

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB

Białystok, 31 stycznia 2023 r.

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351

Email: d.perkowski@pb.edu.pl, tel. +48 571 443 034

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Anny Litawskiej

„Dynamics of Thin Micro-Periodic Cylindrical Shells: an Extended Version of the Tolerance Modelling Technique”

wykonana pod opieką naukową:

Pani Promotor Prof. Barbary Tomczyk, PhD., DSc., Professor of Warsaw University of Life Sciences

1. Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej Prof. dr. hab. inż. Dariusza Gawina.

2. Opis zawartości pracy:

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy modelowania cienkich, liniowo-sprężyste kołowych powłok walcowych typu Kirchhoffa-Love'a o strukturze periodycznej mikro-niejednorodnej w jednym lub dwóch kierunkach. Doktorantka podjęła się tematyki trudnej, a jednocześnie bardzo aktualnej, o dużych możliwościach aplikacyjnych w zastosowaniach inżynierskich. Wykazując się dobrą znajomością literatury związanej z badaną problematyką sformułowała i rozwiązała szereg zagadnień początkowo-brzegowych opisujących zagadnienia dynamiki cienkich mikro-niejednorodnych powłok walcowych w ujęciu rozszerzonej wersji modelowania tolerancyjnego.

Mechaniczne lub termiczne zachowanie się mikro-niejednorodnych struktur periodycznych lub tolerancyjnie periodycznych (struktur o funkcjonalnej gradacji) są opisywane za pomocą



równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych z periodycznymi lub tolerancyjnie periodycznymi, silnie oscylującymi współczynnikami i często nieciągłymi funkcyjnymi. Dlatego nie można ich bezpośrednio zastosować do badań problemów inżynierskich. Aby uzyskać równania uśrednione z współczynnikami stałymi lub powoli zmiennymi, Doktorantka Anna Litawska zaproponowała i omówiła wiele różnych metod modelowania dla tego rodzaju struktur periodycznych.

Przez wyżej wymienione media o mikrostrukturze tolerancyjnie periodycznej rozumiemy media, które na poziomie mikroskopowym składają się z bardzo dużej liczby regularnie rozłożonych, oddzielonych małych elementów (komórek), idealnie połączonych ze sobą. Sąsiednie komórki mają prawie identyczne właściwości geometryczne i materialne, ale odległe elementy mogą być bardzo różne. Na poziomie makroskopowym ta tolerancyjnie periodyczna mikrostruktura oznacza makroskopowo niejednorodną strukturę, ale z ciągłymi i powolnymi zmianami średnich właściwości. Oznacza to, że na poziomie makro te tolerancyjnie periodyczne ciała stałe mogą być traktowane jako wykonane z materiału o funkcjonalnej gradacji (FGM). Takie zagadnienia związane są z opisem ośrodków niejednorodnych a ich rozwiązanie przy użyciu metod analitycznych sprowadza się w przypadku ośrodka o funkcjonalnej gradacji właściwości do równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych o zmiennych współczynnikach. Uzyskanie rozwiązań w postaci zamkniętej jest możliwe dla wybranych funkcji opisujących zmianę właściwości termicznych oraz mechanicznych w funkcji odległości od brzegu (np. rozkład wykładniczy lub potęgowy). Mgr Anna Litawska zajęła się w pracy analitycznym modelowaniem zagadnień dynamiki walcowych powłok mikro-periodycznych i badaniem wpływu wielkości komórki (tj. charakterystycznego wymiaru liniowego elementu reprezentatywnego) na makroskopowe i mikroskopowe zachowania rozpatrywanych powłok. Wpływ ten nazywany jest efektem skali. Określony cel pracy oraz jej zakres w ocenie recenzenta jest jak najbardziej prawidłowy i zasadny.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi opracowanie zawierające 294 stron, zaś zasadnicza część pracy zawarta jest na 236 stronach, pozostałe strony stanowią bibliografia oraz załączniki. Praca podzielona jest na 9 rozdziałów. Doktorantka rozpoczęła pracę od omówienia aktualności badanych zagadnień, ich możliwości aplikacyjnych.

