

Lublin, 30-11-2023 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Teter
Katedra Mechaniki Stosowanej,
Wydział Mechaniczny,
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin



**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
MGR INŻ. ALEKSANDRY MAGDALENY PAWLAK**

zatytułowanej:

Badania cienkościennych słupów ceowych o niestandardowych przekrojach poprzecznych

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Piotr Paczos, prof. PP

Promotor pomocniczy rozprawy: dr Marcin Rodak

*Podstawą do opracowania niniejszej oceny stanowi: Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Poznańskiej z dnia 02 listopada 2023 roku, nr 7/III/11/2023.*

1. INFORMACJE OGÓLNE

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Magdaleny Pawlak została napisana w języku polskim na 125 stronach i składa się z: ośmiu rozdziałów stanowiących zasadniczą część merytoryczną rozprawy, spisu literatury liczącego 129 pozycji, streszczenia rozprawy w języku polskim oraz angielskim, oraz spisu symboli. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Piotr Paczos, prof. PP, a promotorem pomocniczym: dr Marcin Rodak.

2. TREŚĆ ROZPRAWY, SFORMUŁOWANIE I ROZWIĄZANIE PROBLEMU NAUKOWEGO

Na wstępie Autorka umieszcza streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim i angielskim oraz definiuje cel i zakres pracy. Stawia tezę badawczą, że modyfikując kształt przekroju poprzecznego ściskanych słupów ceowych poprzez dodanie wzmocnień lokalnych można zmienić ich zachowanie w stanach: krytycznym, zakrytycznym oraz granicznym. Po czym zestawia spis używanych w rozprawie symboli.

A.K

W pierwszym rozdziale rozprawy doktorskiej Autorka na bazie przeprowadzonego przeglądu literatury obejmującego zagadnienia utraty stateczności i nośności granicznej struktur cienkościennych wykazała, że brakuje badań nad statecznością ściskanych struktur płytowych o złożonych przekrojach poprzecznych wykonanych z materiałów izotropowych. Deklaruje, że w omawianej rozprawie doktorskiej w przypadku zaproponowanych rozwiązań opiszę zachowanie struktur w pełnym zakresie obciążeń prowadząc badania: analityczne, numeryczne oraz eksperymentalne uwzględniając interakcję postaci własnych.

W rozdziale drugim definiuje objekty badań. Są to krótkie, stalowe ceowniki cienkościenne posiadające wzmocnienia na ramionach i środku. Wyodrębnia do badań 7 przypadków o identycznych wymiarach różniących się wzmocnieniami. W kolejnym rozdziale szczegółowo opisuje metody analityczne oraz obowiązujące normy: europejską EC3 oraz amerykańską ANSI/AISC 360-16. Zestawia rozwiązania analityczne wartości obciążeń własnych oddzielnie dla postaci globalnej, lokalnej i dystorsyjnej.

W rozdziale czwartym opisuje stanowisko do badań eksperymentalnych, zastosowane metody badawcze oraz otrzymane wyniki. Badania eksperymentalne prowadzi z zastosowaniem tensometrii oporowej oraz systemu do cyfrowej korelacji obrazu. Wyznacza właściwości mechaniczne zastosowanych materiałów w statycznej próbie rozciągania badając standardowe próbki oraz naroża. Omawia najniższe obciążenia własne, postaci własne oraz nośność graniczną określone obiema metodami eksperymentalnymi. Do wyznaczenia najniższych obciążeń własnych stosuje: metodę przecięć na wykresie obciążenie-odkształcenie, metodę stycznej oraz metodę Koitera.

W rozdziale piątym Autorka przedstawia modelowanie metodą elementów skończonych, wyniki symulacji numerycznych MES oraz metodą pasm skończonych.

W kolejnym rozdziale zestawia wyniki uzyskane wszystkimi metodami opisujące stany: krytyczny, zakrytyczny oraz graniczny dla wszystkich analizowanych słupów cienkościennych. Na koniec syntetycznie przedstawia wnioski i wskazuje dalsze kierunki badań.

