

dr hab. inż. Bartosz Miller, prof. PRZ
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
ul. Poznańska 2
35-084 Rzeszów

Rzeszów, 18 marca 2019 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Aleksandra Robaka „Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność”

1. Podstawa formalna opracowania i przedmiot recenzji

Recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej prof. dra hab. inż. Bogusława Szmygina, z dnia 29 stycznia 2019 r.

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgra inż. Aleksandra Robaka, o tytule „Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność”, wykonana pod kierunkiem dr hab. inż. Ewy Błazik-Borowej, prof. PL. Zasadnicza część rozprawy (bez załączników) liczy 132 strony, jest podzielona na 7 rozdziałów oraz bibliografię. Praca jest uzupełniona przez dwa załączniki oraz streszczenia w językach polskim i angielskim, wraz ze streszczeniami i załącznikami praca liczy 169 stron. Bibliografia zawiera wykaz 64 pozycji literaturowych. W zasadniczej części rozprawy zamieszczono 97 rysunków, 10 tabel oraz 10 numerowanych wzorów.

2. Ocena tematyki rozprawy

Rusztowania są nieodłącznym elementem procesu budowlanego, są to tymczasowe konstrukcje w formie przestrzennych ram, obecnie w zdecydowanej większości przypadków w postaci tzw. rusztowań systemowych o ustandaryzowanych wymiarach i metodach łączenia elementów składowych, głównie metalowych.

W recenzowanej pracy Autor skupił się na stalowych (i, w kilku przypadkach, aluminiowych) rusztowaniach ramowych. Jako problem naukowy rozprawy zdefiniował zagadnienie „określenia wpływu uszkodzeń na nośność głównych elementów konstrukcyjnych roboczych rusztowań ramowych”. Przedstawiony we wprowadzeniu zakres pracy obejmujący:

- badania terenowe związane z identyfikacją i klasyfikacją uszkodzeń występujących w rusztowaniach ramowych,
- modelowanie uszkodzeń z zastosowaniem zarówno powłokowych jak i prętowych modeli wyizolowanych prętów rusztowań,
- analizę wpływu uszkodzeń na pracę elementów rusztowań oraz analizę wpływu imperfekcji geometrycznych na nośność całej konstrukcji rusztowania z uwzględnieniem możliwości występowania uszkodzeń,

jest przemyślany a jego wykonanie może doprowadzić do wniosków istotnych z punktu widzenia wykorzystania (lub konieczności odrzucenia) uszkodzonych elementów rusztowań.

Podjętą przez Autora tematykę badań należy ocenić pozytywnie z punktu widzenia potencjalnego wykorzystania w praktyce budowlanej, jej aktualności i celowości. Możliwość oceny przydatności do dalszego wykorzystania uszkodzonych elementów rusztowań może mieć także bezpośrednie przełożenie na bezpieczeństwo użytkowania rusztowań.

3. Zawartość rozprawy i uwagi ogólne

Celem rozprawy, określonym na stronie 14 jako *problem naukowy*, jest określenie wpływu uszkodzeń ramowych rusztowań systemowych na nośność ich podstawowych elementów konstrukcyjnych oraz przygotowanie wytycznych pozwalających na podejmowanie decyzji związanych z dopuszczeniem do użytkowania elementów uszkodzonych. Zakres prac przewidzianych do wykonania obejmuje:

- identyfikację i klasyfikację uszkodzeń w elementach rzeczywistych rusztowań badanych na placu budowy,
- szczegółową analizę numeryczną uszkodzonych prętów rusztowań z wykorzystaniem metody elementów skończonych, zarówno z zastosowaniem modeli powłokowych jak i uproszonych modeli prętowych, wykonywaną w celu określenia wpływu rodzaju, wielkości i lokalizacji uszkodzenia na pracę pojedynczego, wyizolowanego pręta rusztowania,
- numeryczną analizę wpływu uszkodzenia na pracę całego elementu rusztowania,
- numeryczną analizę wpływu imperfekcji geometrycznych na nośność rusztowania oraz sprawdzenie efektów możliwego nakładania się niekorzystnych czynników (imperfekcji oraz uszkodzeń).

Recenzowana rozprawa doktorska jest podzielona na siedem rozdziałów. W rozdziale pierwszym (7 stron) Autor przedstawia skrótowy opis problemu badawczego, podstawowy opis rusztowań systemowych, omawia obciążenia rusztowań budowlanych i przedstawia zakres pracy.

