



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 24.06.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej:

Finite element modeling of moving weak discontinuities using laminated microstructures

Autor rozprawy: mgr inż. Jędrzej Dobrzański

1. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska składająca się ze wstępu, siedmiu rozdziałów, a także podsumowania oraz spisu literatury. Dodatkowo na końcu zamieszczono pięć aneksów rozszerzających pewne treści merytoryczne poruszane w rozprawie. Całość dysertacji przedstawiona została na 119 stronach. Wykaz literatury zawiera 188 pozycji, z których 22 opublikowano w okresie ostatnich pięciu lat, co świadczy o aktualności i istotności poruszanych zagadnień badawczych. Dwie z cytowanych prac są współautorstwa Autora rozprawy, a przynajmniej 9 związana jest z grupą badawczą pod kierownictwem promotora prof. Stanisława Stupkiewicza, w której realizowana była praca, co jednoznacznie wskazuje na duże doświadczenie najbliższego otoczenia Doktoranta w obszarze poruszanych zagadnień.

Problematyka rozprawy doktorskiej dotyczy modelowania numerycznego materiałów silnie niejednorodnych, w których kluczowym aspektem jest właściwy opis zjawisk i mechanizmów występujących na granicy oddziaływujących ze sobą obszarów. Tematyka modelowania tego typu nieciągłości z uwzględnieniem ich ruchomych powierzchni jest aktualnie bardzo intensywnie rozwijana w wielu ośrodkach naukowych w kraju i za granicą. Zainteresowanie to wynika bezpośrednio z rozwoju coraz bardziej złożonych materiałów inżynierskich, które swoje, często unikatowe własności zawdzięczają bardzo złożonej budowie mikrostrukturalnej. Możliwość bezpośredniego uwzględnienia roli poszczególnych składników struktury materiału jest natomiast kluczowa z punktu przewidywania rozwoju lokalnych niejednorodności o pozytywnym ale i negatywnym wpływie na odpowiedź wyrobów gotowych podczas wytwarzania i późniejszej eksploatacji.

Należy podkreślić, że prace nad takimi zaawansowanymi technikami obliczeniowymi wymagają połączenia wiedzy z zakresu inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej, a także informatyki technicznej aby możliwe było dostarczenie rozwiązań spełniających wygórowane i często przeciwstawne oczekiwania odnośnie wzrostu dokładności wyników oraz

redukcji czasu obliczeń.

W tym aspekcie recenzowana praca wnosi wkład w obszar badań numerycznych nad zagadnieniem efektywnego modelowania stabilnych oraz ruchomych powierzchni nieciągłości występujących w wielu materiałach inżynierskich.

2. Ocena pracy doktorskiej

W pierwszym rozdziale Autor przedstawił ogólną motywację do podjęcia tematyki rozprawy doktorskiej związaną z próbą modelowego opisu coraz bardziej złożonych kształtów analizowanych domen obliczeniowych w skali makroskopowej ale i na poziomie mezo- czy mikrostrukturalnym. Słusznie zwrócono uwagę na wady i zalety dyskretyzacji siatkami zgodnymi i niezgodnymi w opisie nieciągłości zarówno w przestrzeni dwu- jak i trójwymiarowej. Na tej podstawie wskazano cel pracy oraz dokonano ogólnej charakterystyki układu kolejnych rozdziałów. W tej części doktorant jednoznacznie wskazał na dwie własne publikacje naukowe wydane w renomowanych czasopismach, które stanowią bardzo istotną bazę do rozszerzonej dyskusji w ocenianej dysertacji.

Drugi rozdział stanowi przegląd stanu literatury. Warte podkreślenia jest, iż ta część, w przeciwieństwie do większości pracy doktorskich nie ma charakteru opisu książkowego omawiającego założenia kolejnych podejść do modelowania nieciągłości w materiałach. Wręcz przeciwnie, doktorant wykazał się dużą pracowitością oraz umiejętnością syntetycznego przedstawienia kolejnych, istotnych osiągnięć w analizowanych rozwiązaniach, które pojawiały się w literaturze na przestrzeni ponad 100 lat. W tym aspekcie niezmiernie jasno i zrozumiale zaprezentowane zostały kolejne kroki milowe w zakresie opracowania metod do modelowania stabilnych i ruchomych nieciągłości. Szczególnie wartościowa jest dyskusja wad i zalet metod bazujących na uwzględnieniu granicy faz w formie bezpośredniej i rozmytej (ang. sharp, diffuse interface). Takie potraktowanie tematu jest dużo bardziej złożone niż opis o charakterze książkowym i jednoznacznie potwierdza bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora. W mojej ocenie przegląd literatury jest przygotowany w sposób wzorcowy. Wartościowym uzupełnieniem tej części byłoby natomiast omówienie osiągnięć w zakresie modelowania poruszających się granic nieciągłości pojawiających się w analizowanych materiałach w czasie trwania danego procesu np. rozrost ziaren podczas rekryształizacji dynamicznej. Doktorant wspomina o tym wyzwaniu w końcowej części swojej rozprawy.

