

Częstochowa, 25.08.2021 r.

Prof. dr hab. Stanisław Kukla
Katedra Matematyki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

Opinia

o rozprawie doktorskiej mgr inż. Marcina Hatlasa
pt. „Modelling and optimisation of inhomogeneous
materials using granular computations”

Promotor pracy: dr hab. inż. Witold Beluch

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Jacek Ptaszny

Podstawa formalna wykonania opinii:

- pismo Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak, z dnia 26.05.2021 r.
- umowa o dzieło, nr UMC/2289/2021 dotycząca sporządzenia recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Hatlasa pt. „Modelling and optimisation of inhomogeneous materials using granular computations”.

1. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska pt. „Modelling and optimisation of inhomogeneous materials using granular computations”, jest napisana w języku angielskim. Tytuł rozprawy w języku polskim brzmi: „Modelowanie i optymalizacja materiałów niejednorodnych z wykorzystaniem obliczeń ziarnistych”. Praca zawiera 129 stron i składa się z ośmiu rozdziałów poprzedzonych spisem oznaczeń i symboli. Po ostatnim, ósmym rozdziale w rozprawie zamieszczono bibliografię oraz streszczenie w języku angielskim i polskim. Podpisy zamieszczone pod rysunkami są również w języku angielskim i polskim. Bibliografia zawiera 153 pozycje, w tym 7 artykułów, których współautorem jest Doktorant.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił wprowadzenie do tematyki rozprawy, sformułował cel pracy omówił zawartość kolejnych rozdziałów rozprawy doktorskiej. W przedstawionym przeglądzie literatury dotyczącej projektowania materiałów wskazuje na pozycje, w których prezentowane jest modelowanie wieloskalowe, techniki homogenizacji

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 30.08.2021

nr 987/D/2021 zat. 2021

i metody optymalizacji. Zwraca uwagę na zalety metody homogenizacji numerycznej, która opiera się na metodach numerycznych rozwiązywania problemów brzegowych, w szczególności metodzie elementów skończonych i metodzie elementów brzegowych. Podkreśla, że przy numerycznym określaniu własności materiałów niejednorodnych duże znaczenie ma uwzględnienie w obliczeniach niepewności wartości parametrów wejściowych charakteryzujących własności składników jednorodnych. Uwzględnienie wpływu niepewności parametrów jest możliwe, gdy obliczenia są prowadzone z wykorzystaniem analizy stochastycznej lub metody prezentowanej w rozprawie, w której wykorzystuje się własności liczb rozmytych i przedziałowych. Zwraca uwagę na wady metody, której podstawą jest analiza probabilistyczna i stochastyczne parametry wejściowe. Można powiedzieć, że w tej części rozdziału pierwszego, Doktorant uzasadnił podjęcie tematyki modelowania materiałów niejednorodnych z wykorzystaniem obliczeń ziarnistych i arytmetyki liczb rozmytych lub przedziałowych.

Sformułowany przez Doktoranta cel pracy polega na skonstruowaniu metody homogenizacji numerycznej wykorzystującej liczby przedziałowe i rozmyte, powierzchni odpowiedzi oraz metody optymalizacji globalnej do zagadnień wieloskalowych z niepewnymi parametrami i zagadnień odwrotnych. Proponowana metoda numeryczna ma pozwalać na rozwiązywanie zagadnień dotyczących ciał niejednorodnych, w szczególności materiałów porowatych, struktur auksetycznych, kompozytów wzmocnianych cząstkami i włóknami. Ponadto Doktorant przyjął jako cel pracy rozwiązanie zagadnień optymalizacji w projektowaniu materiałów o szczególnych własnościach makroskopowych. W ostatniej części rozdziału pierwszego, Autor przedstawił zakres pracy omawiając tematykę kolejnych rozdziałów.

Rozdział drugi rozprawy dotyczy homogenizacji numerycznej i homogenizacji odwrotnej. W pierwszej części Doktorant przedstawił przegląd literatury poświęconej tematyce tego rozdziału. Odwołując się do literatury wyróżnił efektywną i często stosowaną metodę homogenizacji pól uśrednionych (Mean-Field Homogenisation) oraz homogenizację polegającą na odpowiednim przyjęciu statystycznie reprezentatywnego fragmentu geometrii dla określenia mikrostruktury materiału (Representative Volume Element). Podkreślił, że zastosowanie reprezentatywnych elementów objętościowych do materiałów o strukturze okresowej pozwala na zwiększenie efektywności homogenizacji. W drugim podrozdziale rozdziału drugiego Doktorant omawia podstawowe modele mechaniczne materiałów. Stwierdza, że homogenizacja materiałów nieliniowych wymaga rozwiązania dużej liczby modeli lokalnych oraz stosowania metod iteracyjnych i dlatego jest bardziej złożona niż

homogenizacja materiałów liniowych. Homogenizacja numeryczna umożliwia wyznaczenie parametrów charakteryzujących własności makroskopowe materiału na podstawie danych mikroskopowych, natomiast homogenizacja odwrotna pozwala na wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących własności mikroskopowe materiału, gdy dane są parametry opisujące własności makroskopowe.

