

Wpływ uszkodzeń mechanicznych na nośność głównych elementów konstrukcyjnych systemu fasadowego rusztowań budowlanych

dr inż. Aleksander Robak, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska

1. Wprowadzenie

Obecnie na budowach dominują rusztowania systemowe, czyli konstrukcje stworzone z prefabrykowanych elementów, w których jednoznacznie narzucone są wymiary głównej siatki konstrukcyjnej. Analizy w niniejszym opracowaniu prowadzone były na elementach wybranego systemu ramowego rusztowań. Głównym elementem w systemach ramowych jest sztywna rama złożona z dwóch stojaków, czyli elementów pionowych oraz łączących je belek poziomych. Stojaki wykonane są z rury $\varnothing 48,3$ mm o różnych grubościach ścianki w zależności od systemu lub materiału i długości 2,0 m, co jest standardem światowym. Rury te wykorzystywane są również w wielu innych elementach konstrukcyjnych tworzących system, takich jak stężenia czy dźwigary kratowe. Wspomniane powyżej elementy w klasycznych formach rusztowania są elementami, które poddane są działaniu siły osiowej. Szczególnie stojaki, które poza szczególnymi przypadkami gdy konstrukcja rusztowania jest „podwieszona”, są elementami głównie ściskanymi. Dlatego w niniejszym opracowaniu przedstawiono analizy, w których określono wpływ wybranych uszkodzeń eksploatacyjnych na nośność rury $\varnothing 48,3$ mm obciążonej siłą osiową.

2. Uszkodzenia 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 na temat uszkodzeń uzyskano na podstawie inwentaryzacji rzeczywistych konstrukcji w trakcie ich eksploatacji. Badania realizowano w różnych regionach

na terenie niemal całej Polski [1]. Badania tego typu były również tematem prac naukowych zespołów z Hiszpanii [2] oraz Stanów Zjednoczonych [3]. Podczas realizacji badań jednoznacznie stwierdzono, że elementy wykorzystywane do tworzenia konstrukcji rusztowań mają uszkodzenia. W pracy [4] dokonano klasyfikacji uszkodzeń występujących w rusztowaniach budowlanych oraz przedstawiono ich zestawienie ilościowe. Uszkodzenia w rusztowaniach mogą powstać na skutek miejscowego przeciążenia spowodowanego nierównomiernym rozkładem obciążenia. Jednak wydaje się, że dużo częściej uszkodzenia są powodowane 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 przewidzieć miejsce, kierunek i wartość takiego obciążenia. Innym czynnikiem mającym bardzo duży wpływ na stan techniczny elementów rusztowań, jest tymczasowość konstrukcji z wielokrotnym użytkowaniem tych samych elementów w nowych realizacjach. Wiąże 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 załadunku, transportu i rozładunku elementów. W pracy [4] wskazano, że z punktu widzenia nośności konstrukcji najbardziej niebezpieczne są uszkodzenia w postaci punktowego wgięcia (deformacji przekroju poprzecznego rury) oraz łukowego zakrzywienia osi stojaka. Dlatego to właśnie te dwa rodzaje uszkodzeń poddano szczegółowej analizie opisanej w niniejszej pracy.

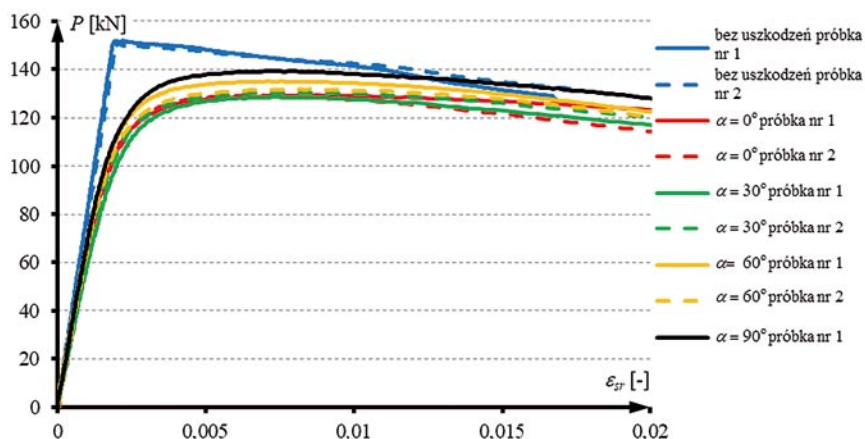
Rys. 1. Wyniki otrzymane z próby ściskania wycinka rury

