

## **Badania uszkodzonych elementów ram rusztowań systemu fasadowego**

**Aleksander Robak<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: a.robak@pollub.pl*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono sposób przygotowania oraz przeprowadzenia badań laboratoryjnych służących do analizy wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych głównego elementu konstrukcyjnego ram nośnych systemu fasadowego rusztowań. Obecność w zasadzie nieunikniona defektów powoduje zmniejszenie wytrzymałości w stosunku do wytrzymałości teoretycznej. Analiza numeryczna poprzedzona własnymi badaniami laboratoryjnymi pozwala dokładnie opisać zachowanie elementu.

**Słowa kluczowe:** Rusztowanie, uszkodzenia, pomiary laboratoryjne, rura stalowa, nośność elementu.

### **1. Wprowadzenie**

Rusztowania są elementem obecnym w niemal każdym procesie technologicznym, związanym ze wznoszeniem lub konserwacją obiektów budowlanych. Coraz bardziej skomplikowane obiekty inżynierskie wymagają opracowania specjalnych technologii, umożliwiających sprawną obsługę wszystkich procesów z nimi związanych. Podczas analizy dostępnych materiałów na temat projektowania i obciążeń rusztowań stwierdzono, że tematyka z tym związana jest pobieżnie traktowana przez obowiązujące normy jak i katalogi producentów, a także dostępne są jedynie nie liczne publikacje, poruszające zagadnienia wytrzymałości i stateczności tych tymczasowych konstrukcji. W literaturze poświęconej rusztowaniom nie ma też żadnych informacji na temat wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych na pracę statyczną elementów nośnych rusztowań. Praktycznym problemem jest ocena nośności rusztowania, którego elementy uległy znacznym uszkodzeniom w trakcie jego eksploatacji. Powstaje wtedy pytanie, czy można nadal korzystać z rusztowania, czy też należy konstrukcję natychmiast zdemontować. Odpowiedź na to pytanie można uzyskać, wykonując obliczenia statyczne rusztowania z uwzględnieniem uszkodzenia, ale będzie to możliwe wtedy, gdy opracuje się metodę oceny osłabienia elementu i uwzględniania tego faktu w całej konstrukcji rusztowania [1].

Analiza wpływu uszkodzeń na pracę statyczną ram nośnych rusztowań wymaga opracowania kilku rodzajów modeli komputerowych zbudowanych z elementów powłokowych a także prętowych. W obliczeniach MES pełne konstrukcje rusztowań modelowane są za pomocą elementów prętowych. Jednak uwzględnienie w takim modelu uszkodzeń eksploatacyjnych możliwe jest tylko poprzez wcześniejsze opracowanie sposobu uwzględniania uszkodzeń rusztowań, które mogą polegać, na przykład, na: wprowadzeniu zastępczych charakterystyk geometrycznych lub materiałowych, wprowadzeniu zaburzeń geometrii, itp. W tym celu należy wykonać badania laboratoryjne pracy statycznej fragmentów ram z uszkodzeniami oraz całych ram rusztowaniowych z uszkodzeniami. Wyniki badań laboratoryjnych i obliczeń komputerowych posłużą do opracowania metody uwzględniania uszkodzeń, w pierwszym etapie, w pojedynczych ramach, modelowanych za pomocą elementów powłokowych, a w kolejnym etapie w modelach prętowych pełnych konstrukcji rusztowań. Niniejsza praca opisuje badania laboratoryjne nośności fragmentów ram oraz całych ram z wybranymi uszkodzeniami, które są niezbędne do weryfikacji modeli komputerowych, oraz pozwalają na wstępną ocenę wpływu uszkodzeń w rusztowaniach na ich nośność.

