

16 MAJ 2017

Wydział Mechaniczny Technologicznego

dr hab. inż. Anna Timofiejczuk,
prof. zw. w Pol. Śl.



KATEDRA MECHANIKI I INFORMATYKI STOSOWANEJ

Wydział Mechaniczny Wojskowej Akademii Technicznej
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49

Dr hab. inż. Jerzy Małachowski, prof. nadzw. WAT
Tel.: +48 261 839 683
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl
WWW: <http://kmiis.wme.wat.edu.pl/>

Warszawa, 14.05.2017 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej pt. „Homogenizacja materiałów niejednorodnych z uwzględnieniem anizotropii oraz nieliniowych związków konstytutywnych” napisanej przez
mgra inż. WITOLDA OGIERMANA

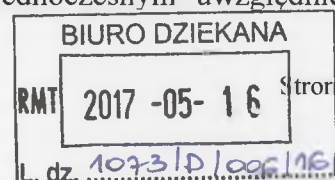
1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. ANNY TIMOFIEJCZUK, prof. zw. w Politechnice Śląskiej z dn. 12.04.2017 podyktowane decyzją Rady Wydziału i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. WITOLDA OGIERMANA pt. *Homogenizacja materiałów niejednorodnych z uwzględnieniem anizotropii oraz nieliniowych związków konstytutywnych*. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. GRZEGORZ KOKOT.

2. Omówienie pracy

Recenzowana praca została napisana na 116 stronach maszynopisu formatu A4; składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, 10 rozdziałów i bibliografii. Rozprawa w całości napisana jest w języku polskim. Spis literatury zawiera 94 pozycje, na które składają się: wykaz pozycji literaturowych oraz dokumentacja oprogramowania Digimat. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wprowadzenie; (2) Materiały o niejednorodnej orientacji przestrzennej faz; (3) Metody homogenizacji; (4) Metoda uśredniania orientacji; (5) Numeryczna weryfikacja metody uśredniania orientacji w zakresie liniowo-sprężystym; (6) Metoda optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami; (7) Homogenizacja z uwzględnieniem metody optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami w schemacie dwukrokowym; (8) Homogenizacja materiałów wykazujących własności nieliniowe; (9) Generowanie RVE o dowolnym rozkładzie orientacji inkluzji oraz (10) Podsumowanie i wnioski.

Przedmiot pracy doktorskiej dotyczy problematyki rozwoju metod komputerowych w obszarze modelowania materiałów niejednorodnych z jednoczesnym uwzględnieniem



Strona 1 z 7

rozkładu orientacji inkluzji i implementacją nieliniowych związków konstytutywnych. W pracy została zaprezentowana metoda homogenizacji, wykorzystująca schemat dwukrokowy i pozwalająca na tworzenie optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami. Takie podejście daje możliwość znacznej reedukacji liczby pseudo-ziaren wymaganych do odtworzenia zadanego rozkładu orientacji. Fakt ten Doktorant poparł przykładami z przeglądu literaturowego. Zastosowanie przez Pana mgr inż. Witolda Ogiermana opracowanej metody optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami prowadzi do wyznaczenia parametrów pseudo-ziaren, których znajomość jest niezbędna podczas realizacji procedury dwukrokowej homogenizacji. Skuteczność zaproponowanej metody w homogenizacji materiałów niejednorodnych Autor rozprawy potwierdza wyznaczając efektywne własności materiałowe wybranych materiałów kompozytowych i porowatych. Należy potwierdzić za Doktorantem, iż oryginalnym elementem pracy jest również opracowanie przez Niego nowej metody generowania trójwymiarowej geometrii reprezentatywnych elementów objętościowych (RVE) o zadanym rozkładzie orientacji inkluzji. Kluczowym aspektem tej metody jest określenie orientacji przestrzennej poszczególnych inkluzji w taki sposób, aby ich zbiór reprezentował zadany rozkład orientacji. Zagadnienie to Autor rozwiązał dzięki modyfikacji wcześniej opracowanej metody optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami. Opracowana i przedstawiona w pracy metoda daje możliwość reprezentacji zadanego rozkładu orientacji przez znacznie mniejszą liczbę inkluzji. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest budowanie znacznie mniejszych modeli numerycznych reprezentujących zadany rozkład orientacji. Skuteczność zaproponowanej metody Doktorant potwierdził opracowując reprezentatywne elementy objętościowe opisujące wybrane materiały kompozytowe i porowate, które następnie poddał procesowi homogenizacji z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Tak opracowane modele następnie poddał nieliniowej analizie numerycznej.

