

## **Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgr. inż. Aleksandra Robaka**

### **pt. „Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność”**

#### **1. Podstawa formalna i przedmiot opracowania recenzji**

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej z dnia 28 listopada 2018 r. oraz zlecenie Dziekana Wydziału, Pana prof. dr. hab. inż. Bogusława Szmygina, prof. PL z dnia 29 stycznia 2019 r. na wykonanie niniejszej recenzji.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Aleksandra Robaka pt. „Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność”, której promotorem jest dr hab. inż. Ewa Błazik-Borowa, prof. PL, promotorem pomocniczym jest dr inż. Jarosław Bęc.

#### **2. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa składa się z 7 rozdziałów, spisu literatury obejmującego 64 pozycje, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz dwóch załączników zawierających pełne wyniki badań laboratoryjnych i obliczeń statycznych. Tekst rozprawy liczy 169 stron formatu A4, w którym zawarto 97 rysunków, 10 tabel oraz 9 wzorów. Praca realizowana była w ramach projektu nr. PBS3/A2/19/2015 „Model oceny ryzyka wystąpienia katastrof budowlanych, wypadków i zdarzeń niebezpiecznych na stanowiskach pracy z wykorzystaniem rusztowań budowlanych” finansowanego przez NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych.

**Rozdział pierwszy** stanowi wstęp, w którym omówiono podstawowe problemy dotyczące zagadnień związanych z wpływem uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność. W rozdziale tym przedstawiono przedmiot i zakres pracy, a także główny problem naukowy. Ponadto przeprowadzono przegląd literatury z uwzględnieniem różnych obciążeń i typów rusztowań budowlanych.

**Rozdział drugi** to kontynuacja przeglądu literatury ze szczególnym uwzględnieniem aktualnego stanu wiedzy w zakresie opisu i analizy występowania uszkodzeń w konstrukcjach stalowych wykonanych z elementów rurowych. W rozdziale tym zawarto przegląd badań laboratoryjnych i analiz numerycznych prowadzonych w krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych w zakresie rusztowań budowlanych. Poruszono również zagadnienia globalnych imperfekcji geometrycznych występujących w konstrukcjach stalowych, przedyskutowano sposoby uwzględniania ich w modelu numerycznym oraz przedstawiono przykłady weryfikacji modeli numerycznych na podstawie badań laboratoryjnych.

**Rozdział trzeci** dotyczy identyfikacji uszkodzeń w ramowych rusztowaniach budowlanych. W pierwszej części rozdziału przedstawiono i przeanalizowano wyniki inwentaryzacji uszkodzeń rzeczywistych rusztowań. W celu usprawnienia pomiarów zaproponowano wytyczne dotyczące podniesienia wiarygodności uzyskanych wyników. Między innymi zaproponowano podział konstrukcji rusztowań na cztery grupy elementów oraz opracowano specjalne arkusze do zapisu danych uzyskanych w wyniku pomiarów. Ponadto dokonano klasyfikacji i zestawienia ilościowego uszkodzeń, a także zwrócono uwagę na uszkodzenia mogące mieć istotny wpływ na nośność rusztowań oraz bezpieczeństwo ich użytkowania.

**W rozdziale czwartym** przedstawiono cel i zakres własnych badań laboratoryjnych dotyczących uszkodzeń rusztowań ramowych wykonanych z rur stalowych. Badania te obejmowały próbę rozciągania i ściskania wycinka rury z i bez uszkodzenia oraz testy laboratoryjne powtarzalnej ramy rusztowania budowlanego. W tej części badań wiele uwagi poświęcono analizie wpływu uszkodzeń w postaci wygięcia osi stojaka rusztowania zarówno w, jak i z płaszczyzny ramy na jego nośność. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych sformułowano wnioski odnośnie mechanizmów zniszczenia badanej ramy oraz dalszych analiz numerycznych.

