Dr hab. inż. **Marek Galewski**, prof. Uczelni
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska

Gdańsk, dnia 18.08.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Beaty Niesterowicz
pt.: „Modelowanie belek stalowo-polimerobetonowych
z zastosowaniem modeli ciągłych”

Praca wykonana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
Promotor: prof. dr hab. inż. Stefan Berczyński
Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Dunaj

Podstawa oceny:
uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna ZUT z 4.07.2023 oraz pismo prof. dr. hab. inż. Mirosława Pajora, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT z dnia 10.07.2023 wraz z otrzymanym egzemplarzem pracy doktorskiej.

1. Dobór tematu, cel i zakres pracy
Przedmiotem pracy doktorskiej przedłożonej przez mgr. inż. Beatę Niesterowicz są badania nad modelowaniem własności dynamicznych belek stalowych o przekroju prostokątnym wypełnionych w całości lub w wybranych segmentach, materiałem polimerobetonowym. Tytuł tej pracy brzmi *„Modelowanie belek stalowo-polimerobetonowych z zastosowaniem modeli ciągłych”* i dobrze oddaje jej zawartość, aczkolwiek przeprowadzane rozważania, a zwłaszcza badania eksperymentalne, ograniczają zakres rozpatrywanych przypadków tylko do belek o przekroju kwadratowym, a weryfikacja i ocena skuteczności proponowanych metod skupia się w zasadzie tylko na ocenie zgodności częstotliwości drgań własnych. Pozwoliło to jednak wystarczająco wykazać zgodność rezultatów i zweryfikować proponowane metody modelowania.

Autorka przedstawiła cel rozprawy jako: „…*opracowanie metodyki doboru pasywnych eliminatorów drgań konstrukcji belkowych z zastosowaniem matematycznych modeli ciągłych*.” Cel ten został określony w sposób jasny i zrozumiały, a praca przedstawia w kolejnych rozdziałach elementy i kroki niezbędne do jego realizacji. Założony w pracy cel został osiągnięty.

Zakres pracy został zdefiniowany prawidłowo i zawiera elementy, których oczekuje się od rozprawy naukowej. Są to: wprowadzenie, wstęp i przegląd literatury, zdefiniowanie celu i tezy pracy, przedstawienie metod modelowania belek, przedstawienie autorskich metod opartych na modelach ciągłych i dyskretnych dla profili stalowych wypełnionych polimerobetonem, badania eksperymentalne, weryfikacja i walidacja proponowanej metodyki, propozycja zastosowania metodyki do określania rozkładu wypełnień w konstrukcji ramy portalowej oraz podsumowanie.

Praca zredagowana jest w języku polskim, liczy 120 stron oraz zawiera streszczenie w językach polskim i angielskim. Zasadnicza część pracy składa się 10 rozdziałów (w tym wprowadzanie i podsumowanie). Wykaz literatury zawiera 126 pozycji dobranych właściwie i w większości opublikowanych w ciągu ostatnich kilkunastu lat. Z kolei wśród cytowanych starszych prac wiele to publikacje, które można uznać za nadal aktualne lub wręcz fundamentalne dla poruszanej problematyki i ich przywołanie jest jak najbardziej właściwe. Zdecydowana większość pozycji literaturowych to publikacje w języku angielskim z czasopism indeksowanych na liście JCR. Wśród cytowanych prac są również 3 pozycje powstałe przy współudziale doktorantki (w tym 2 w piśmie JCR).