3. Omówienie zakresu rozdziałów i uwagi

Rozdział 1. Wprowadzenie (5 stron)

Autor w pierwszym rozdziale dokonuje wprowadzenia w tematykę pracy, definiuje jej cel, stawia tezę pracy oraz określa zakres zadań cząstkowych, które będą niezbędne do jej realizacji. Doktorant przedstawia także skrótowy opis treści zawartych w poszczególnych rozdziałach swojej dysertacji. Na uwagę zasługuje fakt, że przedstawiona literatura i wynikający z niej przegląd, w opinii Recenzenta, jest w pełni właściwy i bazuje w dużej mierze na publikacjach powstałych po 2000 roku, wśród których duża liczba dotyczy okresu od roku 2010 i opublikowana została w czasopiśmie związanych z metodami komputerowymi mechaniki oraz inżynierii materiałowej. W ten sposób Autor potwierdza, że powstała dysertacja dotyczy aktualnej tematyki naukowej, która w tym obszarze jest obecnie w świecie rozwijana.

Rozdział 2. Materiały o niejednorodnej orientacji przestrzennej faz (5 stron)

W rozdziale drugim Doktorant przedstawia opis najpopularniejszych materiałów inżynierskich, które charakteryzują się niejednorodną orientacją przestrzenną faz. Treści

zawarte w tym rozdziale są kontynuacją przeglądu literatury, z tą jednak różnicą, że odnoszą się do opisu cech mikrostruktury materiałów niejednorodnych. Doktorant dzięki tej analizie dochodzi do słusznego wniosku, „że występowanie niejednorodnej orientacji przestrzennej faz materiału jest powszechnym zjawiskiem związanym z różnymi grupami popularnych materiałów inżynierskich” i w związku z powyższym faktem „rozwój metod komputerowych pozwalających na analizę tego typu materiałów jest ważnym zagadnieniem z punktu widzenia badań podstawowych i stosowanych”.

Rozdział 3. Metody homogenizacji (13 stron)

W rozdziale tym Doktorant dokonuje przedstawienia metod homogenizacji. Szczególną uwagę poświęca bezpośredniej metodzie homogenizacji z implementacją metody elementów skończonych (MES) do rozwiązania problemu brzegowego oraz metodzie Mori-Tanaki (M-T) związanej z wykorzystaniem rozwiązania Eshelby’ego. W rozdziale tym wprowadza także pojęcie reprezentatywnego elementu objętościowego RVE (z ang. *Representative Volume Element*), który to element z makroskopowego punktu widzenia, jest punktem materiału jednorodnego charakteryzujący się objętością V i służy do reprezentacji niejednorodnej mikrostruktury. W rozdziale przedstawiony jest również opis homogenizacji bezpośredniej z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Dla opracowanych z jej wykorzystaniem modeli numerycznych jest możliwość definiowania trzech rodzajów warunków brzegowych, w tym możliwość definiowania warunków o charakterze periodycznym. Doktorant przedstawia też metodę homogenizacji pośredniej, która bazuje na rozwiązaniu Eshelby’ego i wiąże się z zagadnieniem pojedynczej inkluzji umieszczonej w nieskończonej osnowie. Jak wskazuje Doktorant, to podejście ma jednak swoje ograniczenie w praktycznych przypadkach analizy materiałów kompozytowych i dlatego musi podlegać modyfikacji z uwzględnieniem dodatkowych założeń lub poprzez przeprowadzenie kilkukrotnej homogenizacji. Metoda ta została także wzbogacona o możliwość analiz materiałów o charakterystyce sprężysto-plastycznej (w pierwotnej wersji dotyczyła tylko materiałów liniowo-sprężystych) dzięki przyrostowej procedurze homogenizacji zaproponowanej przez Mori-Tanaki i Lielensa. Całość przedstawionej w tym rozdziale treści nie budzi zastrzeżeń Recenzenta i dzięki zawartym podstawom i założeniom zaprezentowanych metod homogenizacji, pozwala na zrozumienie złożoności podejmowanego przez Doktoranta zagadnienia. Rozdział ten bazuje na bardzo dobrze opracowanym przeglądzie literatury.