3. OCENA WARTOŚCI NAUKOWEJ PRZEDŁOŻONEJ ROZPRAWY

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Magdaleny Pawlak zatytułowana: „*Badania cienkościennych słupów ceowych o niestandardowych przekrojach poprzecznych*” **według mojej wiedzy, stanowi oryginalne opracowanie Autorki oraz zawiera wszystkie niezbędne elementy pracy naukowej oraz zawiera elementy nowości.** Autorka na bazie omawianej literatury postawiła jasno problem, uzasadniła konieczność



prorowadzonych badań eksperymentalno-numerycznych oraz zaproponowała sposób jego rozwiązania. **Posiada więc umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Do najważniejszych osiągnięć Autorki zaliczam:

- 1) porównanie różnych metod analitycznych oraz numerycznych pozwalających opisać zachowanie ściskanych, płytowych struktur cienkościennych o złożonym przekroju poprzecznym;
- 2) opracowanie autorskich testów eksperymentalnych pozwalających oszacować najniższe obciążenia własne oraz nośność ściskanych struktur cienkościennych tego typu.

Przedstawione rozwiązania oraz uzyskane wyniki stanowią wkład Autorki w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna. Oryginalność przedstawionych w rozprawie doktorskiej wyników i rozwiązań potwierdzają opublikowane przez mgr inż. Aleksandrę Magdalenę Pawlak artykuły w wysokopunktowanych czasopismach: *Metals* (1 artykuł – 70 pkt. MEiN 2023 r.), *Engineering Structures* (1 artykuł – 140 pkt. MEiN 2023 r.), *Materials* (1 artykuł – 140 pkt. MEiN 2023 r.). Ogółem w bazie Scopus znajduje się 3 artykuły cytowane 10 razy, indeks-H wynosi 3 (stan z dn. 22-11-2023 roku). W badaniach bibliograficznych stosowano numer ORCID 0000-0001-9389-0708. Należy podkreślić, że są to artykuły z okresu: 2021-2022.

Mgr inż. Aleksandra Magdalena Pawlak posiada pogłębioną wiedzę teoretyczną oraz praktyczną w zakresie stateczności cienkościennych struktur, metody elementów skończonych oraz metod eksperymentalnych.

Można stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Magdaleny Pawlak spełnia wszystkie warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (t.j. Dz.U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4. UWAGI KRYTYCZNE, PYTANIA MERYTORYCZNE ORAZ DYSKUSYJNE

Przy pozytywnej ocenie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej nasuwają się następujące wątpliwości, pytania oraz uwagi krytyczne:

- 1) w tytule rozprawy zabrakło informacji czy są to długie, czy krótkie słupy? Dodatkowo warto dookreślić stan obciążenia. Moim zdaniem doprecyzowałoby to problem, jaki podjęła Autorka w rozprawie. W przedstawionej wersji tytuł sugeruje bardzo szeroki zakres omawianej rozprawy. Z jednej strony długość słupów jest kluczowym

A.M. 3

parametrem w przypadku utraty stateczności, bo możliwe są różne formy utraty stateczności i interakcje pomiędzy nimi. Z drugiej strony możliwe są różne scenariusze zniszczenia zależnie od sposobu obciążenia. W rozprawie na str. 21 dowiadujemy się jakie są wymiary geometryczne omawianych słupów, a na str. 9 jak były obciążenia. **Podsumowując Autorka prowadzi badania krótkich, płytowych cienkościennych słupów podanych ścisaniu, które narażone są na lokalną/dystorsyjną utratę stateczności, a ich zniszczenie następuje w punkcie granicznym.** W wybranych przypadkach jest możliwa wtórna bifurkacja.