## 2. Klasyfikacja typowych uszkodzeń elementów rusztowań

W odniesieniu do rusztowań uszkodzenia można podzielić na:

- Mikro defekty, z których możemy wyróżnić defekty o charakterze geometrycznym, czyli koncentratory naprężeń w postaci szczelin, pęknięć, wcięć niezwiązanych z budową materiału oraz defekty wewnętrznej budowy materiału w postaci dyslokacji, pustek rozlokowanych wzdłuż granic sąsiednich ziaren, wtrąceń obcego materiału.
- Makro defekty, z których możemy wyróżnić uszkodzania takie jak: deformacja kształtowników tworzących element (np. wygięcie słupka ramy), deformacja połączenia między kształtownikami tworzącymi element, deformacja przekroju poprzecznego kształtowników

Po rozpoznaniu uszkodzeń elementów rusztowań stwierdzono, że realny wpływ na nośność elementów mają wyżej wymienione makro defekty. Z oględzin przeprowadzonych na eksploatowanych elementach stwierdzono, że to właśnie duże uszkodzenia tego typu decydują o wycofanych z elementów użytku. W celu identyfikacji ewentualnych micro defektów przeprowadzono badanie z użyciem defektoskopu ultradźwiękowego. Badania te przeprowadzone zostały na elementach z widocznymi śladami wielokrotnego użytkowania, wyniki pozwoliły stwierdzić że defekty tego typu nie występują lub ich wielkość jest pomijalna przy analizie nośności.

## 3. Badania fragmentów rusztowań

### 3.1. Badania charakterystyk materiałowych

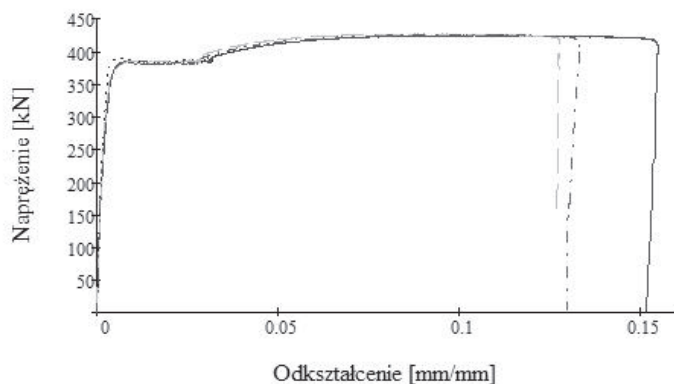
Do przeprowadzenia planowanych analiz i symulacji potrzebne są wartości parametrów takich, jak granica plastyczności, moduł Younga czy moduł wzmocnienia [2]. Wartości tych parametrów uzyskano z próby rozciągania przeprowadzonej na wycinkach elementów konstrukcyjnych ramy (próbki z elementów fabrycznie nowych). Na rys. 1 pokazano próbkę zamontowaną w prasie wytrzymałościowej, przygotowaną do obciążenia osiową siłą rozciągającą, oraz postać zniszczenia próbki.



Rys. 1. Wycinek rury przygotowany do obciążenia siłą osiową.

W celu wyznaczenia charakterystyk materiałowych podczas testu na 5 próbkach zmontowano ekstensometr a na kolejnych dwóch dla porównania pomiar odkształceń na próbce został rejestrowany przy pomocy systemu optycznego pomiaru odkształceń ARAMIS. Na rys. 2 pokazano wykres, na którym zestawiono wyniki otrzymane z testu w postaci zależności naprężenie-odkształcenie. Na wykresie tym przedstawiono wyniki z 2

próbek bez uszkodzenia oraz dwóch posiadających uszkodzenia. Przy takim zestawieniu zaobserwowano bardzo dużą zgodność wszystkich wyników. Różnice pomiędzy poszczególnymi próbkami mieszczą się w zakresie błędu statystycznego, co dodatkowo pozwala na stwierdzenie, że wygenerowane uszkodzenia, w znacznym zakresie odkształceń, nie mają wpływu na zachowanie się próbki poddanej osiowej sile rozciągającej. Całkowite zerwanie próbek uszkodzonych zachodzi przy mniejszych odkształceniach niż w odniesieniu do próbek bez uszkodzeń. Należy przy tym zaznaczyć, że uszkodzenia wytworzone zostały poprzez liniowe przyłożenie siły w taki sposób, aby doprowadzić do deformacji przekroju poprzecznego bez jego załamania i tylko nieznacznych zmian grubości ścianki elementu, odpowiada to uszkodzeniom występującym na eksploатовanych elementach powstałych na skutek np. uderzenia młotkiem lub innego miejscowego przyłożenia obciążenia.