Rozdział 4. Metoda uśredniania orientacji (7 stron)

W ramach tego rozdziału Doktorant podjął się zaprezentowania założeń metody uśredniania orientacji oraz tensorowego opisu rozkładu orientacji, procedury dwukrokowej homogenizacji oraz metody aproksymacji tensora orientacji czwartego rzędu. Rozdział w przedstawionej formie wraz z zaprezentowanymi podstawami zastosowanych procedur matematycznych (analitycznych) daje możliwość dużo głębszego zrozumienia analizowanego zagadnienia. Bardzo ważnym i godnym podkreślenia aspektem jest fakt, że ten rozdział stał się inspiracją dla Doktoranta do zaproponowania własnej autorskiej metody optymalnej

dyskretyzacji niejednorodnych mikrostruktur w wykorzystanej procedurze dwukrokowej homogenizacji, która opiera się na pseudo-ziarnach. Rozdział ten bazuje w dużej mierze na bardzo dobrze opracowanym przeglądzie literatury.

Rozdział 5. Numeryczna weryfikacja metody uśredniania orientacji w zakresie liniowo-sprężystym (17 stron)

W rozdziale Doktorant dokonał prezentacji numerycznej weryfikacji metody uśredniania orientacji w zakresie liniowo-sprężystym. Zastępcze tensory sztywności wyznaczone zostały przez zastosowanie metody uśredniania orientacji. Następnie zostały one porównane z zastępczymi tensorami obliczonymi na podstawie analizy metodą elementów skończonych złożonych RVE. Do wygenerowania geometrii RVE zaimplementowano komercyjne oprogramowanie Digimat-FE, a do obliczeń MES komercyjny kod ANSYS. Dyskretyzacji geometrii Doktorant dokonał wykorzystując tetragonalne elementy skończone z kwadratowymi funkcjami kształtu. Dla każdego analizowanego przypadku rozwiązano sześć zadań brzegowych zadając okresowe warunki brzegowe wymuszające odkształcenia. Autor przeanalizował łącznie trzy różne materiały (materiał wzmocniony cząsteczkami elipsoidalnymi RVE1, włóknami walcowymi RVE2 oraz materiał z pustkami RVE3) o odmiennych rozkładach orientacji inkluzji lub pustek. Zaprezentowane przez Doktoranta wyniki z przeprowadzonych testów pokazują skuteczność metody uśredniania orientacji w modelowaniu materiałów o niejednorodnej orientacji przestrzennej inkluzji i pustek w zakresie liniowo-sprężystym. Oszacowany błąd względny pomiędzy komponentami tensora sztywności, wyznaczonymi przy wykorzystaniu metody uśredniania orientacji, i komponentami tensora sztywności, wyznaczonymi poprzez analizę MES RVE o złożonej geometrii dla każdego analizowanego przypadku, nie przekroczył 1,5 %.

Po analizie przedstawionych wyników z badań, które Doktorant starał się bardzo dokładnie i rzeczowo zaprezentować, rodzą się jednak pewne pytania i wątpliwości, na które Recenzent oczekuje odpowiedzi i wyjaśnień, a mianowicie:

- 1) Odpowiednikiem jakich materiałów są analizowane przez Doktoranta przypadki?
- 2) Jak wyglądały dane opisujące geometrię analizowanych modeli oraz dane statystyczne z punktu widzenia liczby elementów czy stopni swobody i czy zaproponowane modele poddane zostały analizie wrażliwości?
- 3) Na ile celowym jest wykazywanie błędów analiz na poziomie setnych części procenta, kiedy tego typu błąd może wynikać zarówno z natury analizowanego zagadnienia, jak też i z rodzaju założonych poziomów precyzji obliczeń, czy też użytych do analiz różnych procesorów?

