



Warszawa, 3.10.2022 r.

Dr hab. inż. Anna Barszcz  
Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej  
al. Armii Ludowej 16  
00-637 Warszawa  
e-mail: [anna.barszcz@pw.edu.pl](mailto:anna.barszcz@pw.edu.pl)

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Wierzbickiego pt.

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

### 1. Podstawa opracowania

Uchwała nr 190 Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 27 czerwca 2022 roku (pismo prorektora ds. nauki prof. dr hab. inż. Jacka Przepiórskiego z dnia 4 lipca 2022 roku).

### 2. Zawartość rozprawy doktorskiej

Rozprawa zawarta jest na 263 stronach i obejmuje spis treści, podziękowania, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, 7 rozdziałów, bibliografię z 99 pozycjami, spisy rysunków, wykresów i tabel oraz 5 rysunków dokumentacji projektu stanowiska badawczego.

**Rozdział 1: Wstęp** o objętości 3 stron. W pierwszym podrozdziale Autor wskazuje powody zainteresowania się tematyką wzmocnienia elementów konstrukcyjnych w trakcie użytkowania budowli. Charakteryzuje sytuację na rynku budowlanym, która często wymusza adaptację istniejącego budynku do nowych potrzeb, jako rozwiązanie korzystniejsze od zbudowania nowego obiektu w dogodnej lokalizacji. Następnie przedstawione są problemy często spotykane przy wykorzystywaniu istniejących budowli do nowych celów i wynikająca z nich konieczność wzmocnienia elementów konstrukcyjnych w warunkach eksploatacji. W tym kontekście Autor wskazuje i uzasadnia wybór, jego zdaniem najlepszego, sposobu wzmocnienia belek narażonych na zwichrzenie, jakim jest dospawanie blach w miejscach o niskim wyężeniu przekroju. W drugim podrozdziale przedstawiony jest cel rozprawy – analiza efektywności tego typu wzmocnienia i weryfikacja możliwości przeprowadzenia takiego procesu w warunkach konstrukcji obciążonej. Zakres pracy obejmuje opracowanie modelu numerycznego belek dwuteowych bez wzmocnień i z wzmocnieniami,

obciążonych siłą skupioną w środku rozpiętości, przeprowadzenie badań doświadczalnych takich belek oraz omówienie i porównanie wyników otrzymanych z analiz numerycznych i eksperymentu. Na koniec sformułowano 3 tezy pracy. Po pierwsze, że usztywnienie belek żebrami ograniczającymi deplanację, może efektywnie zwiększyć nośność belek, które z racji dużej smukłości narażone są na utratę stateczności w postaci zwichrzenia. Po drugie, że wzmacnianie takimi żebrami można przeprowadzić w elemencie obciążonym i po trzecie, że wyniki symulacji numerycznej są zadowalająco zbieżne z wynikami eksperymentu.

**Rozdział 2: Wprowadzenie** o objętości 36 stron (w tym 13 rysunków, 1 zdjęcie i 5 wykresów), składa się z 3 podrozdziałów. W pierwszym przedstawiono historycznie etapy dojścia do sformułowania powszechnie stosowanego wzoru na moment krytyczny, w szczególności dla przekrojów dwuteowych, i zwrócono uwagę, że ograniczenie deplanacji można uwzględnić przez przyjęcie odpowiedniej wartości współczynnika długości efektywnej przy zwichrzeniu. W kolejnym podrozdziale przedstawiono ekonomiczne i normatywne przyczyny zainteresowania inwestorów adaptacją istniejących obiektów do nowych potrzeb, a następnie omówiono wyzwania stojące przed projektantami w związku koniecznością wzmacniania elementów konstrukcji oraz sposoby ich rozwiązywania. W ostatnim podrozdziale omówione są różne typy wzmocnień belek dwuteowych i ich wpływ na wartość momentu krytycznego. Zaprezentowano wyniki prac własnych Autora poświęconych analizie wpływu usztywnień w postaci blach czołowych o różnej grubości na wartość współczynnika  $k_w$  i momentu krytycznego. Porównano wyniki uzyskane z wzorów analitycznych funkcjonujących aktualnie w literaturze i obliczeń przeprowadzonych programami wykorzystującymi metodę elementów skończonych. Końcowy fragment poświęcono belkom usztywnionym blachami równoległymi do środka. Przegląd literatury w tym zakresie zakończono wzorem na moment krytyczny z pracy Metwally'ego, EL-Aghoury'ego i Ibrahima, w którym wpływ takiego usztywnienia uwzględniony jest przez modyfikację momentów bezwładności (wycinkowego i przy skręcaniu swobodnym). Zwrócono uwagę, że weryfikacja proponowanych wzorów analitycznych ma zwykle charakter numeryczny i brak jest potwierdzenia ich prawidłowości badaniami doświadczalnymi. W związku z tym zadeklarowano odniesienie się w pracy doktorskiej do zaproponowanego wzoru, jednak w dalszych analizach porównawczych również ograniczono się tylko do eksperymentu numerycznego.

