

Gdańsk, 31.08.2022.

dr hab. inż. Elżbieta Urbańska-Galewska, prof. PG
Katedra Konstrukcji Inżynierskich
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
email: ugalew@pg.edu.pl



RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa WIERZBICKIEGO
pod tytułem:

*„Wpływ elementów ograniczających deplanację na moment krytyczny belek
stalowych w eksperymencie numerycznym i fizycznym”*

promotor: dr hab. inż. Maciej Szumigła, prof Politechniki Poznańskiej

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania stanowi Uchwała nr 190 Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 27 czerwca 2022 roku przekazana w formie pisma Prorektora ds. Nauki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, prof. dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego, nr RPW/12069/2022 z dnia 4 lipca 2022 roku.

2. Tematyka i cel rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. K. Wierzbickiego dotyczy jednego z podstawowych zagadnień w ocenie nośności prętowych konstrukcji stalowych jakim jest weryfikacja stateczności belek z uwagi na giętno-skrętną postać wyboczenia. Pomimo że jest to zagadnienie podstawowe zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i projektanta konstrukcji stalowych, to wyznaczenie wartości momentu krytycznego przy zginaniu nadal nastęrcza dużo trudności. Funkcjonujące w literaturze zależności analityczne na określenie

wartości momentu krytycznego pręta zginanego są ograniczone do pewnego, podstawowego zakresu warunków podporowych. Co więcej, w wielu przypadkach rzeczywiste rozwiązania konstrukcyjne nie znajdują odzwierciedlenia w modelach uproszczonych założeń przyjętych do określenia warunków podparcia belek. Dostępne rozwiązania analityczne i oprogramowanie inżynierskie, dedykowane zagadnieniu określenia wartości momentu krytycznego, umożliwiają jego ocenę tylko dla wybranych (typowych) warunków brzegowych lub rodzajów obciążenia belki. W rzeczywistości bardzo często mamy trudności z odzwierciedleniem istniejących lub projektowanych warunków brzegowych w dostępnych programach obliczeniowych.

Autor rozprawy doktorskiej, wskazując na różnorodność sytuacji projektowych wynikających między innymi z zapotrzebowania na przebudowy lub adaptacje istniejących obiektów budowlanych o stalowej konstrukcji nośnej, podjął tematykę związaną z oceną momentu krytycznego belek, które są wzmacniane w czasie eksploatacji, a więc nie tylko o geometrii odbiegającej od standardowej, ale również z pewnym istniejącym już poziomem wartości sił wewnętrznych.

Przeprowadzone przez Autora badania numeryczne i eksperymentalne jak najbardziej wychodzą na przeciw potrzebom rynku projektowo-eksperckiego. Z uwagi na powszechną potrzebę uwzględniania zwichrzenia w procesie projektowania konstrukcji prętowych oraz brak wiedzy na temat pracy elementu konstrukcyjnego wzmacnianego pod obciążeniem, podjęcie tematyki dotyczącej sprawdzenia wpływu elementów ograniczających deplanację belki na wartość momentu krytycznego belki jest jak najbardziej zasadne.

Następujące trzy tezy rozprawy doktorskiej (str. 17):

- 1. Elementy ograniczające deplanację przekroju dwuteowego w postaci żeber bimomentowych mogą efektywnie zwiększyć nośność belek o odpowiedniej smukłości wymiarowanych na utratę nośności z tytułu zginania ze zwichrzeniem;*
- 2. Blachy bimomentowe mogą stanowić ekonomiczny sposób wzmocnienia dwuteowych elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniu podczas tego procesu, z uwagi na wzmocnienie w miejscu o niskim stopniu wyężenia i niewielkiej ilości materiału potrzebnego do wykonania wzmocnienia;*
- 3. Symulacja numeryczna zwichrzenia belek stalowych dwuteowych pozwala na osiągnięcie zadawalającego przybliżenia do wyników osiągniętych w eksperymencie fizycznym;*



są poprawne, aczkolwiek do tezy nr 2 i 3 zostały sformułowane uwagi krytyczne w pkt. 5 niniejszej recenzji. Natomiast cel rozprawy: „*analiza efektywności wzmacniania dwuteowych belek stalowych poprzez zwiększenie momentu krytycznego przy wykorzystaniu elementów ograniczających deplanację przekroju tych belek, a także weryfikację jaki wpływ na to wzmocnienie ma przeprowadzenie tego procesu pod obciążeniem konstrukcji i czy jest to w ogóle możliwe*” jest sformułowany przejrzysto.