**Rozdział piąty** poświęcony jest analizie numerycznej elementów konstrukcyjnych, opisującej te, które uprzednio zostały zbadane w laboratorium. W tym celu opracowano model numeryczny wycinka stojaka z uwzględnieniem uszkodzenia w postaci punktowego wgięcia. Dane dotyczące geometrii defektu uzyskano poprzez skanowanie 3D rzeczywistych próbek, bezpośrednio po wygenerowaniu uszkodzenia. Na tej podstawie opracowano 3 modele numeryczne wycinka stojaka stosując powłokowe i bryłowe elementy skończone w programie Autodesk Simulation Multiphysics. Następnie modele numeryczne poddano walidacji poprzez porównanie uzyskanych wyników z rezultatami testów laboratoryjnych. W dalszej części przedstawiono wyniki analiz numerycznych pełnych ram rusztowań, odpowiadających tym, które były przedmiotem badań w laboratorium tj. z uszkodzeniami w postaci wygięcia osi stojaka. W modelu numerycznym uwzględniono nieliniowość fizyczną jak i geometryczną. Ponadto w celu dostosowania modelu numerycznego do warunków laboratoryjnych rozpatrzono trzy różne rodzaje kinematycznych warunków brzegowych i poddano je walidacji oraz przeprowadzono analizę błędów. Należy podkreślić, że obliczenia numeryczne ramy rozszerzono nie tylko o dodatkowe warianty dotyczące sposobu zamocowania stojaków ramy, ale również o zmiany charakterystyk geometrycznych i materiałowych. W podsumowaniu stwierdzono, że istotny wpływ na nośność ramy mają przede wszystkim defekty w postaci wygięcia osi stojaka.

**Rozdział szósty** wieńczy analizy numeryczne prowadzone w rozdziale 5 poprzez opracowanie przestrzennego, prętowego modelu numerycznego konstrukcji rusztowania, traktowanej jako większa całość. Analizy objęły wpływ uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcyjnych rusztowań w postaci łukowego wygięcia osi stojaka ramy na pracę statyczną konstrukcji. W modelu uwzględniono nieliniowość geometryczną i materiałową oraz rzeczywiste globalne imperfekcje geometryczne. Parametry modelu prętowego dobierano tak, aby uzyskać jak najlepszą zgodność z wynikami uzyskanymi dla modelu powłokowego. W analizowanych przykładach obliczeniowych uwzględniono zróżnicowane wartości obciążeń, wysokości konstrukcji oraz zmienną lokalizację i liczebność uszkodzeń w konstrukcji. Efektem prowadzonych badań, było stwierdzenie, że uszkodzenia w postaci łukowego wygięcia osi stojaka powodują wzrost wartości naprężeń normalnych i mogą mieć znaczący wpływ na nośność całego rusztowania.

**Rozdział siódmy** zawiera wnioski końcowe i podsumowanie.

Uważam, że kolejność rozdziałów i podrozdziałów jest prawidłowa i pozytywnie wpływa na logiczny sposób przedstawiania treści pracy. Rozprawa napisana jest w sposób przejrzysty, językiem prostym i zrozumiałym. Jednakże zbyt oszczędny charakter opisu stosowanych metod i analiz oraz błędy językowe i stylistyczne w pewnym stopniu obniżają naukowo-dydaktyczne walory rozprawy. Szczegółowe uwagi dotyczące powyższych zastrzeżeń zamieszczono w punkcie 4 (Uwagi krytyczne) niniejszej recenzji.

### 3. Ocena doboru tematu i naukowej wartości rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dobrze wpisuje się w aktualny problem badawczy, dotyczący analizy nośności rusztowań budowlanych oraz wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych na bezpieczeństwo ich użytkowania. Z tematem tym związane są zasady analizy, projektowania, wykonania i eksploatacji rusztowań budowlanych gwarantujące ich bezpieczeństwo oraz odpowiedni poziom użytkowania. W praktyce inżynierskiej bardzo aktualne jest pytanie, jak należy formułować kryteria nośności, użyteczności i trwałości, aby konstrukcja bezpiecznie spełniała stawiane jej wymagania. W odpowiedzi na potrzebę rozwiązania powyższego problemu w opiniowanej rozprawie Doktorant sformułował następujący problem badawczy : *„czy jest możliwe warunkowe dopuszczenie do dalszego użytkowania elementów posiadających uszkodzenia...”*.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć naukowych Autora można zaliczyć:

- 1) Rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego uszkodzeń eksploatacyjnych rusztowań budowlanych oraz metod oceny ich nośności obejmujących badania laboratoryjne i numeryczne.
- 2) Dokonanie identyfikacji uszkodzeń w ramowych rusztowaniach budowlanych i opracowanie metodyki ich inwentaryzacji uwzględniającej między innymi podział elementów rusztowań i zaproponowanie autorskich arkuszy do zapisu danych.
- 3) Klasyfikację i zestawienie ilościowe uszkodzeń eksploatacyjnych rusztowań budowlanych oraz ich podział ze względu na wpływ na: nośność i estetykę konstrukcji oraz bezpieczeństwo użytkowników.

