

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Szczerby pt. „Dynamics of thin functionally graded cylindrical shells – tolerance modeling”

Podstawy przygotowania recenzji: pismo Przewodniczącego Rady ds. Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa i Transport, Architektura i Urbanistyka Prof. dr. hab. inż. Dariusza Gawina z dnia 27.10.2020 r.

1. Opis zawartości recenzowanej rozprawy doktorskiej

Przedmiotem rozważań w pracy doktorskiej mgr. inż. Pawła Szczerby jest matematyczne modelowanie zagadnień dynamiki cienkich powłok walcowych, zbudowanych z materiałów kompozytowych. Doktorant skupił się na powłokach liniowo- sprężystych, mikro-niejednorodnych typu Kirchhoffa-Love’a. Są one zbudowane z dużej liczby komórek idealnie połączonych, tworząc w kierunku obwodowym tzw. tolerancyjnie periodyczną mikrostrukturę. Mgr inż. Paweł Szczerba rozumie przez to założenie, że sąsiadujące ze sobą komórki mają prawie identyczne własności geometryczne i materiałowe, a komórki oddalone od siebie mogą znaczenie się różnić. Doktorant ponadto zakłada, że charakterystyczny liniowy wymiar komórki jest duży w porównaniu z maksymalną grubością powłoki oraz mały w stosunku do minimalnego promienia krzywizny. Opisując mikroskopowo własności inercyjne, geometryczne i sprężyste rozpatrywanych powłok, trzeba zastosować funkcje silnie oscylujące, nieciągłe, tolerancyjnie periodyczne, zaś opisując makroskopowo uśrednione własności tych powłok są funkcjami ciągłymi i wolnozmiennymi w kierunku tolerancyjnej periodyczności. Autor nazywa takie ciała powłokami o funkcyjnej, poprzecznej gradacji makrowłasności. Mgr inż. Paweł Szczerba wykorzystał technikę tolerancyjnego modelowania do opisu dynamicznych zachowań takich powłok. Metoda ta została zapoczątkowana przez Cz. Woźniaka w wielu publikacjach i trzech monografiach. Jej głównym walorem jest to, że po zastosowaniu tego podejścia, otrzymane modele uwzględniają wpływ wielkości mikrostruktury w zagadnieniach dynamiki, co jest nazywane efektem skali. Doktorant zastosował metodę tolerancyjnego modelowania dla rozpatrywanego rodzaju cienkich powłok walcowych, otrzymując trzy nowe uśrednione modele:

- (1^o) model tolerancyjny,
- (2^o) model asymptotyczny konsystentny,
- (3^o) model asymptotyczno-tolerancyjny.

Model tolerancyjny charakteryzuje się równaniami o wolno-zmiennych, ciągłych współczynnikach, które zależą od wymiaru komórki. Model asymptotyczny opisują równania o ciągłych i wolnozmiennych współczynnikach, niezależnych od wymiaru mikrostruktury powłoki.

Trzeci model zwany asymptotyczno – tolerancyjnym jest opisany równaniami różniczkowymi ze współczynnikami będącymi funkcjami wolnozmiennymi i ciągłymi, i uwzględnia efekt skali. Wprowadzone w pracy doktorskiej modele Doktorant wykorzystał do oceny efektu skali, w szczególnych zagadnieniach drgań własnych cienkościennych powłok walcowych. Analiza ta dotyczyła zarówno tzw. niższych częstości drgań własnych, jak również wyższych częstości, które nie są obserwowalne w ramach modeli asymptotycznych. Mgr inż. Paweł Szczerba na podstawie przeprowadzonych obliczeń sformułował odpowiednie wnioski dotyczące stosowalności poszczególnych modeli. Ponadto przeanalizował wyprowadzone wzory opisujące wyższe (zależne od wielkości komórki) częstości mikrodrgań własnych w kierunkach obwodowym, osiowym oraz normalnym do powierzchni środkowej powłoki.