3. Badania laboratoryjne stojaków z uszkodzeniami

Badania laboratoryjne są najlepszym sposobem sprawdzenia zachowania elementu konstrukcyjnego pod wpływem określonego oddziaływania zewnętrznego. Podczas badań wykonywanych na rzeczywistych elementach uzyskujemy informacje na temat niewralgicznych punktów badanego elementu lub ich układu. Dlatego niezmiernie 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 opisanych w niniejszej pracy. W celu precyzyjnego określenia wpływu uszkodzenia na nośność danego elementu należało obciążyć pojedynczą ramę. W przeciwnym przypadku będziemy mogli mówić o wpływie uszkodzenia na pewien konkretny układ elementów, gdyż ten sam układ konstrukcyjny o innych wymiarach z wprowadzonym identycznym uszkodzeniem, 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 badawczych, dostosowanych do badania pojedynczych elementów lub nawet ich fragmentów z wykorzystaniem dostępnych maszyn wytrzymałościowych.

3.1. 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



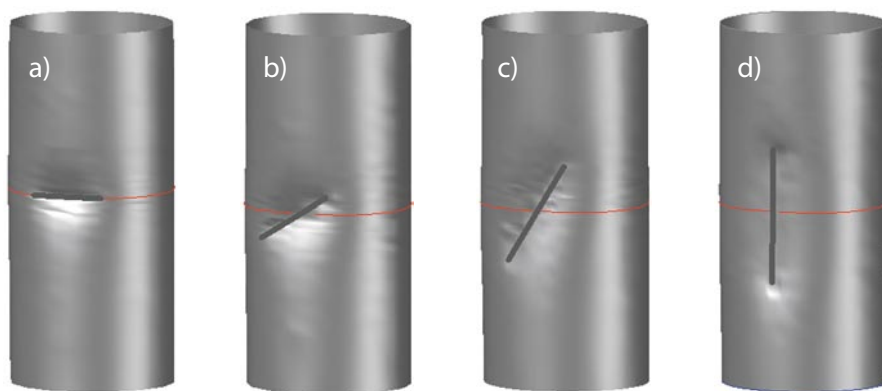
nieposiadających uszkodzeń. Wyniki z takiego testu traktowano jako referencyjne. W kolejnych etapach badań oraz późniejszych analizach, wszystkie wyniki były porównywane do tych uzyskanych z testów, przeprowadzonych na elementach bez uszkodzeń. Przeprowadzono dwa rodzaje badań. W pierwszym, oddziaływaniu 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.

3.2. Badanie laboratoryjne wycinka rury

W badaniach zachowania wycinków rury obciążane były elementy o długości 50 cm. Próbki do badań zostały pobrane ze stojaka ramy. W pierwszej serii badań głównym celem było określenie charakterystyk materiałowych. Podobne badania zostały już wcześniej wykonane na Politechnice Lubelskiej i opisane w pracy [5]. 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 ich wyniki potwierdziły, że uszkodzenia w formie punkowego wgięcia rury w przypadku próby rozciągania nie mają istotnego wpływu na nośność elementu.