4. Analiza treści i ocena rozprawy

Przedmiotowa rozprawa doktorska ma charakter analityczno-doświadczalny. Dotyczy weryfikacji efektywności metody wzmacniania stalowych belek dwuteowych z uwagi na zwichrzenie.

Tekst rozprawy to 227 stron maszynopisu uzupełnionych o spis literatury zawierający 99 pozycji, zestawienia 99-ciu wykresów, 12-tu tabel, 5-ciu rysunków oraz 5-ciu arkuszy projektu stanowiska badawczego.

W pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części. W części pierwszej, mającej charakter kompilacyjny (rozdziały 1 ÷ 2) o łącznej objętości około 20% całości pracy, Autor syntetycznie przedstawił:

- krótki rys historyczny,
- aktualny stan wiedzy oraz aktualnie stosowane metody wyznaczania wartości momentu krytycznego zwichrzenia,
- stan wiedzy odnośnie metod ograniczania deplanacji w elementach belkowych oraz ich uwzględniania w obliczeniach,
- problematykę wzmacniania stalowych elementów konstrukcji.

Do drugiej części pracy, dotyczącej autorskich badań i analiz, należą rozdziały 3 ÷ 5, stanowiące około 65% objętości całej pracy. Ta część rozprawy charakteryzuje się aspektami poznawczo-naukowymi. Zawiera szereg elementów oryginalnych, stanowiących własny dorobek naukowy Autora. Należą do nich:

- projekt stanowiska badawczego i nadzór nad jego wykonaniem,
- szczegółowe pomiary geometrii wszystkich sześciu badanych belek stalowych zweryfikowane za pomocą skanera 3D w celu uwzględnienia rzeczywistych imperfekcji geometrycznych zarówno przekroju poprzecznego jak i wstępnego wygięcia belki w dwóch płaszczyznach,

- na podstawie przeprowadzonych badań materiałowych, opracowanie i wprowadzenie do modeli numerycznych dwóch różnych (dla średników i dla pasów belki) sprężysto-plastycznych modeli materiałowych,
- szczegółowa analiza parametryczna czterech typów elementów skończonych (ES) z uwagi na wpływ wymiarów poszczególnych ES na wartość momentu krytycznego i na czas obliczeń w programie Abakus, a następnie – dla wybranego rozmiaru ES – analiza porównawcza z wartościami momentu krytycznego wyznaczonego znanymi metodami analitycznymi oraz w programie LTBeamN,
- analiza parametryczna sposobów uwzględnienia zaokrągleń pomiędzy półkami a średnikiem w prętowym, powłokowym i bryłowym modelu numerycznym dwuteownika walcowanego na gorąco,
- opracowanie w programie *Abakus* powłokowych modeli numerycznych sześciu belek dwuteowych, uwzględniających wyokrąglenia walcownicze, imperfekcje przekroju poprzecznego oraz rzeczywiste wygięcia łukowe każdej z belek,
- analizę parametryczną wpływu wymiarów i lokalizacji blach bimomentowych, czyli skrajnych przewiązek na wartość momentu krytycznego i nośność belek o różnej rozpiętości,
- przeprowadzenie szeregu analiz numerycznych dla każdej z sześciu belek wzmocnionych i niewzmocnionych tzw. blachami bimomentowymi, a wszystkie dla 2 wariantów obciążeń:
 - 1) dla idealnych warunków pracy belki w czasie obciążania (bez wpływu oporów tarcia na podporach belki oraz oddziaływania wychylonego zawiesia z siłomierzem w miejscu przyłożenia obciążenia);
 - 2) z uwzględnieniem dodatkowych sił odwzorowujących zarówno wpływ tarcia na podporach jak i oddziaływania zawiesia w miejscu przyłożenia obciążenia w środku rozpiętości belki,
- wykazanie znaczącego wpływu uwzględnienia tarcia na podporach oraz stabilizującego oddziaływania zawiesia, poprzez które przykładane było obciążenie w eksperymencie;
- przeprowadzenie eksperymentu fizycznego polegającego na badaniu deformacji giętno-skrętnej sześciu belek wzmocnionych blachami bimomentowymi, z czego trzy były wzmocniane w trakcie trwania eksperymentu, tzn. pod obciążeniem.

Trzecia część pracy to rozdziały 6 i 7, zawierające zestawienie wyników badań numerycznych i laboratoryjnych oraz istotnych wniosków, wynikających z przeprowadzonych przez Autora badań.

Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych oraz badań w warunkach laboratoryjnych stanowią istotny wkład w rozszerzenie wiedzy na temat możliwości i skuteczności zwiększania giętno-skrętnej nośności stalowych belek dwuteowych poprzez ograniczenie ich deplanacji.

