

dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: piwicki@pg.edu.pl



Gdańsk, 31.08.2022

Recenzja **rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Sowińskiego** **pt. „Analysis and optimization of stress distribution** **in complex shell structures”**

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, dra hab. inż. Olafa Ciszaka prof. Politechniki Poznańskiej (pismo dnia 7 czerwca 2022), który w imieniu Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej, zwrócił się z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Sowińskiego pt. „Analysis and optimization of stress distribution in complex shell structures”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Paweł Jasion, natomiast promotorem pomocniczym dr inż. Dariusz Kurpisz.

2. Tematyka i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim, łącznie na 159 stronach formatu A4 i składa się z ośmiu numerowanych rozdziałów. Na początku znajdują się podziękowania, następnie deklaracja dotycząca publikacji stanowiących integralną część pracy i streszczenie w języku angielskim. Pracę uzupełniają: bibliografia (References), publikacje będące częścią pracy (The publications reprints), które zamieszczono w załącznikach (Appendix A1-A3), streszczenie w języku polskim (Extended Abstract in Polish) i oświadczenia współautora publikacji (Declarations). Rozprawa zawiera 177 wzorów, 64 rysunki, 23 tablice oraz 95 pozycji literatury w kolejności cytowań. Rysunki i tablice są numerowane w ramach rozdziałów.

Rozdział pierwszy (Introduction) obejmuje wstęp o objętości 7 stron zawierający wprowadzenie do tematyki badawczej. Opisano w nim na podstawie literatury badane zagadnienia i omówiono znaczenie podjętej tematyki. Zaprezentowano przedmiot, cel i zakres rozprawy oraz sformułowano tezy pracy:

- Analityczne, teoretyczne rozwiązania problemów związanych z naprężeniami i odkształceniami w konstrukcjach powłokowych mogą prowadzić do niedokładnych wyników.
- Rozkład naprężeń w znormalizowanych dennicach ciśnieniowych zbiorników walcowych jest niekorzystny.

Ponadto postawione zostały dwie hipotezy:

- Zastosowanie metody Ritza do rozwiązywania problemów naprężeń i deformacji powłok może prowadzić do otrzymywania wyników o większej dokładności niż w przypadku rozwiązań analitycznych.
- Optymalizacja kształtu dennicy walcowego zbiornika ciśnieniowego może doprowadzić do znaczącej poprawy rozkładu naprężeń przy zachowaniu znormalizowanych wymiarów.

W **rozdziale drugim** (Linear theory of shells) na 4 stronach przedstawiono, korzystając z literatury, podstawy teorii powłok osiowo-symetrycznych dla materiału sprężystego i ortotropowego.

W **rozdziale trzecim** (Analytical study), liczącym 42 strony, omówiono bezmomentową teorię powłok (membrane theory - MT) oraz teorię zaburzeń brzegowych powłok (edge effect theory - EET). Analizy teoretyczne zilustrowano przykładami, w których wyznaczono naprężenia oraz deformacje ciśnieniowych zbiorników walcowych ze znormalizowanymi dennicami elipsoidalnymi i toroidalno-sferycznymi. Otrzymane wyniki analiz teoretycznych porównano z obliczeniami za pomocą metody elementów skończonych (MES). Wykazano, że rozwiązania teoretyczne mogą prowadzić do otrzymania niezadowolających wyników w związku z zakładanymi uproszczeniami oraz pominięciem wpływu obciążeń powierzchniowych w zjawiskach zgięciowych.

Rozdział czwarty (Ritz method application) (1 strona) zawiera skrótowy opis metody Ritza (RM) do badań naprężeń i odkształceń w zbiornikach ciśnieniowych przy założeniu ortotropowego modelu materiału. Funkcje opisujące przemieszczenia przyjmują postać wielomianów, szeregów trygonometrycznych oraz deformacji otrzymywanych w teorii zaburzeń brzegowych. Rezultaty analiz pokazują, że zgodność wyników z metodą elementów skończonych jest otrzymywana dla relatywnie dużego zakresu grubości powłok, co potwierdzają niemal identyczne wartości naprężeń i przemieszczeń. Więcej na temat zastosowania metody Ritza podano w pracy przedstawionej w załączniku A1, która jest integralną częścią rozprawy.

