

prof. dr hab. inż. Bohdan Michalak
Politechnika Łódzka
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska
Katedra Mechaniki Konstrukcji
Al. Politechniki 6, 93-590 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Vazgena Badasaryana pt.

„Model tolerancyjny sprzężonych pól temperatury i przemieszczeń w periodycznych materiałach wieloskładnikowych”

Podstawa opracowania recenzji: pismo Dziekana Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego z dn. 27.10 2016 roku.

1. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska wykonana przez mgr inż. Vazgena Badasaryana na temat:

"Model tolerancyjny sprzężonych pól temperatury i przemieszczeń w periodycznych materiałach wieloskładnikowych".

Praca powstała na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Sanitarnej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Promotorem pracy jest prof. dr hab. Wiesław Nagórko, promotorem pomocniczym dr inż. Marek Chalecki. Rozprawa doktorska liczy 83 strony tekstu, zestawienie bibliografii zawierające 105 pozycji, oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca doktorska ma charakter teoretyczny i jest poświęcona modelowaniu matematycznemu i analizie zagadnień termosprężystości w przewodnikach o budowie mikrostrukturalnej jedno- lub dwukierunkowo periodycznych.

Główną tezę pracy jest wykazanie, że technika tolerancyjnego uśredniania jest efektywną metodą uzyskania uśrednionych równań termosprężystości dla wybranych materiałów o budowie periodycznej uwzględniających wpływ wymiaru mikrostruktury na zachowania tych materiałów.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów oraz spisu literatury.

We wstępie Autor zdefiniował jakiego rodzaju materiałom kompozytowy poświęcona jest rozprawa. Podał podstawowe związki i równania termosprężystości zapisane dla jednorodnego materiału izotropowego. W celu wyprowadzenia równań termosprężystości Autor zdefiniował w tym rozdziale dwa funkcjonały, które będą podstawą do uzyskania uśrednionych równań w materiałach kompozytowych. Wyróżnił prostszy przypadek szczególnie równań termosprężystości znany w literaturze pod nazwą teorii naprężeń cieplnych. Autor omówił również skrótowo w tym rozdziale literaturę związaną z rozpatrywanym w pracy zagadnieniem, podał tezę i cele rozprawy doktorskiej. We wstępie Autor przedstawił również bardzo skrótowo podstawowe definicje i zasady techniki tolerancyjnego uśredniania. Przedstawiono tu również uśrednione; funkcjonał i równania tylko dla zagadnienia przewodzenia ciepła. Zdaniem recenzenta ta część wstępu powinna się raczej znaleźć w rozdziale 2 "Model uśredniony termosprężystych ciał wieloskładnikowych"

W rozdziale 2 Autor w sposób bardzo zwięzły wyprowadza uśrednione równania termosprężystości dla trzech przypadków kompozytów periodycznych, o periodyce w trzech, w dwóch i w jednym kierunku. Podane są również uśrednione równania dla przypadku teorii naprężeń cieplnych. Na zakończenie tego rozdziału Autor podał znaną kawałkami liniową funkcję kształtu dla jednokierunkowej periodyki w dwumateriałowej komórce reprezentatywnej.

Rozdział 3 jest poświęcony zagadnieniu przewodzenia ciepła, zarówno dla kompozytów warstwowych jak i materiału dwukierunkowo periodycznego. W tym drugim przypadku komórka składa się z czterech prostokątnych obszarów, każdy o innych własnościach materiałowych. Poszczególne obszary komórki reprezentatywnej są zbudowane z matrycy i równoległych włókien. Trzy z tych obszarów wypełniają ułożone w dwojaki sposób włókna o specyficznych własnościach termicznych. Włókna te mają znacznie inne od matrycy własności termiczne w kierunku równoległym do włókien i takie same jak matryca własności w kierunku prostopadłym do włókien. Oscylację pola temperatury w materiale dwukierunkowo periodycznym, Autor zaproponował w postaci sumy oscylacji tego pola oddzielnie dla każdego z prostopadłych do siebie kierunków. Autor przedstawił również przejście do równań asymptotycznych modelu tolerancyjnego. W dalszej części tego rozdziału podano rozwiązania równań przybliżenia asymptotycznego modelu tolerancyjnego dla poszczególnych przykładów jedno- lub dwukierunkowego przewodzenia ciepła w przewodnikach warstwowych, oraz dla zagadnienia stacjonarnego przewodzenia ciepła w przewodniku dwukierunkowo periodycznym. Na koniec tego rozdziału Autor dokonał porównania rozwiązań, uśrednionych równań modelu tolerancyjnego, otrzymanych metodą analityczną i metodą różnic skończonych. Przedstawił również porównanie wartości uśrednionych temperatur otrzymanych z modelu tolerancyjnego i asymptotycznego modelu tolerancyjnego.

