

Prof. dr hab. inż. Jerzy Rojek
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa
e-mail: jrojek@ippt.pan.pl
tel. 600 202 430

Warszawa, 20.04.2023 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Dryzka
pt. „Multiscale finite element modeling of mechanical properties of selected
advanced materials”

Podstawa: Pismo prof. dr. hab. inż. Andrzeja Szaraty, Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 16 lutego 2023 r. informujące o powołaniu przez Radę Wydziału na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr. inż. Mateusza Dryzka

1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Dryzka pt. „Multiscale finite element modeling of mechanical properties of selected advanced materials” została przygotowana pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. inż. Witolda Cecota w Katedrze Technologii Informatycznych w Inżynierii Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Rozprawa jest napisana w języku angielskim. Podstawą przedstawionej rozprawy doktorskiej jest zbiór czterech artykułów opublikowanych w czasopismach z bazy JCR:

1. M. Dryzek and W. Cecot. A coupling of multiscale finite element method and isogeometric analysis. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 18(4):439–454, 2020.
2. M. Dryzek and W. Cecot. The iterative multiscale finite element method for sandwich beams and plates. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 122:6714–6735, 2021
3. M. Dryzek and E. Dryzek. Positron annihilation lifetime spectroscopy of ABS objects manufactured by fused deposition modelling. *Acta Physica Polonica A*, 132(5):1506-1508, 2017.
4. M. Dryzek, W. Cecot, and M. Tekieli. Experimental and multiscale computational static and dynamic study of 3D printed elements with mesostructure. *Finite Elements in Analysis and Design*, 215:103876, 2023.

Zbiór artykułów jest zawarty w rozdziale 3 rozprawy. Rozprawa zawiera ponadto cztery numerowane rozdziały, bibliografię obejmującą 57 pozycji (niezależnie od bibliografii każdego z artykułów), spis rysunków oraz streszczenia w języku angielskim i polskim.

Rozprawa doktorska jest przygotowana w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport należącej do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Praca jest poświęcona wieloskalowemu modelowaniu wybranych materiałów za pomocą tzw. wieloskalowej metody elementów skończonych (ang. Multiscale Finite Element Method – MsFEM). Rozpatrywanymi materiałami są materiały kompozytowe, belki i płyty warstwowe (ang. sandwich beams and plates) oraz materiały wytworzone technikami przyrostowymi (ang. additive manufacturing, 3D printing). Cel i zakres pracy oraz motywacja praktyczna są przedstawione we wstępie stanowiącym rozdział 1 rozprawy. Rozdział 2 zawiera przegląd literatury powiązany z wprowadzeniem do podstaw homogenizacji oraz modelowania wieloskalowego za pomocą wieloskalowej metody elementów skończonych.

Rozdział 3 zawierający zbiór 4 opublikowanych artykułów stanowi zasadniczą część rozprawy. Artykuł 1 przedstawia nowatorską koncepcję wykorzystania metod wypracowanych w analizie izogeometrycznej i zastosowania funkcji wyższego rzędu typu B-spline jako funkcji bazowych w MsFEM. W artykule 2 przedstawione jest modelowanie warstwowych belek i płyt za pomocą wieloskalowej metody elementów skończonych. W artykule 3 i 4 zawarte są wyniki badań doświadczalnych materiałów wytwarzanych metodami druku 3D. W artykule 4 ponadto przedstawiono dostosowanie wieloskalowej metody elementów skończonych do modelowania takich materiałów charakteryzujących się złożoną mezostrukturą.

Rozdział 4 rozprawy zawiera dodatkowe wyniki doświadczalne i numeryczne. W rozdziale 5 są przedstawione wnioski, uwagi końcowe oraz możliwe kierunki dalszych badań.

2. Ocena pracy

Tematyka pracy mieści się nowoczesnym nurcie modelowania wieloskalowego materiałów. Właściwości materiału w skali makroskopowej można wyznaczyć poprzez uwzględnienie struktury materiału w niższej skali – w skali mikro- lub mezoskopowej. Jest to alternatywa do modelowania fenomenologicznego w którym wyznacza się zależności konstytutywne na podstawie badań makroskopowych materiału. Uwzględnienie mikrostruktury jest niezbędne w projektowaniu nowoczesnych materiałów takich jak kompozyty lub materiały o złożonej mikro- lub mezostrukturze wytworzone metodami przyrostowymi. Materiały te mają bardzo szerokie zastosowanie w nowoczesnych gałęziach przemysłu, jak również w budownictwie. Modelowania wieloskalowe może przyczynić się do zmniejszenia kosztów i skrócenia czasu projektowania takich materiałów. Dlatego jest to bardzo ważny kierunek nowoczesnych metod modelowania materiałów.

Modelowanie wieloskalowe jest intensywnie rozwijane. Poszukiwane są lepsze i efektywniejsze obliczeniowo metody modelowania wieloskalowego. Jedną z metod modelowania wieloskalowego jest wieloskalowa metoda elementów skończonych (ang. MsFEM). Idea MsFEM polega na wprowadzeniu wieloskalowych funkcji bazowych złożonych z funkcji bazowych dla makroelementów tworzących rzadką siatkę oraz z funkcji bazowych dla siatek gęstych dyskretyzujących makroelementy. Obliczenia metodą MsFEM przebiegają w dwóch etapach – w pierwszym etapie obliczenia na gęstej siatce wewnątrz makroelementów pozwalają uzyskać macierze sztywności i wektory obciążeń makroelementów. W drugim etapie rozwiązanie zagadnienia wieloskalowego uzyskuje się przeprowadzając obliczenia na siatce rzadkiej (makroelementów). Metoda ta posiada istotne zalety w stosunku do innych metod modelowania wieloskalowego dlatego ważne są badania nad jej rozwojem prowadzone przez Kandydata i przedstawione w niniejszej rozprawie.