**Rozdział 3: Model badawczy** o objętości 42 stron (w tym 14 rysunków, 16 zdjęć, 5 wykresów i 6 tabel), jest pierwszym z zasadniczych rozdziałów pracy. Podzielony jest na 4 podrozdziały, z których pierwszy skupia się na budowie stanowiska badawczego i aparaturze pomiarowej, drugi na modelowaniu elementu dla potrzeb obliczeń numerycznych, w trzecim opisano parametry belki wybranej do

zbadania, a w czwartym przedstawiono algorytm obliczeń i przebieg badań doświadczalnych. W zasadzie w opisie modelu badawczego w pierwszej kolejności oczekiwane jest przedstawienie przedmiotu badań. Te informacje znalazły się dopiero przy opisie eksperymentu numerycznego i w następującym po nim podrozdziale. Opis modelu rozpoczyna natomiast opis stanowiska badawczego. Niestety niektóre istotne informacje są trudne do odczytania mimo dość szczegółowego opisu, załączonych rysunków i zdjęć. Dotyczy to np. sposobu przekazywania siły obciążającej na badany element, co ma istotne znaczenie przy interpretacji wyników. Co prawda pośrednio sposób ten jest opisany w kolejnym rozdziale dotyczącym eksperymentu numerycznego, ale już tutaj mógłby być zasygnalizowany od strony technicznej. Sytuację mogłyby poprawić zdjęcia wykonane w trakcie badania i/lub po jego zakończeniu. W dalszej części opisu badań, wskazane są punkty pomiarowe. Szczegółowo opisane są parametry urządzeń pomiarowych i sposób pomiaru imperfekcji geometrycznych belek przeznaczonych do badań. Opis eksperymentu numerycznego rozpoczęto od zdefiniowania modelu materiału, co zostało poprzedzone standardowymi badaniami wytrzymałości na rozciąganie 8 próbek (po 4 ze środka i pasów). Następnie opisano geometrię elementu i sposób jego podparcia. Część informacji i objaśnień zawartych w tym rozdziale dotyczy badań doświadczalnych i mogłaby się znaleźć w podrozdziale dotyczącym eksperymentu fizycznego. Należy podkreślić, że dobór odpowiednich typów elementów skończonych i wymiarów przekroju zastępującego przekrój walcowany przekrojem bez wyokrąglenia walcowniczych, poprzedzono szeregiem analiz, oszacowań i zestawień. Rozdział poświęcony imperfekcjom geometrycznym i materiałowym zawiera wprowadzenie teoretyczne i informacje o wyborze sposobu modelowania tych imperfekcji. Dopiero po tych informacjach podano uzasadnienie wyboru parametrów badanego elementu z uwagi na ograniczenia wymiarów laboratorium i spełnienie założenia utraty stateczności w zakresie sprężystym. Określono też wymiary i lokalizację blach wzmacniających oraz kolejność układania spoin. Na zakończenie zamieszczono podrozdział w tytule dotyczący obliczeń, ale w treści opisany jest zarówno algorytm obliczeń jak i algorytm badań doświadczalnych. Symbole poszczególnych etapów i przemienny sposób ich opisu sugerują korelację między obliczeniami i badaniami doświadczalnymi, co nie ma miejsca.

**Rozdział 4: Eksperyment numeryczny**, o objętości 46 stron (w tym 12 rysunków, 27 wykresów i 3 tabele), poświęcony jest modelowaniu numerycznemu badanych elementów za pomocą oprogramowania Abaqus. Rozdział podzielony jest na 6 podrozdziałów, z których dwa pierwsze opisują geometrię badanych belek. Analiza wymiarów przekrojów różnych belek, a także przekrojów w różnych miejscach na długości belki pozwoliła na przyjęcie przekroju o takich samych wymiarach dla wszystkich belek. Imperfekcje związane z brakiem prostoliniowości belki pomierzono w dwóch kierunkach dla każdej belki oddzielnie. Na ich podstawie obliczono również dla każdej belki maksymalny kąt skręcenia przekroju, z których największy wyniósł około 0,5°. W kolejnym podrozdziale powrócono do ustalenia wymiarów zastępczego przekroju