Rozdział trzeci rozprawy poświęcony ziarnistości informacji, zawiera również wprowadzenie do teorii liczb rozmytych i liczb przedziałowych. Na potrzebę wykorzystania ziarnistości informacji w modelowaniu materiałów niejednorodnych wskazują cechy charakteryzujące informacje ziarniste. Wykorzystanie właściwości informacji ziarnistych jest realizowane w obliczeniach numerycznych nazywanych obliczeniami ziarnistymi. Idea obliczeń ziarnistych prezentowanych przez Doktoranta opiera się na wykorzystaniu liczb rozmytych i arytmetyki przedziałowej. Własności liczb rozmytych i przedziałowych są omówione w oddzielnych podrozdziałach rozdziału trzeciego.

W rozdziale czwartym Doktorant omówił zagadnienie metamodelowania, które jest stosowane dla zapewnienia odpowiedniej dokładności obliczeń ziarnistych prowadzonych z wykorzystaniem liczb rozmytych i przedziałowych. Szczególną uwagę skupił na metamodelu, który jest nazywany metamodelem powierzchni odpowiedzi (response surface). Zastosowanie metamodelu powierzchni odpowiedzi pozwala na modelowanie układów silnie nieliniowych bez konieczności wykonywania złożonych operacji matematycznych na macierzach. Ważnym etapem tworzenia tego metamodelu jest zaprojektowanie eksperymentu na podstawie rodzaju oczekiwanej odpowiedzi. Doktorant omawia plany eksperymentu przedstawiając na rysunkach przykłady dla dwóch parametrów wejściowych. W obliczeniach numerycznych prezentowanych w rozprawie doktorskiej stosowana jest technika optymalnego wypełnienia przestrzeni, przy czym dla zwiększenia odległości między punktami w przestrzeni parametrów używany jest algorytm maxmin, który maksymalizuje minimum odległości między dwoma punktami. Relacje między parametrami wejściowymi i wyjściowymi opisuje wielomian stopnia drugiego, którego współczynniki są wyznaczane metodą najmniejszych kwadratów. Jakość przyporządkowania parametrów wyjściowych określa wprowadzony w pracy wskaźnik jakości (quality metrics). W dalszej części rozdziału czwartego Doktorant omawia wykorzystanie sieci neuronowych do wyznaczania nieliniowych relacji między danymi wejściowymi i parametrami odpowiedzi.

Przedmiotem rozdziału piątego są obliczenia ziarniste, których celem jest wyznaczenie własności makroskopowych materiału na podstawie niepewnych informacji o mikrostrukturze tego materiału z wykorzystaniem informacji ziarnistych. Dla opisu niepewnych

parametrów wejściowych materiału niejednorodnego stosowane są liczby przedziałowe lub rozmyte. Ziarnista homogenizacja numeryczna w pierwszym etapie wymaga analizy struktury i dopuszczalnych własności materiału. Na podstawie informacji o mikrostrukturze materiału budowany jest reprezentatywny element objętościowy, którego opis jest uwzględniany w programie komputerowym rozwiązującym zagadnienie metodą elementów skończonych. Obliczenia numeryczne modeli parametrycznych wykonywane na podstawie przyjętego planu eksperymentu pozwalają na wygenerowanie powierzchni odpowiedzi i wyznaczenie wskaźnika jakości. Zaletą tego podejścia jest to, że wyniki pośrednie otrzymane metodą elementów skończonych nie muszą być zachowane, ponieważ w dalszych obliczeniach wykorzystywane są tylko parametry odpowiedzi. Autor podkreśla, że jeśli obliczenia są wykonywane z użyciem skierowanej arytmetyki przedziałowej, to kierunek wejściowego parametru przedziałowego jest istotny dla uzyskania poprawnych wyników obliczeń. Uzyskane makroskopowe własności materiału mogą być użyte jako niepewne dane wejściowe do dalszych symulacji komputerowych, np. do wyznaczenia naprężeń, analizy modalnej, itd. Kolejny podrozdział rozdziału piątego jest poświęcony odwrotnej homogenizacji ziarnistej czyli problemowi wyznaczenia zakresu parametrów określających własności mikroskopowe materiału, gdy znane są jego własności makroskopowe.

