



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

## Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
Tel: +48 (12) 617 51 54  
Fax: +48 (12) 617 29 21

**AGH**

prof. dr hab. inż. Łukasz Madej

e-mail: lmadej@agh.edu.pl

Kraków 27.02.2023

### Recenzja rozprawy doktorskiej:

#### *Multiscale finite element modeling of mechanical properties of selected advanced materials*

Autor rozprawy: mgr inż. Mateusz Dryzek

Niniejsza ocena została przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 16 lutego 2023 roku.

#### 1. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska, której podstawą jest tematycznie spójny cykl czterech publikacji dotyczących rozwoju wieloskalowej metody obliczeniowej typu MsFEM (Multiscale Finite Element Method). Przedstawiona do oceny praca doktorska całościowo liczy 108 stron i uwzględnia wstęp do zagadnienia, przegląd literatury z zakresu wybranych metod analizy wieloskalowej, cztery publikacje stanowiące cykl doktorski, rozdział z materiałami uzupełniającymi, podsumowanie oraz spis literatury. Całość uzupełniona jest wykazem rysunków oraz czterostronicowym streszczeniem w j. polskim. Wykaz literatury, z pominięciem wskazanych do oceny publikacji, jest dość skromny i zawiera tylko 57 prac, z których 10 opublikowano w okresie ostatnich pięciu lat. Szczególnie brakuje szerszego przedstawienia innych alternatywnych technik stosowanych do modelowania tego typu materiałów silnie niejednorodnych. Warto podkreślić jest natomiast uwzględnienie w spisie literatury pozycji o fundamentalnym charakterze w tym obszarze nawet z 1965 roku.

Tytuł rozprawy doktorskiej jest generalnie adekwatny do tematyki przedstawionego cyklu publikacji. Tak jak wspomniano, sam cykl składa się z czterech prac z okresu 2017-2023. Prace opublikowano w czasopismach o różnorodnym współczynniku oddziaływania tzw. IF (ang. impact factor), 1.591, 3.477, 0.577 oraz 2.628. Sumaryczna wartość to 8.273, a w odniesieniu do tzw. liczby punktów MEiN to 380. Szczególnie wartościowe są prace wydane w wiodących czasopismach z dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport tj. International Journal for Numerical Methods in Engineering oraz Finite Elements in Analysis and Design. W tym aspekcie, należy również podkreślić, że Doktorant jest pierwszym autorem we wszystkich pracach wchodzących w skład rozprawy doktorskiej. Trzy prace Doktorant przygotował ze

Wydziału Inżynierii Lądowej

06 MAR. 2023

Wpłynęło dnia...

L. dz. ...

10. 510. 21. 4. 2018

podpis...

swoim promotorem w zespole dwóch lub trzech osób, co podkreśla samodzielność jego pracy. Dodatkowo jedna publikacja przygotowana jest bez współudziału promotora i ta praca wydaje się odbiegać tematycznie od głównego nurtu osiągnięcia naukowego.

Przeprowadzone i opublikowane badania zostały pozytywnie zaopiniowane przez kolegia redakcyjne i niezależnych recenzentów we wspomnianych prestiżowych czasopismach naukowych, to potwierdza, że podjęcie tematyki było uzasadnione, a same badania zostały prawidłowo zaplanowane i zrealizowane. W związku z powyższym charakterystykę zrealizowanych prac oraz pewne uwagi do uzyskanych rezultatów przedstawię w sposób zbiorczy w niniejszej opinii.

