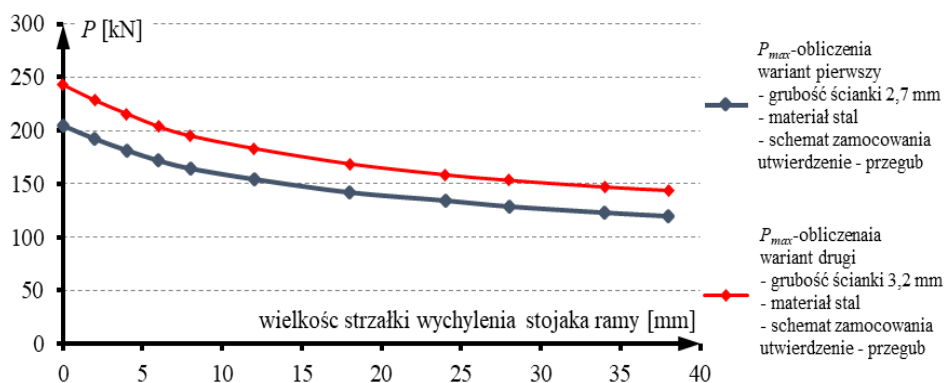
Rys. 5.31. Wartości przemieszczeń górnych krawędzi stojaków pod obciążeniem  $P = 50$  kN:  
a) rama bez uszkodzeń, b) rama z wygiętym stojakiem

Tak jak napisano wcześniej, obliczenia w ramach pracy rozszerzono o dodatkowe warianty polegające na zmianie charakterystyk geometrycznych i materiałowych oraz schematu zamocowania stojaków ramy. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunku 5.32 i 5.33. Na wszystkich wykresach przedstawiających wyniki dodatkowych wariantów obliczeń zamieszczono także wartości podstawowego pierwszego wariantu obliczeń.

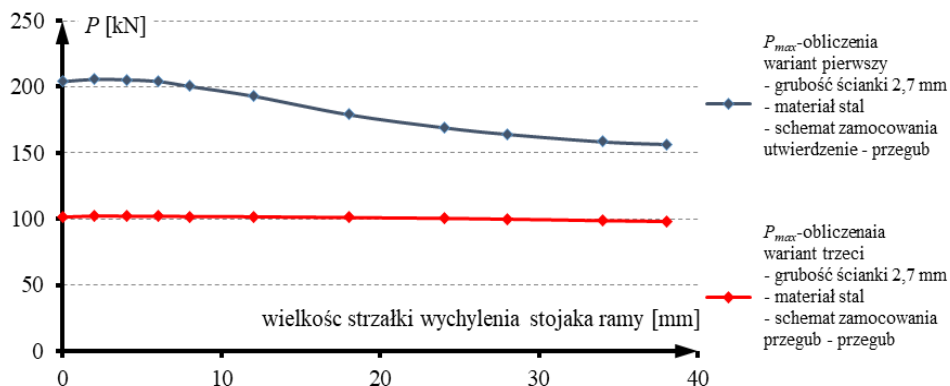




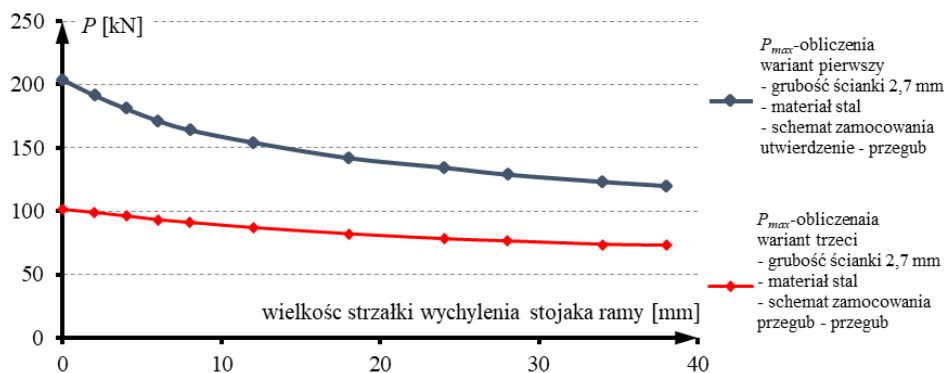
Rys. 5.32. Porównanie maksymalnych wartości sił uzyskanych z obliczeń (wariant pierwszy i drugi) ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy



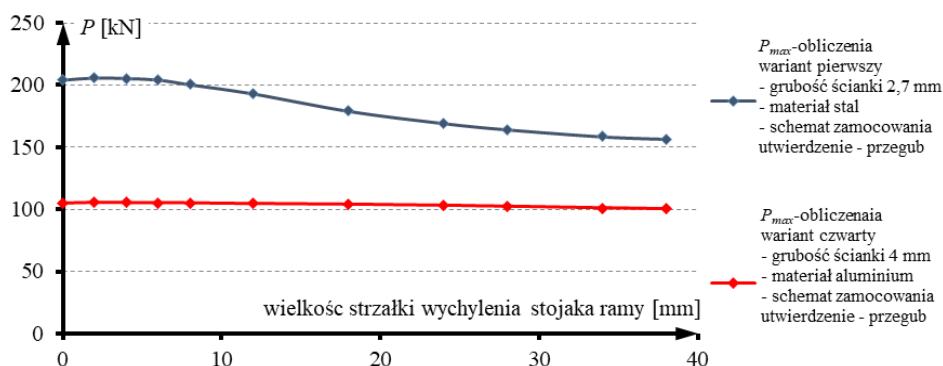
Rys. 5.33. Porównanie maksymalnych wartości sił uzyskanych z obliczeń (wariant pierwszy i drugi) ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy



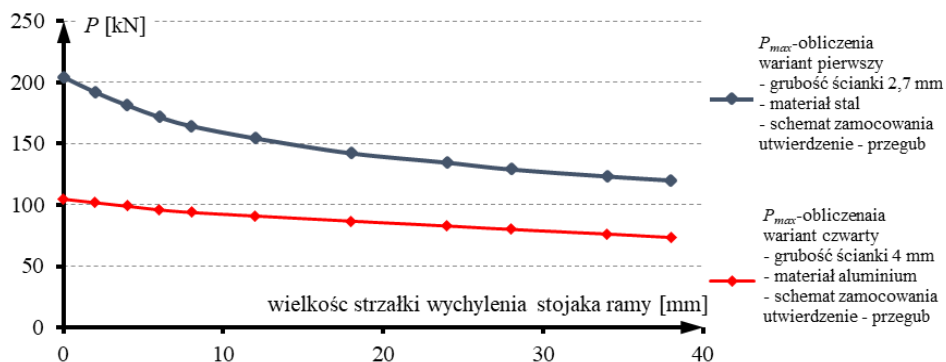
Rys. 5.34. Porównanie maksymalnych wartości sił uzyskanych z obliczeń (wariant pierwszy i trzeci) ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy



Rys. 5.35. Porównanie maksymalnych wartości sił uzyskanych z obliczeń (wariant pierwszy i trzeci) ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy



Rys. 5.36. Porównanie maksymalnych wartości sił uzyskanych z obliczeń (wariant pierwszy i czwarty) ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy



Rys. 5.37. Porównanie maksymalnych wartości sił uzyskanych z obliczeń (wariant pierwszy i czwarty) ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy

Tab. 5.6. Procentowa utrata nośności elementu z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy w odniesieniu do elementu nieposiadającego uszkodzenia.

Wielkość strzałki wychyleń stojaka ramy [mm]	Wariant pierwszy obliczeń [%]	Wariant drugi obliczeń [%]	Wariant trzeci obliczeń [%]	Wariant czwarty obliczeń [%]
0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	6,1	6,0	2,4	2,8
4	11,3	11,2	5,2	5,5
6	15,9	16,1	8,1	8,4
8	19,5	19,7	10,3	10,4
12	24,3	24,6	14,3	13,2
18	30,3	30,5	19,1	17,2
24	34,0	34,7	23,1	21,0
28	36,7	36,8	24,9	23,6
34	39,5	39,4	27,4	27,3
38	41,1	40,8	28,2	29,9

Tab. 5.7. Procentowa utrata nośności elementu z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy w odniesieniu do elementu nieposiadającego uszkodzenia.

Wielkość strzałki wychyleń stojaka ramy [mm]	Wariant pierwszy obliczeń [%]	Wariant drugi obliczeń [%]	Wariant trzeci obliczeń [%]	Wariant czwarty obliczeń [%]
0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,5	0,2
12	1,8	2,4	0,4	0,3
18	5,4	6,0	0,2	0,9
24	12,3	12,8	0,3	1,7
28	17,1	17,7	0,9	2,5
34	19,6	20,1	1,4	3,7
38	22,4	22,9	2,4	4,5

Jak widać zmiana wprowadzona w wariancie drugim spowodowała proporcjonalnie jednakowy wzrost uzyskiwanej siły maksymalnej we wszystkich analizowanych przypadkach. Zupełnie inaczej sytuacja przedstawia się w wariancie trzecim, w którym zmieniono sposób zamocowania stojaków ramy na obustronnie przegubowy. W wariancie tym okazało się, że uszkodzenia zlokalizowane w płaszczyźnie ramy, niemal nie mają wpływu na uzyskiwaną w obliczeniach maksymalną siłę. Jak widać w tabeli 5.7 dla największej analizowanej wartości uszkodzenia, w porównaniu do ramy bez uszkodzeń, uzyskano spadek maksymalnej siły o zaledwie 2,4%. W przypadku uszkodzeń zlokalizowanych w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy obserwujemy wyraźny spadek o charakterze bardzo podobnym do obliczeń wyjściowych, jednak procentowy ubytek nośności w tym wariancie jest wyraźnie mniejszy.

W ostatnim, czwartym analizowanym wariancie zmieniono materiał, z którego wykonana jest rama na aluminium. Ze zmianą materiału wiąże się również zmiana grubości ścianki stojaka. Zgodnie z zaleceniami normowymi wartością minimalną grubości ścianek rur wykonanych z aluminium jest 4 mm i właśnie taką przyjęto do obliczeń. Co bardzo ciekawe, w tym wariancie również zaobserwowano bardzo niewielki spadek nośności rzędu 4,5% spowodowany uszkodzeniami wytworzonymi w płaszczyźnie ramy. Uszkodzenia zlokalizowane w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy, tak jak we wszystkich poprzednich wariantach wywołały stosunkowo większe zmiany. Jednakże i w tym przypadku procentowy ubytek nośności wraz ze wzrostem wielkości uszkodzeń był mniejszy niż w obliczeniach wyjściowych.