Rozdział piąty zatytułowany „Diminishing of the edge effect” (1 strona) zawiera opis badań mających na celu redukcję naprężeń na styku części cylindrycznych z dennicą zbiornika. Problem został szczegółowo opisany w pracy zamieszczonej w dodatku A2. Po przeprowadzeniu badań analitycznych (MT i EET) oraz półanalitycznych (RM) stwierdzono, że równoważny rozkład naprężeń von Misesa w znormalizowanych wypukłych cylindrycznych zbiornikach ciśnieniowych jest niekorzystny. Zdefiniowane zostały pewne warunki geometryczne celem zmniejszenia intensywności efektu brzegowego. Założono, że południki analizowanych powłok obrotowych miały postać trzech krzywych analitycznych tj. owalu Cassiniego i Bootha oraz uogólnionych postaci klotoidy. Stan naprężenia był badany analitycznie i numerycznie przy użyciu metody elementów skończonych za pomocą programu Ansys. Uzyskano poprawę rozkładu naprężeń w obszarze połączenia powłok, ale doszło do wzrostu naprężeń poza tym miejscem, co było przyczyną prowadzenia dalszych badań.

Rozdział szósty (Shape optimization of dished ends) (1 strona) zawiera opis metod i wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych związanych z optymalizacją powłok, która była wykonana w dwóch oddzielnych procesach. Początkowo funkcja celu była wyznaczana przy odwołaniu do teorii bezmomentowej powłok, a optymalizacja prowadzona była z zastosowaniem deterministycznego algorytmu. Następnie optymalizacja była realizowana za pomocą algorytmu genetycznego z wykorzystaniem programu bazującego na metodzie elementów skończonych MES. Otrzymano poprawę rozkładu naprężeń dennic przy zachowaniu znormalizowanych wymiarów ogólnych. Szczegółowy opis sformułowania problemu i jego wynik został opisany w ramach pracy, zamieszczonej w dodatku A3.

Rozdział siódmy zatytułowany „Experimental studies and numerical verification” (32 strony) zawiera opis przeprowadzonych badań doświadczalnych, które wykonano dla modelu opracowanego w poprzednich rozdziałach po jego optymalizacji. Najpierw zbadano próbki materiału z uwzględnieniem ortotropowości i dwóch metod wytwarzania Selective Laser Sintering (SLS) i Multi Jet Fusion (MJF). Badany zbiornik ciśnieniowy został wykonany za pomocą technologii wytwarzania przyrostowego Multi Jet Fusion. Celem weryfikacji dokładności wykonania konstrukcji przeprowadzono pomiary imperfekcji geometrycznych za pomocą skanera optycznego. Zmierzoną geometrię zaimplementowano do modeli numerycznych metodą elementów skończonych. Wytworzony zbiornik zbadano na zaprojektowanym stanowisku laboratoryjnym pozwalającym na obciążenie go wewnętrznym ciśnieniem. Za pomocą tensometrów pomierzono rzeczywisty rozkład odkształceń oraz naprężeń zbiornika. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń

za pomocą metody elementów skończonych. Osiągnięta została zadowalająca zgodność, potwierdzająca korzystną charakterystykę opracowanych kształtów dennic.

Rozdział ósmy (4 strony) zawiera podsumowanie pracy i prowadzonych badań, a także ocenę uzyskanych wyników oraz wniosków. Przedstawiono również argumenty potwierdzające poprawność postawionych tez pracy doktorskiej.