poprzecznego (tym razem na podstawie rzeczywistych wymiarów przekroju walcowanego, ustalonych z pomiarów belek przygotowanych do badań fizycznych), następnie opisano przyjęty sposób modelowania przekroju elementami powłokowymi. Dla takiego modelu policzono momenty krytyczne dla belki niewzmocnionej i wzmocnionej wykorzystując analizę BUCKLE w Abaqusie. Otrzymane wartości jako czysto teoretyczne i dla idealnego przypadku obciążenia nie były dalej w pracy wykorzystane ani dyskutowane. Podrozdział czwarty poświęcony jest wyznaczeniu nośności belek. Zasygnalizowano dwa kryteria brane pod uwagę przy ocenie nośności sprężystej i plastycznej belek. Przedstawiono schemat prowadzenia obliczeń w programie Abaqus. Poinformowano, że zdecydowano, aby obliczenia przeprowadzić dwukrotnie: 1) dla elementu w idealnych warunkach i 2) w warunkach zbliżonych do zaistniałych w badaniach doświadczalnych, co prawda mając świadomość, że ich dokładne odzwierciedlenie praktycznie nie jest możliwe z uwagi chociażby na pominięcie wpływu ewolucji naprężeń własnych w wyniku spawania żeber ograniczających deplanację przekroju. W opisie wyników badań dla belki nr 1 te dwa rodzaje obliczeń nazwano wersją 1 i wersją 2. Szkoda, że nie poinformowano o tym już w tym miejscu. Przydałby się też opis programu badań. Informacje o nim są porzucane w opisach badań poszczególnych belek. Na zakończenie części wstępnej sformułowano dwa kryteria, które zaplanowano brać pod uwagę przy analizie wyników i ich porównywaniu. Obydwa kryteria dotyczą wartości naprężeń w punktach pomiarowych najbardziej wyężonych. W kryterium osiągnięcia nośności sprężystej, jako wartość referencyjną uznano nominalną wartość granicy plastyczności dla stali S355, z której wykonane zostały elementy doświadczalne, w którymkolwiek z czterech punktów pomiarowych. Kryterium nośności plastycznej też ograniczono do jednego z punktów pomiarowych, definiując je jako wzrost wartości naprężenia bez przyrostu obciążenia. Po tym wstępnym opisie, w sześciu kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki obydwu wersji obliczeń numerycznych dla belek bez wzmocnień i wzmocnionych blachami. W trzech pierwszych belkach wzmocnienie uwzględniano po obciążeniu belki siłą 8 kN, które zostało oszacowane jako odpowiadające realnemu obciążeniu konstrukcji wzmacnianej, co wyjaśniono w następnym rozdziale, dotyczącym badań doświadczalnych. W trzech kolejnych belkach wzmocnionych nie wprowadzano wstępnej siły. Otrzymane wyniki obliczeń zestawiono w postaci wykresów naprężeń i przemieszczeń w funkcji siły obciążającej. Podano wartości sił wyznaczonych według dwóch przyjętych kryteriów. Szkoda, że tych charakterystycznych punktów nie zaznaczono na wykresach. Zwrócono uwagę na podobieństwa i różnice zachowania się belek wzmocnionych i bez wzmocnień oraz obliczanych w warunkach nazwanych „idealnymi” i z uwzględnieniem sił tarcia oraz obciążeń pochodzących od zawiesia. Starano się zinterpretować sytuacje nietypowe. Przed porównaniem wyników zamieszczono podrozdział z analizami parametrycznymi dla przekroju IPE 180 o wymiarach i charakterystykach przyjętych z tablic wyrobów walcowanych. Moment krytyczny i nośność belek z uwzględnieniem zwiczenia wyznaczono z opisanych wcześniej wzorów analitycznych i normowych. Porównano je dla belek o różnych długościach i

różnych grubościach blach usztywniających, różnej ich lokalizacji i długości. To już drugi fragment w tym rozdziale nie związany z obliczeniami numerycznymi. Na zakończenie podano wartości momentu krytycznego i nośności na zwichrzenie belki o długości przyjętej w badaniach doświadczalnych i wzmacnianej blachami o wymiarach też przyjętych w eksperymencie fizycznym. Wartości te wykorzystano przy porównaniu wyników w kolejnym rozdziale. Trochę dziwi rezygnacja z przekroju zastosowanego w obliczeniach numerycznych. Policzenie jego charakterystyk nie jest skomplikowane. W ostatnim podrozdziale zestawiono na wykresach zbiorczych wyniki dla wszystkich belek, oddzielnie niewzmocnionych i wzmacnionych. Naniesiono też obliczone wartości momentu krytycznego i nośności oraz sformułowano wnioski. Stwierdzono większą nośność belek usztywnionych blachami, niż bez tych blach. W załączonych tablicach nie porównywano jednak nośności belek, ale różnice między nośnością przed i po wzmacnieniu liczone dla każdej z belek. Nie stwierdzono istotnego wpływu na wyniki wzmacniania pod obciążeniem i bez obciążenia, co jest oczywiste dla belek zachowujących się sprężysto.