### **5.3 Podsumowanie analiz numerycznych ram**

Przeprowadzone analizy numeryczne wycinków stojaków ramy rusztowań fasadowych modelowanych elementami powłokowymi wykazały, że wyniki uzyskiwane z obliczeń, w których uszkodzenia w postaci punktowego wgnięcia są modelowane tylko i wyłącznie poprzez uwzględnienie geometrii uszkodzenia nie w pełni odwzorowują zachowania rzeczywistego elementu poddanego obciążeniu. Zaproponowane metody wprowadzenia zmian grubości elementów w modelu numerycznym w obrębie uszkodzenia powodują uzyskiwanie wyników o dużo wyższym stopniu zgodności. Ze względu na zaobserwowany w trakcie badań i obliczeń bardzo duży zakres sprężysty pracy elementów posiadających uszkodzenia, a także niewielkie zmiany w podatności elementów na obciążenie osiowe, można stwierdzić, że uszkodzenie w analizowanym zakresie wielkości powodują zmniejszenie nośności ramy, w której występują. Natomiast ich występowanie nie ma istotnego wpływu na wielkości sił wewnętrznych innych elementów w konstrukcji rusztowania. Dlatego w następnym rozdziale pracy pominięto wpływ tego rodzaju uszkodzeń.

Symulacje numeryczne pełnych ram wykazały, że wygięcia stojaków są istotne dla nośności rusztowań, a przede wszystkim następuje wzrost momentów

zginających i w konsekwencji wzrost naprężeń normalnych. Potwierdzono, że defekt o tej samej wielkości zlokalizowany w płaszczyźnie ramy powoduje znacznie mniejsze obniżenie nośności niż taki sam, w którym przemieszczenie wywołane jest deformacją w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy. Podczas przeprowadzonych obliczeń wykazano też, że uszkodzenia zlokalizowane w płaszczyźnie ramy w pewnym zakresie wielkości wprowadzonego uszkodzenia, w każdym z przeprowadzonych wariantów, nie powodują obniżenia nośności ramy. Wykazano także, że rama podparta z jednej strony przegubowo, a z drugiej z zamocowaniem pełnym wykazuje większe procentowe osłabienie niż taka sama rama podparta obustronnie przegubowo. Zwiększenie grubości ścianki zwiększa wartości sił uzyskiwanych w badaniach, natomiast nie ma wpływu na procentowe osłabienie przy jednakowej wielkości uszkodzenia. W obliczeniach ramy wykonanej z aluminium uzyskano zdecydowanie mniejsze wartości sił. W ramach wykonanych z aluminium zaobserwowano także zdecydowanie mniejszy procentowy ubytek nośności wraz ze wzrostem wielkości uszkodzenia w stosunku do ramy stalowej zamocowanej w ten sam sposób. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że połączenie pomiędzy ramami z zastosowaniem trzpieni można traktować jako połączenie sztywne.

Podsumowując, wgięcie rur o głębokości do 10% średnicy powoduje zmniejszenie nośności rur, ale dotyczy to wartości powyżej 80 kN. Takie wartości sił normalnych nie występują w stojakach ram rzeczywistych konstrukcji i dlatego w dalszych analizach pełnych rusztowań, to uszkodzenie nie jest brane pod uwagę. Inaczej wygląda sytuacja z uszkodzeniami w formie wygięcia stojaków, a w szczególności wygięcie stojaków w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy. Dlatego w kolejnym rozdziale będzie badany wpływ tego rodzaju uszkodzeń na pełne konstrukcje rusztowań.

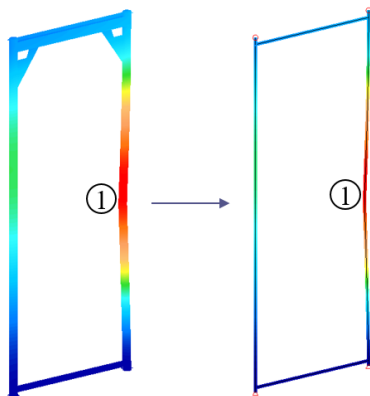
## **6 ANALIZA NUMERYCZNA KONSTRUKCJI RUSZTOWANIA BUDOWLANEGO**

W tym rozdziale pracy zbadano wpływ uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych rusztowań na pracę statyczną konstrukcji jako całości. Tak jak napisano w poprzednich rozdziałach, główne uszkodzenia, które zostały określone jako te, które mogą mieć wpływ na nośność rusztowania jako całości to: punktowe wgłębienie stojaka oraz wygięcie osi stojaka. W trakcie inwentaryzacji uszkodzeń prowadzonych na budowach na rzeczywistych użytkowanych konstrukcjach, elementy rusztowań posiadały uszkodzenia tego typu o wielkości nie przekraczającej 5 mm. Jest to wielkość około 10% wymiaru poprzecznego rury stojaka. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych i numerycznych w ramach niniejszej pracy wykazano, że uszkodzenia tej wielkości powodują obniżenie nośności elementu, na którym występują, ale ze względu na swój lokalny zasięg, ich występowanie nie ma istotnego wpływu na pozostałe elementy konstrukcyjne rusztowania. Dlatego w tym rozdziale pracy, uszkodzenia w postaci punktowego wgłębienia stojaka nie będą analizowane. Natomiast szeroko analizowane zostanie zagadnienie wpływu wygięcia stojaka ramy na zachowanie rusztowania pod wpływem obciążenia jako całości. Z opisanych wcześniej badań wynika, że uszkodzenia w postaci wygięcia stojaka w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy mają zdecydowanie większy wpływ na pracę uszkodzonego elementu, dlatego w dalszej części pracy uszkodzenie będzie wprowadzane właśnie w tym kierunku. W opisanych we wcześniejszych rozdziałach pracy badaniach i symulacjach komputerowych analizowano uszkodzenia o maksymalnej wielkości 38 mm. Spowodowane to było tym, że podczas rozmów z przedstawicielami firm zajmujących się wynajmowaniem rusztowań ustalono, że uszkodzenia o większej wielkości, ze względu na pojawiające się deformacje węzłów ramy, nie pozwalają na wmontowanie takiego elementu do konstrukcji, czyli elementy z uszkodzeniami większymi niż te analizowane w pracy są trwale eliminowane z użytku. W dalszej części pracy, ze względu na poszukiwanie najbardziej niekorzystnych efektów, wszystkie wprowadzane uszkodzenia będą miały wartość 38 mm.

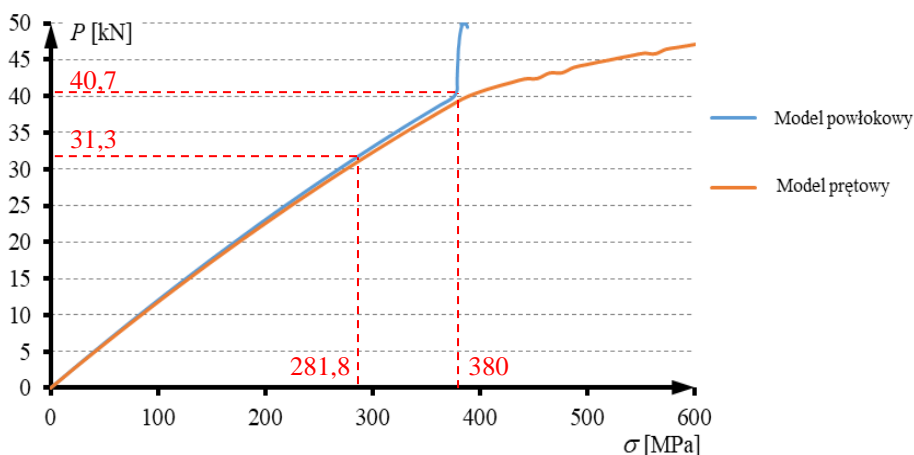
### **6.1 Numeryczny model prętowy ramy**

Rusztowanie jako całość, jest typową konstrukcją prętową. W analizie numerycznej konstrukcji rusztowania nie jest możliwe wykorzystanie wcześniej stworzonych precyzyjnych modeli uwzględniających uszkodzenia. Dlatego pierwszym krokiem przy budowie modelu całego rusztowania było porównanie wyników uzyskiwanych z jednakowo zamocowanych i obciążonych modeli posiadających uszkodzenie, zbudowanych z elementów powierzchniowych

i prętowych. Dokonano porównania wartości odczytanych ze stojaka, do którego wprowadzone zostało wygięcie. Wartości odczytano z punktu oznaczonego jako 1 na rysunku 6.1, czyli w wierzchołku wygięcia. W punkcie tym występowały zarówno ekstremalne naprężenia, jak i maksymalne przemieszczenia.

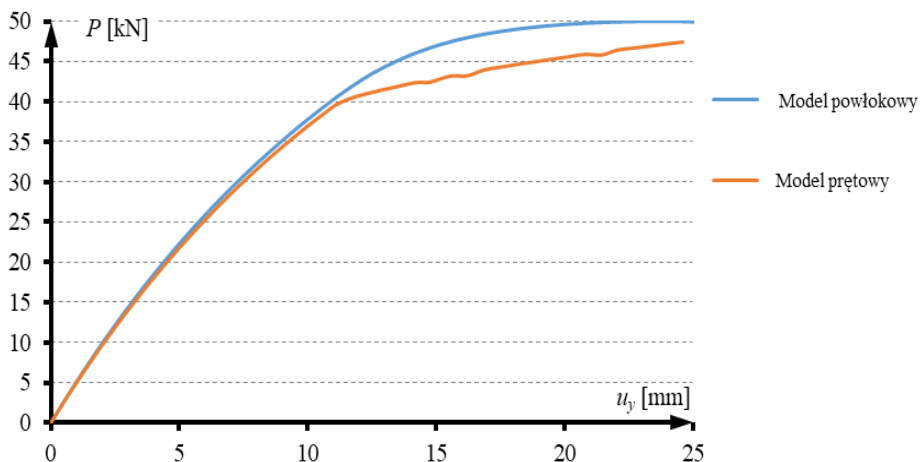


Rys. 6.1. Schemat porównania modelu powłokowego i prętowego ramy



Rys. 6.2. Porównanie wartości naprężeń normalnych w modelu powłokowym i prętowym ramy

Na rysunku 6.2 przedstawiono zależność pomiędzy naprężeniem normalnym i wartością siły normalnej w stojaku z uszkodzeniem. Dodatkowo, na wykresie tym przerywanymi liniami zaznaczono wartości granicy plastyczności uzyskanej w przeprowadzonych badaniach oraz wartości obliczeniowej granicy plastyczności. Wartość obliczeniowa granicy plastyczności uzyskano poprzez podzielenie wartości charakterystycznej, odczytanej z atestu udostępnionego przez producenta (310MPa), przez współczynnik materiałowy  $\gamma_m = 1,1$ .