Na szczególną uwagę zasługuje obszerne uzasadnienie podjęcia tematyki związanej ze wzmacnianiem istniejących obiektów wraz ze szczegółową dyskusją wad i zalet stosowanych w praktyce sposobów wzmacniania elementów konstrukcyjnych, a także ogromna wnikliwość i sumienność Autora w analizowaniu dotychczasowego stanu wiedzy, stanowiącego układ odniesienia dla przeprowadzonego i udokumentowanego w niniejszej dysertacji eksperymentu naukowego. Kolejną bardzo istotną cechą jest dociekliwość Autora przy analizowaniu czynników różniących eksperyment fizyczny czyli model rzeczywisty od modelu numerycznego oraz rzetelność przy formułowaniu wniosków.

Autor rozprawy doktorskiej wykazał się:

- znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie analizowanej dziedziny,
- umiejętnością jasnego formułowania i analizowania problemu badawczego,
- umiejętnością definiowania zmiennych, które były przedmiotem analiz,
- wiedzą na temat aparatury pomiarowej niezbędnej do przeprowadzenia badań,
- umiejętnością projektowania i przeprowadzania eksperymentów numerycznych,
- umiejętnością analizowania i interpretowania uzyskanych wyników.

Uważam, że przyjęte cele pracy zostały osiągnięte, a postawione tezy potwierdzone wynikami przeprowadzonych analiz.

5. Uwagi krytyczne

Analizując rozprawę doktorską nasunęły mi się uwagi krytyczne i dyskusyjne o charakterze merytorycznym i redakcyjnym, wymagające skomentowania przez Autora w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

A. Uwagi merytoryczne

1. Zarówno w tezie nr 2 jak i w całej pracy Autor posługuje się terminem „*blachy/żebra bimomentowe*”, który nie jest jednoznaczny, gdyż blachy czołowe jak i kilka innych rozwiązań konstrukcyjnych ograniczających deplanację można by również nazwać

blachami / żebrami bimomentowymi. W rozdziale 2.3 „*Elementy ograniczające swobodę deplanacji – przegląd literatury*” przedstawione są prace, w których tego typu elementy są wymieniane jako ograniczające deplanację, jednakże nikt z cytowanych autorów (Gossowski, Takabatake) nie używa tego określenia. Stosowana jest nazwa „przewiązki” lub odpowiednio w języku angielskim „*batten plates*” co również oznacza przewiązkę. Zastosowane przez Autora blachy też można by nazwać np. przewiązkami skrajnymi, co byłoby zdecydowanie bardziej jednoznaczne. Wobec powyższego można powiedzieć, że w pracy brakuje definicji pojęcia „blachy bimomentowe”. Jeżeli już ktoś stosował to określenie, to należało wskazać źródło, a jeśli autor sam wprowadza ten termin to tym bardziej należało to podkreślić.

2. Teza nr 3 również jest nieprecyzyjna, gdyż jest w zasadzie oczywista. Fakt osiągnięcia zgodności pomiędzy wynikami eksperymentu fizycznego i numerycznego jest w zasadzie celem a nie tezą.
3. W rozdziale 3.1.1. bardzo dokładnie, z wykorzystaniem zdjęć i rysunków Autor przedstawił opis stanowiska badawczego, jednakże nie udało mi się znaleźć informacji na temat szczegółów podparcia belki. Również w rozdziale 3.2.2. „*Geometria przyjętego układu, warunki brzegowe*”, na rys.20 i 22 (w modelu numerycznym) zaznaczono blokadę na przesuw wzdłuż belki, lecz nie ma informacji w jaki sposób zostało to zrealizowane w laboratorium. Dopiero pod koniec pracy, na str. 163, jest wyjaśnienie dlaczego w warunkach laboratoryjnych nie zdecydowano się na wprowadzenie ograniczenia na przesuw podłużny. Z kolei na zdjęciu nr 2 i rys.16 zaznaczony jest „*początek*” i „*koniec*” belki, co nie jest zbyt dobrym oznaczeniem, gdyż nie jest jednoznaczne. Lepsze byłyby jakiegokolwiek oznaczenie alfanumeryczne, np. A i B, lub 1 i 2. Brakuje też szczegółowego opisu zawiesia za pośrednictwem którego przykładano obciążenie w postaci siły skupionej, tzn. informacji w jaki sposób zapewniono podążanie siłownika za deformującą się belką. Na podstawie zdjęć nr. 2 i 7 można domyślać się, że zastosowano dwa przeguby.
4. Autor ani razu nie użył w swojej pracy słowa „*walidacja*” pomimo, że z bardzo dobrym efektem, w celu przybliżenia wyników eksperymentu numerycznego do fizycznego, przeprowadził proces polegający na uwzględnieniu w modelu numerycznym czynników fizycznych takich jak np. siły tarcia na podporach, oddziaływanie zawiesia w miejscu przyłożenia siły pionowej. Zabiegi takie stanowią element walidacji modelu numerycznego.