Analizowana w pracy problematyka jest interesująca i zarazem ważna tak z naukowego, jak i z praktycznego punktu widzenia. Elementy belkowe są powszechnie stosowane w inżynierii w różnorakich konstrukcjach. Analiza tego typu elementów zarówno pod względem ich właściwości statycznych jak i dynamicznych jest więc zagadnieniem, z którym inżynierowie i projektanci spotykają się często. W szczególności, dotyczy to problemów związanych z występowaniem drgań i hałasu jak i zagadnień optymalizacji konstrukcji np. w celu redukcji jej masy. Do modelowania układów drgających stosuje się metody ciągłe oraz dyskretne. Mimo rozwoju i coraz powszechniejszego stosowania metod dyskretnych, w niektórych przypadkach, jak wykazano w pracy, metody ciągłe mogą mieć istotne zalety i przewagę nad dyskretnymi.
Szczególnym przypadkiem jest zagadnienie opisu struktur wielostopniowych tj. np. belek o zmiennej geometrii przekroju oraz o zmiennych parametrach materiałowych, w tym – belek powstałych poprzez usunięcie materiału w określonych segmentach. Jednocześnie materiał wewnątrz belki może być inny niż samej belki. W przypadku przedstawionej pracy belka wypełniana jest w całości lub w segmentach polimerobetonem składającym się z żywicy epoksydowej zmieszanej z różnymi gatunkami wypełnienia mineralnego w postaci żwiru o nieregularnych kształtach, piasku i popiołu.
Ponieważ częstotliwość drgań własnych belki jest zależna od masy i sztywności, a te z kolei zależą od ilości usuniętego materiału w danym przedziale, możliwe jest modelowanie charakterystyk dynamicznych belki wielostopniowej tak, by uzyskać ich pożądane właściwości. Jednocześnie może być to powiązane z optymalizacją masy układu.
Proponowana w pracy metoda pozwala modelować wielostopniowe elementy belkowe, a w szczególności świadomie kształtować i przewidywać ich własności dynamiczne, co może mieć duże znaczenie praktyczne w projektowaniu nowoczesnych urządzeń i konstrukcji

2. Merytoryczna ocena pracy

2.1. Charakter pracy

Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny z zakresu modelowania własności dynamicznych belek, zwłaszcza belek wielosegmentowych o wypełnieniu polimerobetonowym.

2.2. Teza naukowa i wnioski z pracy

W przedłożonej pracy, jej Autorka sformułowała następującą tezę:

„[...] *zwiększenie zdolności konstrukcji do tłumienia drgań można uzyskać poprzez odpowiednie, poparte analizą modeli, rozmieszczenie pasywnych eliminatorów drgań na długości konstrukcji belkowej*".

Choć tak sformułowane stwierdzenie może wydawać się oczywiste – stosowanie pasywnych eliminatorów drgań jest metodą znaną – to w kontekście tematyki pracy, tj. umieszczania eliminatorów wewnątrz profili stalowych i wykonanie ich z polimerobetonu, teza wskazuje na dążenie przez doktorantkę do wykazania możliwości rozwiązania oryginalnego i aktualnego problemu naukowego i badawczego.

2.3. Zawartość pracy i ocena osiągniętych rezultatów

Na początku pracy znajduje się wstęp oraz przegląd literatury. Choć przegląd ten jest stosunkowo krótki (zaledwie 8 stron), to w bardzo syntetyczny ale mimo wszystko dość wszechstronny sposób omawia aktualny stan wiedzy i metody modelowania dotyczące zagadnień poruszanych w pracy. Cenne byłoby jednak nieco szersze wyjaśnienie niektórych kluczowych pojęć, opisywanych idei lub metod (np. w formie rysunków).

W kolejnej części pracy, Autorka skupia się na przedstawieniu metod modelowania elementów belkowych, w szczególności ich drgań wzdłużnych, skrętnych oraz poprzecznych (modele Eulera-Bernoulliego i Timoshenki) oraz na modelowaniu tłumienia. Następnie model Timoshenki rozszerzony zostaje na belki kompozytowe o wypełnieniu segmentowym. Modelowany obiekt dzielony jest na fragmenty, odpowiadające segmentom, które modelowane są niezależnie. W kolejnym kroku, w celu wyznaczenia częstotliwościowych funkcji przejścia dla belek wielosegmentowych Autorka proponuje zastosowanie metody sprzęgania receptancji z zachowaniem zgodności warunków brzegowych na krańcach elementów. Pozwala to w stosunkowo łatwy sposób budować modele belek o złożonej strukturze, składających się z wielu segmentów. Rezultaty uzyskane z wykorzystaniem proponowanej metody modelowania są w dalszej części pracy porównywane z wynikami eksperymentalnej analizy modalnej. Na tej podstawie, dla wszystkich rozpatrywanych w pracy modeli stwierdzono wysoką zgodność częstotliwości drgań oraz częstotliwościowych funkcji przejścia z wynikami doświadczalnymi. Zrealizowano w ten sposób cel pracy, którym było opracowanie metodyki modelowania belek segmentowych z zastosowaniem modeli ciągłych.