Autor nie definiuje tez pracy, ogranicza się do określenia problemu badawczego oraz zakresu prac niezbędnych do wykonania w celu rozwiązania postawionego problemu badawczego.

Rozdział drugi (16 stron) zawiera przegląd literaturowy dotyczący aktualnego stanu badań związanych z interesującym Autora problemem badawczym. Przegląd literaturowy rozpoczyna opis badań związanych z identyfikacją i opisem różnego rodzaju uszkodzeń konstrukcji stalowych, do których Autor zalicza zarówno błędy projektowe i wykonawcze jak i imperfekcje geometryczne, uszkodzenia będące wynikiem oddziaływań termicznych, korozji czy też powtarzające się lub zmienne obciążanie (tak Autor definiuje zmęczenie). Następnie Autor opisuje badaniami eksperymentalne rur stalowych z różnego rodzaju uszkodzeniami (powstałymi np. w wyniku uderzenia lub prostowania rur po uderzeniu) oraz wybrane badania eksperymentalne rusztowań, w tym badania węzłów rusztowań i ich sztywności, oraz tworzenie modeli numerycznych wyizolowanych prętów i węzłów rusztowań. Przegląd literaturowy zamyka opis metod monitorowania stanu rusztowań oraz imperfekcji geometrycznych w ramowych konstrukcjach stalowych z uwzględnieniem badań imperfekcji lokalnych i globalnych wykonywanych na rusztowaniach w trakcie ich rzeczywistej eksploatacji a także opis metod weryfikacji modeli numerycznych poprzez porównywanie wyników otrzymanych z analiz numerycznych z wynikami pomiarów wykonanych na konstrukcji rzeczywistej.

W rozdziale trzecim (17 stron) rozpoczyna się opis prac własnych wykonanych przez Autora rozprawy. Na początku rozdziału wspomniany jest bliżej niesprecyzowany projekt badawczy związany z opracowaniem modelu oceny ryzyka wystąpienia katastrofy lub sytuacji niebezpiecznej podczas prac z wykorzystaniem rusztowań budowlanych. W ramach tego projektu zostały wykonane badania inwentaryzacyjne uszkodzeń rzeczywistych rusztowań. Wg przygotowanych przez Autora wytycznych zespół osób współpracujących w ramach projektu zebrał informacje dotyczące wygięć stojaka rusztowania ramowego w płaszczyźnie stojaka, z płaszczyzny stojaka oraz deformacji przekroju rury stojaka. Zebrano także informacje dotyczące korozji, pęknięć, kompletności elementów rusztowania, w tym także pomostów. Zebrane dane dotyczące rusztowań zostały podzielone na dwie podstawowe grupy (wpływające lub niewpływające na nośność konstrukcji), określono częstotliwość pojawiania się uszkodzeń oraz wskazano, że elementy uszkodzone powinny być poddawane weryfikacji w celu określenia ich przydatności do dalszego wykorzystania.

Rozdział czwarty (18 stron) przedstawia wykonane w ramach doktoratu doświadczalne badania prętów rusztowań z wprowadzonymi uszkodzeniami oraz kompletnych stojaków rusztowań, także z uszkodzeniami wprowadzonymi na etapie badań. Podczas badań wykorzystano zarówno tradycyjne metody pomiarowe (tensometry elektrooporowe) jak i nowoczesne podejście oparte na

cyfrowej korelacji obrazu (ang. Digital Image Correlation, DIC). Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych pozwoliły oszacować wpływ wielkości i ułożenia uszkodzeń względem osi uszkodzonych elementów na nośność zarówno poszczególnych prętów jak i całych elementów rusztowania. W celu wykonania badań laboratoryjnych Doktorant przygotował własne stanowisko badawcze zarówno do badania pojedynczych prętów rusztowania jak i całych stojaków.