- 2) W celu pracy (str. 9) czytamy: „*Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zbadanie wpływu modyfikacji kształtu przekrojów poprzecznych ścisanych słupów ceowych na ich wytrzymałość, stateczność oraz nośność graniczną*”. Dalej w części rozprawy str. 42 czytamy: „*...Przeprowadzenie obliczeń, które związane są tylko z wytrzymałością tego typu konstrukcji jest niewystarczające i niemiarodajne*”. Co Autorka ma na myśli pisząc **wytrzymałość** struktur tego typu? Moim zdaniem, zniszczenie ścisanych struktur cienkościennych nastąpi poprzez utratę sztywności, zaś nośność określona jest przez punkt graniczny (wtórną bifurkację) na zakrytycznej ścieżce równowagi. Z warunku wytrzymałościowego można przyjąć w pełnym uplastycznieniu: przypadki B1-B3 – powierzchnia przekroju ok. 100mm², granica plastyczności ok. 330MPa, czyli nośność wynosi ok. 33kN. Pozostałe przypadki B4-B7 – powierzchnia przekroju ok. 160mm², granica plastyczności ok. 330MPa, czyli nośność wynosi ok. 54kN. Najniższe obciążenie własne nie przekracza: 13kN (słupy B1-B3) oraz 22kN (B4-B7). Obciążenia w stanie granicznym (wtórne bifurkacje) nie przekraczają: 15kN (słupy B1-B3) oraz 24kN (B4-B7). **Podsumowując, celem omawianej rozprawy jest opis wpływu modyfikacji ścianek słupa na stateczność lokalną/dystorsyjną oraz wyznaczenie nośności w punkcie granicznym lub wtórnej bifurkacji na zakrytycznej ścieżce równowagi.**
- 3) Po co Autorka powtarza cele pracy na str.5, 9, 53, 59, 101? Dodatkowo zmienia je. Cele ze str. 5 nie są tożsame celom ze str. 9. Za cel nie może przyjąć: „*...zestawienie wyników w postaci tabel i wykresów*”.
- 4) Wyjaśnienia wymaga na czym polega różnica pomiędzy: „*siłą krytyczną*”, a „*siłą wyboczeniową*” i jak mają się te siły do obciążeń własnych?
- 5) W rozprawie przegląd literatury jest rozproszony w całej jej objętości. Autorka powinna zebrać wszystkie prace w jednym rozdziale i zależnie od tematyki pogrupować w podrozdziałach.



- 6) Po co Autorka powtarza rysunki np. 2.1 oraz 2.2 str. 20-21? W pracy i na tych rysunkach zabrakło podkreślenia, że przekroje posiadają jedną oś symetrii. Tabela 3.3 str. 35 znając symetrię przekroju, po co podawać wartości: odśrodkowych momentów bezwładności, czy ekstremalnych momentów bezwładności?
- 7) W teorii stateczności przyjętą się w języku polskim podział postaci własnych na: postacie globalne, lokalne oraz dodatkowo wyodrębniono postacie dystorsyjne, czy zwichrzenie. Oczywiście postacie globalne i lokalne dalej możemy dzielić na szczególne przypadki. Autorka rozprawy (np. str. 42) stosuje inny podział postaci własnych: „*wyboczenie ogólne, miejscowe oraz dystorsyjne*”, czy wynika to z tłumaczenia pojęć angielskich?
- 8) W tabeli 3.6 str. 50 Autorka rozprawy zestawia wartości własne do wybranych postaci będące wynikiem rozważań analitycznych. Ze wzorów: (84) str. 44 oraz (102) str. 46 wprost wynika, że wartości własne odpowiadające postaciom globalnym/dystorsyjnym zależą od wysokości słupa. Dla jakich wysokości słupa podano te wartości? Z drugiej strony w jakim celu je podano? Przy założonych wymiarach słupa moim zdaniem możliwe są tylko postacie lokalne/dystorsyjne, co potwierdza Autorka rozprawy w części pracy poświęconej symulacjom numerycznym.
- 9) Na str. 51 Autorka omawia warunki brzegowe realizowane w badaniach eksperymentalnych: „*Górna przekładka, do której przykładana była siła ściskająca zablokowała dwie translacje: względem osi y i względem osi z . Przesuw względem osi x był umożliwiony. Zablokowane zostały także trzy obroty, względem wszystkich osi. Natomiast dolna przekładka zablokowała trzy translacje oraz trzy obroty*”. Na rys. 4.1 str. 51 na schemacie stanowiska zaznacza, że podkładki są podparte na walcach lub kulach, a to oznacza, że możliwa jest co najmniej jedna rotacja. Moim zdaniem podparcie pokazane na tym rysunku jest poprawne w przypadku wyboczenia globalnego. Z kolei warunki brzegowe opisane w tekście są poprawne w przypadku wyboczenia lokalnego/dystorsyjnego. **Powstaje więc wątpliwość jakie warunki zrealizowano w badaniach eksperymentalnych? Dodatkowo warunki te należy sprecyzować w badaniach numerycznych.**
- 10) Do oszacowania obciążeń własnych w badaniach tensometrycznych Autorka zastosowała kilka metod. Na wstępie pokazała zależność obciążeń ściskających w funkcji średniego odkształcenia (rys. 4.6 str. 61). Na str. 60-61, czytamy: „*Odkształcenie średnie określono jako średnią arytmetyczną z odkształceń zarejestrowanych przez tensometr znajdujący się na półce oraz przez tensometr znajdujący się na środku*”. Dodatkowo położenie tensometrów pokazano na rys. 4.1