Zamieszczone w pracy wyniki badań, mimo uwag i pytań jakie zamieszczono w pkt. 2.5 niniejszej recenzji dotyczących ich kompletności i reprezentatywności, są wystarczające do weryfikacji i oceny skuteczności proponowanych metod modelowania. Autorka w sposób zadowalający wykazała wysoką zgodność rezultatów modelowania z wynikami eksperymentalnymi.

Dodatkowo w pracy przedstawiono procedurę obliczeniową, która służy do poszukiwania korzystnego, z punktu widzenia redukcji masy elementu, rozkładu wypełnień z jednoczesnym uwzględnieniem maksymalnej amplitudy drgań tego elementu. Procedura ta wskazuje możliwe praktyczne zastosowanie opracowanej metody modelowania. Po uzupełnieniu i uwzględnieniu dodatkowych założeń metodyka ta może mieć również zastosowanie do konstrukcji modelowanych przy użyciu elementów belkowych o innych przekrojach poprzecznych.

Osiągnięcia pracy są więc na tyle uniwersalne, że po ich odpowiednim rozwinięciu mogą znaleźć dalsze zastosowanie aplikacyjne.

2.4. Samodzielny i oryginalny dorobek doktorantki

Praca doktorska mgr. inż. Beatu Niesterowicz wykazuje cechy samodzielności. Wyraża się to odpowiednim doborem metod analitycznych i eksperymentalnych oraz przeprowadzaniem badań eksperymentalnych i przedstawieniem ich wyników, a także przedstawieniem praktycznego przykładu zastosowania opracowanej metody modelowania. Szczególnie istotny i oryginalny dorobek doktorantki to:

- przedstawienie metodyki modelowania cienkościennych profili stalowych o przekroju kwadratowym, wypełnionych polimerobetonem uwzględniającej drgania poprzeczne, skrętne i wzdłużne,
- wyprowadzenie równań ruchu profilu stalowego i kompozytowego korzystając z zasady Hamiltona,
- przedstawienie metodyki modelowania belki segmentowej w zastosowaniu do modelowania właściwości dynamicznych profili stalowych wypełnianych segmentowo polimerobetonem,
- opracowanie metodyki modelowania właściwości dynamicznych profili stalowych wypełnianych polimerobetonem, korzystając z modelu ciągłego.

2.5. Uwagi dotyczące pracy

Uwagi i pytania ogólne

1. Dokładniejszego wyjaśnienia wymaga proces wykonania próbek do badań eksperymentalnych. W jaki sposób polimerobeton był umieszczany wewnątrz profili. W szczególności, w tym kontekście wyjaśnienia wymaga kwestia wypełnienie styropianem (str. 60). Czy były to tylko wąskie przekładki ograniczające strefy, gdzie umieszczano polimerobeton czy wypełniały całą przestrzeń, która podczas modelowana traktowana jest jako pusta? Czy jest pewność, zwłaszcza jeśli drugi z przypadków ma miejsce, że styropianowe wypełnienie nie wpływało na własności belki? Jak to stwierdzono?
2. Kierunki wymuszenia zaznaczone na rys. 27 są odpowiednie do wymuszenia i obserwacji drgań poprzecznych w osi Z. W tabelarycznych zestawieniach wyników eksperymentalnych wykazane są jednak także drgania skrętne (np. tab. 10, postać 3) i wzdłużne (np. tab. 10,. postać 5) choć nie pokazano odpowiednich zakresów częstotliwości na rysunkach. Badane są belki osiowo symetryczne, a więc ich zginanie, skręcanie i rozciąganie są wzajemnie niezależne. W związku z tym, jak przeprowadzona była identyfikacja drgań skrętnych i wzdłużnych? Czy były one jakoś specjalnie wymuszane, inaczej niż w układzie jak na rys. 27?
3. (w powiązaniu z poprzednią uwagą) Czy funkcje z rys. 28…32 oraz 33…36 odnoszą się do konfiguracji badań jak na rys. 27? Czy wykonywane były badania dla innych konfiguracji punkt pobudzenia – punkt odpowiedzi? Fragmenty tekstu na str. 59…61 sugerują, że były lub miały być m.in. prowadzone badania dla wymuszenia w osi X obiektu, jednak w pracy takich wyników, w szczególności wykresów funkcji receptancji, nie zamieszczono.
4. Czy w związku z powyższymi uwagami nr 2 i 3, zamieszczone w pracy wyniki są wystarczająco reprezentatywne jako podstawa do formułowania przedstawionych w niej wniosków? Uzasadnienia wymaga dlaczego prezentowane są tylko wyniki dla konfiguracji pobudzenia jak na rys. 27.
5. Wprawdzie tytuł pracy jasno definiuje jej tematykę jako „*modelowanie belek stalowo-polimerobetonowych* […]", a cel pracy określony został jako „*opracowanie metodyki doboru pasywnych eliminatorów drgań* […]" to teza pracy odnosi się do zwiększenia zdolności konstrukcji do tłumienia drgań. Choć wykazanie redukcji amplitud pośrednio tego dowodzi, to mimo wszystko wskazane było by, aby w pracy znalazło się bezpośrednie odniesienie do współczynników tłumienia. O ile w części teoretycznej jest mowa o modelowaniu tłumienia oraz o konieczności wyznaczania zastępczego współczynnika dla profilu wypełnionego polimerobetonem, to w części