Rozdział 6. Metoda optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami (20 stron)

W rozdziale tym Doktorant zawarł opis podstaw teoretycznych zaproponowanej metody optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami. Następnie Autor przedstawił parametry pseudo-ziaren wyznaczone dla wybranych rozkładów orientacji, przeanalizował dokładność rekonstrukcji zadanego rozkładu orientacji przez pseudo-ziarna oraz na tej podstawie wyznaczył zastępcze tensory sztywności. Analizy te zostały wykonane dla wspomnianych

wcześniej trzech rodzajów mikrostruktur (RVE1, RVE2 i RVE3). Całość zaprezentowanej w tym rozdziale treści nie budzi, w opinii Recenzenta, poważniejszych uwag, a jedynie pewne następujące kwestie wymagają wyjaśnienia:

- 1) Jakimi kryteriami kierował się Doktorant przyjmując cztery zakładane poziomy dokładności, które nie we wszystkich z analizowanych przypadkach się sprawdziły - jak sam podkreśla?
- 2) Czym była spowodowana różnica sumy wag $\sum w$, która w jednych przypadkach wynosiła więcej niż jedność, a w innych była poniżej tej wartości?

Rozdział 7. Homogenizacja z uwzględnieniem metody optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami w schemacie dwukrokowym (2 strony)

W rozdziale siódmym dysertacji Doktorant przedstawił opracowaną procedurę homogenizacji wykorzystującą metodę optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami oraz dwukrokowy schemat homogenizacji (Rys. 7.1). Tego typu podejście umożliwia analizę materiałów z jednoczesnym uwzględnieniem nieliniowych związków konstytutywnych oraz dowolnego rozkładu orientacji faz.

Rozdział 8. Homogenizacja materiałów wykazujących własności nieliniowe (13 stron)

W ramach tego rozdziału Doktorant podjął się zaprezentowania wyników analizy materiału w zakresie sprężysto-plastycznym. W pierwszym etapie Doktorant przeprowadził analizę materiałów transwersalnie izotropowych. Homogenizację materiału transwersalnie izotropowego zrealizował wykorzystując bezpośrednią homogenizację MES, a także przyrostową metodę Mori-Tanaki. W celu zastosowania metody przyrostowej Mori-Tanaki zastosował oprogramowanie Digimat-MF, a do analiz MES program ANSYS. W kolejnym etapie Doktorant przeanalizował trzy materiały RVE wykorzystując bezpośrednią homogenizację MES bazującą na RVE o złożonej geometrii (analiza MES złożonego RVE), dwukrokową homogenizację uwzględniającą metodę optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami połączoną z homogenizacją MES (metoda uśredniania orientacji, MES) i dwukrokową homogenizację uwzględniającą metodę optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami z implementacją w pierwszym kroku homogenizacji metodą Mori-Tanaki (metoda uśredniania orientacji, M-T). Zaprezentowanymi wynikami Autor potwierdził skuteczność opracowanej metody homogenizacji w zakresie modelowania materiałów wykazujących anizotropię oraz własności nieliniowe.

Za celowe, z punktu widzenia Recenzenta, jest wyjaśnienie następujących kwestii:

- 1) Jaka była wielkość analizowanych modeli?
- 2) Jaka była metodologia wykreślania zaprezentowanych krzywych σ - ϵ mając na względzie złożoność modelowanych mikrostruktur?
- 3) Jaki rodzaj nieliniowych procedur numerycznych oraz jakie kryteria zbieżności zostały zaimplementowane do rozwiązania zaprezentowanych w rozdziale przypadków?