- 4) Przygotowanie stanowisk i przeprowadzenie badań laboratoryjnych obejmujących próbę rozciągania i ściskania wycinka rury z i bez uszkodzeń lokalnych oraz testy laboratoryjne powtarzalnej ramy rusztowania budowlanego z uwzględnieniem uszkodzeń w postaci globalnej tj. wygięcia osi stojaka rusztowania.
- 5) Zaproponowanie metod uwzględniania uszkodzeń elementów rurowych w modelach numerycznych tak w postaci lokalnej jak i globalnej umożliwiającymi bardzo dobre odwzorowanie w modelu numerycznym warunków występujących podczas badań laboratoryjnych. Na uwagę zasługuje metoda uwzględniania uszkodzeń lokalnych polegająca na doborze grubości każdego elementu skończonego w obszarze uszkodzenia na podstawie stosunku powierzchni elementu odkształconego  $A_o$  do powierzchni referencyjnej  $A_r$  przy zachowaniu stałej objętości materiału.
- 6) Przeprowadzenie szerokiego wachlarza symulacji numerycznych konstrukcji rusztowania, traktowanej jako większa całość, z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń w postaci wygięcia osi stojaka ramy, nieliniowości geometrycznej i materiałowej, rzeczywistych globalnych imperfekcji geometrycznych oraz zróżnicowanych wartości obciążeń, wysokości konstrukcji oraz zmiennej lokalizacji i liczebności uszkodzeń w konstrukcji.

Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia Doktoranta oraz fakt, że postawiony problem badawczy został rozwiązany, pozytywnie oceniam naukową wartość recenzowanej rozprawy.

#### **4. Uwagi krytyczne**

Niezależnie od mojej pozytywnej oceny wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej, z obowiązku recenzenta wykażę poniżej dyskusyjne lub ujemne jej strony.

##### **4.1. Ogólne uwagi merytoryczne**

- 1) W pierwszej części recenzowanej rozprawy Doktorant pozostawił pewien niedosyt w zakresie sformułowania celu oraz tezy pracy. W prawdzie nakreślił on problem badawczy stawiając pytanie, czy możliwe jest warunkowe dopuszczenie uszkodzonych elementów rusztowań do użytkowania i udzielił na nie odpowiedzi. Jednakże z uwagi na fakt, że praca doktorska obok rozwiązania problemu naukowego powinna również zawierać szerszy kontekst odnoszący się do obszaru podejmowanej tematyki, pożądane byłoby pełniejsze nakreślanie podłoża teoretycznego, celu, zakresu i tezy pracy.
- 2) W ocenie recenzenta, w rozdziale 2.4 zbyt wąsko opisano zagadnienia dotyczące imperfekcji geometrycznych konstrukcji stalowych. Podano tu pewne definicje i podział imperfekcji geometrycznych na lokalne i globalne. Niestety w dalszej części pracy brak jest konsekwencji w stosowaniu tego nazewnictwa. Warto zwrócić uwagę, że terminologia związana z imperfekcjami geometrycznymi stosowana w mechanice i w normach dotyczących projektowania konstrukcji metalowych różni w zasadniczy sposób. W świetle <sup>1</sup> wyróżnia się imperfekcje globalne układów ramowych w postaci przechyłu układu konstrukcyjnego oraz imperfekcje lokalne w postaci wstępnego wygięcia łukowego pojedynczych elementów. Natomiast w mechanice, za imperfekcje globalne uznaje się początkowe

---

<sup>1</sup> PN-EN 1993-1-1. Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

deformacje całego pręta lub układu konstrukcyjnego. Z kolei za imperfekcje lokalne przyjmuje się imperfekcje związane z deformacją konturu w postaci lokalnych<sup>2</sup> deformacji ścianek lub zmiany kąta pomiędzy przystającymi ściankami przekroju poprzecznego. Dlatego też niezwykle ważną kwestią jest sprecyzowanie, którą z opisanych powyżej terminologii przyjęto w recenzowanej rozprawie. Ponadto w świetle rozważanych w doktoracie zagadnień, interesująca byłaby też dyskusja, czy uszkodzenia polegające na deformacji konturu przekroju poprzecznego lub wygięcia osi pręta są imperfekcjami geometrycznymi czy nie. Jeśli nie, to jak powinno się definiować kryteria umożliwiające ich rozróżnienie?