Zagadnieniom opisu warsztatu badawczego wykorzystanego w rozprawie poświęcony jest rozdział trzeci. Praca ma charakter badań teoretycznych z wykorzystaniem zaawansowanego aparatu matematycznego oraz modeli mechaniki ciała stałego z zakresu liniowej sprężystości oraz sprężysto-plastyczności w oparciu o skończone odkształcenia. Doktorant zaprezentował podstawowe równania modeli do opisu stabilnych oraz ruchomych nieciągłości reprezentujących głównie granice rozmaitych składników mikrostruktury materiałów, które doktorant nazywa fazami. Wprowadzono również pojęcia metody elementów skończonych, metody pola fazowego, metody poziomice oraz koncepcję mikrostruktur warstwowych, które są wykorzystywane w niniejszej pracy. W tym aspekcie ograniczono się do przedstawienia podstawowych założeń wspomnianych metod bez zbędnych szczegółów co pozytywnie wpływa na przejrzystość pracy. Równocześnie Doktorant wskazał kluczową literaturę

rozszerzającą omówienie poruszanych zagadnień.

W rezultacie informacje przedstawione w rozdziale 2 oraz 3 umożliwiły sformułowanie koncepcji nowej metody obliczeniowej do symulacji poruszających się nieciągłości (granic elementów mikrostrukturalnych - mikroobszarów) w rozdziale 4. Zaproponowane i zaimplementowane podejście bazuje na koncepcji metody elementów skończonych i opisu granicy mikroobszarów z wykorzystaniem tzw. elementów warstwowych LET (ang. laminated element technique). W mojej opinii zaproponowane rozwiązanie jest niezmiernie intuicyjne i stanowi pewien pomost pomiędzy bardzo uproszczonymi i złożonymi podejściami do opisu nieciągłości w materiałach. W rozdziale tym Doktorant wprowadza pewne założenia, które jednak nie są obszernie uzasadnione np. wykorzystanie tylko elementów czterowęzłowych lub ośmiowęzłowych odpowiednio w 2D oraz 3D. Niedosyt pozostawia również dyskusja nad możliwością rozszerzenia zaproponowanego opisu do elementów opisujących więcej niż dwa mikroobszary, która została przeniesiona do części z aneksami. W mojej opinii przedstawienie oraz dyskusja uzyskanych wyników z zaproponowanego podejścia powinna zostać przedstawiona w kolejnym 5 rozdziale pracy, a nie w rozdziale 6. Wydaje się, że takie ułożenie treści rozprawy w bardziej intuicyjny sposób wprowadzałoby czytelnika w kolejne opracowane modyfikacje metody bazujące na jej połączeniu z metodą pola fazowego. Ta modyfikacja jest natomiast omówiona już w kolejnym rozdziale 5. W rozdziale tym Doktorant wskazuje miejsca modyfikacji równań metody pola fazowego umożliwiające wprowadzenie metody LET, głównie w obszarze modyfikacji zasady pracy wirtualnej. Wyjaśnia również podstawową różnicę w opisie granicy nieciągłości pomiędzy metodą pola fazowego a zaproponowaną modyfikacją. Wskazuje również, że opracowana metoda LET-FP nie zapewnia tak wysokiej dokładności opisu nieciągłości jak metoda XFEM, jednak jej zaletą jest prostota implementacji, która ogranicza się jedynie do ingerencji na poziomie definicji elementu skończonego. W opisie rozdziału omówiono również zaproponowane podejście do rozwiązywania problemów ze zbieżnością zaproponowanego rozwiązania. W tym przypadku rysunek 5.3 wymaga jednak pewnego wyjaśnienia.

Tak jak wspomniano wyniki obliczeń metodą LET oraz LET-FP wraz z obszerną ich dyskusją zamieszczono kolejno w rozdziałach 6 i 7. Rozdział 6 zawiera pięć zdefiniowanych przypadków testowych o wzrastającym stopniu złożoności zagadnienia. Wyniki uzyskane z zaproponowanej metody LET w każdym przypadku odnoszone są do najprostszego rozwiązania jakim jest wykorzystanie siatki zgodnej oraz klasycznych podejść do problemu w przypadku siatki niezgodnej tj. uwzględnienie przypisania faz do danego elementu lub do punktów całkowania Gaussa w danym elemencie. Tego typu podejścia są często stosowane w literaturze ponieważ zapewniają akceptowalny poziom dokładności wyników bez wydłużenia czasu symulacji. Doktorant zdefiniował warunki początkowe oraz brzegowe analizowanych przypadków testowych. Część z nich była realizowana również w przestrzeni 3D. Niestety w żadnym przypadku nie określił jednostek stosowanych wielkości fizycznych, co nie jest konieczne w przypadku teoretycznej analizy problemu, ale pożądane z punktu widzenia ich praktycznego wykorzystania. Komentarz odnośnie czasów obliczeń wykorzystywanymi metodami również byłby wartościowym uzupełnieniem tego rozdziału. W dyskusji wyników nie jest także w pełni jasne z czego wynika gorsze zachowanie metody GLPA w porównaniu do ELA. Wartościowym elementem omawianego rozdziału jest krótkie podsumowanie