Rys. 6.3. Porównanie wartości przemieszczeń w modelu powłokowym i prętowym ramy

Natomiast na rysunku 6.3 przedstawiono zależność przemieszczeń poziomych w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy i siły normalnej w stojaku. Jak widać na obu tych zestawieniach obserwujemy bardzo dużą zgodność w wynikach obliczeń obu modeli do momentu uzyskania wartości granicy plastyczności w stojaku. Maksymalna różnica między wynikami w tym zakresie to 1,2%. Po przekroczeniu wartości granicy plastyczności na obu wykresach widać wyraźne rozbieżności. Spowodowane jest to faktem, że w użytych programie obliczeniowym wartość naprężeń normalnych w elemencie uzyskiwana jest ze wzoru:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_2}{W_2} + \frac{M_3}{W_3} \quad (9)$$

gdzie:  $N$  – siła normalna,  $A$  – pole przekroju poprzecznego stojaka,  $M_2$  – moment zginający o wektorze zgodnym z drugą osią lokalnego układu współrzędnych,  $W_2$  – wskaźnik wytrzymałości względem drugiej osi lokalnego układu współrzędnych,  $M_3$  – moment zginający o wektorze zgodnym z trzecią osią lokalnego układu współrzędnych,  $W_3$  – wskaźnik wytrzymałości względem drugiej osi lokalnego układu współrzędnych. Natomiast sprawdzenie zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  modelującej materiał odbywa się oddzielnie dla każdego z członów wzoru (9). W efekcie wejście w część wykresu  $\sigma$ - $\varepsilon$ , która wyznacza wzmocnienie, następuje przy naprężeniach normalnych znacznie większych niż granica plastyczności, co jest ewidentnym błędem programu i będzie monitorowane w dalszej części badań. Jako wyniki prawidłowe w modelu prętowym są traktowane tylko te, które uzyskano z obliczeń, w których naprężenia wyznaczone ze wzoru (9) nie przekraczają granicy plastyczności. Obliczania konstrukcji rusztowań w tym rozdziale pracy będą prowadzone według zaleceń obowiązujących norm, dlatego za wartość graniczną przyjęto wartość obliczeniową granicy



plastyczności materiału, z którego są wykonane elementy rusztowań. To także gwarantuje, że model prętowy zbudowany w programie Autodesk Simulation Multiphysics w zakresie do uzyskania granicy plastyczności poprawnie odwzorowuje zachowanie elementu posiadającego uszkodzenie w postaci wygięcia stojaka.

## 6.2 Warianty obliczeń

Obliczenia statyczne pełnej konstrukcji rusztowania przeprowadzono w 816 wariantach, w których uwzględniono zróżnicowanie następujących parametrów:

- normowe przypadki obciążeń,
- wpływ imperfekcji geometrycznych,
- wpływ wysokości konstrukcji,
- wpływ lokalizacji i liczności uszkodzeń w konstrukcji.

### 6.2.1 Przypadki obciążeń

Zgodnie z zaleceniami normy [3], przy projektowaniu rusztowań należy uwzględnić obciążenia stałe: ciężar własny konstrukcji wraz z elementami pomocniczymi (np. wieże wyciągów) i zabezpieczającymi, oraz obciążenia zmienne: eksploatacyjne (na pomoście roboczym), wiatrem, śniegiem i lodem. Obciążenie wiatrem, śniegiem i oblodzeniem jest brane pod uwagę tylko w przypadku rusztowań ustawionych na zewnątrz obiektów budowlanych. Jeżeli nie planuje się ustawienia rusztowania na zewnątrz w okresie zimowym, to obciążenie śniegiem i oblodzenie należy pominąć.

Dla rusztowań fasadowych norma [3] podaje, w jaki sposób uwzględnić najbardziej niekorzystne przypadki obciążenia statycznego w warunkach eksploatacji oraz kiedy rusztowanie nie jest używane. Każdy projekt musi zawierać oba te przypadki.

Obliczenia rusztowania w stanie eksploatacji powinny uwzględniać połączenie takich obciążeń, jak:

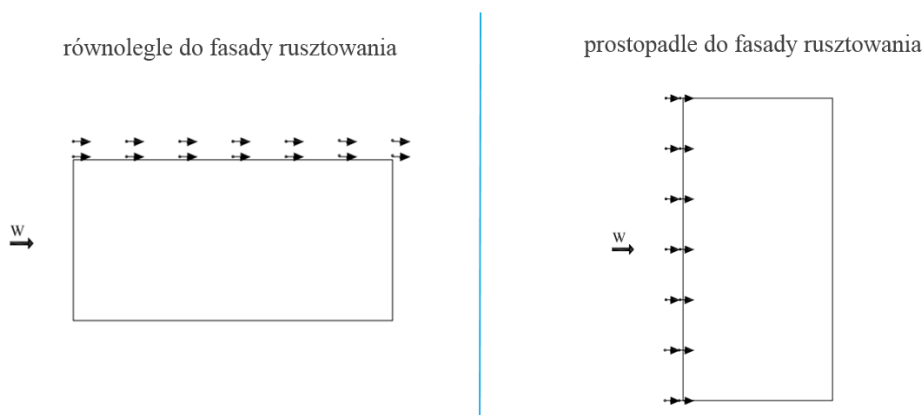
- ciężar własny konstrukcji,
- równomiernie rozłożone na podestach roboczych obciążenie eksploatacyjne, którego wartość przyjmuje się w zależności od klasy rusztowania (tabela 6.1) podanej przez producenta systemu,
- obciążenie robocze wiatrem lub dla rusztowań wewnątrz obiektów budowlanych poziome obciążenie zastępcze.
- Jeżeli rusztowanie nie jest eksploatowane należy uwzględnić:
- ciężar własny rusztowania,
- w zależności od klasy rusztowania obciążenia: 0%, 25% lub 50% równomiernie rozłożonego obciążenia eksploatacyjnego,
- maksymalne obciążenie wiatrem zgodnie z normą [63].

Tab. 6.1. Obciążenia eksploatacyjne w zależności od klasy obciążenia [3]

Klasa obciążenia	Obciążenie rozłożone równomiernie $q_1$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	0,75
2	1,50
3	2,00
4	3,00
5	4,50
6	6,00

Ogólne zasady projektowania rusztowań oraz zalecenia dotyczące sposobu zbierania i przykładania obciążenia wiatrem na konstrukcję rusztowania, znajdujące się w normie [3], zalecają przyjmowanie obciążenia wiatrem w dwóch kierunkach: równoległe i prostopadłe do fasady rusztowania, bez uwzględnienia ekranowania, jak przedstawiono na rysunku 6.4.

kierunki przykładania obciążenia:



Rys. 6.4. Zalecenia normowe dotyczące przyjmowania kierunku obciążenia wiatrem na rusztowanie

Maksymalne obciążenie wiatrem należy przyjąć na podstawie obowiązującej normy wiatrowej, czyli Eurokodu [63]. Oddziaływanie wiatru należy obliczać na podstawie tzw. ciśnienia dynamicznego prędkości wiatru, działającego na powierzchnię wystawioną w kierunku działania wiatru (powierzchnia odniesienia). Norma [3] zaleca przyjmowanie oddziaływania wiatru oddzielnie dla kierunku wiatru równoległego i prostopadłego do fasady, przy której znajduje

się konstrukcja rusztowania, a wartość charakterystyczną wynikowej siły wiatru należy wyznaczyć ze wzoru:

$$F_k = c_s \cdot \sum_i (c_{fi} A_i q_i) \quad (10)$$

gdzie:  $c_s$  – współczynnik miejsca,  $c_{fi}$  – współczynnik siły aerodynamicznej,  $A_i$  – pole powierzchni odniesienia,  $q_i$  – ciśnienie dynamiczne,  $i$  – numer elementu rusztowania. Ciśnienie dynamiczne wiatru należy przemnożyć dodatkowo przez współczynnik statystyczny równy 0,7, który uwzględnia tymczasowość konstrukcji rusztowania. Robocze obciążenie wiatrem należy przyjąć jako równomiernie rozłożone na całej powierzchni konstrukcji, równe 0,2 kN/m<sup>2</sup>. Szczegółowy opis przyjmowania wartości obciążenia wiatrem rusztowań fasadowych został przedstawiony w pracy [64].

Uwzględniając powyższe zalecenia normowe, dla rusztowania klasy 3, ustawionego na zewnątrz obiektu budowlanego w okresie letnim, mamy cztery przypadki obciążenia zgodnie z tabelą 6.2.

Tab. 6.2. Przypadki obciążeń rusztowania ustawionego na zewnątrz obiektu budowlanego, w okresie letnim

	Oznaczenie przypadku obciążenia	Ciężar własny	Obciążenie wiatrem	100% obciążenia najwyższe- go pomostu	50% obciążenie pomostu niższego	25% obciążenia najwyższe- go pomostu
Wariant obciążenia I	w1	●	Maksymalne, prostopadłe do elewacji			●
Wariant obciążenia II	w2	●	Robocze, prostopadłe do elewacji	●	●	
Wariant obciążenia III	w3	●	Maksymalne, równoległe do elewacji			●
Wariant obciążenia IV	w4	●	Robocze, równoległe do elewacji	●	●	

Norma [3] dla wszystkich obciążeń stałych i zmiennych zaleca przyjęcie częściowych współczynników bezpieczeństwa w stanie granicznym nośności  $\gamma_f = 1,5$ .