**Rozdział 5: Eksperyment fizyczny** o objętości 38 stron (w tym 2 rysunki, 2 zdjęcia, 32 wykresy i 2 tablice), ma trochę inną budowę niż poprzedni. Nie zawiera informacji wstępnych, dotyczących wszystkich badanych elementów, a opis badań poszczególnych belek podzielono na dwie grupy: belki wzmacniane pod obciążeniem i bez siły wstępnej. Wyniki z badań pokazano na wykresach analogicznych do tych ilustrujących obliczenia numeryczne. Opisano dokładnie przebieg badania szczególnie pierwszej belki, podczas którego sprawdzano poprawność działania stanowiska. Zdawano sobie sprawę z ingerencji w zachowanie się belki w trakcie łączenia blach wzmacniających z pasami dwuteownika za pomocą spawania, szczególnie gdy odbywa się ono przy utrzymaniu stałej siły obciążającej. Objawiało się to uskokami na wykresach zależności naprężeń i przemieszczeń od siły obciążającej. W dwóch pierwszych belkach dodatkowo umieszczono termopary, aby monitorować rozkład temperatur w trakcie spawania i stygnięcia belki. Starano się wyjaśnić wszystkie nietypowe wyniki pomiarów. Rozdział zakończony jest porównaniem wyników i podsumowaniem zawierającym wykresy i tabele. Uzyskano zadowalającą zbieżność wyników badań wszystkich belek. Nie spodziewano się wyników bardzo bliskich sobie, chociażby ze względu na istniejące i stwierdzone za pomocą pomiarów imperfekcje. Do porównania wyników tym razem zastosowano 3 kryteria, z których tylko jedno, dotyczące osiągnięcia nominalnej granicy plastyczności w jednym punkcie, pokrywało się całkowicie z kryterium wprowadzonym w eksperymencie numerycznym. Poprzednie kryterium nośności plastycznej tu jest zdefiniowane nieco inaczej i precyzyjniej, jako kryterium utraty nośności. Dodatkowo wprowadzono trzecie kryterium (szczególnie istotne w przypadku belki, która nie spełniła warunków dwóch pierwszych kryteriów). Nazwano je kryterium przegięcia na wykresie zależności naprężenie-siła obciążająca. Podobnie jak poprzednio porównano różnice sił, przy których zostały spełnione kryteria dla belek z wzmacnieniami i bez nich.

**Rozdział 6: Porównanie wyników badań numerycznych i doświadczalnych** o objętości 21 stron (w tym 30 wykresów i 1 tablica) ma budowę podobną do Rozdziału 5. Najpierw dla kolejnych belek pokazane są wykresy takich samych zależności jak w dwóch poprzednich rozdziałach, z tym że zestawiono krzywe z eksperymentu fizycznego z krzywymi z eksperymentu numerycznego w dwóch wersjach, ale oddzielnie dla belek bez wzmocnień i z wzmocnieniami. Wyniki otrzymane dla każdej belki zostały też krótko omówione. Potem, w kolejnym podrozdziale, zestawiono w tablicy wyniki dla wszystkich belek. Kierowano się dwoma kryteriami zdefiniowanymi przy eksperymencie numerycznym. Nie porównywano sił obciążających belkę, tylko różnice wartości tych sił otrzymanych dla belek wzmocnionych blachami i belek bez takiego wzmocnienia. Jedynie dla kryterium dotyczącego osiągnięcia teoretycznej granicy plastyczności otrzymano prawie kompletne wyniki (w belce nr 1 – testowej – nie doprowadzono obciążenia do wywołującego naprężenia równe nominalnej granicy plastyczności). W przypadku plastycznej utraty nośności wyniki kompletne uzyskano tylko dla wersji I obliczeń programem Abaqus. W związku z tym drugą wersję obliczeń MES potraktowano jako badanie poglądowe, chociaż to właśnie te wyniki były bliższe wynikom z badań doświadczalnych.