eksperymentalnej kwestia wpływu zastosowania polimerobetonu i jego rozmieszczenia w kontekście wpływu na współczynnik tłumienia w ogóle nie jest poruszana. Nawet wspomniane wyżej wykazanie redukcji amplitud ogranicza się raczej do słownego stwierdzenia tego faktu na podstawie rysunków, bez analizy konkretnych wartości liczbowych. Np. str. 76: „[...] *można zauważyć, że wypełnienie umożliwia również obniżenie amplitudy drgań nawet pięciokrotnie w stosunku do profilu stalowego (w analizowanym przypadku dla pierwszej częstotliwości drgań).*" Tego rodzaju stwierdzenia warto było by poprzeć np. tabelarycznym zestawieniem danych liczbowych, na których się opierają, zwłaszcza, że rysunki nie prezentują zakresu częstotliwości obejmującego wszystkie rozważane postacie drgań.

6. (w powiązaniu z poprzednią uwagą) Analizy uzyskanych rezultatów i porównania z wynikami badań eksperymentalnych skupiają się wyłącznie na częstotliwościach drgań i, w mniejszym stopniu, amplitudach poszczególnych składowych. Błędy / rozbieżności wyników ocenianie są wyłącznie w kontekście różnic w wyznaczonych lub obserwowanych częstotliwościach drgań własnych. Nie przedstawiono wyników oceny zgodności kształtów postaci drgań choć opis tekstowy, np. na str. 76, sugeruje, że taka ocena była wykonana podczas badań: „*Stwierdzono również zgodność postaci drgań*." i jest elementem proponowanej metodyki (schemat na rys. 5.). Taka ocena była by istotna zwłaszcza dla belek o wypełnieniu segmentowym, których kształty postaci mogą się różnic od postaci dla belki całkowicie pustej w środku lub wypełnionej w całości. Nie wykonano także identyfikacji i porównania współczynników tłumienia.
7. Testy modalne wykonywane były z użyciem akcelerometrów, a prezentowane wyniki wyrażone są w [mm/N]. W jaki sposób przyśpieszenia były przeliczane na przemieszczenia?

Uwagi szczegółowe

Bibliografia: Sposób opisu pozycji literaturowych w bibliografii nie jest w pełni spójny. M.in. w niektórych pozycjach podane jest pełnie imię autora, a w innych – tylko inicjał. W pozycji [100] nazwiska i imiona autorów zapisane są wielkimi literami. W pozycji [84] opis bibliograficzny jest prawdopodobnie niepełny.

Ta sama pozycja literaturowa z bibliografii czasem przywoływana jest w tekście pracy na różne sposoby, np. Dunaj i in. 2019 lub Dunaj, Okulik i in. 2019. Co więcej, w bibliografii jest także pozycja Dunaj, Chodźko 2019, więc nie ma pewności, o którą pracę chodzi gdy przywoływana jest pozycja Dunaj 2019. Również przywołanie Dunaj i in. 2020 nie wskazuje jednoznacznie, o którą pozycję z bibliografii chodzi.