str. 52. W przypadku omawianych słupów, jak wcześniej pisałem, najniższe obciążenia własne opowiadają wyboczeniu lokalnemu/dystorsyjnemu. Skąd wiadomo, że w połowie słupa nie wystąpi linia węzłowa, a wskazania tensometrów nie będą 0? Z drugiej strony wiadomo, że dla dostatecznie długich słupów wartości własne odpowiadające wyboczeniu lokalnemu nie zależą od wysokości słupa, ale od szerokości ścian (wzór (119) str. 48). Można się spodziewać, że na ściankach będą różne postacie własne różniące się liczbą półfal i w tym kontekście co oznacza wartość średniego odkształcenia wyznaczona w omawiany sposób? **Moim zdaniem wymaga to dalszych badań i potwierdzenia poprawności metodyki badań.** Dodatkowo zastosowane metody określania najniższych wartości własnych są niezgodne z klasycznym podejściem, w którym tensometry są klejone parami w wybranych punktach środka i ramion po obu stronach ścian tworzących słup. W każdym punkcie oddzielnie określa się wartość odkształcenia średniego i z wybranych kryteriów wyznacza wartość obciążeń własnych. Szczegółowo omówienie tego problemu można znaleźć np. w monografii: Kołakowski Z., Kowal-Michalska K., (eds.): „*Statics, Dynamics and Stability of Structures, vol. 2, Statics, Dynamics and Stability of Structural Elements and Systems*”. Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Monografie, Łódź 2012 - Chapter 19: Rhodes J., Zaráś J.: *Determination of critical loads by experimental methods*, pp.477-499. **W rozprawie na znalazłem informacji jak liczne były serie badanych słupów B1-B7? Nie określono również rozrzutu uzyskanych wyników.**

5. OCENA REDAKCJI ROZPRAWY

Rozprawa doktorska jest przygotowana starannie, jej układ jest logiczny, a otrzymane wyniki są szczegółowo omówione w tekście i na rysunkach. Język jest poprawny, a edycja tekstu jest bardzo dobra.

Autorka nie ustrzegła się kilku błędów kompozycyjnych i językowych:

1. Przegląd literatury jest rozproszony w całej rozprawie. Autorka powinna zebrać wszystkie prace w jednym rozdziale i skoncentrować się na publikacjach wprost związanych z rozprawą.
2. Cele pracy są powtórzone w kilku miejscach pracy: str. 5, 9, 53, 59, 101. Dodatkowo Autorka rozprawy zmienia je, cele ze str. 5 nie są tożsame celom ze str. 9.



3. W zapisie równań i w tekście symbole powinny być zapisane kursywą. Autorka nie przestrzega tej zasady w rozprawie np. str. 10-14.
4. W rozprawie pojawiają się pojęcia niespotykane oraz niejednoznaczne w polskojęzycznej literaturze: np.: str. 9 „czyste ściskanie”, „siła krytyczna” versus „siła wyboczeniowa”, a obciążenie własne, str. 13 „belka”, czy słup, str. 57 „tensometry elektryczne”, str. 109 „...w ujęciu bezwartościowym”.
5. Na str. 12 i w pracy niejednoznacznie oznacza współczynnik Poissona.

Wyżej wskazane uwagi nie mają wpływu na wartość merytoryczną ocenianej rozprawy.

5. KONKLUZJA KOŃCOWA

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Magdaleny Pawlak zatytułowana: „*Badania cienkościennych słupów ceowych o niestandardowych przekrojach poprzecznych*” spełnia wszystkie warunki stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (t.j. Dz.U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) i na tej podstawie wnioskuję o przyjęcie rozprawy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Aleksandry Magdaleny Pawlak do publicznej obrony.