W rozdziale szóstym zaprezentowano wyniki obliczeń dotyczących modelowania materiałów niejednorodnych z wykorzystaniem homogenizacji ziarnistej i arytmetyki przedziałowej lub rozmytej. Badania numeryczne wykonano dla czterech rodzajów materiału niejednorodnego. Wyniki przedstawione w pierwszym podrozdziale dotyczą modelowania materiału z równomiernie rozmieszczonymi pustkami. Mikrostrukturę tego materiału reprezentuje element objętościowy zawierający 216 równomiernie rozmieszczonych pustek sferycznych. Dyskretyzacja obszaru zajmowanego przez materiał na 248832 elementy sześciokątne prowadzi do 1133209 węzłów. Wyniki obliczeń dla przyjętego materiału porowatego zestawiono w tablicach. Autor podkreśla, że uzyskane wyniki obliczeń nie różnią się znacząco od wyników rozwiązania analitycznego prezentowanych w literaturze. Wskazuje, że obserwowane różnice mogą być spowodowane przez zastosowanie przemieszczeniowych warunków brzegowych, które przyczyniają się do zawyżenia wyników obliczeń.

Drugi przykład zastosowania ziarnistej homogenizacji numerycznej dotyczy obliczeń parametrów charakteryzujących własności kompozytu wykonanego z żywicy epoksydowej z równomiernie i jednokierunkowo rozmieszczonymi włóknami węglowymi. Niektóre stałe określające własności materiału są reprezentowane przez trójkątne liczby rozmyte. Analiza otrzymanych wyników prowadzi do wniosku, że liczby rozmyte odpowiedzi nie są trójkątne.

Autor stwierdza, że jest to spowodowane przez nieliniowy związek między parametrami wejściowymi i wyjściowymi. Otrzymane wyniki porównano z wynikami rozwiązania analitycznego prezentowanego w literaturze. Różnice wyników można uzasadnić uproszczeniami przyjętymi przez autora rozwiązania analitycznego.

W kolejnym przykładzie Doktorant przedstawia wyniki obliczeń dotyczące materiału wzmocnionego cząstkami. Mikrostruktura materiału jest reprezentowana przez komórki elementarne zawierające sferyczne wtrącenia, a wartości niepewnych danych reprezentują liczby rozmyte. Na różnych etapach realizacji obliczeń numerycznych stosowano obliczenia równoległe i sieci neuronowe. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach. Zamieszczono analizę otrzymanych wyników obliczeń numerycznych.

W przykładzie czwartym przedstawione są wyniki badań numerycznych własności makroskopowych materiału auksetycznego uwzględniając nieliniowość własności materiału. Dla określenia makroskopowych sztywności zbudowano metamodel przy użyciu sieci neuronowych i zastosowano arytmetykę przedziałową. Stwierdzono zgodność wyników obliczeń z wynikami uzyskanymi na podstawie uproszonego modelu analitycznego.

W rozdziale siódmym zaprezentowano przykłady zagadnień odwrotnych, których rozwiązanie polega na wyznaczeniu optymalnych, wejściowych zakresów wartości parametrów mikrostruktury dla uzyskania założonych własności makroskopowych materiału. Przedmiotem badań numerycznych był materiał kompozytowy wzmocniony włóknami i materiał auksetyczny. W pierwszym przykładzie celem było wyznaczenie optymalnej, pojedynczej niepewnej wartości współczynnika macierzy sztywności oraz długości przedziału wyznaczonej wartości parametru. W drugim przykładzie, zagadnienie polega na wyznaczeniu dwóch niepewnych wartości elementów macierzy sztywności, a także długości przedziałów wyznaczonych wielkości optymalnych. W obu przykładach stosowano algorytm optymalizacji jednokryterialnej z wykorzystaniem sum ważonych oraz algorytm optymalizacji wielokryterialnej wyznaczający front Pareto. W Podsumowaniu Doktorant podkreśla, że podejście prezentowane w drugim przykładzie może być użyte do zagadnienia optymalizacji odwrotnej, której celem będzie wyznaczenie wielu współczynników macierzy sztywności. W kolejnym podrozdziale rozdziału siódmego przedstawiono wyniki badań numerycznych przeprowadzonych dla wzmocnionego materiału auksetycznego. Ostatni, ósmym rozdział pracy stanowi Podsumowanie, w którym wyszczególniono najważniejsze wyniki i wskazano kierunki dalszych badań.