Rys. 2. Wyniki otrzymane z próby rozciągania; linia ciągła – próbki w stanie nienaruszonym, linie przerywane – próbki uszkodzone.



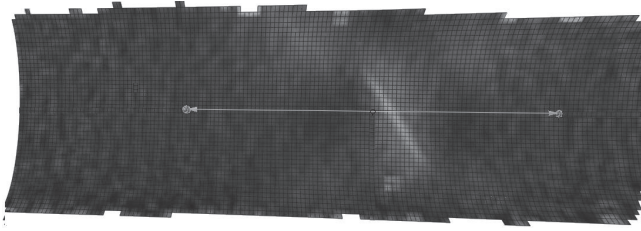
Rys. 3. Wycinek rury przygotowany do obciążenia siłą osiową.

### 3.2. Badania fragmentów rusztowań z uszkodzeniami

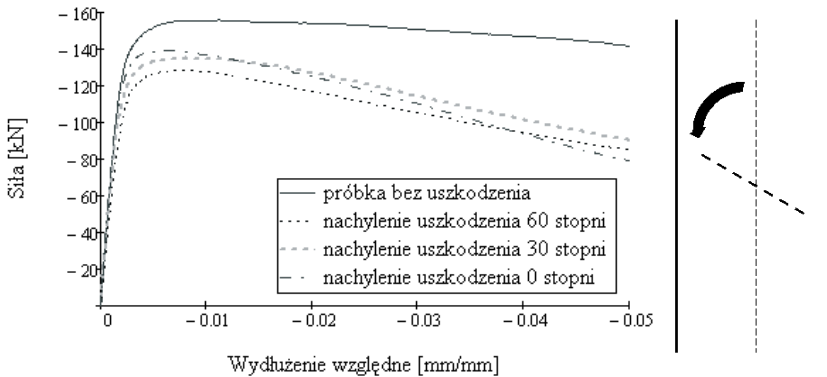
Po ustaleniu charakterystyk materiałowych przeprowadzono badanie, w którym wycinki rur z wygenerowanym uszkodzeniem poddano działaniu siły ściskającej i rozciągającej. Eksperyment, w którym próbka jest poddana działaniu osiowej siły ściskającej wymagała przygotowania przegubowych uchwytów, zapobiegających

przekazywaniu momentu zginającego na szczęki prasy wytrzymałościowej, pojawiającego się w późniejszych fazach doświadczenia. Każde wprowadzenie do układu pomiarowego takich elementów, obciąża eksperyment dodatkowymi błędami, dotyczy to szczególnie przemieszczeń rejestrowanych przez prasę na początku badania, spowodowane jest to „układaniem” się elementów. 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 przez system optycznego pomiaru odkształceń ARAMIS. W celu użycia systemu ARAMIS na próbkę naniesione zostały punkty z farby na podstawie ich wzajemnych przemieszczeń podczas testu wyznaczone zostaną odkształcenia na powierzchni próbki. Próbkę, przygotowaną do obciążenia osiową siłą ściskającą, wraz z uchwytami, umożliwiającymi zamocowanie wycinka rury pokazano na rys. 3.

Wyniki otrzymane z próby ściskania przedstawiono na rys. 5. Na wykresie tym pokazano zależność siły i skrócenia względnego mierzonego między dwoma punktami usytuowanymi w odległości ok. 4cm od środka osi uszkodzenia (rys.4). Pomiarów wykonano w odniesieniu do próbki bez uszkodzenia oraz trzech próbek z uszkodzeniami, których oś z osią elementu tworzą kąty:  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  i  $60^{\circ}$ . Na wykresie widać, że w próbkach z uszkodzeniami uzyskano mniejszą wartość siły maksymalnej. Zgodnie z przewidywaniami widać też, że im kąt pomiędzy osią elementu a uszkodzenia jest większy tym wartość siły maksymalnej, uzyskanej w pomiarach, jest większa. Inaczej mówiąc uszkodzenia wzdłuż osi elementu są mniej niebezpieczne niż uszkodzenia prostopadłe do osi elementu.



Rys. 4. Obraz uzyskany z analizy przeprowadzonej przez system ARAMIS.