Rozdział 9. Generowanie RVE o dowolnym rozkładzie orientacji inkluzji (17 stron)

W ramach tego rozdziału Doktorant przedstawił zastosowanie metody optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami do tworzenia reprezentatywnych elementów objętościowych o zadanym rozkładzie orientacji inkluzji. Badane i analizowane we wcześniejszych rozdziałach przypadki trzech materiałów (RVE1, RVE2 i RVE3) zostały zastąpione modelami o zredukowanej liczbie inkluzji poprzez wykorzystanie nowej metody generowania RVE z zachowaniem tego samego rozkładu orientacji. Potwierdzeniem poprawności zaproponowanego podejścia było zaprezentowanie krzywych typu σ - ε zarówno dla przypadków przed redukcją, jak też i po redukcji. Otrzymane wykresy charakteryzują się bardzo dużą zbieżnością i tym samym potwierdzają wiarygodność takiego ujęcia zagadnienia.

Rozdział 10. Podsumowanie i wnioski (4 strony)

Autor w tej części rozprawy dokonał podsumowania rezultatów przeprowadzonych analiz. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki stanowią podstawę dla Doktoranta do dalszych badań nad rozwojem i zastosowaniem zaproponowanych metod. Godny podkreślenia jest to, że Doktorant widzi potrzebę wykonania badań eksperymentalnych wybranych materiałów kompozytowych, które to przyczynią się do walidacji uzyskanych rezultatów analiz numerycznych.

4. Ocena ogólna pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wnosi znaczny wkład badań w obszarze homogenizacji materiałów niejednorodnych z uwzględnianiem ich anizotropii oraz implementacji nieliniowych związków konstytutywnych służących do opisu ich zachowania. Na szczególne podkreślenie zasługuje w tej pracy szereg zaprezentowanych aspektów naukowych, w tym oryginalnych oraz poznawczych.

Na bardzo dużą wartość naukową rozprawy składają się w szczególności następujące elementy zaprezentowanej dysertacji:

- 1) zaproponowanie metody homogenizacji, która wykorzystuje metodę optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami oraz dwukrokową procedurę homogenizacji oraz wykazanie, że jest ona skutecznym i efektywnym narzędziem umożliwiającym numeryczne modelowanie wieloskalowe;
- 2) zastosowanie nowej metody optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami, która pozwala na zredukowanie liczby pseudo-ziaren wymaganych do rekonstrukcji zadanego rozkładu orientacji, w odniesieniu do wyników uzyskanych metodami przedstawionymi w literaturze, jak wykazuje Autor - tego typu podejście znacząco przyspiesza numeryczny proces homogenizacji;
- 3) zaproponowanie nowej metody generowania geometrii RVE wykorzystującej metodę optymalnej dyskretyzacji pseudo-ziarnami, która pozwala na tworzenie RVE o znacznie mniejszej liczbie inkluzji lub pustek wymaganej do odtworzenia zadanego rozkładu orientacji, w odniesieniu do metod przedstawionych w literaturze.

Doktorant w przedstawionej do oceny pracy nie uniknął drobnych błędów natury edycyjnej. W opinii Recenzenta, nie wpływają one jednak w sposób znaczny na całościową bardzo wysoką ocenę merytoryczną dysertacji.

Zagadnieniem, które niewątpliwie musi być pogłębione w następnych badaniach, jest bezpośrednio odniesienie otrzymanych rezultatów analiz numerycznych do wyników testów eksperymentalnych. Doktorant ten fakt wskazuje w kolejnych krokach swojego rozwoju naukowego determinując potrzebę walidacji uzyskanych rezultatów symulacji numerycznych.

Należy podkreślić, że Doktorant wykonał pracę doktorską na bardzo wysokim poziomie, a osiągnięte dotychczasowe wyniki już zamieścił w opublikowanych trzech artykułach w czasopiśmie z listy JCR. Ten fakt zasługuje na wyraźne podkreślenie i, w zależności od wyniku i przebiegu samej obrony, będzie mocnym argumentem w głosowaniu nad jej wyróżnieniem przez Radę Wydziału. W związku z powyższym, Recenzent, mając na względzie osiągnięte wyniki badawcze oraz poziom merytoryczny zaprezentowanej rozprawy, stawia wniosek do Rady Wydziału o jej wyróżnienie.

5. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska 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 późn. zm.) i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgra inż. WITOLDA OGIERMANA.