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z ośmiu rozdziałów, Dodatku, Spisu literatury i Streszczenia. Rozpoczyna ją Lista stosowanych oznaczeń. Pierwszy z rozdziałów „Introduction” zawiera opis przedmiotu badań, cele i zawartość pracy. Drugi rozdział „Overview of modelling techniques applied to periodic and tolerance-periodic structures” przedstawia szerokie omówienie istniejącej literatury dotyczącej modelowania mechaniki materiałów kompozytowych, w tym z uwzględnieniem powłok zbudowanych z kompozytów. W rozdziale trzecim zatytułowanym “Concepts and assumptions of the tolerance modelling technique” mgr inż. Paweł Szczerba przytoczył zastosowane dalej relacje tolerancyjnego modelowania, definicje: wolnozmiennych funkcji, tolerancyjno-periodycznych funkcji, fluktuacyjnych funkcji kształtu. Ponadto podał wzory przedstawiające tolerancyjne uśrednienie, rozkład pola przemieszczenia za pomocą mikro-makro dekompozycji. W rozdziale czwartym Doktorant sformułował rozpatrywane zagadnienia, opisał materiał, z którego są zbudowane powłoki, opisał przemieszczenia oraz funkcje Lagrange’a. Podał układ równań stanowiący punkt wyjścia do operacji uśredniania (równanie (4.9)). Rozdział piąty zawiera trzy podejścia do modelowania. Przedstawiając przemieszczenia w postaci mikro-makro dekompozycji (wzór (5.1)). Doktorant otrzymał równania modelu tolerancyjnego (wzory (5.6) i (5.7)). Następnie przeprowadził ich analizę, podając również przejście do powłok zbudowanych z jednorodnego materiału. Drugie podejście prowadzi do modelu asymptotyczno – konsystentnego, który mgr inż. Paweł Szczerba otrzymał stosując odpowiednią procedurę zamieszczoną w monografii Cz. Woźniaka ze współautorami z 2010 roku. Tu przemieszczenia powłoki są przedstawione za pomocą asymptotycznej dekompozycji danej wzorem (5.8). Po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń Doktorant otrzymał układ równania modelu, złożony z trzech równań różniczkowych cząstkowych na makroprzemieszczenia i układ równań algebraicznych na fluktuację amplitud. Otrzymane relacje Doktorant wnikliwie podsumował, prezentując również przejścia do powłok jednorodnych. Trzecie podejście zaprezentowane w tym rozdziale prowadzi do modelu asymptotyczno – tolerancyjnego. Opiera się ono na dwu stopniowych krokach modelowania przedstawionych w cytowanej monografii Cz. Woźniaka ze współautorami i prowadzi do układu równań (5.34) – (5.36). Model ten opisuje efekt skali, a równania różniczkowe cząstkowe, opisujące go zawierają ciągłe i wolno-zmienne współczynniki, jednakże jest on bardziej skomplikowany w stosunku do poprzednich modeli. Rozdział szósty zatytułowany „Selected problems of dynamics: Application of the tolerance and asymptotic models” zawiera przykłady zastosowań wprowadzonych w poprzednim rozdziale modeli; tolerancyjnego i asymptotycznego. Mgr inż. Paweł Szczerba rozpatrzył cienką powłokę walcową o stałej

grubości i skończonych wymiarach długości obwodowej i nieskończonej osiowej. Powłoka ta zbudowana jest z dwóch sprężystych, izotropowych materiałów idealnie sklejonych na powierzchniach łączących poszczególne składniki. Ponadto Doktorant przyjął, że powłoka ma funkcyjnie zmienną makrostrukturę i tolerancyjnie periodyczną mikrostrukturę wzdłuż kierunku obwodowego, a w kierunku osiowym ma stałą strukturę. Mgr inż. Paweł Szczerba rozpatrzył problem drgań swobodnych, swobodnie podpartej takiej powłoki. Do tego zastosował najpierw model tolerancyjny i metodę przybliżoną Ritza przy rozwiązywaniu układu równań (6.17). Otrzymał dwie częstotliwości drgań własnych: dolną i górną (spowodowaną tolerancyjno – periodyczną strukturą powłoki). Stosując model asymptotyczny dla tego samego ciała dostał jedną częstość drgań własnych.