W następnej kolejności przeprowadzono badanie, w którym wycinki rur z uszkodzeniem poddano działaniu siły ściskającej. Wyniki otrzymane z próby ściskania, przedstawiono na rysunku 1. Na wykresie pokazano zależność pomiędzy siłą, zarejestrowaną na trawersie maszyny wytrzymałościowej podczas testu, i średnim odkształceniem. Wytworzone uszkodzenia zróżnicowano pod względem nachylenia osi uszkodzenia względem

Rys. 2. Schematy uszkodzenia w postaci punkowego wgięcia rury



płaszczyzny przekroju poprzecznego rury, czyli płaszczyzny poziomej podczas badania. W poszczególnych próbkach oś uszkodzenia, mierząc od kierunku poziomego, była nachylona pod kątem 0, 30, 60 oraz 90°. Schematy wytworzonych uszkodzeń na rurach przedstawiono na rysunku 2. Po lewej pokazana jest rura z uszkodzeniem nachylonym pod kątem 0°, w kolejnych nachylenie się zwiększa i po prawej mamy rurę z uszkodzeniem nachylonym pod kątem 90°.

Na wykresie, pokazanym na rysunku 1, 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 z powodu 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.

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

3.3. Badania laboratoryjne całej ramy

Kolejnym zrealizowanym w ramach pracy badaniem było wytrzymałościowe badanie całych ram systemu

ramowego rusztowań w maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell. Opis stanowiska badawczego zamieszczono w pracy [6]. Podobnie, jak w przypadku wcześniej opisanych badań, najpierw obciążeniu poddano element niemający uszkodzeń. Wyniki z tego testu traktowano jako referencyjne w odniesieniu do wyników badań kolejnych 7 ram z uszkodzeniami. W badaniach tych analizowano wpływ uszkodzeń w postaci wygięcia osi stojaka na nośność i pracę statyczną ramy. Analizowano wpływ uszkodzenia o strzałce ugięcia wielkości 24 mm oraz 38 mm, zlokalizowanego zarówno w płaszczyźnie ramy, jak i prostopadłe do płaszczyzny ramy. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na dalszą analizę wpływu kierunku wygięcia stojaka, a także na określenie wpływu wielkości uszkodzenia na zachowanie się ram pod wpływem obciążenia pionowego.

Aparaturę pomiarową, zastosowaną podczas badań ramy, stanowiły tensometry elektrooporowe umieszczone na każdym ze stojaków ramy w odległości 95 cm od podstawy. W badaniu zastosowano tensometry foliowe TFs 5/120. Wszystkie tensometry podczas badania służyły do pomiaru odkształcenia w kierunku pionowym. Na każdym ze stojaków umieszczano 4 tensometry rozmieszczone promieniście co 90° względem osi stojaka (rys. 4). Dodatkowo na jednym ze stojaków montowano zestaw dwóch czujników przemieszczeń, umieszczanych na wysokości 105 cm od podstawy. Czujniki te zastosowano w celu pomiaru przemieszczeń poziomych stojaka w płaszczyźnie ramy oraz prostopadłych do płaszczyzny ramy. Podczas badań ram z uszkodzeniem czujniki przemieszczeń były umieszczone na stojaku, na którym zostało wytworzone uszkodzenie. Dane zarejestrowane przez wszystkie wspomniane wyżej czujniki były użyte do weryfikacji modeli numerycznych w dalszej części pracy.

3.4. Podsumowanie badań laboratoryjnych

Przeprowadzone badania dostarczyły informacji o zachowaniu elementów podczas obciążenia siłą ściskającą

ramy rusztowań ramowych. W badaniach fragmentów rur potwierdzono właściwości materiałowe rur, z których zrobiono stojaki ram, 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 sprężystości 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 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.

4. Badania numeryczne stojaków z uszkodzeniami

Precyzyjne modele numeryczne są często niezbędne zarówno podczas projektowania nowych konstrukcji, jak i 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.

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. 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.