- 3) W rozdziale 3.1 Autor pisze o metodologii zbierania danych o uszkodzeniach. Czy rzeczywiście zawarta jest tu metodologia? Czy raczej metodyka zbierania danych o uszkodzeniach?
- 4) Doktorant podkreśla, że jego oryginalnym osiągnięciem jest opracowanie autorskiej metodyki inwentaryzacji uszkodzeń w ramowych rusztowaniach budowlanych uwzględniającej między innymi opracowanie autorskich arkuszy służących do uporządkowanego zapisu danych uzyskanych na podstawie pomiaru uszkodzeń „in situ”. Niestety w pracy nie zawarto ani jednego takiego arkusza.
- 5) W rozdziale 3.4 przedstawiono ilościowe zestawienie uszkodzeń *o rozmiarach mogących mieć istotny wpływ na nośność i bezpieczeństwo rusztowań oraz widoczne „gołym okiem”*. Sformułowanie to wydaje się być dość subiektywne. Nasuwa się pytanie, czy oprócz liczby możliwy jest również pomiar rozmiaru uszkodzeń?
- 6) Jedną z konkluzji płynących z badań laboratoryjnych pojedynczej ramy rusztowania było stwierdzenie, że defekt w postaci wygięcia osi stojaka zlokalizowany w płaszczyźnie ramy powoduje znacznie mniejsze obniżenie nośności niż taki sam, w którym deformacja jest prostopadła do płaszczyzny ramy. Czy powyższy wniosek sformułowany dla pojedynczej, płaskiej ramy jest również prawdziwy dla rzeczywistych rusztowań budowlanych, które pracują w złożonych układach przestrzennych? Czy udało się potwierdzić ten wniosek podczas analiz numerycznych prowadzonych w rozdziale 6 dla prętowych układów przestrzennych? Czy w analizie tej również wprowadzono wygięcie osi stojaka z i w płaszczyźnie ramy?
- 7) W rozdziale 6.2.2 opisano lokalizację uszkodzeń w postaci wygięcia osi stojaka ramy przyjętą w prętowym modelu numerycznym rusztowania na podstawie obserwacji poczynionych podczas wstępnych obliczeń. Stwierdzono, że najbardziej niebezpieczna lokalizacja uszkodzenia to ta odnosząca się do ram najniższego poziomu. W związku z tym w modelu numerycznym ograniczono się do wprowadzenia wygięcia osi czterech stojaków najniższego poziomu tylko dla jednego segmentu (1, 2, 3, 4) oraz dwóch stojaków wyższych poziomów tego samego segmentu (5 i 6). Czy zaproponowana w pracy, deterministyczna metoda przyjmowania lokalizacji uszkodzeń powala na znalezienie najbardziej niekorzystnego przypadku? Czy w analizowanym przykładzie zasadne mogłoby być zastosowanie metod probabilistycznych lub metod analizy wrażliwości konstrukcji na losową zmianę parametrów opisujących geometrię i definiujących materiał?

---

<sup>2</sup> Rzeszut K., Garstecki A., Kąkol W., Local-sectional imperfections in coupled instabilities problems of steel thin-walled cold formed  $\Sigma$  members, w: Proceedings of Fourth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, 2004, s. 21–30.

- 8) W rozdziale 7 zawarto wiele ciekawych spostrzeżeń i wniosków odnośnie oceny wpływu uszkodzeń na nośność rusztowań. Brakuje tu jednak krytycznej refleksji czym różniłyby się ewentualne wyniki, gdyby Autor przyjął inne podejście i założenia? Jak bardzo wprowadzone uproszczenia i ograniczenia wpływają na wiarygodność uzyskanych wyników? Warto również szerzej rozwinąć kwestie dotyczące kontynuacji badań, wskazać nowe kierunki badań jakie wynikają z rezultatów pracy i ewentualnie omówić to czego nie udało się zrealizować.

#### 4.2. Szczegółowe uwagi merytoryczne

- 1) Str. 21 w 7d – na podstawie rys. 4 i 5 można sformułować inne spostrzeżenia odnośnie deformacji rury. Mianowicie w przypadku a) uderzenie w prześle zaobserwowano mniejsze deformacje przekroju poprzecznego i większe przemieszczenia osi pręta niż w przypadku b) uderzenie w węzeł.
- 2) Str. 23 rys. 7 – czy zdjęcie b) rzeczywiście przedstawia próbę rozciągania?
- 3) Str. 48 – na rysunku 27 brak jest legendy opisującej co oznaczają niebieskie kropki i linia kropkowana (Czy jest to linia trendu?).
- 4) Str. 53 – na rysunku 30 brak jest legendy z opisem próbek.
- 5) Str. 55 wzór 2 – proszę wyjaśnić co określają indeksy 1 i 2.