## **2. Ocena pracy doktorskiej**

W pierwszym rozdziale Doktorant przedstawił ogólną motywację do podjęcia tematyki rozprawy doktorskiej wskazując na istotną rolę modelowania wieloskalowego w komputerowym wspomaganiu projektowania nowych materiałów i wyrobów końcowych. Rozdział drugi omawia kilka wybranych technik stosowanych w zagadnieniach modelowania wieloskalowego ze szczególnym uwzględnieniem podejścia MsFEM, w którym funkcje kształtu w każdym elemencie w skali makro są określane na bazie siatki gęstej, która uwzględnia morfologię mikrostruktury. W rezultacie możliwe jest zmniejszenie liczby stopni swobody, a tym samym skrócenie czasu obliczeń, co jest niezmiernie istotne w przypadku konieczności realizacji wielu obliczeń danego zagadnienia np. w analizie odwrotnej. Rozdział ten porusza również kwestię zwiększenia dokładności obliczeń o wieloskalowym charakterze. Wskazuje też na bardzo szerokie spektrum możliwych zastosowań tego typu modeli w wielu obszarach w których wykorzystywane są materiały inżynierskie o niejednorodnej budowie wewnętrznej.

Rozdział trzeci stanowi przedstawienie cyklu publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej. Tak jak wspomniano, kluczowe prace to publikacje oznaczone jako artykuł 1, artykuł 2 oraz artykuł 4. Pierwsze dwie pozycje stanowią omówienie głównego osiągnięcia rozprawy jakim jest opracowanie koncepcji oraz implementacja modyfikacji metody MsFEM, zwiększających jej dokładność. Artykuł 4 stanowi natomiast udaną próbę weryfikacji eksperymentalnej uzyskiwanych wyników obliczeń ze zmodyfikowanego podejścia MsFEM.

Artykuł 1 przedstawia zaproponowaną koncepcję wykorzystania krzywych sklepanych typu B-Spline opisujących kilka elementów w skali makro do określania funkcji bazowej. Koncepcja wykorzystania tego typu krzywych jest zaadaptowana z obszaru analizy izogeometrycznej. Analizowano również wpływ zwiększenia rzędu funkcji B-Spline na stabilność uzyskiwanych wyników. Zaimplementowane rozwiązanie zostało przetestowane na bazie problemu przepływu w ośrodkach porowatych, z założeniem periodycznego i losowego rozkładu własności materiału.

Artykuł 2 przedstawia zaproponowaną koncepcję wykorzystania hierarchicznych funkcji wyższego rzędu oraz iteracyjnego schematu korekcyjnego w algorytmie MsFEM do modelowania belek i płyt warstwowych ze złożoną strukturą kompozytową. Publikacja przedstawia serię testów numerycznych oraz weryfikację eksperymentalną na bazie testu zginania warstwowej płyty o falistym układzie.

Artykuł 4 stanowi kontynuację prowadzonych badań nad modyfikacją podejścia MsFEM

w kierunku weryfikacji uzyskiwanych wyników dla materiałów drukowanych o istotnych zastosowaniach inżynierskich. Rozdział przedstawia bardzo wartościowe wyniki badań własności mechanicznych prowadzonych na wydrukowanych obróbkach wsparte dodatkowo analizą cyfrowej korelacji obrazu umożliwiającą wizualizację pola odkształceń/przemieszczeń obciążanej konstrukcji. Takie wyniki można w sposób bezpośredni porównać z wynikami prowadzonych analiz numerycznych modelem MsFEM. Ilustrację zakresu prowadzonych uzupełniających badań eksperymentalnych opisuje rozdział czwarty rozprawy.

Cykl publikacji obejmuje również artykuł 3, który nie dotyczy kwestii modelowania numerycznego, a skupia się na wykorzystaniu techniki spektroskopii czasu życia pozytonów do oceny niejednorodności komponentów wydrukowanych techniką osadzania topionego materiału jakim jest termoplastyczny polimer. Praca przedstawia interesującą technikę badawczą, jednak jej powiązanie z głównym nurtem niniejszej rozprawy nie jest jednoznacznie wskazane.

Kolejny rozdział czwarty „Walidacja eksperymentalna” ma nietrafnie dobrany tytuł, ponieważ stanowi raczej uzupełnienie informacji przedstawionych w artykule 4. Kolejna przedstawiona analiza wykorzystania opracowanego podejścia w symulacji materiału o negatywnym współczynnik Poissona jest wartościowa ponieważ pokazuje uniwersalność podejścia, ale odniesie wyników do literaturowych badań eksperymentalnych jest dość ogólne.