W skład rozprawy doktorskiej wchodzi również trzy prace już opublikowane podane w załączniku:

A1. Sowiński K., *The Ritz method application for stress and deformation analyses of standard orthotropic pressure vessels*, *Thin-Walled Structures*, 2021;162,107585.

A2. Sowiński K., Magnucki, K., *Shaping of dished heads of the cylindrical pressure vessel for diminishing of the edge effect*, *Thin-Walled Structures*, 2018;131,746-754.

A3. Sowiński K., *Stress distribution optimization in dished ends of cylindrical pressure vessels*, *Thin-Walled Structures*, 2022;171,108808.

Warto podkreślić, że Doktorant jest autorem dwóch publikacji, a w trzeciej jego wkład autorski wynosi 70 %. Poza wymienionymi pracami mgr inż. Krzysztof Sowiński dwukrotnie publikował w czasopismach indeksowanych na Web of Science, takich jak *Thin-Walled Structures* lub *Engineering Structures*. Ponadto w bazie publikacji naukowych Politechniki Poznańskiej (baza System Informacji Naukowej <https://sin.put.poznan.pl/>) wykazano dwa raporty z badań doświadczalnych, w których mgr inż. Krzysztof Sowiński jest współautorem.

3. Ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma istotny aspekt aplikacyjny i poznawczy. Zagadnienia problemów rozkładu naprężeń w złożonych konstrukcjach powłokowych mają znaczenie praktyczne, a wyniki analiz mogą być stosowane w przemyśle. Badane zagadnienia dotyczą walcowych zbiorników ciśnieniowych, ale metody badawcze są na tyle uniwersalne, że mogą być wykorzystane do analiz innych konstrukcji powłokowych.

Docenić należy to, że postawiony problem badawczy został rozwiązany za pomocą różnych metod, takich jak: analizy teoretyczne, analizy numeryczne MES oraz optymalizacja konstrukcji. W rozprawie bardzo ważne są również badania doświadczalne, które pozwoliły na weryfikację analiz teoretycznych i numerycznych.

Należy podkreślić, że postawiona teza oraz hipotezy badawcze wymagały dokładnej analizy literatury problemu i aktualnego stanu wiedzy. Znaczenie badanej problematyki jest tym większe, że obecnie normowe rozwiązania w zakresie zbiorników ciśnieniowych

charakteryzują się niekorzystnym rozkładem naprężeń w strefie połączenia części walcowej z dennicą. Udowodnienie postawionej tezy wymagało od Doktoranta znajomości teorii powłok, a szczególnie zakładanych uproszczeń, z których wynikają ograniczenia teorii. Rozwiązania teoretyczne różnią się od obliczonych za pomocą metody elementów skończonych, szczególnie przy analizowaniu powłok o większej grubości. Wynika to z założeń teorii oraz pominięcia wpływu obciążeń powierzchniowych w zjawiskach zgięciowych.

Mgr inż. Sowiński wykazał się również wiedzą w zakresie teorii konstrukcji, rozwiązując postawiony problem metodą Ritza, w której funkcje opisujące przemieszczenia miały postać wielomianów, szeregów trygonometrycznych oraz deformacji otrzymywanych w teorii zaburzeń brzegowych. Rezultaty tych analiz pokazały, że uzyskano lepszą zgodność wyników z metodą elementów skończonych niż w rozwiązaniach teoretycznych dla relatywnie dużego zakresu grubości powłok. Dzięki zaproponowanej metodzie możliwe było poszukiwanie kształtu powłoki w celu zmniejszenia intensywności efektu brzegowego. Uzyskaną poprawę rozkładu naprężeń w obszarze połączenia powłok Doktorant uznał za niewystarczającą, gdyż doszło do wzrostu naprężeń w innej części powłoki, co było motywacją do dalszych analiz problemu.