Rozdział 4 jest poświęcony analizie teorii naprężeń cieplnych w dwuskładnikowym materiale warstwowym. Autor ograniczył rozważania do określenia pól przemieszczeń wywołanych obciążeniem termicznym, wykorzystując otrzymane w rozdziale 3 rozkłady pola temperatury. Właściwości mechaniczne poszczególnych składników materiału warstwowego są przyjęte jak dla materiałów izotropowych.

Praca kończy się podsumowaniem i wnioskami z analizy otrzymanych wyników, oraz wymienieniem najważniejszych oryginalnych elementów pracy.

Praca zawiera również spis literatury dotyczącej rozpatrywanego zagadnienia.

3. Szczegółowe uwagi krytyczne

Przedstawione tu uwagi są uszeregowane według kolejności ich występowania w pracy, a nie według ich ważności.:

1. Brakuje w omówieniu literatury we wstępie jak i w analizie uzyskanych wyników odniesienia do, zdaniem recenzenta istotnych, publikacji dotyczących podstaw techniki tolerancyjnego uśredniania:
 - Woźniak Cz., Michalak B., Jędrysiak J. [ed.], 2008, *Thermomechanics of microheterogeneous solids and structures*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź
 - Woźniak Cz. [ed.], 2010, *Mathematical Modelling and Analysis in Continuum Mechanics of Microstructured Media*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwicemodelowania kompozytów dwukierunkowo periodycznych;
 - Matysiak S. J., 1991, *On certain problems of heat conduction in periodic composites*, ZAMM, 71,524-528
 - Matysiak S. J., Ukhanska O. M., 1997, *On heat conduction problem in periodic composites*, Int. Comm. Heat Mass Transfer, 24, 827-834dotyczących zagadnień termosprężystości w przewodnikach warstwowych;
 - Jędrysiak J., 2011, *On the tolerance modelling of thermoelasticity problems for transversally graded laminates*, Arch. of Civil and Mech. Eng. 11, 61-74
 - Pazera E., Jędrysiak J., 2015, *Thermoelastic phenomena in transversally graded laminates*, Composite Structures, 134, 663-671.
2. Funkcja oscylacji temperatury $h^A(\cdot)$ w przypadku ciał o budowie periodycznej nie zależy od położenia komórki periodyczności czyli współrzędnych x_i , zależy od współrzędnych lokalnych w komórce.
3. W rozdziale 2. brakuje omówienia warunków brzegowych dla otrzymanych uśrednionych równań różniczkowych. Szczególnie dotyczy to równań modelu tolerancyjnego gdzie występują amplitudy oscylacji temperatury i przemieszczeń.
4. Rysunek 3.2. Brakuje na nim układów współrzędnych; globalnego dla całej struktury i lokalnego dla komórki. Utrudnia to zrozumienie przyjętego sposobu przewodzenia ciepła w każdej z czterech części komórki periodyczności. Funkcje kształtu opisane równaniami (3.2.8) i (3.2.9) powinny być funkcjami współrzędnych lokalnych w komórce.
5. Rozdz. 3.2 Autor rozprawy stwierdził, że przyjęte funkcje kształtu oscylacji temperatury dotyczą przypadku zbrojenia włóknami długimi. Zdaniem recenzenta funkcje te dotyczą przypadku zbrojenia włóknami krótkimi.
6. Str. 38. Do wyznaczenia amplitudy fluktuacji temperatury potrzebna jest pochodna przestrzenna uśrednionej temperatury. Dlaczego zastosowano iloraz różnicowy prawostronny a nie iloraz różnicowy centralny.
7. Przykład obliczeniowy na str. 45. Autor rozpatruje przewodnik wzmacniany włóknami długimi. Zdaniem recenzenta powinno być wzmacnianie włóknami krótkimi. Co oznaczają podane w tym przykładzie wymiary komórki $l_{11}, l_{12}, l_{21}, l_{22}$.