5. Niejasne jest następujące sformułowanie w ostatnim wierszu na stronie 197: „*Największe obciążenia była w stanie przenieść belka, która została przebadana w laboratorium*”.

B. Uwagi redakcyjne

Praca jest dobrze napisana i zilustrowana. Szereg drobnych usterek gramatycznych i edytorskich zaznaczyłam w plik cyfrowym i prześlę je Autorowi w celu ich późniejszego uwzględnienia. Dotyczą one m.in.:

- stosowania słowa „*ilość*” zamiast „*liczba*” (m.in. na str.21, 81, 85,),
- błędnego stosowania słowa *wielkość* oznaczającego właściwość, którą można zmierzyć jak długość, masa, itp., a nie rozmiar czy wymiar (np. na str. 85; 91),
- błędów rysunkowych na stronie 43 (jeżeli mamy do czynienia z „*widokami z góry*” to większość linii powinna być wykonana linią przerywaną, jako niewidoczne),
- braku cytowania pracy [75] na str. 49, a na str. 51 błędnego numeru cytowania;
- oddzielnego numerowania rysunków, wykresów i zdjęć, co zdecydowanie utrudnia przeglądanie pracy (rysunki, wykresy i zdjęcia powinny mieć wspólną numerację, przypisaną do poszczególnych rozdziałów),
- braku cytowania rys. 5, 6, 7 i zdjęcia nr 1,
- brak opisu elementów składowych stanowiska badawczego na rys. 14,
- braku zaznaczenia w Tabeli 5, która jej część odnosi się do przekroju poprzecznego z wyokrągleniami i bez nich,
- niekompletnego podpisu pod rys. 23,
- braku właściwych nagłówek w Tabeli 6,
- zastosowania dwóch rodzajów mian: [m] i [mm] na rys. 29 ÷34,
- wielokrotnego powtarzania w tekście: „*na powyższym wykresie*”, „*na kolejnym wykresie*”, bez podania numeru wykresu, co często skutkowało błędnymi odniesieniami, jak np. na str. 130, 134, 138, 142, 146, 147,
- różnego zakresu skali na osi poziomej na wykresach 32÷37 dla przypadków bez i z wzmocnieniami (zastosowanie tego samego zakresu bardziej podkreśliłoby wpływ wzmocnień).

Ponadto sformułowanie w tezie nr 2 „*elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniu podczas tego procesu*” powinno być przeredagowane, np. na „*elementów konstrukcyjnych znajdujących się pod obciążeniem w czasie procesu wzmocniania*”.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter doświadczalno-analityczny. Autor podjął się rozwiązania aktualnego zagadnienia naukowego, dotyczącego uzupełnienia wiedzy w zakresie wyznaczania momentu krytycznego zwiczenia z uwzględnieniem lokalnych wzmocnień spawanych do konstrukcji będącej pod obciążeniem.

Z zadania tego Autor wywiązał się bardzo dobrze, gdyż jego praca zakończona jest istotnymi z punktu widzenia projektanta wnioskami odnośnie wagi przewiązek mocowanych w strefach przypodporowych stalowych belek dwuteowych. Z treści rozprawy wynika, że Autor:

- właściwie sprecyzował cel i przyjęte tezy rozprawy oraz konsekwentnie ten cel zrealizował,
- dobrze zna od strony analitycznej ogół aktualnych zagadnień objętych zakresem rozprawy w dyscyplinie naukowej budownictwo,
- zawarł w rozprawie szereg elementów oryginalnych wzbogacając aktualny stan wiedzy o analizowanych zagadnieniach,
- wykazuje dobry stopień przygotowania naukowego, umiejętność poprawnego i samodzielnego prowadzenia badań naukowych i ich interpretacji.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Krzysztofa Wierzbickiego pt.: „*Wpływ elementów ograniczających deplanację na moment krytyczny belek stalowych w eksperymencie numerycznym i fizycznym*” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*”.

Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Elżbieta Urbańska-Galewska, prof. PG

Gdańsk, 31 sierpnia 2022 r.