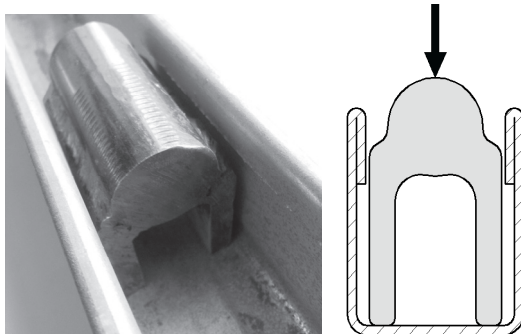


Rys. 5. Wyniki otrzymane z próby ściskania rury z deformacjami kształtu oraz schemat usytuowania uszkodzenia względem osi przęta.

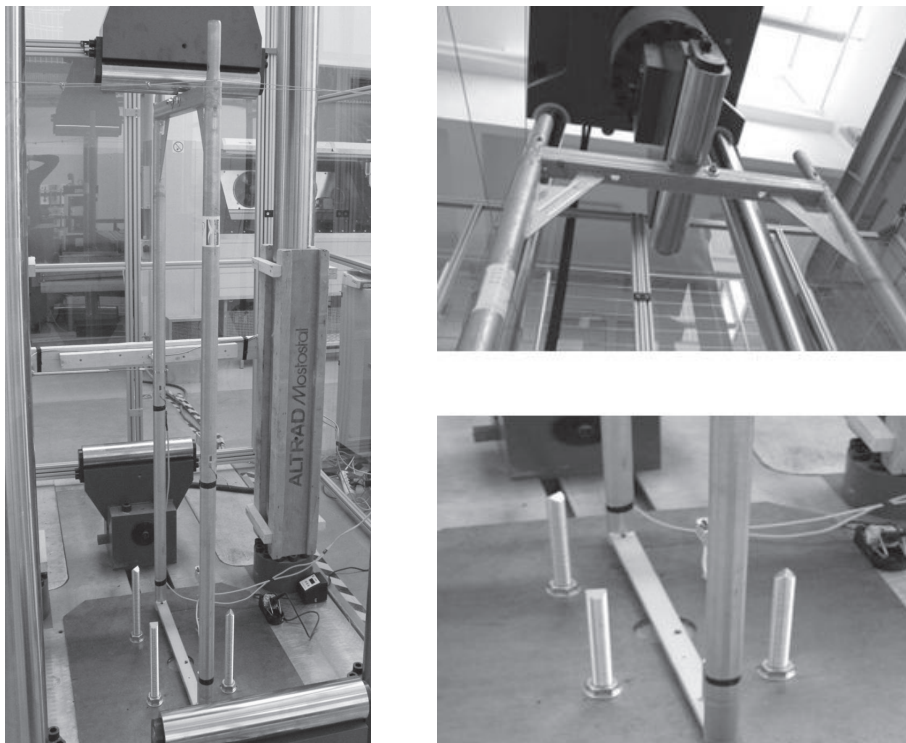
#### 4. Badania pełnej ramy systemu fasadowego

Innym rodzajem badań laboratoryjnych uszkodzeń, występujących w ramach rusztowaniowych, były badania wytrzymałościowe całych ram systemu fasadowego rusztowań w prasie Żwick i porównanie odkształceń ramy nienaruszonej z odkształceniami

ramy, posiadającej uszkodzenia, polegające na wygięciu słupków. Strzałka ugięcia słupków wynosiła ok. 1cm na dwu metrowym elemencie.



Rys. 6. Schemat przekazania siły na ramę rusztowania w prasie wytrzymałościowej.

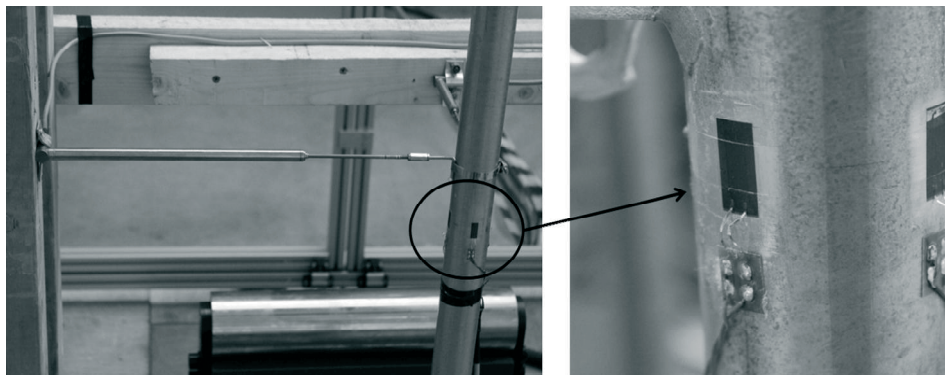


Rys. 7. Stawisko do obciążania ramy systemu fasadowego rusztowań.