Otrzymane rezultaty analityczne zostały przebadane numerycznie, a ich wyniki przedstawione na 19 wykresach i szczegółowo omówione.

Drugi przykład zawiera analizę drgań cienkościennej powłoki walcowej z materiału kompozytowego o skończonych wymiarach przy zastosowaniu modeli: tolerancyjnego i asymptotycznego. Doktorant porównał otrzymane wyniki z rezultatami obliczonymi za pomocą programu Ansys Academic Research Mechanical 2020 R1. Cennym są wyciągnięte wnioski zawarte w „Discussion of results”.

Rozdział siódmy rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Szczerby zatytułowany „Selected dynamic problems of micro-dynamics: Application of the combined asymptotic – tolerance model” dotyczy problemu mikro-dynamiki cienkościennej powłoki walcowej z materiału niejednorodnego. Doktorant zastosował tu trzeci z wyprowadzonych modeli; tzw. model asymptotyczno-periodyczny (przyjmując pewne uproszczenia). Doktorant rozpatrzył oddzielnie mikro-drgania w kierunkach obwodowym i osiowym. Wykazał, że różne postacie mikrodrgań mogą występować w zależności od relacji między częstością drgań harmonicznym a wyższą częstością mikrodrgań własnych. Zastosowanie modelu asymptotyczno – tolerancyjnego w przypadku fal długich w powłokach nieskończone długości, w kierunku osiowym doprowadziło mgr. inż. Pawła Szczerbę do wniosku, że mogą propagować się trzy typy fal: sinusoidalna, wykładnicza lub zdegenerowana. Model asymptotycznie – tolerancyjny daje nowe rezultaty w porównaniu z wynikami modeli: tolerancyjnego i asymptotycznego. W rozdziale siódmym Doktorant rozpatrzył również problem uwzględniając warunek początkowy dla amplitud mikro-fluktuacji w kierunku osiowym.

Doktorant wykazał, że w zależności relacji między wymiarami komórki i całej powłoki, mikro-fluktuacje przemieszczeń w kierunku osiowym mają różny charakter. Jest to wynik polegający na zastosowaniu modelu asymetryczno – tolerancyjnego. Rozdział ósmy rozprawy „Final remarks and conclusions” zawiera podsumowanie ze szczególnym wskazaniem efektów otrzymywanych dla dynamiki powłok cienkościennych walcowych zbudowanych z kompozytów przy zastosowaniu wyprowadzonych modeli. Ponadto praca zawiera „Appendix: Calculations of coefficients in averaged models equations” i „Bibliography” zawierające spis 170 artykułów i monografii cytowanych w rozprawie. Zakończeniem rozprawy liczącej 193 strony są „Summary” i „Streszczenie”.

2. Ocena pracy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Szczerby dotyczy aktualnej tematyki, która jest rozwijana ze względu na możliwości zastosowania w praktyce. Doktorant rozpatrzył cienkościennie powłoki walcowe z materiałów kompozytowych ograniczając się do liniowo- sprężystych mikro-niejednorodnych powłok typu Kirchhoffa – Love’a. Do modelowania dynamicznego zachowania tych powłok zaadaptował technikę tolerancyjnej aproksymacji rozwijaną przez Cz. Woźniaka i współpracowników. Stosując nieasymptotyczne podejście do matematycznego modelowania ciał periodycznych lub tolerancyjnie periodycznych oparte na relacjach tolerancyjnych, mgr inż. Paweł Szczerba wyprowadził trzy modele badanych powłok: model tolerancyjny, model asymptotyczny oraz model asymptotyczno – tolerancyjny. Do osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