**Rozdział 7: Wnioski**, o objętości 4 stron, zawiera wnioski z przeprowadzonych badań i analiz oraz propozycje kierunków dalszych badań. We wnioskach po pierwsze stwierdzono, że pierwsza teza pracy została udowodniona dla konkretnej belki i przy konkretnym jej wzmocnieniu. Jednocześnie została udowodniona druga teza. W tym przypadku Autor zwrócił dodatkowo uwagę na znaczenie lokalizacji blach wzmacniających, z czym również jest związana możliwość pominięcia, lub nie, wpływu wysokiej temperatury występującej podczas spawania na nośność belki. Dalej wymienione są zalety takiego wzmacniania smukłych belek. Udowodniona też została trzecia teza, ale w zakresie przyrostu nośności, a nie wartości samej nośności. Uwzględnienie tarcia na podporach oraz stabilizującego wpływu zawiesia pozwala zdaniem Autora zmniejszyć rozbieżności pomiędzy nośnościami badanych elementów. Doświadczenie zdobyte przez Doktoranta w trakcie badań doświadczalnych i analiz numerycznych pragnie on wykorzystać do analiz elementów lokalnie usztywnionych o innych przekrojach i długościach oraz warunkach brzegowych. Przewiduje również dalsze badania wpływu spawania konstrukcji obciążonej na jej pracę.

**Rysunki dokumentacji projektu stanowiska badawczego:** Zamieszczono rysunki stanowiska badawczego zaprojektowanego przez autora i zgłoszonego do postępowania w sprawie nadania ochrony patentowej. Na rysunkach zestawieniowych w tekście i załączniku brak oznaczeń elementów montażowych.

### 3. Ogólna ocena rozprawy

#### 3.1. Tematyka

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy tematyki wzmacniania smukłych belek dwuteowych znajdujących się w warunkach wymagających zwiększenia ich nośności. Zainteresowanie tą tematyką aktualnie wzrasta w związku z rozwojem budownictwa, a jednocześnie kurczeniem się terenów zapewniających korzystną lokalizację nowo powstających obiektów. Często korzystniejszym rozwiązaniem jest zaadaptowanie istniejącego obiektu, a wtedy pojawiają się problemy związane między innymi ze wzmacnianiem elementów tego obiektu, znajdujących się pod obciążeniem. Często konieczne jest wzmacnianie najbardziej wyjątkowego przekroju, ale w przypadku smukłych belek, wymiarowanych ze względu na nośność z uwzględnieniem zwężenia, może okazać się wystarczającym ograniczenie deplanacji niektórych przekrojów mniej wyjątkowych. Częstość występowania takich sytuacji nie jest może zbyt duża, ale korzyści z zastosowania łatwiejszego sposobu wzmacniania są istotne i stąd zajęcie się tym zagadnieniem wydaje się uzasadnione.

Dotychczasowe badania są ukierunkowane głównie na ocenę wartości momentu krytycznego. Proponowane są wzory uwzględniające rodzaj i geometrię elementów wzmacniających w określaniu współczynnika długości przy zwężeniu lub modyfikujące wyrażenie na wartość momentu krytycznego w inny sposób. W literaturze przedmiotu sporo jest analiz numerycznych prowadzących do sformułowania wzorów analitycznych, natomiast niewiele badań doświadczalnych, dotyczących walidacji rozwiązań analitycznych lub numerycznych. Przeprowadzenie badań doświadczalnych stateczności elementów jest zadaniem trudnym, wiele czynników ma wpływ na otrzymane wyniki i trudno osiągnąć ich powtarzalność. Stąd może brać się niechęć do podejmowania takiego wyzwania. W pracy zaprezentowano aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki objętej rozprawą, zauważono brak eksperymentów fizycznych i zdecydowano się na próbę walidacji doświadczalnych obliczeń numerycznych. W tym kontekście pewien niedosyt budzi brak pozycji literatury, w których zajmowano się sposobami określania momentu krytycznego na podstawie wyników badań doświadczalnych. Co prawda ostatecznie Autor wybrał inną drogę, bo pomimo badania belek smukłych, narażonych na zwężenie, nie zajmował się określeniem momentu krytycznego, czy nośności belki, ale porównywał przyrost nośności belki definiowany osiągnięciem w punkcie pomiarowym określonego naprężenia. Badania doświadczalne zostały poprzedzone pomiarami imperfekcji, które zostały też uwzględnione w obliczeniach numerycznych. Sporo uwagi poświęcono zastąpieniu przekroju walcowanego przekrojem składającym się z prostokątów i uwzględnieniu rzeczywistej, pomierzonej geometrii przekroju. Przeprowadzono badania doświadczalne na specjalnie zaprojektowanym stanowisku. Zbudowano modele numeryczne badanych elementów: proste i uwzględniające zjawiska występujące w trakcie eksperymentu fizycznego, takie jak np. tarcie. Porównano wyniki

otrzymane z symulacji numerycznych z wynikami doświadczalnymi. Stwierdzono zasadność zastosowania wybranego typu wzmocnienia blachami, jako rozwiązania podnoszącego nośność belki. Zauważono zbieżność analiz numerycznych z wynikami eksperymentu fizycznego w zakresie oceny wzrostu nośności belki.