Mgr inż. Krzysztof Sowiński rozwiązał badany problem za pomocą metod optymalizacji kształtu konstrukcji na podstawie teorii bezmomentowej powłok oraz za pomocą metody elementów skończonych i algorytmu genetycznego. Ostatecznie opracowana została nowa geometria dennicy zbiornika, która charakteryzuje się korzystniejszym rozkładem naprężeń. W normowych rozwiązaniach naprężenia w dennicach były od 71% do 174% większe niż w części cylindrycznej, a w rozwiązaniach zaproponowanych przez Doktoranta wzrost wynosił około 20%.

Rozwiązanie badanego problemu było możliwe dzięki umiejętności prowadzenia analiz numerycznych i znajomości zaawansowanych programów do analiz numerycznych MES.

Oceniana praca świadczy również o tym, mgr inż. Sowiński umiejętnie prowadzi badania doświadczalne i potrafi zastosować nowoczesne technologie produkcyjne. Doktorant przeanalizował dwa sposoby wykonania próbek do testów doświadczalnych: w technologii wytwarzania przyrostowego Multi Jet Fusion (MJF) i Selective Laser Sintering (SLS). O umiejętności prowadzenia badań świadczy również zastosowanie skanera optycznego do pomiaru imperfekcji geometrycznych i implementacja uzyskanych wyników do programu komputerowego ANSYS.

Postawiona teza dotycząca niedokładności teoretycznych rozwiązań problemów związanych z naprężeniami i odkształceniami w konstrukcjach powłokowych, jak

i niekorzystnego rozkładu naprężeń w znormalizowanych dennicach ciśnieniowych zbiorników została udowodniona. Hipoteza dotycząca poprawy dokładności obliczeń naprężeń i deformacji powłok w stosunku do rozwiązań analitycznych dzięki zastosowaniu metody Ritza została zweryfikowana. Przeprowadzone badania numeryczne i eksperymentalne potwierdziły korzystny rozkład naprężeń uzyskany w badaniach optymalizacji kształtu.

Swoje zastrzeżenia i komentarze do pracy Recenzent przedstawia w poniższym wykazie uwag, pytań i wątpliwości:

- Autor prezentuje wyniki analiz teoretycznych, wskazując na mankamenty podejścia normowego i niekorzystny rozkład naprężeń w znormalizowanych dennicach ciśnieniowych zbiorników. W wielu zagadnieniach projektowych stosowane są wytyczne na podstawie analiz teoretycznych lub numerycznych. Czy po analizie norm^{1,2,3} i po przeprowadzonych badaniach Doktorant mógłby zaproponować zalecenia do projektowania zbiorników ciśnieniowych bez potrzeby przeprowadzania skomplikowanych analiz numerycznych lub teoretycznych?
- W zagadnieniu optymalizacji poszukiwano kształtu powłoki w celu ograniczenia naprężeń w dennicy w stosunku do części walcowej. Jak zmieniała się masa konstrukcji uznanej za optymalną w stosunku do konstrukcji normowej? We wnioskach z artykułu A3 podano komentarz ogólny dotyczący masy optymalnej konstrukcji, ale brakuje informacji czy korzystniejszy rozkład naprężeń wiąże się z zwiększeniem masy powłoki?
- W pracy przyjęto, że ważnym narzędziem badawczym jest metoda elementów skończonych. Można stwierdzić, że proponowany optymalny kształt powłoki został zweryfikowany za pomocą analiz MES. Do celów projektowych konstrukcji, w których nie wykonuje się badań próbnych powinno się założyć najbardziej niekorzystne imperfekcje, tak aby zapewnić bezpieczne rozwiązanie. Wymagania stawiane przy projektowaniu za pomocą analiz MES można znaleźć w normach^{4,5}. Jakie są wnioski Doktoranta dotyczące projektowania zbiorników ciśnieniowych w zakresie zakładanych

¹ EN 13445-3:2002 Unfired pressure vessels – Part 3: Design, European Committee for Standardization

² ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 2015.

³ ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, American Society of Mechanical Engineers, 2015.

⁴ Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-14: Design assisted by finite element analysis.