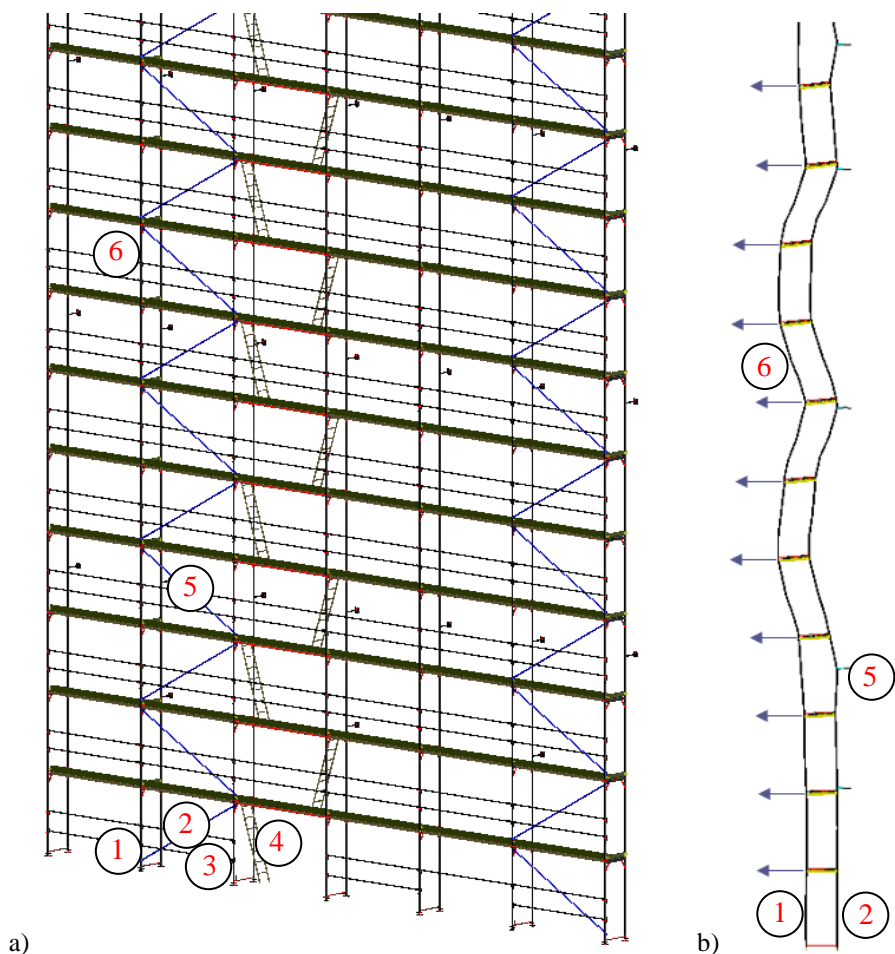
### 6.2.2 Lokalizacja uszkodzeń

Wstępne obliczenia rusztowań, do których wprowadzono elementy z uszkodzeniem w postaci wygięcia stojaka ramy, potwierdziły, że największy wpływ na wzrost stanu naprężenia w konstrukcji mają uszkodzenia, zlokalizowane

u podstawy konstrukcji. Jest to ściśle związane ze schematem zamocowania danego stojaka oraz oczywiście wynika to z faktu, że najczęściej to właśnie te stojaki posiadają największy stopień wytwężenia jeszcze przed wprowadzeniem uszkodzeń. Drugim spostrzeżeniem jest to, że ze względu na całkowicie przegubowy charakter połączeń pomiędzy elementami poziomymi a pionowymi, wprowadzenie uszkodzenia do jednej ramy nie powoduje żadnych zmian w elementach sąsiednich, ma jedynie niewielki wpływ na elementy zlokalizowane w tym samym pionie, w którym znajduje się rama z uszkodzeniem. Oczywiście jest tak tylko w przypadku normalnej pracy, prawidłowo zaprojektowanej konstrukcji. W przypadku stanów awaryjnych, gdzie pojawiają się duże przemieszczenia, lub nieprawidłowo zaprojektowanych rusztowań, siły mogą być przekazywane na sąsiednie piony. Wyjątkiem od tej zasady są pola rusztowania, które posiadają stężenia pionowe. W tej sytuacji, siły z jednego pionu są zawsze przekazywane na sąsiedni za pośrednictwem stężeń. Dlatego w analizowanym rusztowaniu, warianty odnoszące się do lokalizacji uszkodzenia w większości ograniczono do wprowadzania ich do ram najniższego poziomu. W tabeli 6.3 określono, do których stojaków wprowadzono uszkodzenia w poszczególnych wariantach. Schematyczne oznaczenie lokalizacji uszkodzeń zostało przedstawione na rysunku 6.5.

Tab. 6.3. Warianty lokalizacji uszkodzeń w rusztowaniu

Lp.	Nazwa wariantu	Numery stojaków, w których wprowadzono uszkodzenia
1	U_b	brak
2	U_1	1
3	U_2	2
4	U_3	3
5	U_4	4
6	U_12	1, 2
7	U_34	3, 4
8	U_234	2, 3, 4
9	U_134	1, 3, 4
10	U_1234	1, 2, 3, 4
11	U_6	6
12	U_5	5

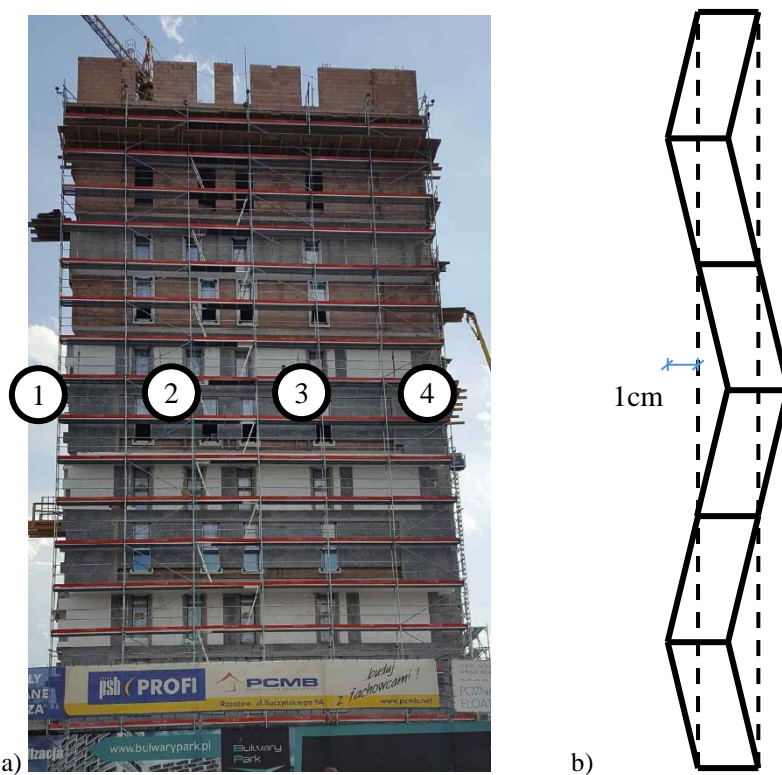


Rys. 6.5. Schemat lokalizacji stojaków z uszkodzeniem: a) widok izometryczny, b) przekrój poprzeczny

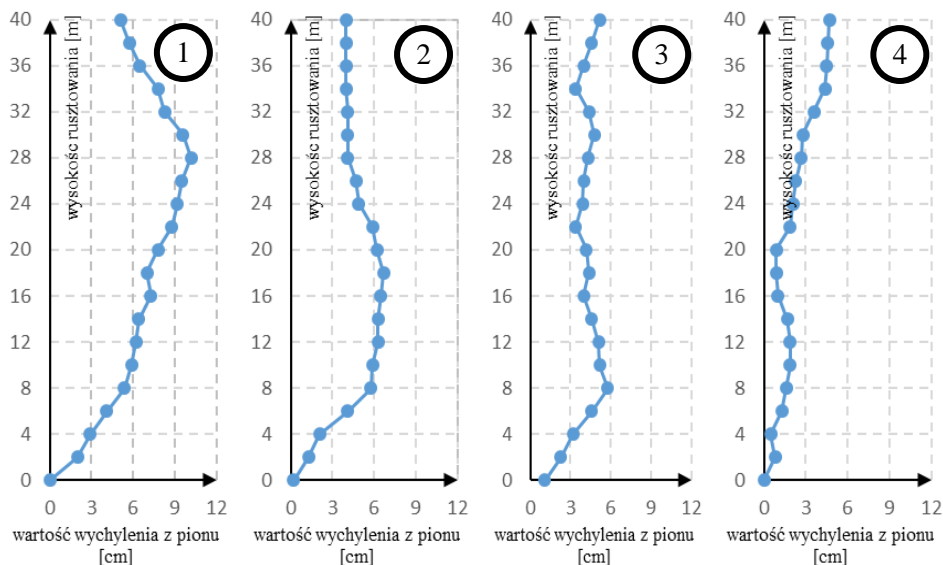
Jak widać, pierwszy wariant jest wariantem referencyjnym, nieposiadającym uszkodzeń, natomiast dodatkowe dwa ostatnie warianty, to uszkodzenia wprowadzone w miejscach, w których występują maksymalne naprężenia powodowane momentem zginającym. Są to charakterystyczne sytuacje dla rusztowań fasadowych, gdzie największe zginanie powstaje, jeżeli kotwienie jest zrealizowane w środku wysokości stojaka (stojak nr 5 na rysunku 6.5b) lub na załamaniu, wynikającym z oddziaływań poziomych i powstającym, jeżeli w rusztowaniu nie jest kotwionych kilka kolejnych poziomów (stojak nr 6 na rysunku 6.5b).

### 6.2.3 Imperfekcje geometryczne

Kolejnym analizowanym w badaniach elementem są imperfekcje. Rozpatrzono trzy warianty dotyczące imperfekcji. Pierwszym jest wariant referencyjny, w którym rusztowanie nie posiada imperfekcji geometrycznych. Drugi wariant to taki, w którym w geometrii rusztowania uwzględniono imperfekcje rzeczywiste. Wprowadzono je do modelu numerycznego na podstawie danych uzyskanych z pomiaru przeprowadzonego z użyciem technik geodezyjnych. Pomiaru tego dokonano na rzeczywistym rusztowaniu, którego schemat pokazano rysunku 6.6, użytym w warunkach budowy.



Rys. 6.6. Rusztowanie wykorzystane do analiz numerycznych: a) widok i oznaczenie pionów, dla których pokazane zostały imperfekcje geometryczne, b) schemat imperfekcji normowych



Rys. 6.7. Wartości imperfekcji rzeczywistych w pionach rusztowania z rysunku 6.6

Rusztowanie to można traktować jako wzorcowe, ponieważ zostało zaprojektowane zgodnie z zaleceniami normowymi i zmontowane zgodnie z projektem. Dodatkowo rusztowanie to ma bardzo regularną siatkę kotwienia, co eliminuje występowanie nienaturalnych koncentracji naprężeń, powodowanych oddziaływaniem poziomym wiatrem. Nie jest ono także połączone z innymi konstrukcjami oraz nie posiada żadnych niestandardowych zewnętrznych obciążeń pionowych i poziomych. Na rysunku 6.7 zestawiono rzeczywiste imperfekcje geometryczne w postaci zależności wychylecia rusztowania od pionu wzdłuż wysokości rusztowania. Zestawienie to przedstawiono dla wybranych stojaków analizowanego rusztowania zgodnie z oznaczeniem na rysunku 6.6a.