### **3.2. Ocena wartości naukowej**

Materiał zawarty w rozprawie jest wartościowy szczególnie w zakresie badań doświadczalnych i analiz numerycznych. Badania zostały zaprojektowane po przeanalizowaniu obecnego stanu wiedzy. Widoczne jest zaangażowanie Autora w budowę stanowiska badawczego. Z dużą starannością została dobrana aparatura pomiarowa. Zdobyte doświadczenie będzie mogło służyć również badaniom elementów o innych przekrojach i długościach oraz warunkach podparcia. Zwraca uwagę fakt, że analiza przebiegu badań przeprowadzona była dla każdej belki. Natomiast badania numeryczne charakteryzują się dużą dbałością o odtworzenie warunków, w jakich przeprowadzono eksperyment fizyczny. Wiele miejsca poświęcono dokładności odwzorowania rzeczywistych elementów badawczych. Doktorant w dobrym stopniu opanował współczesne narzędzia i techniki badawcze. Cenne są analizy wyników i próby wyjaśnienia przyczyn występowania zjawisk nietypowych. Wątpliwości budzi natomiast sformułowanie niektórych kryteriów, a w analizach porównawczych - oparcie się głównie na zależnościach siła-naprężenie. Problematyka naukowa została określona prawidłowo, chociaż nie jest ona całkowicie zgodna z tytułem pracy. Obejmuje swym zakresem zagadnienia związane z badaniami doświadczalnymi i symulacjami numerycznymi w odniesieniu do oceny przyrostu nośności belek po wzmocnieniu blachami. Przyjęte cele badawcze zostały osiągnięte, a tezy rozprawy udowodnione wynikami dociekań naukowych.

### **3.3. Ocena strony formalnej**

Układ treści rozprawy jest w miarę poprawny. Czasami budzi zastrzeżenia umieszczenie podobnych treści w różnych rozdziałach i kolejność podawania informacji. W trzech zasadniczych rozdziałach zachowano podobny sposób prezentowania. Każdy rozdział zawierający wyniki dociekań naukowych zakończony jest porównaniem i podsumowaniem. Zastrzeżenia budzi kolorystyka niektórych wykresów, ich skalowanie i brak na nich niektórych istotnych informacji wykorzystywanych w dalszych opisach. Język i terminologia naukowo-techniczna nie zawsze są precyzyjne, ale zauważone usterki nie obniżają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy. Szczególnie w końcowych rozdziałach pracy zauważa się większy chaos i sprawiają one wrażenie pisanych z pośpiechem, co generuje błędy gramatyczne (głównie nieprawidłowe końcówki wyrazów i brak spójników), ale nie obniżają one wartości merytorycznej pracy. Jednak w uwagach najważniejsze z nich wymieniono.



## 4. Uwagi do rozprawy

### 4.1 Uwagi ogólne

a) Jak wspomniano wyżej w tytule pracy zasugerowane jest badanie wpływu elementów ograniczających deplanację na moment krytyczny, czego ani w eksperymencie numerycznym, ani fizycznym nie wyartykułowano. W pracy są liczne odniesienia do momentu krytycznego, zarówno w przeglądzie literatury, jak i w porównaniach prowadzonych na potrzeby doboru wymiarów przekroju zastępczego i typu elementu skończonego do modelowania belek w programie Abaqus. W celu rozprawy sformułowanie jest bardziej adekwatne, bo mowa jest o analizie efektywności wzmacniania belek przez zwiększenie momentu krytycznego, co rzeczywiście występuje przy zastosowaniu elementów ograniczających deplanację. Natomiast w tezach pracy już nie wspomina się o momencie krytycznym i są one najbliższe temu co osiągnięto w wyniku przeprowadzonych eksperymentów. Istnieją publikacje opisujące sposób wyznaczenia momentu krytycznego na podstawie wyników badań doświadczalnych, ale nie zostały one przywołane w pracy.