8. We wnioskach do rozdziału 3.5 pojawiają się określenia "mniejszy uśredniony współczynnik przewodzenia ciepła" i "wysoki uśredniony współczynnik przewodzenia ciepła". Czy wysoki oznacza kompozyt o bardzo różnych współczynnikach dla materiałów składowych komórki? Na rysunkach 3.44-3.46 Autor podał błąd względny rozwiązań modelu asymptotycznego do tolerancyjnego w zależności od liczby komórek. Głębszej analizie wymaga zauważona na niektórych wykresach niewielka zależność różnicy rozwiązań w zależności od rozmiaru komórki periodyczności. W pewien sposób przeczy to wnioskowi znanym dotychczas z literatury, gdzie błąd przybliżenia asymptotycznego zależy od wielkości komórki.
9. Przykład na str.60. Dlaczego do określenia pochodnych przestrzennych w metodzie różnic skończonych nie zastosowano ilorazu różnicowego centralnego.
10. Równania 4.3.5 są zapisane dla struktury nieskończenie długiej w kierunku osi x_3 , czyli dla płaskiego stanu odkształcenia. Natomiast warunki brzegowe (4.3.9), zdaniem recenzenta, są zapisane dla uśrednionych naprężeń, ale w płaskim stanie naprężenia. Proszę o komentarz do uwagi.

4. Ocena pracy

Dobór tematu, zakres i cel pracy.

Wymagania stawiane materiałom wykorzystywanym we współczesnych konstrukcjach często nie mogą być zaspokojone przez materiały tradycyjne. Stąd potrzeba poszukiwania i stosowania materiałów kompozytowych o wymaganych własnościach efektywnych. Materiały o budowie mikrostrukturalnej charakteryzują równania z silnie oscylującymi i nieciągłymi współczynnikami. Rozwiązanie takich równań jest bardzo kłopotliwe i stąd poszukiwania zastępczych modeli matematycznych opisanych uśrednionymi równaniami w których, w przypadku materiałów periodycznych, występują stałe współczynniki. W zastosowaniach inżynierskich rozwiązanie takich równań jest znacznie prostsze i może być dokonane znanymi metodami.

Autor pozostawił sobie za cel sformułowanie uśrednionego modelu dla zagadnień termosprężystości w materiałach warstwowych i wzmocnionych siatką prętów ułożonych w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach. Autor otrzymane uśrednione równania wykorzystał w celu przetestowania uzyskanego modelu przez: rozwiązanie wybranych zagadnień początkowo-brzegowych, zbadanie wpływu wymiaru komórki periodyczności na uzyskane wyniki, oraz porównanie wyników otrzymanych z rozwiązania równań dwóch modeli; przybliżenia asymptotycznego modelu tolerancyjnego i pełnego modelu tolerancyjnego. Do uzyskania uśrednionych równań Autor wykorzystał technikę tolerancyjnego uśredniania.

Istotnym osiągnięciem recenzowanej rozprawy jest to, że Autor poza materiałem warstwowym podjął również trud otrzymania rozwiązań dla materiału dwukierunkowo periodycznego. Jeżeli rozwiązania z wykorzystaniem techniki tolerancyjnego uśredniania dla materiałów warstwowych są dobrze znane z literatury, to rozwiązania dla materiałów o dwukierunkowej budowie mikrostrukturalnej nie są zbyt często spotykane w literaturze. Rozpatrywana w pracy komórka dwukierunkowo periodyczna ma specyficzne własności wynikające z zastosowania zbrojenia włóknami. W technice tolerancyjnego uśredniania

jednym z ważnych etapów modelowania jest uzyskanie funkcji kształtu oscylacji poszukiwanych pól temperatury i przemieszczeń. Jest to bardzo interesujący i ważny kierunek badań i szkoda, że Autor nie pogłębił swoich badań w tym kierunku. Komórki złożone z czterech podobszarów, wprawdzie o innej mikrostrukturze, były już badane przez S.J. Matysiaka i można było porównać przedstawione tam funkcje kształtu z proponowanymi przez Autora rozprawy.

Reasumując tematyka i zakres pracy doktorskiej Pana mgr inż. Vazgena Bagdasaryana dotyczące modelowania zagadnień termosprężystości periodycznych materiałów wieloskładnikowych wpisują się w nurt aktualnych badań naukowych.

Zasadnicza teza naukowa rozprawy i jej oryginalność.