Jak widać imperfekcje rzeczywiste w rusztowaniach mają charakter przechylowy. Wielkości wychyleń mają różny rozkład po wysokości w kolejnych pionach w obrębie jednego rusztowania. Podobnie jest z wielkościami maksymalnymi wychyleń. Należy dodać, że według zaleceń normowych, podczas montażu rusztowania maksymalne dopuszczalne wychYLECIE od pionu nie może przekraczać wartości 40 mm. W analizowanym rusztowaniu maksymalna zarejestrowana wartość wychylecia to 102 mm.

Trzecim, ostatnim wariantem jest wprowadzenie imperfekcji geometrycznych do konstrukcji rusztowania według zaleceń normowych. Schemat wprowadzania imperfekcji normowych pokazany został na rysunku 6.6b. W tym przypadku do modelu numerycznego wprowadza się przesunięcia węzłów na poziomie pomostów o zadaną wartość imperfekcji (1 cm). Przesunięcia te są realizowane

zgodnie z kierunkiem dominującego obciążenia poziomego, czyli obciążenia wiatrem, przy czym przemieszczenia węzłów na kolejnych poziomach mają przeciwny zwrot.

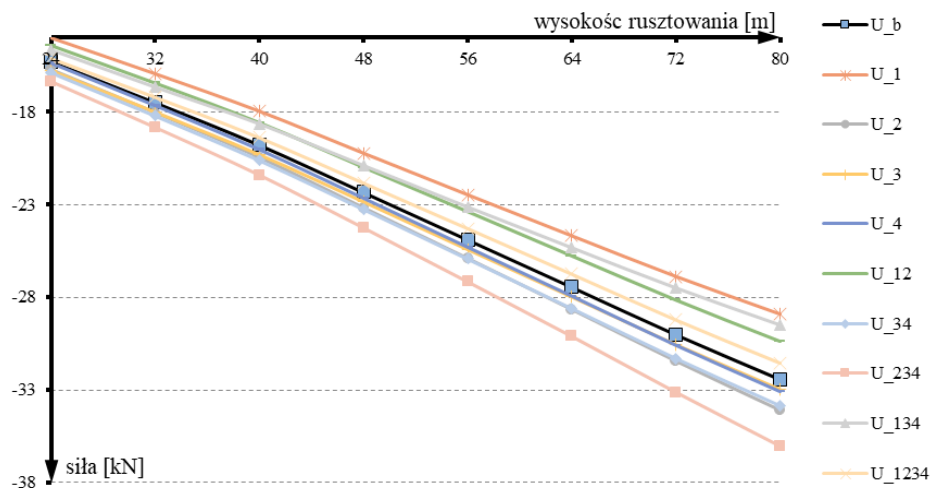
#### **6.2.4 Wysokość konstrukcji**

Warianty obliczeń, w których wprowadzane były rzeczywiste imperfekcje geometryczne, były przeprowadzone tylko przy wysokości rusztowania równej 40 m. Jest to faktyczna wysokość analizowanego rusztowania. Natomiast obliczenia, w których uwzględniano oba warianty teoretyczne, czyli obliczenia rusztowania bez imperfekcji i z imperfekcjami normowymi zostały dodatkowo rozszerzone o warianty, w których zmieniano wysokość konstrukcji. Rozpatrzono dwa warianty, w których zmniejszono wysokość rzeczywistego rusztowania o 8 m i o 16 m. Zmniejszenie polegało na usunięciu w kolejnych krokach 4 najwyższych poziomów rusztowania. Najniższym badanym rusztowaniem było rusztowanie o wysokości 24 m. Jest to wysokość, do której w przypadku większości systemów rusztowań dostępnych na polskim rynku, nie są potrzebne dodatkowe obliczenia statyczne. Rusztowania do tej wysokości można budować na podstawie wytycznych instrukcji montażu danego producenta. Rozpatrywano też konstrukcje o wysokościach większych. Podobnie jak przy zmniejszaniu, w tym przypadku w kolejnych wariantach dodawano po 4 poziomy. Kolejne poziomy dodawano zachowując wszystkie wyjściowe założenia konstrukcyjne. Najwyższe analizowane rusztowanie miało wysokość 80 m.

### **6.3 Wyniki obliczeń statycznych**

Wprowadzone uszkodzenia miały wpływ na stan naprężeń w stojaku, w którym zostały wytworzone. Dodatkowo zaobserwowano, że wprowadzone uszkodzenia mają wpływ na rozkład sił normalnych w stojakach. W stojaku, w którym wprowadzono uszkodzenie, siła normalna zmniejszyła się. Obciążenie pionowe jest przejmowane przez sąsiednie stojaki, głównie te, które nie posiadają uszkodzenia. Siły pionowe ze stojaków ram początkowych (na najniższym poziomie) są przekazywane do podstawek, czyli są to również wartości oddziaływania rusztowania na podłoże, na którym zostało posadowione. Na rysunku 6.8 przedstawiono zależność siły w podstawce od wysokości rusztowania w poszczególnych wariantach lokalizacji uszkodzenia.

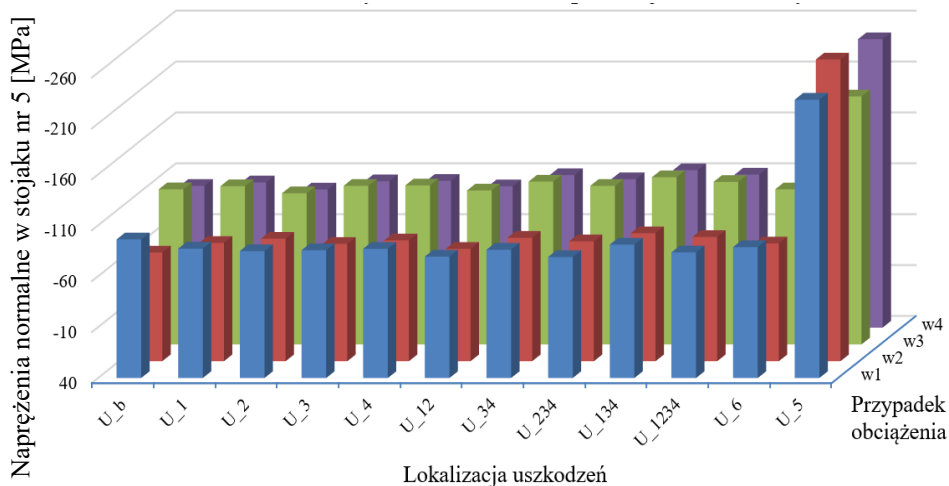




Rys. 6.8. Wartości siły normalnej w podstawce pod stojakiem nr 1 w III wariancie obciążenia (tabela 6.2) rusztowania bez imperfekcji o wysokości 80 m

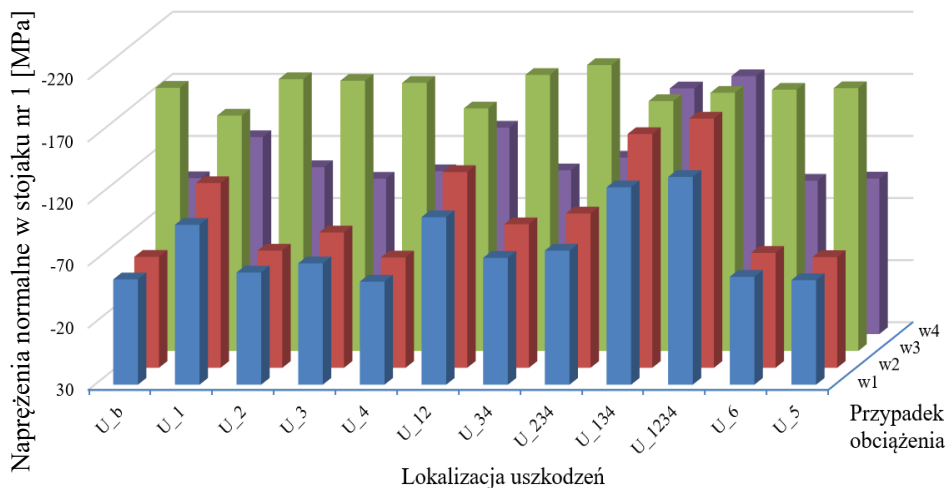
Są to wartości pochodzące z III wariantu obciążenia (obciążenia przyjęto według tabeli 6.2) w rusztowaniu bez imperfekcji o wysokości 80m, w podstawce, która jest zlokalizowana pod słupkiem oznaczonym nr 1. To właśnie w tej podstawce, ze wszystkich przeanalizowanych wariantów, uzyskano największą wartość siły normalnej. Na zestawieniu tym widać, że w stosunku do wariantu bez uszkodzeń, we wszystkich przypadkach, w których uszkodzenie jest wprowadzane do stojaka nr 1, siła w podstawce pod nim maleje. W przypadkach, w których stojak nr 1 nie posiada uszkodzenia, siła w podstawce pod nim rośnie. Maksymalna różnica pomiędzy siłami normalnymi w tym przypadku względem wariantu bez uszkodzenia to 12,3%.

Przypadki, w których uszkodzenia zostały wprowadzone do stojaków, które nie były zlokalizowane u podstawy rusztowania, czyli o numerze 5 i 6, miały pomijalnie mały wpływ na wielkość sił normalnych w podstawkach. Nie miały one też większego wpływu na wartości naprężeń w stojakach zlokalizowanych u podstawy. Na rysunku 6.9 zestawiono wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 5 z wariantu obliczeń rusztowania o wysokości 80 m z imperfekcjami normowymi. W tym przypadku zarejestrowano najwyższą wartość siły normalnej w stojaku, który nie był zlokalizowany u podstawy rusztowania. Jak widać, istotny wzrost naprężeń odnotowano tylko w przypadku, gdy uszkodzenie zostało wprowadzone właśnie do stojaka nr 5. Uzyskano w ten sposób przeszło dwukrotny wzrost naprężenia w stosunku do najwyższej wartości we wszystkich innych wariantach. Należy podkreślić jednak, że nawet w tym wariancie nie została przekroczona obliczeniowa wartość granicy plastyczności zdefiniowanego materiału.