b) Wyniki badań są dla każdej belki prezentowane w postaci zależności od siły obciążającej takich wielkości jak: naprężenia w czterech punktach na pasach dwuteownika w środku rozpiętości belki, przemieszczenia podłużne czterech punktów na pasie górnym (po dwa na każdej z podpór) i przemieszczenia pionowe i poziome punktu na pasie dolnym dwuteownika w środku rozpiętości belki. Belka jest w układzie odwróconym w stosunku do sił grawitacyjnych. Przebiegi wszystkich zależności są skomentowane, ale do oceny nośności brane są wyniki tylko z wykresów siła-naprężenie. Biorąc pod uwagę, że naprężenia są obliczane na podstawie wyników odkształceń pomierzonych tensometrami, nie są to akurat najbardziej miarodajne dane, szczególnie wówczas, gdy osiągnane są naprężenia równe granicy plastyczności.

c) Wątpliwości budzi drugie kryterium nazwane kryterium nośności plastycznej. Przy eksperymencie numerycznym jest ono sformułowane dość ogólnie, jako kryterium utraty nośności belki, czyli maksymalna siła obciążająca, którą belka jest w stanie przenieść i można to zaakceptować. Trzeba jednak zauważyć, że nie musi to być nośność plastyczna. Wszak mamy do czynienia z belkami smukłymi, które mogą utracić nośność przed uplastycznieniem przekrojów. Dalej doprecyzowany jest sposób spełnienia tego kryterium, jako wartości siły, przy której dla jednego punktu pomiarowego wykres naprężeń staje się równoległy do asymptoty pionowej. To świadczy o uplastycznieniu w jednym punkcie przekroju, gdy o nośności plastycznej decyduje takie uplastycznienie przekroju, przy którym występuje dywergencja między siłami wewnętrznymi i obciążeniem (punkt graniczny na ścieżce równowagi, obrazującej zależność obciążenia i składowej przemieszczenia stanu pokrytycznego). Ogólnie najwłaściwszą ocenę nośności można przeprowadzić odczytując wartości siły jako maksimum na wykresie siła-przemieszczenie.

d) Czytelność wykresów poprawiłaby konsekwentnie stosowana kolorystyka. W przypadku wykresów zbiorczych w rozdziałach podsumowujących wyniki tę zasadę zastosowano, niestety w wielu innych wykresy tych samych zależności, bądź wykresy dla tych samych punktów pomiarowych są oznaczane różnymi kolorami, co utrudnia ich porównanie. Dla zobrazowania różnic w nośnościach przydatne byłoby podobne wykresy wykonać w osiach o tych samych zakresach. Ponieważ w opisie badań podane są różne nośności, byłoby wskazane zaznaczenie na wykresach punktów, które decydowały o ich wartości.

e) Szczególnie przy opisie wyników badań spotyka się złe odwołania. Wraz z pomyłkami i literówkami utrudniają one prawidłową percepcję tekstu.

#### 4.2 Uwagi szczegółowe

W uwagach szczegółowych podano jedynie niektóre usterki tekstu, zarówno redakcyjne jak i o charakterze merytorycznym. Nie powtarzano uwag poczynionych wyżej.

Z błędów językowych pojawia się *ilość* zamiast *liczba* przy rzeczownikach policzalnych i *przy pomocy* w odniesieniu do rzeczy oraz pisane rozłącznie np. *niewskazane, nowoprojektowane* czy *przeciwskrętne*.

Str. 9, w. 5 od góry – Niezbyt fortunne określenie „blachy bimomentowe”, gdy chodzi o usztywnienia w postaci żeber czy przewiązek, które ograniczają deplancję przekroju dwuteowego belki.

Str. 13, w. 12-15 od dołu – Sformułowanie *oś o momencie bezwładności*, lepiej zastąpić przez - *oś bezwładności*. W tym przypadku - oś główna mniejszej lub większej bezwładności.

Str. 13, w. 5 od dołu – Powinno być - *nośność przekroju przy obciążeniu siłą podłużną*

Str. 14, w. 2 i 3 od góry – Powtórzone linie.

Str. 16, w. 6 od góry – Najkorzystniej wypada *ktoś* lub *coś*, a tutaj powinno być - *najkorzystniej jest wzmocnić*.

Str. 19, w. 5 od góry – Moment zginający wywołuje naprężenia, które przenoszone są przez przekrój

Str. 19, w. 6 od góry – Chyba *bratanek*.

Str. 24, Rys. 3 – Zamiast *M* powinno być *M<sub>y</sub>*.

Str. 26, Rys. 5 – Niejasne sformułowanie w podpisie rysunku – *belka oparta na przekroju*

Str. 26, Rys. 6, str. 36, Rys. 7 i str. 87, Rys. 22 – Brak odwołania w tekście do tych rysunków.

Str. 28 – W wyrazach wektora  $r$  brakuje  $\alpha_2$ .