Teza pracy mówiąca, że *„Możliwe jest skonstruowanie, przy użyciu techniki uśredniania tolerancyjnego, modelu termosprężystości wybranych materiałów periodycznych (warstwowych i materiałów wzmocnionych siatką prętów), w którym uwzględniony będzie wpływ mikrostruktury na przewodzenie ciepła oraz na pole przemieszczeń, oraz otrzymany układ równań będzie prostszy do rozwiązania niż układ klasyczny. ”* została potwierdzona w pracy przedstawionej przez Doktoranta. Należy podkreślić, że teza pracy została potwierdzona nie tylko dla materiału jednokierunkowo periodycznego, ale również dla materiałów wielokierunkowo periodycznych. Doktorant przedstawił uśrednione równania modelu tolerancyjnego dla materiałów periodycznych w jednym, dwóch i trzech kierunkach.

Ocena metody użytej przez Autora do rozwiązania rozpatrywanych zagadnień.

Doktorant w celu otrzymania uśrednionych równań termosprężystości rozpatrywanego materiału kompozytowego użył techniki tolerancyjnego uśredniania. Uśrednione równania otrzymano z zasady stacjonarności działania dla zdefiniowanych przez Autora rozprawy dwóch funkcjonałów. Otrzymane uśrednione równania różniczkowe nie zawierają już skokowo zmiennych nieciągłych współczynników, lecz współczynniki opisane gładkimi ciągłymi funkcjami. Tak więc w ogólnym przypadku zagadnień dwukierunkowych do ich rozwiązania można wykorzystać znane metody numeryczne. Oczywiście można spotkać stwierdzenia, że istnieją zdaniem innych autorów lepsze metody uzyskania rozwiązań dla materiałów o budowie mikrostrukturalnej. Tym niemniej nigdy nie jesteśmy w stanie stwierdzić, że któraś z metod jest uniwersalna i pozwala rozwiązać wszystkie napotkane problemy. Stąd potrzeba rozwijania różnych metod badawczych i ocena zakresu ich stosowalności.

Istotnym wymaganiem stawianym modelom uśrednionym jest to, aby opisywały one wpływ budowy mikrostruktury na wielkości uśrednione otrzymane w wyniku rozwiązania równań opisujących te modele. Uśrednione równania otrzymane przez Autora techniką tolerancyjnego uśredniania zawierają współczynniki zależne od wymiaru komórki periodyczności. Stąd korzystając z tych równań Autor rozprawy zbadał wpływ wymiaru mikrostruktury na wynikowe pola temperatury i przemieszczeń.

Zastosowana przez Autora technika modelowania tolerancyjnego została z powodzeniem użyta do otrzymania uśrednionych równań termosprężystości, oraz przeanalizowania wpływu wymiaru komórki periodyczności na uzyskane wyniki. Stąd zarówno teza pracy jak i jej cele zostały zrealizowane.

Redakcja pracy, umiejętność przedstawienia wyników.

Rozprawa jest napisana poprawnym językiem naukowym. Użyta w pracy terminologia z zakresu zagadnień związanych z analizą termosprężystości materiałów kompozytowych i ich modelowaniem matematycznym jest powszechnie przyjęta w literaturze. Trudno się czyta rozdziały pracy zawierające przykłady zastosowań otrzymanych równań. Poszczególne przykłady nie są w czytelny sposób rozdzielone i ponumerowane. Praca zawiera też pewną ilość usterek redakcyjnych, które powinny być poprawione przed jej ewentualną publikacją. Usterki te nie wpływają na merytoryczną wartość pracy, ale wymagają korekty.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa przedłożona do oceny jest samodzielną pracą mgr inż. Vazgena Bagdasaryana. Niezależnie od występujących w pracy usterek można stwierdzić, że Autor rozprawy wykazał się podstawową wiedzą niezbędną w prowadzeniu badań i opanował zasady analitycznej pracy naukowej.

Podsumowując powyższą ocenę pracy mogę stwierdzić, że rozprawa spełnia warunki określone w Ustawie o tytule naukowym i stopniach naukowych z dnia 14 marca 2003 r. wraz z jej późniejszymi nowelizacjami i może stanowić podstawę do ubiegania się przez wyżej wymienioną o stopień naukowy doktora nauk technicznych. Wniosuję o dopuszczenie do publicznej obrony recenzowanej rozprawy.