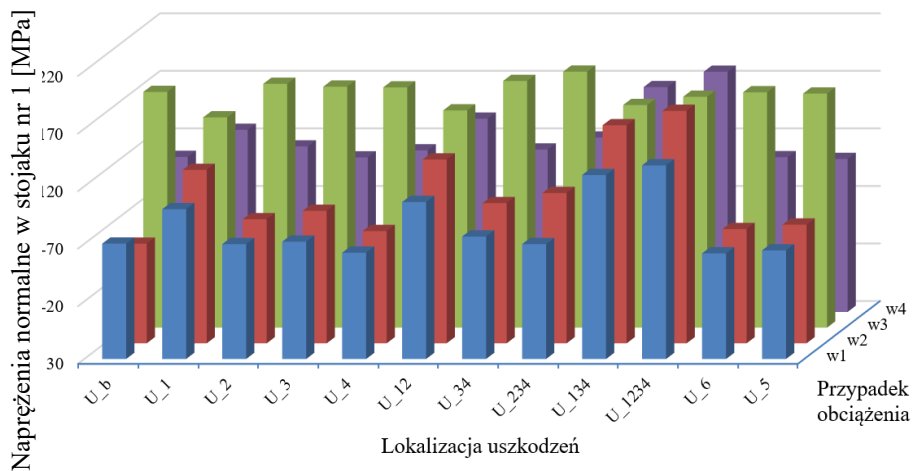


Rys. 6.9. Wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 5 rusztowania z imperfekcjami normowymi o wysokości 80 m

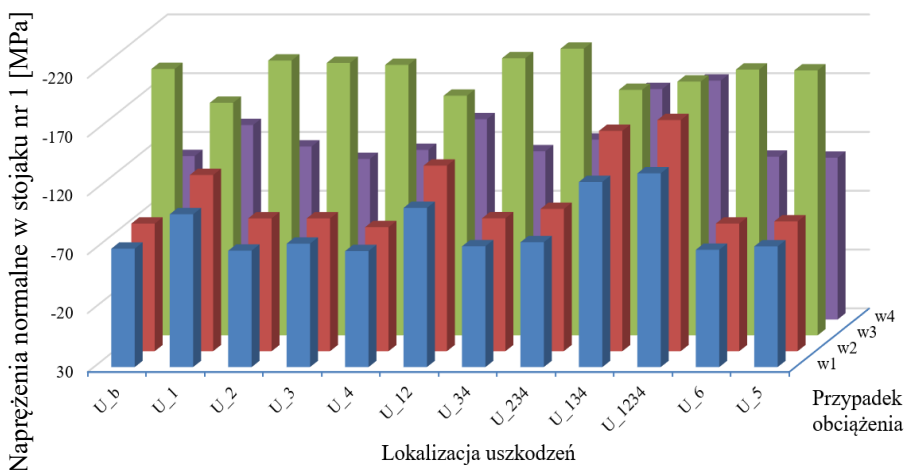
W celu porównania wpływu wszystkich rozpatrywanych wariantów imperfekcji geometrycznych na stan naprężenia, na rysunku 6.10, 6.11 i 6.12 zestawiono wyniki uzyskane z wariantu obliczeń rusztowania o wysokości 40 m. Są to wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 1, ponieważ w tym elemencie uzyskano maksymalną wartość w wariancie rusztowania o tej wysokości.



Rys. 6.10. Wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 1 rusztowania bez imperfekcji o wysokości 40 m



Rys. 6.11. Wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 1 rusztowania z imperfekcjami normowymi o wysokości 40 m

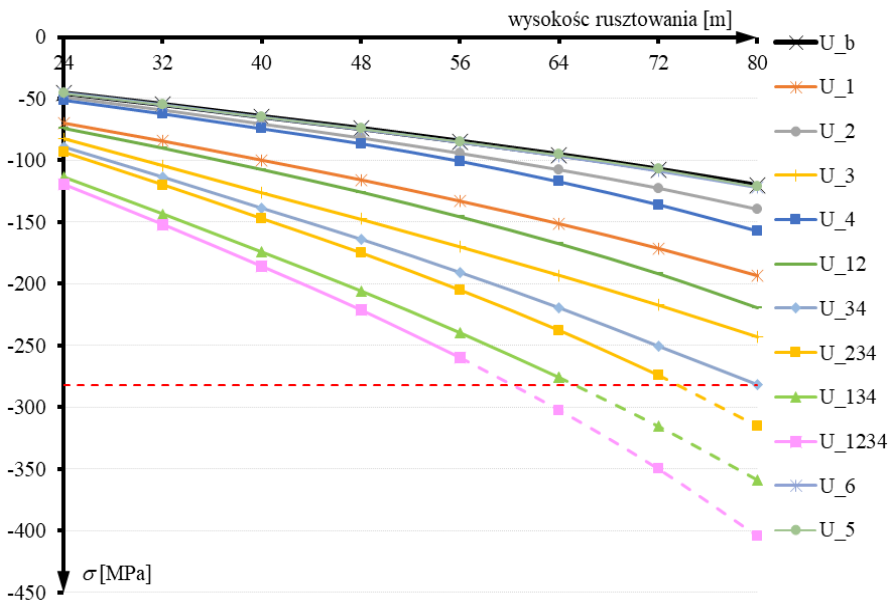


Rys. 6.12. Wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 1 rusztowania z imperfekcjami rzeczywistymi o wysokości 40 m

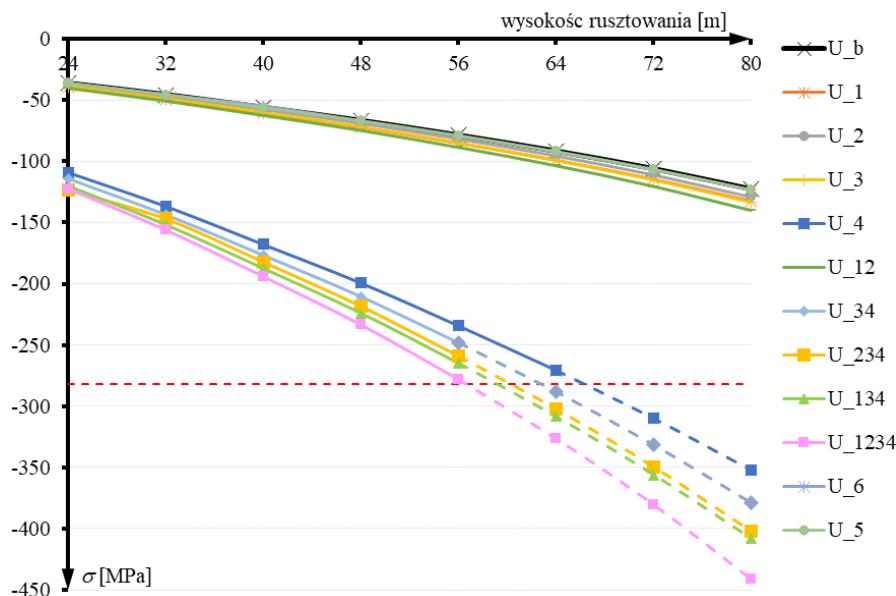
Jak widać, w odniesieniu do wszystkich wariantów lokalizacji uszkodzenia, największe wartości osiągają naprężenia normalne pochodzące z obliczeń uwzględniających imperfekcje rzeczywiste. W wariancie U\_234, w którym wartości są największe, są one wyższe maksymalnie o 7% w stosunku do referencyjnego wariantu bez imperfekcji. Natomiast w wariancie z imperfekcjami normowymi w wariancie U\_234, są niższe o 3%. W tych obliczeniach jest to szczególnie przypadek, ponieważ wartość ekstremalna naprężeń normalnych nie jest uzyskiwana w wierzchołku wprowadzonego uszkodzenia. W przypadku stojaka nr 1 mamy do czynienia z sytuacją, w której maksymalną wartość

naprężeń normalnych uzyskujemy w miejscu połączenia stężenia, czyli około 17 cm od dołu stojaka. W wariancie III obciążenia działanie wiatru skierowane jest równoległe do płaszczyzny rusztowania, czego konsekwencją jest powstanie największych sił normalnych w stężeniach. Efekt ten przy wysokości rusztowania równej 40 m przewyższa wpływ zginania powodowanego wygięciem stojaka. W tym przypadku wprowadzone uszkodzenia mają tylko taki wpływ na naprężenia normalne, że w wariancie U\_234 stojak nr 1, jako jedyny bez uszkodzenia, przejmuje większą część obciążenia pionowego, co powoduje wzrost siły normalnej i w połączeniu ze wspomnianym zginaniem daje największą wartość naprężeń normalnych.

Na rysunkach 6.13 i 6.14 przedstawiono wpływ wysokości rusztowania na uzyskiwane wartości naprężeń normalnych. Obliczenia, których wyniki przedstawiono na tych rysunkach, wykonano przy założeniu nieliniowości geometrycznej, natomiast nie uwzględniano nieliniowości materiałowej, ponieważ jak napisano wcześniej, w modelu prętowym programu Autodesk Simulation Multiphysics obliczenia po przekroczeniu wartości granicy plastyczności nie dają wiarygodnych wyników. Dlatego należy zaznaczyć, że wyniki te są obarczone błędem, to znaczy są wiarygodne tylko dla obliczeń, gdzie nie uzyskano naprężeń normalnych przekraczających granicy plastyczności. Jednak w celach poglądowych podano wyniki obliczeń dla wszystkich analizowanych wariantów wysokości rusztowań, jedynie odznaczając linią przerywaną tę, w których została przekroczona granica plastyczności.