⁵ EN 1993-1-6 (2007) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures

modeli materiału, typu analiz statycznych, modelowania warunków brzegowych, zakładanych imperfekcji w analizach nieliniowych?

- Mając model MES, można określić, jakie są mechanizmy zniszczenia zbiornika ciśnieniowego i obciążenia graniczne. Od projektanta wymaga się wykazania określonego marginesu bezpieczeństwa w stosunku do obciążeń projektowych⁶. Jakie zalecenia w tym zakresie wynikają z przeprowadzonych analiz? Jaki jest zapas bezpieczeństwa w nośności zbiornika ciśnieniowego?
- W badaniach doświadczalnych próbek materiału i badaniach zbiornika ciśnieniowego (pkt. 7.2.2.) uzyskano różne własności ortotropowe materiału, ostatecznie przyjmując do dalszych badań materiał „prawie izotropowy”. Uznano, że było to związane z dużo większą prędkością odkształcania w badaniu tensometrycznym. Czy nie można było powtórzyć badań próbek w celu wyjaśnienia różnic we właściwościach ortotropowych?
- Czy przeprowadzono analizy dla innych typów materiału o właściwościach ortotropowych? W przypadku konstrukcji silosów z blachy falistej z pionowymi słupami wzdłuż obwodu przy małym rozstawie słupów do projektowania stosuje się wzory uwzględniające własności ortotropowe powłoki. Jaki wpływ na optymalną geometrię zbiornika ma ortotropowy model materiału?
- W rzeczywistych konstrukcjach zbiorników występują zarówno naprężenia pospawalnicze jak i imperfekcje geometryczne związane z procesem spawania. W pracy brakuje dokładniejszego opisu procesu wytwarzania elementów do badań. Czy w fazie przygotowania próbek zbiornika ciśnieniowego do badań doświadczalnych za pomocą metody MJF mogły powstać naprężenia własne?
- Jako jedną z przyczyn różnic w obliczeniach teoretycznych i analizach MES wymieniono powierzchnię przykładania obciążenia. Czy badano również modele powłokowe, w których obciążenie można przykładać do powierzchni środkowej? Czy zdaniem Doktoranta można korzystać z modeli powłokowych, czy też powinno się modelować zbiorniki ciśnieniowe za pomocą elementów bryłowych?
- Brak jednostek naprężeń na mapach z wynikami MES.

Zaprezentowane w pracy metody badawcze, które łączą analizy teoretyczne z obliczeniami numerycznymi i testami eksperymentalnymi są prawidłowe i pozwalają na analizę problemu w wielu aspektach, a zgodność wyników uzyskanych różnymi metodami potwierdza poprawność

⁶ Mackenzie D., Camilleri D., Hamilton R., Design by analysis of ductile failure and buckling in torispherical pressure vessel heads, *Thin-Walled Structures* 46 (2008) 963–974

przeprowadzonych badań. Zaproponowane metody badawcze są uniwersalne i mogą posłużyć do analiz innych zagadnień teorii powłok.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy konstrukcji powłokowych, a zastosowana metodologia może być zaadaptowana do innych zagadnień dotyczących projektowania powłok. Rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Sowińskiego zawiera istotne wartości poznawcze w zakresie analiz teoretycznych i numerycznych oraz badań doświadczalnych konstrukcji. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgra inż. Krzysztofa Sowińskiego do jej publicznej obrony.

Recenzowana rozprawa doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem i jakością przeprowadzonych badań, a uzyskane wyniki mają zastosowanie praktyczne. Ponadto rezultaty badań zostały już opublikowane w czasopismach z wysoką wartością współczynnika oddziaływania IF oraz punktacji MEiN (IF= 5.881 i pkt MEiN=140, dwie prace autorskie, a w trzeciej udział autorski 70%). Wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Sowińskiego, zgodnie z Regulaminem obowiązującym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej.



dr hab. inż. Piotr Iwicki, prof. uczelni