Rozdział piąty (32 strony) przedstawia przeprowadzone przez Autora numeryczne symulacje pracy wyizolowanych elementów rusztowania. Pierwszą grupą przeprowadzonych obliczeń jest symulacja numeryczna pracy wycinka pręta rusztowania z wprowadzonym uszkodzeniem punktowym (miejscowe wgięcie ścianki spowodowane np. uderzeniem). Modelowanie uszkodzenia wykonano w trzech wariantach: bez uwzględnienia zmiany grubości ścianki pręta w miejscu uszkodzenia oraz z dwoma różnymi podejściami do uwzględnienia zmiany grubości. Model pręta z uszkodzeniem został obciążony siłą rozciągającą, otrzymane wyniki zostały porównane z wynikami badań doświadczalnych, przy czym porównywano rozkład odkształceń na próbce w okolicy uszkodzenia oraz krzywe siła-odkształcenie średnie. Wykazano zgodność wyników symulacji numerycznych z badaniami laboratoryjnymi dla modeli uwzględniających zmianę grubości ścianki pręta w bezpośrednim sąsiedztwie uszkodzenia. Wykazano, że tego typu uszkodzenie nie ma kluczowego znaczenia dla rozkładu sił w całym układzie. Druga grupa symulacji numerycznych przedstawionych w rozdziale piątym jest związana z analizą całej ramy rusztowania z uszkodzeniem w postaci wygięcia pręta ramy (stojaka) w płaszczyźnie lub z płaszczyzny ramy. Podobnie jak w przypadku analizy wyizolowanego pręta wyniki symulacji numerycznych porównano z wynikami badań laboratoryjnych. Porównanie obejmowało pomierzone i obliczone wartości odkształceń w wybranych punktach ramy (w miejscu zamocowania tensometrów podczas badań laboratoryjnych) oraz pomierzone i obliczone przemieszczenie (w miejscu zamocowania czujnika przemieszczeń podczas badań laboratoryjnych). Porównanie przeprowadzono dla różnych wartości siły obciążającej oraz dla sytuacji bez uszkodzenia i z uszkodzeniem wprowadzonym do jednego pręta ramy. Wykazano, że wyniki otrzymane z symulacji numerycznych są zgodne z wynikami doświadczenia. Bazując na zweryfikowanym modelu numerycznym przeprowadzono analizę różnych przypadków uszkodzenia związanych z wygięciem wybranego pręta ramy rusztowania w płaszczyźnie ramy oraz z płaszczyzny ramy, a także różnych wariantów geometria-materiał (różne grubości ścianek pręta ramy stalowej lub aluminiowej), określono także podatność (wg definicji Autora) układu związaną z pojawieniem się uszkodzenia.

Rozdział szósty (17 stron) przedstawia analizę numeryczną pracy całego rusztowania. W modelu numerycznym uwzględniono zarówno wygięcie wybranego pręta ramy rusztowania jak

i imperfekcje geometryczne całego układu. Potwierdzono, że uszkodzenia ramy w postaci wygięcia stojaka mają największe znaczenie dla pracy układu w przypadku uszkodzenia zlokalizowanego na najniższej kondygnacji uszkodzenia. Wykazano także, że imperfekcje geometryczne powinny być uwzględniane podczas modelowania pracy rusztowania.

Rozdział siódmy (3 strony) przedstawia podsumowanie i wnioski ogólne, zawiera także zestawienie oryginalnych osiągnięć Autora związanych z badaniami przedstawionymi w ocenianej rozprawie.

Rozprawę uzupełniają spis piśmiennictwa (64 pozycje) i dwa załączniki ze szczegółowym zestawieniem wyników badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych.

4. Ocena merytoryczna

Tematyka podjętych badań jest istotna i aktualna, wyniki badań przedstawionych w rozprawie mogą być wykorzystane w praktyce jako zalecenia do oceniania przydatności do dalszego użytkowania uszkodzonych elementów rusztowań. Tytuł recenzowanej rozprawy odpowiada zawartości rozprawy. W rozprawie brak jest tradycyjnie postawionych tez, Autor zdefiniował jednak problem badawczy i jasno przedstawił zakres prac niezbędnych do jego rozwiązania. Zakres ten obejmuje:

- identyfikację i klasyfikację uszkodzeń w elementach rzeczywistych rusztowań badanych na placu budowy,
- szczegółową analizę numeryczną uszkodzonych prętów rusztowań z wykorzystaniem metody elementów skończonych, zarówno z zastosowaniem modeli powłokowych jak i uproszczonych modeli prętowych, wykonywaną w celu określenia wpływu rodzaju, wielkości i lokalizacji uszkodzenia na pracę pojedynczego, wyizolowanego pręta rusztowania,
- numeryczną analizę wpływu uszkodzenia na pracę całego elementu rusztowania,
- numeryczną analizę wpływu imperfekcji geometrycznych na nośność rusztowania oraz sprawdzenie efektów możliwego nakładania się niekorzystnych czynników (imperfekcji oraz uszkodzeń).