Zestawienie wszystkich wyciągniętych z pracy wniosków znajduje się w ostatnim, piątym, rozdziale rozprawy. Pewien niedosyt pozostawia skrótowe potraktowanie możliwych planów dalszej pracy, szczególnie, iż doktorant dysponuje nie tylko zaawansowanym modelem numerycznym, ale również dostępem do wartościowego zaplecza laboratoryjnego.

### **3. Uwagi szczegółowe**

Praca napisana jest starannie z zachowaniem standardów tekstu naukowo-technicznego. Jakość ilustracji jest na dobrym poziomie, jednak opisy legendy oraz osi powinny być przygotowane z wykorzystaniem większej czcionki. W części opisów brakuje informacji o jednostkach w jakich dane są przedstawiane, co utrudnia interpretację wyników. W pracy występuje nieznaczna liczba drobnych błędów językowych.

### **4. Uwagi dyskusyjne**

Proszę przedstawić wyjaśnienia następujących kwestii w formie pisemnej:

- dlaczego w badaniach nad wykorzystaniem krzywych sklepanych tzw. B-spline w algorytmie MsFEM obliczenia prowadzone są w układzie bezwymiarowym?
- jak Doktorant określił dane materiałowe dla szerokiego spektrum analizowanych materiałów?. Jakie są techniki pozyskania danych materiałowych poszczególnych elementów składowych mikrostruktury w przypadku materiałów silnie niejednorodnych?
- czy opracowany model obliczeniowy jest zrównoleglony?. W opisie kilkakrotnie wspomniana jest taka możliwość, ale nie jest jasne, czy wersja równoległa kodu jest funkcjonująca.
- w pracy jako zaleta podejścia MsFEM wspomniane jest przyspieszenie obliczeń. Jakie czasy obliczeniowe są uzyskiwane dla podejścia MsFEM w stosunku do podejścia

realizowanego na gęstej siatce MES?

- w jaki sposób można określić minimalny rozmiar modelu spełniający warunki RVE?
- na jakiej podstawie obliczenia, dla akurat tak dobranej siatki MES, potraktowano jako referencyjne?
- jakie inne techniki pomiarowe umożliwiają określenie wewnętrznej niejednorodności budowy materiałów np. drukowanych?
- jakie parametry zastosowywano do analizy DIC np. subset size, czy na komponent naniesiono dodatkowe markery tzw. pattern?

## 5. Podsumowanie

Doktorant na bazie zaproponowanych założeń właściwie przeprowadził prace w swoim doktoracie wykazując się wymaganą dojrzałością naukową. Zaprezentował umiejętności i wiedzę niezbędną do samodzielnego sformułowania oraz rozwiązania zagadnienia naukowego.

Za główne osiągnięcia pracy uważam:

- opracowanie koncepcji oraz implementację krzywych sklepanych tzw. B-spline w algorytmie MsFEM,
- opracowanie koncepcji wykorzystania hierarchicznych funkcji wyższego rzędu oraz iteracyjnego schematu korekcyjnego w algorytmie MsFEM,
- testy opracowanych modyfikacji algorytmu MsFEM dla szerokiego spektrum materiałów o niejednorodnej budowie,
- weryfikacja uzyskanych wyników obliczeń ze zmodyfikowanego algorytmu MsFEM z wynikami badań laboratoryjnych.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne są w dużej mierze dyskusyjne i wynikają z zainteresowania recenzenta przedstawioną rozprawą. Praca w skali wymiarowej, z którą zmierzył się doktorant jest niezwykle skomplikowana i złożona. W związku z powyższym, przedstawione uwagi nie obniżają pozytywnej oceny przedstawionej rozprawy doktorskiej. Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska, spełnia warunki określone obowiązującą ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym z 16 kwietnia 2003 r. z późn. zm. Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Dryzka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Mateusz Dryzka*