Rozdział pierwszy „Introduction” zawiera wprowadzenie do problematyki analitycznego modelowania zagadnień dynamiki dla periodycznych powłok z uwzględnieniem efektu skali (the length-scale effect). Badania przedstawione w pracy bazują na dobrze znanych równaniach

Palczowski

Kirchhoff-Love. Na wstępie Doktorantka przedstawiła przegląd literatury dotyczący rozwoju metod modelowania ośrodków niejednorodnych o strukturze mikro-periodycznej. Ponadto omówiła możliwości modelowania ośrodków o funkcjonalnej gradacji właściwości. Na podstawie którego sformułowała cele oraz tezy rozprawy doktorskiej. Głównymi celami rozprawy doktorskiej są:

- a) Pierwszym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest sformułowanie i omówienie m.in. uśrednionych modeli matematycznych do analizy wybranych problemów dynamicznych w rozważanych powłokach cylindrycznych;
- b) Drugim celem pracy jest zastosowanie ogólnej tolerancji i modeli asymptotycznych do oceny efektu skali długości w niektórych specjalnych problemach związanych z dynamiką (drzganiami swobodnymi) rozważanych mikro-niejednorodnych powłok;
- c) Trzecim celem jest zastosowanie ogólnych kombinowanych modeli asymptotyczno-tolerancyjnych do analizy efektu skali w pewnych specjalnych problemach mikrodynamiki rozważanych powłok.

Ponadto sformułowała następujące tezy badawcze:

- a) Ogólna tolerancja i spójne asymptotyczne modele problemów dynamicznych dla rozważanych powłok periodycznych mogą być z powodzeniem stosować do analizy makroskopowego zachowania się rozważanych powłok. Ponadto model tolerancji ogólnej pozwala na określenie i zbadanie niektórych zjawisk związanych z istnieniem efektu skali mikrostruktury, np. występowanie dodatkowych, zależnych od komórki drgań swobodnych wyższego rzędu częstotliwości.
- b) Zaproponowane ogólne kombinowane asymptotyczno-tolerancyjne modele problemów dynamicznych dla rozważanych powłok pozwala z powodzeniem badać zależne od komórki mikro-drgania periodycznych powłok niezależnie od ich niezależnych od budowy komórki makro-wibracji powłok. Ponadto, modele te pozwalają na analizowanie efektu skali w problemach propagacji fal, jak również w zjawiskach warstwy granicznej związanych z mikro-fluktuacjami.
- c) W ramach ogólnego kombinowanego modelu asymptotyczno-tolerancyjnego dla biperiodycznych powłok możemy badać zjawiska warstwy granicznej, gdzie termin "granica" odnosi się zarówno do czasu jak i przestrzeni, podczas gdy w ramach znanego standardowego połączonego modelu asymptotyczno-tolerancyjnego powłok biperiodycznych [142] możemy badać jedynie zjawiska warstwy czasowo-granicznej.

Poloski

- d) Ogólny, kombinowany model asymptotyczno-tolerancyjny powłok biperydycznych opisuje efekt skali nie tylko w niestacjonarnych, ale również w stacjonarnych problemach mikro-dynamicznych, podczas gdy znany standardowy kombinowany model asymptotyczno-tolerancyjny [142] pozwala na badanie efektu skali tylko w niestacjonarnych problemach mikro-dynamicznych.

Rozdział Doktorantka kończy krótkim omówieniem zawartości poszczególnych rozdziału oraz wyjaśnieniem podstawowych zapisów przyjętych w pracy.

Rozdział 2 zatytułowany „Overview of modelling techniques applied to periodic and tolerance-periodic structures” jest kontynuacją przeglądu literatury. Doktorantka przedstawia tutaj inne techniki modelowania ośrodków niejednorodnych w tym ośrodków o strukturze mikro-periodycznej oraz tolerancyjnie-periodycznej. Szczegółowo zostały omówione poszczególne modele z odwołaniem do najważniejszych prac. Pozwoliło to w krytyczny sposób sformułować dalsze problemy badawcze podjęte w pracy. Mianowicie Doktorantka skupiła się na matematycznym modelowaniu problemów dynamiki dla periodycznych mikro-niejednorodnych powłok cylindrycznych. Ponadto, zwróciła uwagę, iż wyniki analityczne w szczególnych przypadkach zostaną porównane z odpowiednimi analizami numerycznymi przy użyciu metody elementów skończonych w oprogramowaniu ABAQUS. Doktorantka wskazuje, iż to podejście do weryfikacji obliczeń przyjęła w oparciu o pracę Pawlus [105-107]. Powstaje jednak pytanie, czy istnieją inne techniki weryfikacji zaproponowanych modeli?

Kolejny Rozdział 3 zatytułowany „Concepts and assumptions of the extended tolerance and consistent asymptotic modelling techniques” zawiera podstawowe informacje niezbędne do zrozumienia koncepcji modelowania w oparciu o techniki asymptotyczne. Rozdział Doktorantka rozpoczyna od przedstawienia niezbędnych prac innych badaczy zajmujących się technikami modelowania asymptotycznego. Kolejne podrozdziały bardzo szczegółowo przedstawiają koncepcje modelowania w oparciu o rozszerzone modelowanie tolerancyjne oraz pokazano przyjęte założenia. Mianowicie technika modelowania tolerancyjnego prowadzi do modeli matematycznych o stałych lub ciągle wolno zmieniających się współczynnikach w zależności od wielkości mikrostruktury, tj. od wymiaru komórki podstawowej. Ponadto omówiono założenia, związane z koncepcją uśredniania tolerancyjnego, funkcji słabo wolno zmiennej i fluktuacji funkcji kształtu.