2. Uwagi i spostrzeżenia

Praca jest napisana starannie, jednak podczas czytania nasuwają się pewne uwagi i spostrzeżenia. Te uwagi i spostrzeżenia nie umniejszają pozytywnego odbioru całokształtu rozprawy doktorskiej. Do ważniejszych z nich należą:

- pod równaniem (4.8) jest objaśnione x_{nm} , jednak w równaniu (4.8) występuje x_{nm} jako element m -tego wiersza i n -tej kolumny, dlatego zamiast x_{nm} należało raczej wyjaśnić x_{ij} jako dowolny element macierzy. Ponadto w równaniu (4.8) przyjęto, że pierwszy wskaźnik oznacza numer kolumny, a drugi - numer wiersza czyli inaczej niż w pozostałych macierzach występujących w pracy. W literaturze stosowana jest umowa, że pierwszy wskaźnik elementu macierzy oznacza numer wiersza, a drugi numer kolumny.
- w nierówności (5.6) na stronie 56 występują macierze. Moim zdaniem ta nierówność powinna być objaśniona.
- w podrozdziale 6.4 na stronie 77, jest zdanie: „Auxetic materials are modern structures whose microstructure determines negative Poisson's ratios”, jednak poniżej tego tekstu podano wartość współczynnika Poissona $\nu = 0.4$. Dlatego przyjęta do obliczeń wartość współczynnika Poissona powinna być objaśniona w kontekście cytowanego zdania.
- jeśli w obliczeniach numerycznych stosowana jest skierowana arytmetyka przedziałowa, to rodzaj wejściowego parametru przedziałowego (*proper* lub *improper*) jest istotny dla uzyskania poprawnego wyniku obliczeń (rozdział piąty rozprawy doktorskiej). W związku z tym nasuwa się pytanie: jaki warunek wykorzystano dla właściwego określenia rodzaju wejściowych parametrów przedziałowych w obliczeniach numerycznych prezentowanych w rozprawie doktorskiej?

3. Ocena pracy

Problemy naukowe, które są przedmiotem opiniowanej rozprawy doktorskiej, są związane z modelowaniem numerycznym, analizą i optymalizacją materiałów niejednorodnych. Tematyka rozprawy jest ważna i interesująca z praktycznego punktu widzenia, gdyż wykorzystanie zaproponowanego podejścia pozwala na przewidywanie własności nowego materiału na etapie jego projektowania, a w szczególności umożliwia określenie wpływu zmian mikrostruktury materiału na własności tego materiału w skali makro. Doktorant zaproponował własne rozwiązanie problemu z uwzględnieniem niepewności wartości parametrów wejściowych. Prawidłowo zdefiniował zakres badań i dokonał prawidłowej syntezy opisywanych w literaturze metod rozwiązywania problemów modelowania

i optymalizacji materiałów, a także literatury dotyczącej arytmetyki przedziałowej, liczb rozmytych i zastosowań sieci neuronowych. Układ pracy jest odpowiedni, zamieszczone na końcu każdego rozdziału podsumowania ułatwiają śledzenie prezentowanych treści. Rozważania przedstawione w rozprawie wymagały od Autora zarówno bardzo dobrego przygotowania w zakresie mechaniki, jak i metod numerycznych, programowania komputerowego a także dobrego przygotowania matematycznego. Prezentowane problemy są w sposób prawidłowy i jednoznaczny ujęte, a sama rozprawa stanowi oryginalne ich rozwiązanie. Wysoka dokładność i efektywność stosowanej metody została potwierdzona przez porównanie wyników otrzymanych dla wybranych wartości parametrów z wynikami otrzymanymi innymi metodami prezentowanymi w literaturze. Ze względu na szczególne znaczenie przy projektowaniu nowych materiałów na uwagę zasługuje rozdział rozprawy, w którym prezentowane są przykłady obliczeniowe dotyczące zagadnienia odwrotnego. Sformułowany przez Doktoranta w pierwszym rozdziale rozprawy cel pracy został w pełni osiągnięty. Uwagi sformułowane w poprzednim rozdziale recenzji mają charakter polemiczny i nie obniżają mojej pozytywnej oceny pracy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawę oceniam jednoznacznie pozytywnie, uważam, że jest pracą wartościową wnoszącą wkład w rozwój dyscypliny naukowej Mechanika (Inżynieria Mechaniczna). Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Hatłasa pt. „Modelling and optimisation of inhomogeneous materials Rusing granular computations” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki.

Podsumowując, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgra inż. Marcina Hatłasa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