1. wprowadzenie trzech modeli mikro-niejednorodnych powłok walcowych, cienkościennych przez odpowiednie zaadoptowanie metody tolerancyjnej aproksymacji,
2. wnikliwa analiza otrzymanych relacji, w tym cennym jest weryfikacja otrzymanych równań, polegająca na przejściu do przypadku powłok jednorodnych i sprawdzeniu zgodności ze znanymi modelami,
3. omówienie, przy każdym z otrzymanych modeli, różnic między nimi i wskazanie na nowe efekty (np. tzw. efekt skali) wnoszone do dynamiki badanych powłok,
4. analiza przypadków szczególnych, związanych z geometrią i strukturą powłoki,
5. rozpatrzenie drgań swobodnych powłoki swobodnie podpartej o skończonych wymiarach w ramach modelu tolerancyjnego i modelu asymptotycznego, co wymagało znajomości metod rozwiązywania równań różniczkowych,
6. wyznaczenie częstotliwości drgań własnych: dolnej i górnej (spowodowanej tolerancyjno-periodyczną strukturą powłoki),
7. cennymi omówieniami otrzymanych wyników, zarówno analitycznych jak i numerycznych, co świadczy o dużej dojrzałości naukowej Doktoranta,
8. porównanie otrzymanych wyników za pomocą programu Ansys Academic Research Mechanical 2020 R1 z rezultatami w ramach modeli tolerancyjnego i asymptotycznego,
9. analiza trzeciego z wyprowadzonych modeli: tzw. modelu asymptotyczno – tolerancyjnego, za pomocą zastosowania tego modelu do rozwiązania mikrodrgań własnych w kierunkach obwodowym i osiowym rozpatrywanej powłoki,
10. rozpatrzenie przypadku fal długich w powłokach nieskończenie długich i wskazanie na trzy rodzaje fal, co było nowym efektem,
11. szerokie omówienie otrzymanych rezultatów z porównaniami do wyników z innych modeli,
12. szerokie omówienie literatury związanej z tematem rozprawy,
13. bardzo staranne przygotowanie rozprawy w języku angielskim, logiczne jej zredagowanie,
14. wskazanie dalszych możliwości badań z uwzględnieniem bardziej złożonej struktury powłok, nieliniowości sprężystej.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że mgr inż. Paweł Szczerba opublikował 6 artykułów we współautorstwie (w tym trzy w czasopiśmie Composite Structures – wysoko punktowanym

na Liście Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego). Jest to bardzo znaczący dorobek naukowy uzyskany w krótkim czasie (lata 2017-2018). Trzeba zaznaczyć, że tematyka badań podjętych przez Doktoranta jest trudna, wymaga dużej wiedzy dotyczącej mechaniki kompozytów, co jeszcze bardziej podnosi ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Szczerby.

Uwagi krytyczne

Mając na uwadze temat rozprawy Doktorant skupił się na problemach modelowania i analizy otrzymanych wyników. Szkoda, że na początku rozprawy brakuje umotywowania praktycznego zastosowania badanych powłok (Doktorant wspominał tylko jednym zdaniem w streszczeniu) np. podania przykładów powłok stosowanych w inżynierii. Chodzi tu o konkretne materiały będące składnikami kompozytu i strukturę.

Posumowanie

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Szczerby „Dynamics of thin functionally graded cylindrical shells – tolerance modelling” stanowi ciekawy wkład do mechaniki kompozytów, gdyż:

1. zawiera nowe modele opisujące dynamikę walcowych powłok cienkościennych o tolerancyjno – periodycznej strukturze,
2. modele te są analizowane za pomocą przykładów dotyczących drgań własnych,
3. wszystkie otrzymane rezultaty są szeroko omówione i wyprowadzone zostało wiele wniosków,
4. materiał zawarty w rozprawie jest ściśle związany z tematem, przedstawionymi przez Doktoranta celami,
5. praca jest dobrze przygotowana redakcyjnie i graficznie.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Szczerby w pełni spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę o dopuszczenie jej przez Radę ds. Stopni Naukowych w dyscyplinach Inżynieria Lądowa i Transport, Architektura i Urbanistyka Politechniki Łódzkiej do dalszych postępowań. Jednocześnie mając na uwadze duże walory poznawcze, dobre opracowanie tematu oraz zacytowany w niej dorobek Doktoranta, zgłaszam wniosek o wyróżnienie tej rozprawy.

Prof. dr hab. Stanisław Matysiak