4.1. Analiza numeryczna 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

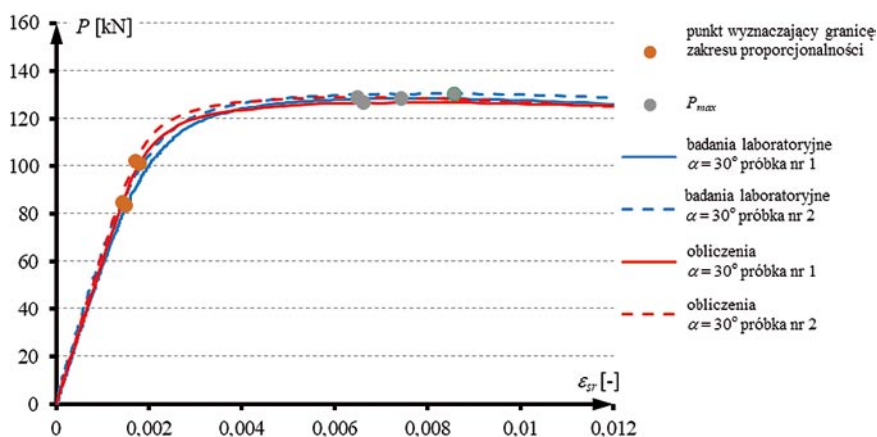
bezpośrednio po wygenerowaniu uszkodzenia, jeszcze przed zamontowaniem uchwytów, pozwalających na przeprowadzenie badania w maszynie wytrzymałościowej. Celem skanowania było uzyskanie bardzo precyzyjnych informacji o geometrii defektu. Podejście takie pozwala na określenie geometrii uszkodzenia z dokładnością 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. W kolejnym etapie na podstawie punktów ze skanera przestrzennego stworzono model powłoki. Ostatnim krokiem w przygotowaniu modelu było wczytanie utworzonej powłoki oraz brył do wykorzystywanego programu obliczeniowego, a następnie w programie obliczeniowym, w obrębie wczytanej powłoki i brył, automatyczne wytworzenie siatki metody elementów skończonych za pomocą generatora siatek programu. W procesie dyskretyzacji modelu w miejscu spodziewanych koncentracji naprężeń, czyli w obrębie uszkodzenia zwiększono liczbę elementów skończonych (zagęszczenie siatki). 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. W badaniach numerycznych zastosowano nieliniową analizę statyczną uwzględniającą zarówno nieliniowość materiałową, jak i geometryczną. Przyjęto model materiału z liniowym wzmocnieniem. Warunki brzegowe zdefiniowano w taki sposób, żeby model w punkcie podparcia miał swobodę obrotu względem osi x globalnego układu współrzędnych. Zrealizowano to za pomocą podpór blokujących przesuwę we wszystkich trzech kierunkach. Podpory te zostały rozmieszczone wzdłuż odcinka tworzącego średnicę kołowego przekroju poprzecznego rury. Zastosoowanie takie zastosowano na jednym z końców elementu. Na drugim końcu analizowanego elementu przyjęto taki sam układ podpór, z tą różnicą, że zablokowano dwa poziome stopnie swobody, natomiast na kierunku pionowym pozostawiono możliwość ruchu. 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 przesunięć w kierunku pionowym wzdłuż osi z. Obciążenie miało zdefiniowany liniowy charakter przyrostu.

Rys. 3. Wyniki otrzymane z próby ściskania wycinka rury

W ramach pracy stworzono modele numeryczne wszystkich próbek, przebadanych w laboratorium. Każda z przebadanych próbek miała swoje odwzorowanie w osobnym modelu. 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. Niestety takie podejście nie dawało w pełni satysfakcjonujących wyników. Dlatego rozważono dwie inne metody modelowania uszkodzenia. Do stworzonych modeli początkowych za pomocą pierwszej metody, wprowadzono dodatkowe modyfikacje. W drugim uwzględniono zmianę grubości ścianki rury w miejscu uszkodzenia oraz dodatkowo na podstawie danych ze skanera, uwzględniono zakrzywienie osi rury. Natomiast w trzecim finalnym modelu uwzględniono również zmiany materiału w miejscu uszkodzenia. Porównanie wyników otrzymanych z analizy numerycznej i badań laboratoryjnych dla dwóch wybranych próbek przedstawiono na rysunku 3. W otrzymanych zestawieniach wskazano trzy parametry określające zgodność uzyskanych wyników. Pierwszym jest maksymalna siła P_{\max} w każdym z przypadków. Drugim jest tangens kąta β , gdzie β jest kątem nachylenia prostej, wyznaczającej zakres proporcjonalności na wykresie. Trzecim jest punkt załamania wykresu, określający koniec zakresu proporcjonalności na wykresie. Jak widać, wyniki uzyskane z analiz numerycznych można było uznać za satysfakcjonujące i ostateczne. W ten sposób opracowany model wiernie odwzorowuje pracę elementu z uszkodzeniem i może być stosowany w przyszłości przy określaniu wpływu uszkodzenia na prace konstrukcji jako całości.