Ze względu na stosunkowo duże wymiary oraz bardzo dużą smukłość takich elementów, bardzo ważne jest precyzyjne ustawienie ram względem prasy. Jeżeli planuje się porównanie wyników badań laboratoryjnych z obliczeniami to należy pamiętać, że sytuacja pomiarowa musi dać możliwość przyjęcia jednoznacznych warunków brzegowych i sposobu przyłożenia obciążenia [3]. 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 kolejnych ram polega na nasunięciu na przygotowaną podstawę i ustawieniu ramy w pionie. Pozwoliło to na jednakowe ustawienie wszystkich badanych elementów centralnie pod trawersą, przekazującą obciążenia a także wiernie odwzorowało zamocowanie elementu

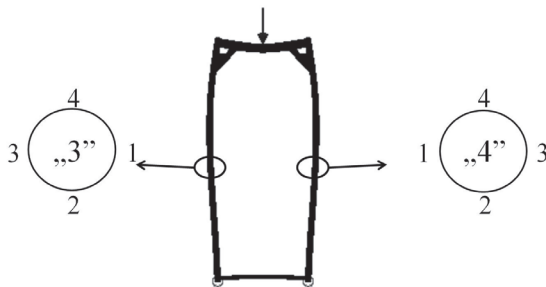
w rzeczywistych konstrukcjach rusztowań. Zgodnie z normą [4] połączenie rama-rama powinno być modelowane, jako sztywne. Obliczenia wykonane dla tego stanowiska pokazały jednak, że na dole ramy należy przyjąć podpory, blokujące przesuw i umożliwiające swobodny obrót elementu. Drugim ważnym aspektem, uwzględnionym w stanowisku badawczym jest sposób przyłożenia obciążenia.

Na rys. 6. przedstawiono schemat przekazania siły z trawersy prasy na u-profil ramy zrealizowany za pomocą specjalnie wykształconego elementu stalowego. Brak tego elementu oznaczałby punktowe przekazanie siły na bardzo smukłe półki u-profilu, co przy stosowanym podczas badań zakresie wartości obciążenia spowodowałoby miejscowe zniszczenie na skutek utraty stateczności. Dodatkowo zastosowane rozwiązanie pozwala uniknąć nierównomiernego obciążenia spowodowanego różnicami w długości półek u-profila. Stanowisko badawcze wraz ze zmontowanym elementem pokazano na rys. 7.



Rys. 8. Aparatura pomiarowa zmontowana na ramie podczas badań.

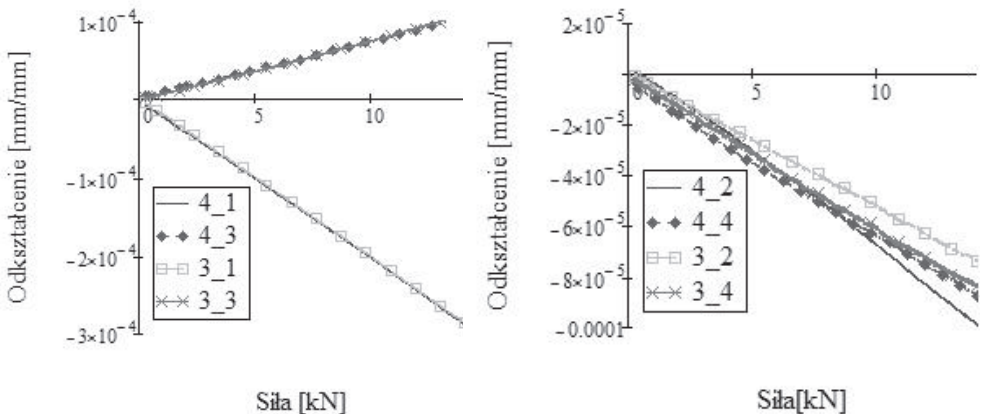
Na rys. 8 przedstawiono aparaturę pomiarową, zastosowaną podczas badań ramy. Na każdym ze stojaków w odległości 95cm od podstawy ramy przyklejono zestaw czterech tensometrów elektrooporowych, mierzących odkształcenia w kierunku pionowym. Dodatkowo na jednym ze stojaków zamontowano zestaw dwóch czujników przemieszczenia umieszczonych 105cm od podstawy, mierzących przemieszczenia poziome stojaka w płaszczyźnie ramy oraz prostopadłe do płaszczyzny ramy. Wszystkie wyniki łącznie z siłą rejestrowane zostały za pomocą analizatora sygnału Hottinger.