W artykule 1 zaproponowano zastosowanie wieloskalowych funkcji bazowych MsFEM wyrażonych poprzez wyższego rzędu funkcje typu B-spline (krzywe B-sklejane) rozpięte na

kilku makroelementach. Wykorzystano przy tym metody wypracowane w tzw. analizie izogeometrycznej. Zaletą tego podejścia jest obliczenie funkcji bazowej w jednym kroku w całym obszarze obliczeniowym w przeciwieństwie do dwuetapowych obliczeń w standardowym sformułowaniu MsFEM. W artykule przedstawione wyniki obliczeń testowych zagadnienia przepływu w periodycznym i losowym ośrodku porowatym. Pokazano zadowalające wyniki obliczeń jak również poprawę dokładności rozwiązania przy poprzez zwiększenie rzędu krzywych B-sklejanych.

W artykule 2 przedstawiono oryginalne sformułowanie MsFEM do analizy belek i płyt warstwowych. Zaproponowano nowe funkcje kształtu uwzględniające warunki brzegowe oraz zastosowano iteracyjną korektę rozwiązania. Opracowany model wieloskalowy został zweryfikowany poprzez porównanie wyników numerycznych z wynikami eksperymentalnymi prób zginania płyty warstwowej. Wykazano dużą zgodność porównywanych wyników.

W artykule 3 przedstawiono badania z wykorzystaniem spektroskopii czasu życia pozytonów (PALS) na próbkach z polimeru akrylonitrylo-butadieno-styrenowego (ABS) wytworzonych w procesie osadzania topionego materiału (ang. FDM – fused deposition modelling) w celu zbadania możliwości identyfikacji cech mikrostruktury wytworzonego materiału.

W artykule 4 przedstawiono wieloskalowe modelowanie materiału wytworzonego przyrostowo charakteryzującego się złożoną mezostrukturą. Do modelowania zastosowano MsFEM z aproksymacją wysokiego rzędu. Wyniki numeryczne zweryfikowano poprzez porównanie z wynikami doświadczalnymi uzyskanymi w próbach statycznego zginania i drgań swobodnych belek o różnych mikro(mezo)strukturach. Uzyskano dużą zgodność wyników numerycznych i doświadczalnych. Pokazano również, że funkcje kształtu wyższego rzędu mogą bardzo dokładnie reprezentować drgania własne nawet o wysokich częstotliwościach.

W rozdziale 4 przedstawiono dodatkowo zastosowanie i walidację MsFEM do metamateriałów o ujemnym współczynniku Poissona (auksetyków).

Tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport. Rozpatrywane zagadnienia, materiały, elementy konstrukcyjne (belki, płyty) oraz metody analizy znajdują zastosowanie w budownictwie (inżynierii lądowej).

Ogólnie wysoko oceniam zawartość merytoryczną rozprawy zwłaszcza artykułów nr 1,2 i 4. Włączenie artykułu nr 3 budzi moje zastrzeżenia z powodu bardzo nikłego związku z pozostałymi artykułami, z ogólnym celem rozprawy oraz zawartości mało związanej z dyscypliną rozprawy. Wyniki badań przedstawionych w artykule 3 nie są wykorzystywane w żaden sposób w innych badaniach. Niemniej jednak zawartość pozostałych artykułów cyklu i dodatkowe wyniki przedstawione w rozdziale 4 są wystarczające do pozytywnej oceny rozprawy.

Rozprawa zawiera istotne elementy oryginalne, do których zaliczam przede wszystkim:

- Zastosowanie funkcji typu B-spline (B-sklejanych) wieloskalowej metodzie elementów skończonych (MsFEM) do modelowania ośrodków niejednorodnych
- Wykorzystanie hierarchicznych funkcji wyższego rzędu w MsFEM do modelowania belek i płyt warstwowych. Opracowanie iteracyjnego schematu korekcyjnego
- Zastosowanie MsFEM do modelowania materiałów wytworzonych metodą druku 3D

Na uwagę zasługuje wykorzystanie badań doświadczalnych do walidacji części opracowanych algorytmów.

Przy pozytywnej ocenie ogólnej, praca ma pewne niedociągnięcia, nasuwają się drobne uwagi krytyczne.

1. W rozdziałach dodanych do cyklu prac w wielu przypadkach stosowany jest mało precyzyjny język, np. w tytule jest mowa o modelowaniu właściwości mechanicznych, wydaje się, że bardziej trafne byłoby stwierdzenie o „modelowaniu materiałów”, tym bardziej, że w rozprawie nie rozpatruje się właściwości samego materiału bazowego a nacisk położony jest na znaczenie mikro- lub mezostruktury
2. Przy dyskusji o właściwościach mechanicznych brak jest skonkretyzowania o jakich właściwościach jest mowa.
3. Autor nie definiuje precyzyjnie zagadnienia fizycznego modelowanego w artykule 1, mowa jest o przepływie, ale nie jest powiedziane czego to jest przepływ – płynu, a może ciepła? A jeśli przepływ płynu przez ośrodek porowaty to również można to precyzyjniej zdefiniować.

Przedstawione uwagi krytyczne są stosunkowo małej wagi.

3. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opisane osiągnięcia oraz ich oryginalny charakter, stwierdzam, że mgr inż. Mateusz Dryzek jest autorem rozprawy, w której przedstawił oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego z dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport, wykazał się ogólną wiedzę teoretyczną w tej dyscyplinie oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Dryzka spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, zatem wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



prof. dr hab. inż. Jerzy Rojek