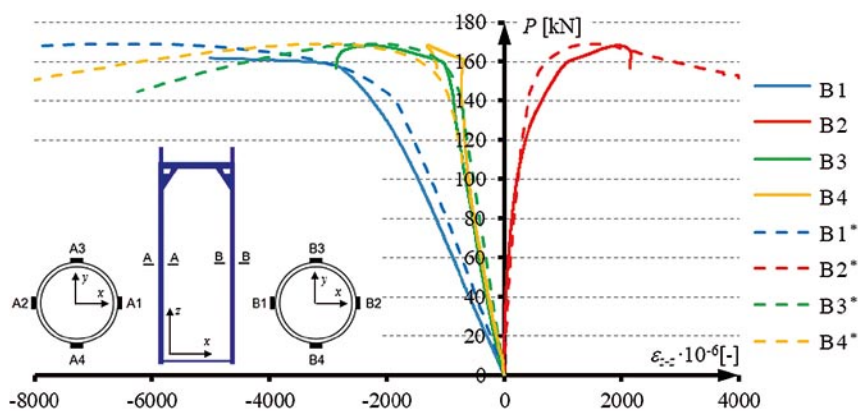
4.2 Analiza numeryczna pełnej ramy

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. 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. 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 na obu końcach obu stojaków ramy. Obciążenie do modelu ramy także tutaj przykładano sterując przemieszczeniem. Obciążenie zrealizowano przy pomocy zastosowania wymuszenia geometrycznego, które miało zdefiniowany liniowy charakter przyrostu, to znaczy wzrastało proporcjonalnie w każdym kolejnym kroku obliczeniowym. W ramach pracy stworzono modele numeryczne wszystkich ram rusztowaniowych, 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. Podparcia ramy zdecydowanie nie można przyjąć jako obustronnie przegubowego,

Rys. 4. Porównanie zależności siła-odkształcenie z badań laboratoryjnych i z obliczeń w stojaku B ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy o wielkości 24 mm



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.

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 i siła-odkształcenie. Przykładowe zestawienie wartości pochodzących z tensometrów dla jednego ze stojaków ramy z uszkodzeniem o wielkości 24 mm zlokalizowanego w płaszczyźnie ramy pokazano na rysunku 4. Jest to uszkodzenie pośrednie w analizowanym zakresie wielkości. Na wykresach, przedstawiających porównania pomiarów laboratoryjnych, wartości pochodzące z symulacji komputerowych oznaczono symbolem „*” oraz linią przerywaną.

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 z czujników, które budziły wątpliwości zaraz po przeprowadzeniu badania. 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 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 1.

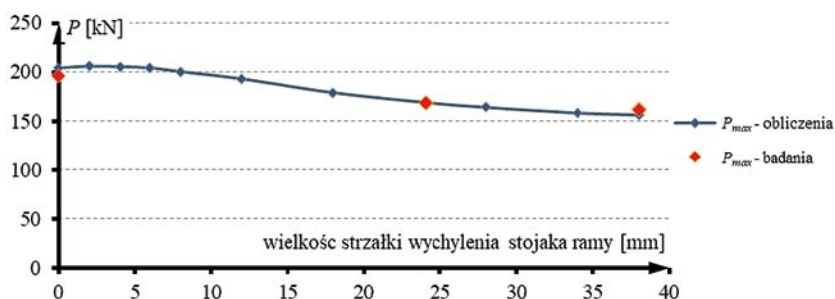
Po analizie porównawczej i stwierdzeniu poprawności założeń analizy numerycznej, wykonano serie