Rozdział czwarty zatytułowany jest „Formulation of the modelling problem”. W niniejszym rozdziale została zdefiniowana i przedstawiona geometria powłoki na przykładzie

Parkowski

jedno- i dwukierunkowych komórek periodycznych. W tym rozdziale przedstawiono również równania teorii Kirchhoffa-Lovego dla cienkich sprężystych powłok cylindrycznych, stanowiące punkt wyjścia do modelowania.

Piąty rozdział zatytułowany jest „Biperiodic shells - averaged models”. W tym rozdziale zostały przedstawione trzy uśrednione modele dla problemów dynamicznych dla cienkich biperiodycznie mikro-niejednorodnych powłok cylindrycznych:

- ogólny model tolerancyjny,
- spójny model asymptotyczny,
- ogólny połączony model asymptotyczno-tolerancyjny.

Doktorantka kończy rozdział porównaniem uzyskanego modelu ze znanym asymptotycznie-tolerancyjnym modelem. Wskazuj, iż zaproponowane podejście jako ogólny model kombinowany pozwala na badanie wpływu efektu skali długości w bardziej szczegółowy sposób.

Rozdział 6 jest kontynuacją rozważań podjętych w rozdziale 5 i dotyczy jednokierunkowo periodycznych powłok i przedstawia modele uśrednione przyjęte w pracy. Podobnie jak wcześniej Pani mgr Anna Litawska kończy rozdział krytycznym podsumowaniem.

Rozdział 7 oraz 8 stanowią omówienie szczególnych przypadków obliczeniowych. Wyniki zawarte w tych rozdziałach zostały uzyskane w oparciu o zaproponowane podejścia oraz przy użyciu standardowych metod numerycznych metody elementów skończonych. Rozważane tutaj były przypadki dynamiki powłok ze szczególnym uwzględnieniem możliwości analizy efektów skali przez zaproponowane modele. Kolejnym bardzo istotnym wnioskiem jest to, iż w przypadku *dynamiki powłok w ramach ogólnych i standardowych modeli tolerancyjnych, otrzymano wzory analityczne nie tylko na podstawowe tzn. niższe częstotliwości drgań własnych, ale również na nowe, dodatkowe, tzn. wyższe częstotliwości drgań własnych zależne od wielkości mikrostruktury. Wyższe częstotliwości umożliwiają analizę drgań wyższego rzędu oraz zjawiska dyspersji. Te nowe wyższe częstotliwości drgań nie mają swoich odpowiedników w analitycznych modelach asymptotycznych oraz w modelach numerycznych, opartych na przykład na metodzie elementów skończonych.* Ten wniosek jest szczególnie istotny z uwagi na możliwości zastosowania zaproponowanego podejścia do modelowania multi-skalowego.

Otrzymane rezultaty zaprezentowane niniejszej rozprawie doktorskiej zostały opublikowane we współautorstwie Tomczyk i Litawska [152-156] oraz Tomczyk, Gołąbczak M., Litawska,

Palas

strukturze periodycznie mikro-niejednorodnej, a także generują nowe kierunki badań i tym samym wywierają wpływ na rozwój tej dziedziny wiedzy.

Ponadto, zaproponowane podejście analityczne modele periodycznie mikro-niejednorodnych powłok walcowych mogą być wykorzystane do badań dynamiki powłokowych elementów konstrukcyjnych mostów i dachów, powłokowych elementów reaktorów, powłokowych elementów samolotów, okrętów, maszyn itd. Jest to szczególnie ważne z uwagi na stawiane coraz to wyższe wymagania materiałom oraz konstrukcjom inżynierskim.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji praca jest oryginalna i wartościowa, napisana zwięźle i przejrzysto, zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analiz zagadnień dynamiki stanowią istotny wkład do problematyki naukowej związanej z rozwojem metod modelowania ośrodków o strukturze uni- lub bi-periodycznej. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest bardzo wysoka. Rozprawa doktorska porusza ważne problemy i przedstawia oryginalne i wartościowe rezultaty. Opracowane nowe modele matematyczne podparte dobrą zgodnością z rozwiązaniami numerycznymi pozwalają twierdzić, iż zaproponowane podejście może znaleźć szerokie uznanie.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem są następujące:

1. Czy możliwa jest adaptacja zastosowanych podejść do innych zagadnień mechaniki ciał niejednorodnych? Jakie są ograniczenia w możliwościach aplikacyjnych do innych zagadnień fizyki matematycznej np. problemów termosprężystych?
2. Czy zdaniem Autorki jest możliwe zaadaptowanie zaproponowanej metody analitycznej do obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych? Jakie są ograniczenia przy tworzeniu modelu numerycznego na bazie zaproponowanych modeli analitycznych?
3. Czy w modelu analitycznym zaproponowanej metody możliwe jest uwzględnienie nieidealnych warunków brzegowych? Jakie są ograniczenia przy zastosowaniu tego typu warunków na powierzchniach łączących różne składniki elementu reprezentatywnego?

Praca jest napisana bardzo starannie pod względem językowym oraz redakcyjnym. Niemniej jednak recenzentowi udało się zauważyć w pracy nieliczne tzw. literówki oraz uwagi redakcyjne, które pokrótce wymieniam poniżej:

Pełkowski

Gołąbczak A. [149]. Na szczególne uznanie zasługuje też fakt, iż Doktorantka Anna Litawska podjęła się również problemów stabilności, które omówiono w publikacjach: Tomczyk, Bagdasaryan, Gołąbczak, Litawska [146] Tomczyk, Gołąbczak M., Litawska, Gołąbczak A. [150].

Wyniki prezentowane w tym rozdziale mają dobrą zgodność z wynikami uzyskanymi w przypadku zastosowania klasycznej metody elementów skończonych. Zaproponowane podejście ma bardzo duże znaczenie aplikacyjne do modelowania ośrodków mikro-periodycznych jak i również o funkcjonalnej gradacji właściwości, ponieważ pozwala rozwiązywać problemy dynamiki powłok mikro-niejednorodnych. We wnioskach Pani mgr inż. Anna Litawska omówiła najważniejsze rezultaty rozprawy doktorskiej. Ponadto, zawarła w nich kierunki badań na najbliższy okres pracy naukowej. Praca zawiera streszczenie w języku polskim oraz angielskim oraz spis literatury liczący 182 pozycje w tym artykuły i monografie, które zostały przez Doktorantkę wcześniej zacytowane w rozprawie doktorskiej.

3. Oryginalność pracy

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. Specjalnie w tym celu stworzone i przetestowane nowe, matematyczne, uśrednione modele służące do analizy zagadnień dynamiki rozważanych biperiodycznych i uniperiodycznych powłok walcowych.
2. Wyprowadzono dwa nowe rozszerzone (ogólne) modele asymptotyczno-tolerancyjne służące do analizy zagadnień dynamiki rozważanych biperiodycznych i uniperiodycznych powłok w oparciu rozszerzoną wersję łączonego modelowania asymptotyczno-tolerancyjnego.
3. Zaproponowane metody opisu pozwoliły na otrzymanie analitycznych wzorów nie tylko na podstawowe tzw. niższe częstotliwości drgań własnych, ale również na nowe, dodatkowe, tzw. wyższe częstotliwości drgań własnych zależne od wielkości mikrostruktury.

4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się podstawowym charakterem badań, niemniej jednak uzyskane wyniki wyróżniają się potencjałem praktycznego wykorzystania do obliczeń oraz projektowania konstrukcji wymagających zastosowania ośrodków z mikrostrukturą jedno lub dwukierunkową. Ponadto, zyskane wyniki mają istotny wpływ na stan wiedzy dotyczącej dynamicznego zachowania się cienkościennych powłok walcowych o

Redowski

1. Str. 81 – jest „model”; powinno być „*model*”.
2. Str. 108 – jest „(5.21)!”; powinno być „(5.21)”.
3. Str. 112 – powtórzono wyraz „obtained” w tym samym zdaniu.
4. Na jakiej podstawie przyjęto, wartości parametru E_2/E_1 ? Dlaczego nie pokazano wyników dla wartości $E_2/E_1=1$, patrz np. rys. 7.10? Czy rozwiązanie odpowiada dla ośrodka jednorodnego?
5. Zbyt mała czcionka na zaznaczonych wymiarach patrz. rys. 8.5.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dziedziny nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport* (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669). **Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Anny Litawskiej do publicznej obrony.**

W związku z powyższym przedstawiam pozytywną konkluzję i uprzejmie wnoszę o przyjęcie przedmiotowej rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję do Rady ds. Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa i Transport, Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Anny Litawskiej do kolejnych etapów przewodu doktorskiego - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 ze zm.).

Dariusz Fedelewski