jednoznacznie wskazujące na zalety oraz ograniczenia zaproponowanej metody LET co stanowiło bezpośrednią motywację do opracowania połączenia LET z metodą pola fazowego (Rozdział 5). Wyniki uzyskane z takiej hybrydy Doktorant przedstawił w Rozdziale 7 na przykładzie trzech przypadków testowych. Zdefiniowane zagadnienia uwzględniały przypadki ewolucji granicy nieciągłości w czasie i były również szeroko opisane w jednej z publikacji naukowych doktoranta. Uzyskane wyniki zaproponowaną metodą były porównywane z wynikami z metody pola fazowego oraz, gdzie było to możliwe, z rozwiązaniem analitycznym analizowanego problemu. Dyskusja możliwości metody LET-FP przedstawiona jest w bardzo przejrzysty sposób, z wieloma dodatkami na wykresach ułatwiającymi podążanie za argumentacją Doktoranta. W jednoznaczny sposób wykazano przypadki modelowania zjawisk fizycznych, w których zaproponowana metoda LET-FP zapewnia dokładniejsze wyniki niż FP.

Rozdziały 4-7 jednoznacznie wskazują, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Rozdział 8 podsumowuje zrealizowane prace, przedstawiając kolejne zrealizowane zadania badawcze i główne osiągnięcia. Wartościowym dodatkiem jest również opis dalszych planów badawczych z wykorzystaniem opracowanych rozwiązań.

3. Uwagi szczegółowe

Praca napisana jest niezmiernie starannie, z zachowaniem najwyższych standardów tekstu naukowo-technicznego. Jakość oraz forma ilustracji poglądowych oraz wykresów przedstawiających obszerny zestaw wyników symulacji numerycznych jest bardzo dobra. W pracy występuje minimalna liczba drobnych błędów gramatycznych i edytorskich np. LET=FP.

4. Uwagi dyskusyjne

Proszę przedstawić wyjaśnienia następujących kwestii w formie pisemnej:

1. Jakie modyfikacje należy wykonać aby uogólnić metodę LET-PF do zagadnień odkształceń skończonych?
2. W przypadku analizy przedstawionej w rozdziale 6.4 proszę o wyjaśnienie procedury postępowania w sytuacji kiedy element przecinany jest przez więcej niż dwa włókna znajdujące się w osnowie.
3. W jakiej formie wprowadzone są periodyczne warunki brzegowe?
4. Proszę o próbę ilościowej oceny wskazanego w tekście pracy zaburzenia symetrii w końcowym wyniku z rysunku 7.16.
5. Jakie podejścia można zastosować do minimalizacji potencjalnego efektu mesh-pinning?
6. Czy aktualna implementacja metody obejmuje techniki zrównoleglenia kodu pod procesory jednostek centralnych lub kart graficznych?
7. Jakie są możliwe przyczyny gorszego zachowania metody GLPA w porównaniu do ELA?
8. Proszę obszerniej omówić kolejne kroki algorytmu przedstawione na rysunku 5.3.
9. Dlaczego analizy metodą LET-FP ograniczono jedynie do przypadków 2D?
10. Czy jest możliwość wykorzystania opracowanego rozwiązania do modelowania materiałów o silnie niejednorodnych kształtach drugiej fazy, gdzie spełnienie kryteriów

do stosowania koncepcji mikrostruktury warstwowej może być trudne?

11. Proszę przedstawić przykładowe wyniki analizy ilustrujące, iż zaproponowane w trakcie pracy modyfikacje równania 4.5 nie spełniły swoich założeń.
12. Czy możliwe jest zaproponowanie koncepcji poprawiającej opis ułamka danej fazy w przypadku elementów skończonych w 3D?
13. Jakie są możliwości i ograniczenia wykorzystania innych typów elementów skończonych w opracowanych rozwiązaniach?

Podsumowanie

Autor 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, sformułowanie i implementację nowej metody obliczeniowej do analizy nieciągłości w materiałach na bazie mikrostruktur warstwowych,
- opracowanie, sformułowanie i implementację rozszerzenia opracowanej metody poprzez jej integrację z metodą pola fazowego,
- wnikliwą i rzetelną analizę porównawczą wyników uzyskiwanych z zaproponowanych metod z innymi dostępnymi w literaturze metodami stosowanymi do tej klasy problemów.
- nienaganne przygotowanie koncepcji i opisu pracy wskazujące na dużą dojrzałość naukową.

Przedstawione powyżej uwagi są w dużej mierze dyskusyjne i wynikają z zainteresowania recenzenta przedstawioną rozprawą. W związku z powyższym, uwagi te nie obniżają pozytywnej oceny przedstawionej rozprawy doktorskiej, która jest wartościową pozycją naukową, a w przyszłości będzie miała również praktyczny wydźwięk. Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska, jest dziełem dysertabilnym i spełnia warunki określone Ustawą z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Jędrzeja Dobrzańskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Równocześnie biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny oraz edycyjny rozprawy, a także oryginalność zaproponowanych rozwiązań numerycznych, wnioskuje o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Jędrzeja Dobrzańskiego.