Tabela 1. Porównanie wartości maksymalnych sił uzyskanych podczas badań z maksymalną siłą uzyskaną z analizy numerycznej

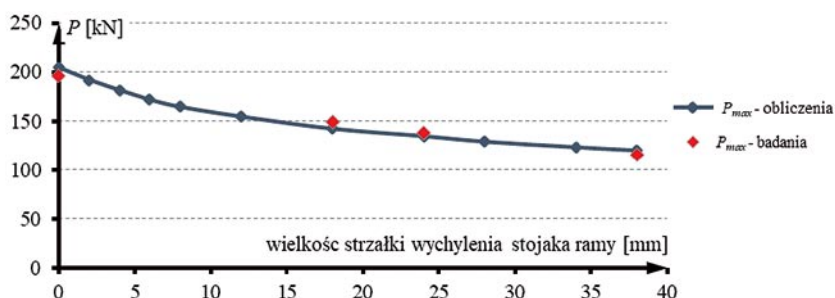
Wielkość strzałki wychylecia stojaka ramy [mm]	Maksymalna wartość siły uzyskana podczas badania [kN]	Maksymalna siła uzyskana z obliczeń [kN]	Różnica [%]
0	196,1	204,1	4,1
Uszkodzenia zlokalizowane w płaszczyźnie ramy			
24	168,9	169,2	0,2
24	168,2	169,2	0,6
38	162,4	156,5	3,6
38	161,5	156,5	3,1
Uszkodzenia 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

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 wychylecia stojaka, zmierzonych w przebadanych elementach. Wyniki tych symulacji w postaci zależności maksymalnej siły uzyskanej z obliczeń do wielkości uszkodzenia przedstawiono na rysunku 5, w odniesieniu do elementów z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy, oraz na rysunku 6, w odniesieniu do elementów z uszkodzeniami 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 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

Rys. 5. Maksymalne wartości sił uzyskanych z obliczeń oraz badań laboratoryjnych, rama z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie ramy



Rys. 6. Maksymalne wartości sił uzyskanych z obliczeń oraz badań laboratoryjnych ramy z uszkodzeniem zlokalizowanym w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny ramy



widać, że już najmniejsze wprowadzone wygięcie powoduje spadek maksymalnej wartości siły uzyskanej w obliczeniach.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy numeryczne wycinków stojaków ramy rusztowań fasadowych modelowanych elementami powłokowymi wykazały, że wyniki uzyskiwane z obliczeń, w których uszkodzenia w postaci punktowego wgięcia są modelowane tylko i wyłącznie poprzez uwzględnienie geometrii uszkodzenia nie w pełni odwzorowują zachowanie 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 sprężystości 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. 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 rusztowań budowlanych. Dlatego uznaje się że uszkodzenia

tego typu nie mają istotnego wpływu na elementy obciążone siłą osiową.

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. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że połączenie pomiędzy ramami z zastosowaniem trzpieni można traktować jako połączenie sztywne.

BIBLIOGRAFIA

- [1] 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, tom 12, 2018, str. 72–77
- [2] Rubio-Romero J. C., Carmen Rubio Gámez M., Carrillo-Castrillo J. A., Analysis of the safety conditions of scaffolding on construction sites, Safety Science, tom 55, 2013, str. 160–164
- [3] Halperin K. M., McCann M., An evaluation of scaffold safety at construction sites, Journal of Safety Research, tom 35, 2004, str. 141–150
- [4] Pieńko M., Błazik-Borowa E., Analysis of Exploitation Damages of the Frame Scaffolding. MATEC Web Conf, tom 284, 2019
- [5] Robak A., Pieńko M., Błazik-Borowa E., Bęc J., Szer I., Verification of the Numerical Model of Insert-Type Joint of Scaffolding in Relation to Experimental Re-search. AIP Conference Proceedings 1922, 080003, 2018
- [6] Robak A., Badania uszkodzonych elementów ram rusztowań systemu fasadowego, Budownictwo i Architektura 12(2)2013