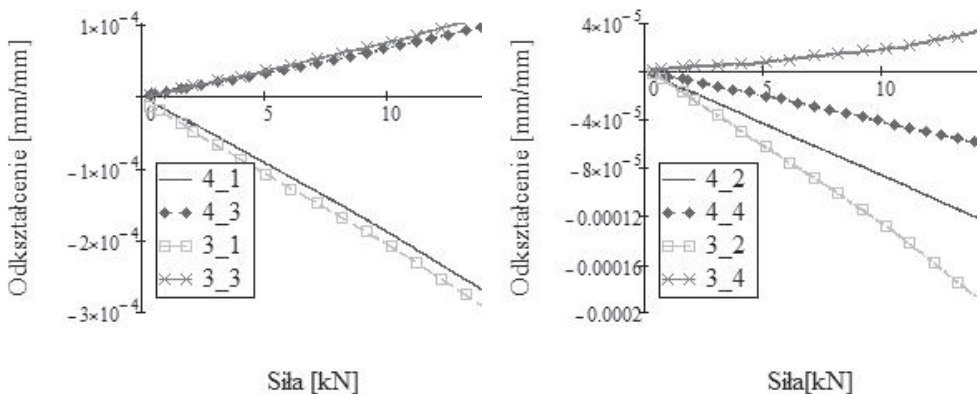
Rys. 9. Schemat statyczny oraz rozmieszczenie tensometrów na ramie.

Na rys. 9 schematycznie zaznaczono rozmieszczenie tensometrów na ramie oraz w obrębie każdego ze słupków. Wykresy pokazane na rys. 10 przedstawiają wartości odkształceń z tensometrów w zależności od siły, zarejestrowanej podczas obciążenia fabrycznie nowej ramy pozbawionej uszkodzeń. Na wykresie umieszczonym po lewej stronie zestawiono wartości odczytane z tensometrów, w których wartości odkształceń są efektem działania zarówno osiowej siły ściskającej jak i momentu zginającego z obu słupków ramy, natomiast po prawej stronie zestawiono wartości z tensometrów, w których wartości odkształceń powinny być efektem działania jedynie osiowej siły ściskającej.

Z obserwacji oraz wstępnej analizy numerycznej wynika, że na wykresie po prawej stronie ze względu na symetryczność geometrii modelu oraz obciążenia, wartości zarejestrowane we wszystkich czterech tensometrach powinny być takie same. Różnice między poszczególnymi odczytami wynikają z niedokładności stanowiska badawczego (pionowość układu, umiejscowienie tensometru względem osi słupka), które mimo staranności wykonania pomiarów nie udało się uniknąć. Na rys. 11 umieszczono analogicznie odczyty z badania ramy, w której stwierdzono uszkodzenie w postaci wygięcia jednego ze słupków ramy. Jak widać tego typu defekt ma znaczący wpływ zarówno na rozkład jak i wielkości ekstremalne odkształceń a co za tym idzie nośność elementu. Różne defekty ramy takie jak wygięcie słupka z płaszczyzny ramy, wygięcie w płaszczyźnie, deformacja połączenia pomiędzy słupkiem i u-profilem, czy zwichrzenie ramy wywołują inne jakościowo stany naprężeń. Powodują przede wszystkim to, że układ nie jest równomiernie obciążony, a ze względu na wygięcie występują w nim większe momenty zginające. Ponieważ słupki ram są elementami smukłymi, to ma to bardzo duży wpływ na pracę statyczną całego układu. W przypadku badanej uszkodzonej ramy, w zakresie sprężystym, widać dwukrotny wzrost odkształceń w stosunku do ramy nienaruszonej, wynikających ze zginania jednego ze słupków. Do wspomnianej wcześniej analizy numerycznej użyto programu obliczeniowego ALGOR opartego na MES. W obliczeniach użyto liniowej analizy statycznej, ponieważ przy przyjętym zakresie sił w doświadczeniu nie wykroczyło poza część sprężystą pracy elementu. Model zbudowany został w całości z elementów powłokowych o sześciu stopniach swobody (elementy Plate z biblioteki programu ALGOR).