#### 4.3. Uwagi dotyczące redakcji rozprawy

- 1) W tekście pracy skrót słowa „rysunek” zapisywano z dużej litery, a powinno być z małej. Uwaga ta dotyczy również skrótu słowa „tabela”.
- 2) Słowo „wielkość” wielokrotnie stosowano na określenie „wartości” lub „rozmiaru” np. str. 30, 68, 101 itd. Jest to potoczna forma. Nauki ścisłe mają to do siebie, że operują dokładnie zdefiniowanymi pojęciami. Zatem wielkość to określona wielkość fizyczna stanowiąca przedmiot pomiaru w postaci liczbowej wartości.
- 3) W pracy często występują wielokrotne powtórzenia tego samego słowa w obrębie jednego lub dwóch zdań. Na przykład str. 9 „obecnie”, str. 15 „możliwe”, str. 25 „związane”, str. 33 „badań”, str. 51 „przeprowadzonych” itd. Powtórzenia te są szczególnie rażące gdy występują w zdaniu, które pełni rolę tezy pracy. Usterki te można z łatwością usunąć poprzez zastosowanie synonimów.
- 4) Str. 6 w 1d – jest: „atacyjnych”, powinno być np.: „statycznych”.
- 5) Str. 13 w 5g – błąd stylistyczny – nie można oprzeć „symulacji” „o” ale „na”.
- 6) Str. 18 w 7d – po „...wewnętrznych” brak przecinka.
- 7) Str. 25 w 2g – jest: „wysokie”, powinno być np.: „duże”.
- 8) Str. 26 w 2g – wyrażenie: „... na sztywno za pomocą spawów” ma charakter mowy potocznej.
- 9) Str. 26 w 12d – po „Ze” usunąć „w”.
- 10) Str. 30 w 5d – zamiast: „ich rozkład po wysokości rusztowania jest daleki od tych opisanych w normach”, proponuję: „ich rozkład na wysokości rusztowania jest daleki od tego opisanego w normach”.
- 11) Str. 32 w 2d – zamiast: „podjęto problem nośności wpływu uszkodzeń”, proponuję: „podjęto próbę określenia wpływu uszkodzeń”.

- 12) Str. 33 w 13d – zamiast: „ciężko”, proponuję: „trudno”.
- 13) Str. 46 w 5d – zamiast: „zakrzywienie”, proponuję: „zakrzywieniu”.
- 14) Str. 58 w 5d – zamiast: „większa”, proponuję: „większą”.
- 15) Str. 63 w 13g – o jakiej granicy nośności jest mowa?
- 16) Str. 70 w 2g – usunąć słowo: „metody”.
- 17) Str. 71 w 2d – usunąć słowo: „metody”.
- 18) Str. 82 w 2d – zamiast: „spadły”, proponuję: „obniżyły się”.
- 19) Str. 101 w 17d, 15d i str. 106 w 4d – po „wygięcia” brak słowa „osi”.

## 5. Wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Aleksandra Robaka stanowi rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego. Praca wnosi znaczący wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie „budownictwo” i ma również duże znaczenie praktyczne. Doktorant wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej tematyki i bardzo dobrą umiejętnością planowania i prowadzenia badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych. Świadczy to o jego dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Uwagi krytyczne wymienione w punkcie 4 nie obniżają dobrego, moim zdaniem, poziomu merytorycznego i ogólnej wysokiej oceny dysertacji. Pomimo tych uwag rozprawa jest bardzo interesująca z naukowego punktu widzenia i posiada wysoką wartość praktyczną. Mam nadzieję, że przedstawione przez mnie uwagi krytyczne choć w części będą pomocne Autorowi w prowadzeniu dalszych badań naukowych.

**Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr. inż. Aleksandra Robaka pt. „Analiza wpływu uszkodzeń eksploatacyjnych elementów konstrukcji rusztowań na ich nośność” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w wytycznych zawartych w ustawie<sup>3</sup>.**

**W związku z tym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Lubelskiej.**



Katarzyna Rzeszut

---

<sup>3</sup> Ustawa z dnia 14 marca 2003r., „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz.U. Nr 65, poz. 595).