Rys. 6.13. Wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 3 w IV wariancie obciążenia (tabela 6.2) rusztowania z imperfekcjami geometrycznymi



Rys. 6.14. Wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 4 w IV wariancie obciążenia (tabela 6.2) rusztowania z imperfekcjami geometrycznymi

Jak widać, wykresy na rysunkach 6.13 i 6.14 nie mają charakteru liniowego, co potwierdza słuszność użycia do obliczeń nieliniowej analizy statycznej i potwierdza wpływ nieliniowości geometrycznej (efektów II rzędu) na zachowanie rusztowania posiadającego uszkodzenie w formie wygięcia stojaka. Wykresy na rysunkach 6.13 i 6.14 przedstawiają wartości pochodzące z ramy, w której uzyskano najwyższe wartości naprężeń normalnych ze wszystkich zrealizowanych wariantów obliczeń. Szczególnie na rysunku 6.14 widać, jak duży wpływ na stan naprężeń normalnych ma wprowadzenie uszkodzenia do danego stojaka. Widać też wyraźnie, że naprężenia w rozpatrywanym stojaku zwiększają się wraz z wprowadzaniem uszkodzeń do sąsiednich stojaków. Na wykresach, w zależności od rozpatrywanego wariantu wysokości, widzimy nawet trzykrotny wzrost naprężeń względem referencyjnego wariantu bez uszkodzeń. Mimo, że wartości na pokazanych wykresach pochodzą ze stojaków jednej ramy, to wartości w poszczególnych wariantach lokalizacji uszkodzenia znacznie się różnią. Wynika to z faktu, że na rysunku 6.13 pokazano wyniki ze stojaka nr 3, do którego dołączone są poręcze w środku jego rozpiętości. Poręcze łączą go z sąsiednimi stojakami w płaszczyźnie rusztowania. Konsekwencją tego faktu jest to, że w wariantach, w których w stojaku nr 3 wprowadzone są uszkodzenia, uzyskujemy niższe wartości względem stojaka nr 4. Ponieważ spowodowane obciążeniem pionowym wychylenie poziome w wierzchołku uszkodzenia powodujące wzrost naprężeń jest częściowo blokowane przez stojaki sąsiednie, z którymi stojak nr 3 jest połączony za pośrednictwem porę-

czy. Inną konsekwencją tej konfiguracji elementów są większe wartości naprężeń normalnych w stojaku nr 3 względem stojaka nr 4 w wariantach, w których uszkodzenie wprowadzono do stojaka nr 1.

Na wykresach rysunkach 6.13 i 6.14 czerwoną przerywaną linią zaznaczono również wartość obliczeniowej granicy plastyczności. Jak widać rusztowanie analizowane w wariancie bez uszkodzeń we wszystkich wariantach wysokości uzyskuje wartości zdecydowanie poniżej tej granicy. Wprowadzenie uszkodzeń skutkuje tym, że dla analizowanej konfiguracji rusztowania, wysokości powyżej 56 m grożą wystąpieniem stanu awaryjnego. Tak jak napisano wcześniej, wartości naprężeń w tych obliczeniach, przekraczające wartość granicy plastyczności, nie mają sensu fizycznego i nie mogą być poddawane analizie

## **6.4 Podsumowanie analiz numerycznych całego rusztowania**

Przedstawione obliczenia pokazują, jak duży wpływ na wielkości naprężeń normalnych mogą mieć uszkodzenia w postaci łukowego wygięcia stojaka ramy. W celu uzyskania wiarygodnej oceny wpływu uszkodzeń na konstrukcję rusztowania, obliczenia należy przeprowadzić w zaprezentowany w pracy sposób, to znaczy obliczenia konieczne należy prowadzić z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i materiałowej. Należy też zweryfikować model prętowy ramy, przyjęty do obliczeń całej konstrukcji. Parametry modelu prętowego należy dobierać tak, żeby jego odpowiedź na obciążenie była taka sama, jak w precyzyjnym modelu stworzonym z elementów powłokowych. W obliczeniach należy też uwzględniać rzeczywiste imperfekcje geometryczne. Imperfekcje rzeczywiste, ze względu na swój nieregularny charakter, mogą dodatkowo zwiększać wartości naprężeń.



## 7 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ocena wpływu uszkodzeń na nośność rusztowań, jak i rozwiązanie pozostałych zagadnień, składających się na problem naukowy, opisany w pierwszym rozdziale pracy, wymagało przygotowania narzędzi do przeprowadzenia badań. Dlatego właściwe badania zostały poprzedzone:

- opracowaniem metodyki inwentaryzacji uszkodzeń rusztowań,
- przygotowaniem stanowisk do laboratoryjnych badań wytrzymałościowych rur i pełnych ram rusztowaniowych z uszkodzeniami,
- opracowaniem metod uwzględniania uszkodzeń w postaci wgięcia w rurze w modelach numerycznych,
- opracowaniem metody weryfikacji prętowych modeli numerycznych ram.

Każda z wymienionych metod badawczych jest oryginalnym osiągnięciem autora.

Na podstawie badań przeprowadzonych na rzeczywistych konstrukcjach w warunkach budowy stwierdzono, że użytkowane rusztowania posiadają uszkodzenia eksploatacyjne. Wykazano, że około 70% przeanalizowanych konstrukcji posiada uszkodzenia mające wpływ na nośność lub bezpieczeństwo użytkowania rusztowań. Wśród zidentyfikowanych uszkodzeń charakterystycznych dla rusztowań fasadowych, stworzono podział obejmujący trzy grupy:

- wpływające na nośność konstrukcji,
- wpływające na bezpieczeństwo użytkowników,
- wpływające na estetykę konstrukcji.

Główne uszkodzenia wpływające na nośność konstrukcji to: wgięcie rur i łukowe wygięcie stojaków ramy, dlatego te typy uszkodzeń są przedmiotem szczegółowych badań przeprowadzonych w pracy.

Badania laboratoryjne i numeryczne rur i ram wykazały, że wgięcia do 10% średnicy nie mają istotnego wpływu na nośność rury czy ramy. Ponadto, wpływ tego typu uszkodzenia uwiidocznia się przy siłach normalnych większych niż 80 kN, które nie występują w rzeczywistych rusztowaniach. Oznacza to, że w przypadku powstania takiego uszkodzenia w trakcie eksploatacji, rusztowanie nie musi być demontowane, ale ze względu na możliwą propagację mikrouszkodzeń, element nie powinien być użytkowany w kolejnych rusztowaniach, w których element mógłby być wyteżony w wysokim stopniu.

Badania, przeprowadzone na całych ramach wykazały, że wygięcia stojaków mają istotny wpływ na nośność rusztowań, a przede wszystkim następuje wzrost momentów zginających i w konsekwencji wzrost naprężeń normalnych. Stwierdzono, że defekt o tej samej wielkości zlokalizowany w płaszczyźnie ramy powoduje znacznie mniejsze obniżenie nośności niż taki sam, w którym prze-



mieszczenie wywołane jest deformacją w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy.

Ponieważ wygięcia łukowe stojaków są istotne dla nośności rusztowań, to w przypadku konstrukcji wysokich bądź o nietypowym kształcie lub obciążonych w nietypowy sposób, czyli w okolicznościach powodujących wysoki stopień wyężenia elementów, wygięcia stwarzają zagrożenie. Dlatego konstrukcja w takich sytuacjach powinna być poddana analizie statyczno-wytrzymałościowej z uwzględnieniem rzeczywistej geometrii i uszkodzeń. Model numeryczny ramy powinien być zweryfikowany według metodyki opisanej w pracy, czyli:

- w pierwszym etapie należy zbudować model powłokowy ramy i skalibrować go na podstawie badań laboratoryjnych,
- w drugim etapie – zbudować model prętowy, który może być wykorzystany w modelu pełnego rusztowania, i skalibrować go na podstawie porównania z modelem powłokowym ramy.

Jak pokazano w pracy, w typowej konstrukcji nawet o wysokości do 50 m, posiadającej uszkodzenia, istnieje możliwość spełnienia warunków stanu granicznego nośności. Dlatego według sposobu przedstawionego w pracy w rozdziale 6 można określić dopuszczalne wartości uszkodzeń dla typowych konstrukcji o wysokości do 24 m. Należy je określać indywidualnie dla każdego systemu, gdyż poszczególne systemy różnią się między sobą rozwiązaniami technicznymi a także materiałem, z którego są wykonane. Najlepszym wyjściem byłoby udostępnianie przez firmy produkujące rusztowania gotowych prętowych modeli numerycznych ram, zawierających charakterystyki materiałowe i geometryczne oraz opis podatności połączeń. Te modele z jednej strony mogłyby być wykorzystywane do projektowania nietypowych rusztowań, z drugiej – mogłyby pozwolić na szybkie opracowanie modelu pełnego rusztowania, w sytuacji gdy konieczne jest sprawdzenie, czy można udostępnić rusztowanie z uszkodzeniem do dalszej eksploatacji.

Z przedstawionych w pracy badań wynika, że uszkodzenie rusztowania w trakcie eksploatacji nie musi oznaczać jego demontażu. W rusztowaniach o wysokości do 24 m powinny być ustalone dopuszczalne wartości uszkodzeń, a wyższe rusztowania powinny być poddane analizie statyczno-wytrzymałościowej z uwzględnieniem rzeczywistych imperfekcji, i na tej podstawie powinna być podjęta decyzja o dalszej eksploatacji lub demontażu rusztowania.

Powyższe wnioski są wynikiem rozwiązania problemu naukowego postawionego w pracy. Natomiast wartością dodaną są następujące wnioski:

- Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych stwierdzono, że rzeczywiste imperfekcje geometryczne mają wpływ na stan sił wewnętrznych w konstrukcji rusztowań i mogą wzmacniać niekorzystne efekty występowania uszkodzeń,

- Odzworowanie w modelu numerycznym stanowiska do badań nośności ramy stwarza w przyszłości możliwość wykorzystania stworzonego modelu do badań porównawczych przy akredytacji badań nośności ram rusztowań,
- Przeprowadzone badań laboratoryjnych pozwoliło na precyzyjne określenie zachowania elementu, w tym potwierdziło sugerowane przez normę traktowanie nasuwanego połączenia między ramami jako połączenia sztywnego.

W pracy wykonano analizy statyczne fragmentów ram, pełnych ram i pełnych rusztowań ramowych z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i kontrolując wpływ nieliniowości materiałowej. Udowodniono, że mechaniczne uszkodzenie rusztowania nie musi powodować konieczności jego demontażu. Jednak koniecznie w każdym wypadku należy monitorować takie uszkodzenie ze względów na oddziaływania dynamiczne, jakim może podlegać rusztowanie. Autor planuje w przyszłości dalsze badania, w tym określenie wpływu obciążeń dynamicznych na rusztowania posiadające uszkodzenia w elementach konstrukcyjnych.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-M-47900-1, *Rusztowania stojące metalowe robocze – Określenia, podział i główne parametry*, 1996.
- [2] Gawęcka D., Gnot D., Kraszkiewicz P., Piłka A., Woźniak T., *Rusztowania budowlane – Nowoczesne systemy rusztowań roboczych*, Polska Izba Gospodarcza Rusztowań, 2006.
- [3] PN-EN 12811-1, *Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy – Część 1: Rusztowania Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania*, 2007.
- [4] PN-EN 12810-1, *Rusztowania elewacyjne z elementów prefabrykowanych – Część 1: Specyfikacje techniczne wyrobów*, 2003.
- [5] Wang F. *Aerodynamic characteristics of scaffolding with nonporous cladding*, PhD Thesis, Tokyo Polytechnic University, Japan, 2013.
- [6] 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.
- [7] Irtaza H., Beale R.G., Godley M.H.R., *Wind-tunnel investigation into the pressure distribution around sheet-clad scaffolds*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol.103, p.86–95, 2012.
- [8] 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, s. 1–12, 2014.
- [9] Irtaza H., *Experimental and computational determination of wind loads on netted/sheeted scaffolds*, PhD Thesis, Oxford Brookes University, 2009.
- [10] 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.