Przedstawiony zakres badań należy uznać za właściwy i pozwalający rozwiązać przedstawiony na początku pracy problem badawczy. Przegląd piśmiennictwa zawarty w rozdziale drugim rozprawy doktorskiej jest wystarczający, Autor odwołuje się do aktualnej literatury krajowej i zagranicznej, jedynie dwie pozycje spośród tych, do których Autor odwołuje się w pracy, są wydane przed rokiem 2000.

Poziom merytoryczny pracy jest na dobrym poziomie, przedstawiane przez Autora wywody mają jednak pewne braki utrudniające ich śledzenie. Zdaniem recenzenta za oryginalne osiągnięcia pracy można uznać przede wszystkim przygotowanie stanowisk do laboratoryjnych badań wytrzymałościowych wyizolowanych prętów rusztowań oraz całych ram oraz przeprowadzenie badań i opracowanie metod uwzględniania uszkodzeń w postaci wgięcia w rurze a także wstępne zalecenia dotyczące przydatności do dalszego stosowania uszkodzonych elementów rusztowań.

Podczas lektury i analizy wyników przedstawionych w recenzowanej rozprawie doktorskiej nasuwają się jednak pewne pytania i uwagi krytyczne:

- Niejasny jest zakres prac własnych Autora rozprawy na etapie zbierania danych dotyczących uszkodzeń rzeczywistych rusztowań. Autor podaje, że „inwentaryzacja była jednym z wielu zadań realizowanych przez stworzone zespoły badawcze w ramach [...] projektu” a wkładem własnym Autora było „stworzenie arkuszy pozwalających na intuicyjną realizację zadania przez każdego z członków zespołu badawczego”. W rozprawie nie przedstawiono jednak przykładu takiego arkusza, niemożliwa jest więc ocena tego etapu badań. Problem ujednoczenia podejścia do przeprowadzania inwentaryzacji stanu konstrukcji budowlanych jest niewątpliwie bardzo istotny, bywa także przedmiotem samodzielnych publikacji, załączenie opracowanego przez Autora arkusza oceny mogłoby podnieść wartość recenzowanej rozprawy i jednoznacznie określić udział własny Autora na tym etapie badań.
- Na stronie z dedykacją jest odwołanie do projektu NCBiR nr 244388. W treści pracy nie już o tym mowy (za wyjątkiem zacytowanego w powyżej fragmencie dotyczącego badań polowych). Czy cała praca została wykonana w ramach tego projektu?
- Na podstawie jakich przesłanek Autor już na etapie przygotowywania inwentaryzacji podzielił ewentualne uszkodzenia rusztowań na te o wielkości mogącej mieć istotny wpływ na nośność i bezpieczeństwo rusztowań oraz na te, które tego wpływu nie mają? Konkretnie wnioski dotyczące wielkości, usytuowania i rodzaju uszkodzeń istotnych ze względu na pracę konstrukcji Autor przedstawia dopiero po wykonaniu szeregu badań doświadczalnych i symulacji numerycznych.
- Na str. 64 Autor podaje, że zamocowania stojaka nie można traktować ani jako w pełni sztywnego ani jako w pełni przegubowego po czym w modelach numerycznych przyjmuje pełne utwierdzenie na dole stojaka a pełny przegub na górze stojaka. Czy nie byłoby rozwiązaniem lepszym zastosowanie w obu przypadkach (na górze i na dole) połączeń podatnych w miejsce pełnego utwierdzenia lub idealnego przegubu?

- Wzory (5) i (6) nie są prawidłowe, w przypadku wielkości dyskretnej całki powinny być zastąpione odpowiednimi sumami.
- W kontekście uwagi na str. 103 („W efekcie wejście w część wykresu σ - ϵ , która wyznacza wzmocnienie, następuje przy naprężeniach normalnych znacznie większych niż granica plastyczności, co jest ewidentnym błędem programu”) wątpliwości budzi wybór programu zastosowanego do symulacji numerycznych.