Rys. 10. Zależność siła-odkształcenie zarejestrowane podczas badań ramy bez uszkodzeń.



Rys. 11. Zależność siła-odkształcenie zarejestrowane podczas badań ramy z uszkodzeniem.

## 5. Wnioski

Przedstawione w pracy badania laboratoryjne pozwalają na wyciągnięcie wniosków jakościowych. Na podstawie tych badań można stwierdzić, że uszkodzenie próbek, polegające na zdeformowaniu kształtu przekroju z zachowaniem jego ciągłości w znaczącym zakresie obciążeń nie mają wpływu na nośność elementów rozciąganych. W przypadku rurowych elementów ściskanych uszkodzenia prostopadłe do osi elementu są bardziej niebezpieczne dla konstrukcji niż uszkodzenia wzdłuż osi. Ponadto wygięcie słupków i inne uszkodzenia, zmieniające kształt ramy, mają znacznie większy wpływ na nośność konstrukcji niż lokalne uszkodzenia, wywołane np. uderzeniem młotka. W przypadku opisywanych badań stwierdzono, że wygięcie słupka spowodowało niemal dwukrotne zwiększenie odkształcenia słupków ramy i to tylko w zakresie sprężystym, a uszkodzenia lokalne zmniejszyły nośność elementów ściskanych na poziomie 10%.

Powyższe wnioski opisują tylko jakościowe zmiany nośności, jakie mogą wystąpić w konstrukcji. Dalsze badania dokładnych zależności pomiędzy wielkościami, rodzajem i lokalizacją uszkodzeń należy przeprowadzić za pomocą obliczeń komputerowych, a przedstawione badania posłużą również do weryfikacji modeli komputerowych.

Na koniec warto zwrócić uwagę na jeszcze jeden aspekt badań laboratoryjnych, które mają uzupełniać i weryfikować obliczenia komputerowe. W takich badaniach bardzo ważne jest, aby opracować sposób przykładania obciążenia oraz oparcie próbki w badaniach laboratoryjnych w taki sposób, aby w sposób jednoznaczny w modelu komputerowym można było wprowadzić warunki brzegowe i siły, a podczas badań elementów uszkodzonych należy poddawać próbom wytrzymałościowym elementy tylko z jednym rodzajem uszkodzeń.

## Literatura

- 1 H.Zhang, T. Chandrangu, K.J.R. Rasmussen: Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems, *Structural Safety*, 32, 2010, 393-401.
- 2 Brunarski L., Kwieciński M., *Wstęp do teorii sprężystości i plastyczności*, Wydawn. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984.
- 3 Pieńko, M. and Błazik-Borowa, E., Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes, *Engineering Structures*, vol 48, pp. 1-9, 2013
- 4 PN-EN 12811-1:2007: Tymczasowe konstrukcje stosowane na placu budowy. Część 1: Rusztowania. Warunki wykonania i ogólne zasady projektowania

## Tests of damaged members of facade scaffolding bearing frames

Aleksander Robak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: a.robak@pollub.pl*

**Abstract:** The preparation and execution of laboratory tests for analysis of influence of operational damage in the main structural member of facade scaffolding bearing frame on the frame capacity are presented in this paper. Virtually unavoidable presence of defects demands reduction of the material strength in comparison to the theoretical one. Numerical analysis has been preceded by author's own laboratory tests which allow to description in detail the behavior of scaffolding member.

**Keywords:** Scaffolding, damage, laboratory tests, steel pipe, capacity of scaffolding members.