- [11] Yue F., Yuan Y., Li G.Q., Ye K.M., Chen Z.M., Wang Z.P. *Wind load on integral-lift scaffolds for tall building construction*, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.131(5), p. 816–24, 2005.
- [12] Charuvisit S., Hino Y., Ohdo K., Maruta E., Makuta K., *Wind tunnel experiment on wind pressures acting on the scaffolds in strong winds*, Journal of Wind Engineering JAWE, vol.32(1), p.1–10, 2007.
- [13] Zerbst U., Ainsworth R.A., Beier H.Th., Pisarski H., Zhang Z.L., Nikbin K., Nitschke-Pagel T., Münstermann S., Kucharczyk P., Klingbeil D., *Review on fracture and crack propagation in weldments – A fracture mechanics perspective*, Engineering Fracture Mechanics, vol.132, p.200–276, 2014.
- [14] Beaulieu L. V., Legeron F., Langlois S., *Compression strength of corroded steel angle members*, Journal of Constructional Steel Research, vol.66, p.1366–1373
- [15] Oszvald K., Tomka P., Dunai L., *The remaining load-bearing capacity of corroded steel angle compression members*, Journal of Constructional Steel Research, vol.120, p. 188–198, 2016.
- [16] Chen Y., Zhang H., Zhang J., Liu X., Li X., Zhou J., *Failure assessment of X80 pipeline with interacting corrosion defects*, Engineering Failure Analysis, vol.47, p. 67–76, 2015.
- [17] Beale R.G., *Scaffold research – A review*, Journal of Constructional Steel Research, vol.98, s. 188–200, 2014.
- [18] Beale R.G., *Review of research into scaffold structures*, Civil Engineering Computations: tools and techniques, p. 271–300, 2007
- [19] Chandransu T., Rasmussen KJR., *Review of past research on scaffold systems. Research report no. R905. Australia*, Centre for Advanced Structural Engineering, Sydney University, 2009.
- [20] Kuo, C.C., Peng, J.L., Yen, T., Chan, S.L., *Experimental study of modular falsework system with wooden shores under various path loads*, Adv. Struct. Eng. vol.11, p. 369–382, 2008.
- [21] Kałuziński D., Mańko Z., *Uszkodzenia rusztowań w czasie budowy nowych wiaduktów nad autostradą A18*, XXIII Konf. Nauk. Tech. Awary Bud, s. 895–902, 2007.

- [22] Peng J.L., Chan S.L., Wu C.L., *Effects of geometrical shape and incremental loads on scaffold systems*, J. Constr. Steel Res., vol.63, p. 448–459, 2007.
- [23] 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*, Adv. Steel Constr., vol.6, p. 949–962, 2010.
- [24] 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*, Eng. Struct., vol.32, p. 1003–1015, 2010.
- [25] Peng J.L., Ho C.M., Chan S.L., Chen W.F., *Stability study on structural systems assembled by system scaffolds*, J. Constr. Steel Res., vol.137, p. 135–151, 2017.
- [26] Huang Y., Chen W., Chen H., Yen T., Ykao Y., Lin C., *A monitoring method for scaffold-frame shoring systems for elevated concrete formwork*, Computers and Structures, vol.78, p. 681–690, 2000.
- [27] Peng J.L., Wu C.W., Chan S.L., Huang C.H., *Experimental and numerical studies of practical system scaffolds*, J. Constr. Steel Res., vol.91, p. 64–75, 2013.
- [28] Peng J.L., Ho C.M., Lin C.C., Chen W.F., *Load-carrying capacity of single-row steel scaffolds with various setups*, Adv. Steel Constr., vol.11, p. 185–210, 2015.
- [29] Peng J.L., Ho C.M., Chen C., Yang Y.B., *Experimental study on load capacities of isolated heavy-duty scaffolds used in construction*, Adv. Steel Constr., vol.10, p. 248–273, 2014
- [30] PN-EN 74-1, *Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 1: Złącza do rur – wymagania i metody badań*, 2006.
- [31] PN-EN 74-2, *Złącza, sworznie centrujące i podstawki stosowane w deskowaniach i rusztowaniach – Część 2: Złącza specjalne – wymagania i metody badań*, 2009.

- [32] Peng J.L., Yen T., Kuo C.C., Chan S.L., *Analytical and experimental bearing capacities of system scaffolds*, J. Zhejiang Univ. Sci. A, vol.10, p. 82-92, 2009.
- [33] Prabhakaran U., Beale R.G., Godley M.H.R., *Analysis of scaffolds with connections containing looseness*, Comput. Struct., vol.89, p. 1944–1955, 2011.
- [34] Chandrangu T., Rasmussen K.J.R., *Investigation of geometric imperfections and joint stiffness of support scaffold systems*, J. Constr. Steel Res., vol.67, p. 576–584, 2011.
- [35] Jia L., Liu H., Chen Z., Liu Q., Wen S., *Mechanical properties of right-angle couplers in steel tube–coupler scaffolds*, J. Constr. Steel Res., vol.125, p. 43–60, 2016.
- [36] Zhang X., Rasmussen K.J.R., Zhang H., *Structural modeling of cold-formed steel portal frames*, Structures, vol.4, p. 58–68, 2015.
- [37] Zhang X., Rasmussen K.J.R., Zhang H., *Second-order effects in locally and/or distortionally buckled frames and design based on beam element analysis*, Journal of Constructional Steel Research, vol.122, p. 57–69, 2016.
- [38] Qu H., Huo J., Li A., Jiang Y., Liu Y., *Experimental study on impact behaviour of steel plane tubular frames*, Thin-Walled Structures, vol.111, p. 210–223, 2017.
- [39] Litwin M., Górecki M., *Błędy wykonawcze podczas realizacji konstrukcji stalowych*, Budownictwo i Architektura, vol.4, s. 63–72, 2009.
- [40] Kowalski D., *Wpływ imperfekcji wykonawczych na stan naprężeń w płaszczu stalowego zbiornika walcowego o osi pionowej*, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, 2004.
- [41] Gwóźdź M., Woźniczka P., Tkaczyk A., *Odbudowa stalowych hal przemysłowych uszkodzonych w przebyłym pożarze*, BiTP, vol.44, s. 51–66, 2016.
- [42] Tuśnio N., *Numeryczna analiza wytrzymałości konstrukcji stalowych w warunkach pożaru*, Praca doktorska, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 2010.

- [43] Kocańda S., Szala J., *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997.
- [44] Kristoffersen M., Borvik T., Westermann I., Langseth M., Hopperstad O. S., *Impact against X65 steel pipes – An experimental investigation*, International Journal of Solids and Structures, vol.50, p. 3430–3445, 2013.
- [45] Yang J.L., Lu G.Y., Yu T.X., Reid S.R., *Experimental study and numerical simulation of pipe-on-pipe impact*, International Journal of Impact Engineering, vol.36, p. 1259–1268, 2009.
- [46] Al-Owaisi S.S., Becker A.A., Sun W., *Analysis of shape and location effects of closely spaced metal loss defects in pressurised pipes*, Engineering Failure Analysis, vol.68, p. 172–186, 2016.
- [47] Zhang C., Rathnayaka S., Shannon B., Ji J., Kodikara J., *Numerical interpretation of pressurized corroded cast iron pipe tests*, International Journal of Mechanical Sciences, vol.128–129, p. 116–124, 2017.
- [48] Arabzadeh H., Zeinoddini M., *A closed-form solution for lateral indentation of pressurized pipes resting on a flexible bed*, International Journal of Mechanical Sciences, vol.75, p. 189–199, 2013.
- [49] Eyvazinejad Firouzsalar S., Showkati H., *Thorough investigation of continuously supported pipelines under combined pre-compression and denting loads*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol.104, p. 83–95, 2013.
- [50] Akbari Alashti R., Jafari S., Hosseinipour S.J., *Experimental and numerical investigation of ductile damage effect on load bearing capacity of a dented API XB pipe subjected to internal pressure*, Engineering Failure Analysis, vol.47, p. 208–228, 2015.
- [51] 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, s. 160–164, 2013.
- [52] Halperin K.M., McCann M., *An evaluation of scaffold safety at construction sites*, Journal of Safety Research, vol.35, p. 141–150, 2004.

- [53] Pieńko M., Błazik-Borowa E. *Verification of the Numerical Model of Insert-Type Joint of Scaffolding in Relation to Experimental Research*. AIP Conference Proceedings 1922, 080003, 2018
- [54] Jastrzębski P., Mutermilch J., Orłowski W., *Wytrzymałość Materiałów*, Arkady, Warszawa, 1986.
- [55] Pieńko M., Robak A., Błazik-Borowa E., Szer J., *Safety conditions analysis of scaffolding on construction sites*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, vol.12, p. 72–77, 2018.
- [56] PN-EN 1993-1-1: *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*
- [57] Borowski Ł., Pieńko M., Wielgos P., *Evaluation of Inventory Surveying of Facade Scaffolding Conducted During ORKWIZ Project*, Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics), p. 189–192, 2017.
- [58] Błazik-Borowa E., Gontarz J., *Wpływ imperfekcji na pracę statyczno-wytrzymałościową typowego rusztowania*, Budownictwo i Architektura, vol.13(2), s. 325–332, 2014,
- [59] Błazik-Borowa E., Gontarz J., *The influence of the dimension and configuration of geometric imperfections on the static strength of a typical façade scaffolding*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol.16, p. 269–281, 2016.
- [60] Zhang H., Rasmussen K.J.R., *System-based design for steel scaffold structures using advanced analysis*, J. Constr. Steel Res., vol.89, p. 1–8, 2013.
- [61] Schommer S., Nguyen V., Maas S., Zürbes A., *Model updating for structural health monitoring using static and dynamic measurements*, Procedia Engineering, vol.199, p. 2146–2153, 2017.
- [62] Pieńko M. *Dobór kryteriów oceny nośności węzłów rusztowań budowlanych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Polska, 2018.
- [63] PN-EN 1991-1-4:2008. *Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1–4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru*.



- [64] Lipecki T., Jamińska-Gadomska P., Błazik-Borowa E. *Dynamic wind action on facade scaffoldings*, AIP Conference Proceedings 1922, 110001, 2018.