5. Ocena formalnej strony recenzowanej rozprawy

Praca jest napisana na ogólnie dobrym poziomie językowym. Usterki językowe i literówki odnalezione przez recenzenta zostały zaznaczone na dostarczonym do recenzji egzemplarzu pracy, jeżeli Autor wyrazi zainteresowanie ten egzemplarz rozprawy zostanie mu udostępniony. Jedyne jedna literówka zostanie tutaj podana wprost, tytuł załącznika nr 2 jest w pracy następujący: „Wyniki obliczeń **at**atycznych konstrukcji rusztowania”.

Kilka uwag ogólnych wymaga jednak komentarza Autora:

- Wywód logiczny prowadzony przez Autora ma w wielu miejscach irytujące wady, Autor odwołuje się bowiem do elementów pracy następujących po miejscu prowadzenia wywodu (np. na str. 53: „odkształcenie zostało wyznaczone w ten sam sposób, jak podczas próby ściskania i zostało opisane w dalszej części tego punktu pracy) lub nawet pozostawia czytelnikowi konieczność odnalezienia odpowiednich przesłanek w dalszej części pracy.
- Autor podaje, że stosował elementy powłokowe o sześciu stopniach swobody, podczas gdy opis elementu powłokowego dostępnego w wykorzystanym przez Autora oprogramowaniu¹ podaje pięć stopni swobody w węźle. Czy Autor może wyjaśnić tę rozbieżność?
- Część wniosków roboczych (zamieszczonych w rozdziałach przedstawiających wyniki badań) jest trywialna, np. na str. 57: „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”.
- Autor nieprawidłowo nazywa maszynę wytrzymałościową wykorzystaną w badaniach laboratoryjnych prasą wytrzymałościową. Prasa nie realizuje rozciągania, także badanego przez Autora.

¹ <https://knowledge.autodesk.com/support/simulation-mechanical/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/SimMech-UsersGuide/files/GUID-724A883C-699D-4B40-B0E5-E8B1DDB109A5-htm.html> „Each shell element node has 5 degrees of freedom (DOF) - three translations and two rotations. The translational DOF are in the global Cartesian coordinate system. The rotations are about two orthogonal axes on the shell surface defined at each node.”

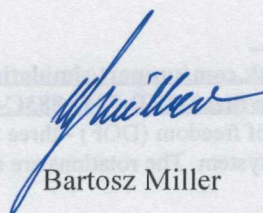
- Część rozdziałów pracy zaczyna się tekstem niebędącym elementem żadnego podrozdziału. Taka sytuacja nie powinna mieć miejsca, jeżeli rozdział jest podzielony na podrozdziały to każdy element rozdziału powinien znajdować się w jakimś podrozdziale.
- Pewne mankamenty ma także spis literatury:
 - nie wszystkie pozycje są cytowane (np. [54]),
 - do niektórych Autor odwołuje się nazywając je w tekście „normami” podczas gdy są to artykuły w czasopiśmie (str. 29, odwołanie do pozycji [55], jedynej będącej współautorstwa Autora rozprawy),
 - spis literatury nie został zbudowany alfabetycznie wg autorów czy tytułów, nie jest też zbudowany wg kolejności cytowań,
 - niektóre opisy są niekompletne (np. poz. [14] nie ma daty wydania).
- Rysunki i tabele w załącznikach powinny być numerowane.

6. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandra Robaka rozwiązuje oryginalne zadanie naukowe dotyczące określenia wpływu uszkodzeń na nośność głównych elementów konstrukcyjnych roboczych rusztowań ramowych. Temat rozprawy jest istotny i prowadzi do wniosków ważnych z praktycznego punktu widzenia.

Autor wykonał przegląd literatury związanej z analizowanym problemem badawczym, przygotował i wykonał serię badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych, do których dane wejściowe stanowiły wyniki inwentaryzacji rzeczywistych rusztowań. Przeprowadzane badania i analizy potwierdzają ogólną wiedzę Autora z zakresu konstrukcji metalowych oraz dobre przygotowanie do prowadzenia badań naukowych w zakresie zarówno doświadczeń laboratoryjnych jak i symulacji numerycznych. Przedstawione w pkt. 4 recenzji uwagi krytyczne nie obniżają wartości rozprawy.

Uważam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi odnośnie prac doktorskich zawarte w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami). Wnioskuje o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie do publicznej obrony.



Bartosz Miller