Str. 9, drugi akapit od dołu, pierwsze zdanie. W zdaniu prawdopodobnie brakuje fragmentu, co czyni je niegramatycznym i trudnym do zrozumienia.

Str. 12, trzeci akapit od góry. Uwaga jak wyżej.

Str. 49, wzory (5.108) i (5.109). Opis oznaczeń we wzorach jest niezrozumiały lub oznaczenia są błędnie opisane lub nastąpiła dodatkowa, nieopisana zamiana oznaczeń przy przekształceniach (jeśli przyjąć, że wzór 109 jest poprawny).

Str. 14, drugi akapit od góry. Przywołanie publikacji z 2001 r. jako potwierdzenia stwierdzenia „*w ostatnich latach* […]" jest mało przekonujące. Wskazane było by przywołanie bardziej aktualnej pozycji.

Str. 71. Rysunki w tabeli 9 są bardzo małe i przez to mało czytelne. Ponadto, szary kolor wykresu postaci drgań dla modelu rzeczywistego dodatkowo utrudnia dojrzenie szczegółów rysunku. W opisie rysunków brakuje przy tym jawnej informacji, który z wykresów to postacie modelu rzeczywistego. Można się co najwyżej domyślać z opisu w tekście i jego kontekstu, że są one pokazane na obu rysunkach jako szare.

Str. 69, rys 26. Brak jest opisu osi rysunku lub szerszego opisu słownego jego zawartości co powoduje, że nie wiadomo co właściwie merytorycznie przedstawia rysunek i czego dotyczy

walidacja z użyciem MAC. Nie wiadomo, której z belek (o jakim przekroju) dotyczy walidacja ani jakie modele / wyniki są walidowane.

Rozdział 8, opisy tabel i rysunków. Opisy tabel i rysunków w tym rozdziale nie podają wszystkich istotnych informacji, które pozwalałyby szybko i jednoznacznie zidentyfikować czego (m.in. jakiego profilu i w jakiej konfiguracji) dotyczą. Informacji te częściowo są zawarte w opisie w treści pracy lub można się ich domyślić z kontekstu, ale było by znacznie łatwiej porównywać i analizować wyniki, gdyby opisy były pełniejsze.

3. Ocena pracy pod względem redakcyjnym

Układ treści pracy jest prawidłowy i logiczny, typowy dla pracy doktorskiej. Tytuły rozdziałów i podrozdziałów są zrozumiałe i odpowiadają ich zawartości. Podział treści na podrozdziały jest również czytelny i prawidłowy. Materiał ilustracyjny dobrano właściwie do treści poszczególnych fragmentów tekstu. Język pracy jest poprawny i zrozumiały, aczkolwiek w treści zauważa się drobne niedociągnięcia interpunkcyjne oraz sporadyczne błędy w postaci brakujących fragmentów zdań (prawdopodobnie przeoczonych przy kolejnych etapach edycji tekstu).

Od strony graficznej praca przygotowana jest starannie i czytelnie. Zamieszczone rysunki i zdjęcia są również czytelne (z jednym wyjątkiem, wskazanym w uwagach). Opisy rysunków mogłyby być jednak nieco szersze, tak by nie trzeba było przy porównywaniu wyników poszukiwać w samej treści pracy lub domyślać się, co dany rysunek prezentuje.

Ogólny poziom redakcyjny prac należy ocenić bardzo dobrze.

4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że oceniana praca Pani mgr. inż. Beaty Niesterowicz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Zamieszczone uwagi mają charakter dyskusyjny i nie pomniejszają pozytywnej oceny wartości merytorycznej rozprawy. Praca stanowi, w myśl art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. z dnia 21.06.2016r. poz. 882) oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jak również – dokumentuje wiedzę teoretyczną kandydatki oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez nią pracy naukowej.

Wnioskuję o dopuszczenie pracy jako rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

Z wyrazami szacunku

dr hab. inż. Marek Galewski, prof. Uczelni