Str. 45, Wykres 1 i 2 – W podpisie jest *wpływ zmiany wartości*, a na osi odciętych odłożona *wartość*. Można by też ujednolicić opis wartości na osiach  $t_{p,1}$  i  $t_{p,2}$

Str. 46, wzory (29) – (31) – Brak objaśnienia niektórych symboli.

Str. 47, Wykres 3 – W podpisie rysunku zależność powinna być odwrotna.

Str. 48 do 51 – Niejasne odwołania do pozycji literatury i rysunków.

Str. 51, w. 11 i 12 – Niezgodność opisu z Wykresem 4.

Str. 53, w. 2-3 od dołu – Powinno być  $z_{bp}$  i  $t_{bp}$

Str. 60 – Brak identyfikacji i opisu punktów 2 i 3

Str. 75, Wykres 8 – Zamieszczony jest zły wykres. Powinien być dla próbek 1-4

Str. 77, w. 4 od góry – Wykres 7 nie wskazuje na zmniejszenie plastyczności stali średnika.

Str. 86, w. 1 od dołu – Od tego miejsca występują powołania na wzory z eurokodu 1993-1-1, które z ostatecznej edycji normy zostały usunięte.

Str. 87, Rys. 22 – Ten rysunek nie wnosi nic nowego w stosunku do Rys. 20.

Str. 92, w. 3 – 8 od góry – Fragment dotyczy dwuteowników spawanych, więc nie ma związku z badanymi elementami.

Str. 101, w. 2 od dołu – Nie ma *poniżej* schematu. Chyba chodzi o Rys. 26.

Str. 104, w. 3 od dołu – Chyba chodzi o *grubość* pasów a nie *wysokość*.

Str. 109, Tabela 7 – W tabeli grubość średnika wynosi 6,5 mm, a w opisie powyżej tabeli i na Rys. 35 – 6,6 mm.

Str. 119, w. 9 od góry – W punktach pomiarowych  $t_1$  –  $t_4$  nie mierzono naprężeń.

Str. 122, w. 9 od góry – Na osi rzędnych wprowadzono oznaczenie sugerujące odkładanie stosunku przemieszczeń, co się co prawda nie zgadza z jednostką [mm]. Lepsze oznaczenie, w którym  $dy$  i  $dz$  oddzielone są przecinkami zastosowano w niektórych dalszych wykresach.

Str. 130, w. 7 od dołu – Złe odwołanie do Wykresu 18. Podobna sytuacja występuje przy Wykresach 21, 24 i 27. Wykresy te są powyżej, a nie na poprzedniej stronie.

Str. 151, w. 2-3 od góry – Zamieniony opis wersji 1 i wersji 2.

Str. 157, w. 2-6 od góry – Tekst powtórzony w kolejnym akapicie.

Str. 165, w. 3 od góry i następne – Złe odwołania do wykresów.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Krzysztofa Wierzbickiego pt. *Wpływ elementów ograniczających deplanację na moment krytyczny belek stalowych w eksperymencie numerycznym i fizycznym*, która powstała w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie pod kierunkiem dra hab. inż. Macieja Szumigały, prof. nadzw. PP, stwierdzam, że w pracy tej Autor przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując się:

- a) ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną z zakresu wzmacniania dwuteowych belek stalowych w sposób zwiększający moment krytyczny za pomocą elementów ograniczających deplanację przekroju,
- b) wiedzą praktyczną z zakresu komputerowego modelowania i analizy statycznej, z uwzględnieniem nieliniowości materiałowych i geometrycznych, w zastosowaniu do oceny zachowania się stalowych belek o dużej smukłości obciążonych poprzeczną siłą skupioną w połowie rozpiętości,
- c) wiedzą praktyczną z zakresu planowania i realizacji badań doświadczalnych służących walidacji rozwiązań numerycznych.

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy należy zaliczyć:

- ważność i aktualność podjętego tematu w odniesieniu do konstrukcji stalowych,
- rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy w tematyce objętej rozprawą,
- właściwy dobór metod badawczych w odniesieniu do tej pracy,
- umiejętność przeprowadzenia badań doświadczalnych w odpowiednim standardzie i opracowanie ich wyników,
- umiejętność modelowania numerycznego w zakresie analiz statycznych,

Zauważone usterki nie mają istotnego znaczenia, jeżeli chodzi o wartość merytoryczną rozprawy.

Przedstawiona wyżej pozytywna ocena rozprawy oznacza, że praca spełnia wymagania Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1669), art. 14 ust. 1 pkt 1, ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14. 03. 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65poz.nr 65. poz. 595 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

