

Prof. dr hab. inż. Marek Lefik

Politechnika Łódzka

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

Katedra Budownictwa Betonowego

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź.

Łódź, 19 kwietnia 2026 roku.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Krystiana Bieńka, zatytułowanej:
„Anisotropy of Composite Material Properties Induced by Microstructure Morphology -
Micromechanical and Numerical Modelling in Non-Linear Regime”**

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania recenzji jest decyzja Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Kamilowi Krystianowi Bieńkowi oraz list w tej sprawie od Sekretarza Rady Naukowej IPPT PAN, Pana profesora Zbigniewa Ranachowskiego.

2. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska napisana przez mgr inż. Kamila Bieńka w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Promotorem pracy jest profesor dr hab. inż. Katarzyna Kowalczyk-Gajewska.

Rozprawa doktorska napisana jest po angielsku. Praca liczy 119 stron, jest podzielona na 7 rozdziałów, ilustruje ją 111 rysunków i wykresów oraz 35 tabel. Spis literatury zawiera 95 pozycji. Streszczenia w języku angielskim i polskim umieszczono na początku rozprawy.

3. Szczegółowa analiza treści rozprawy i jej ocena merytoryczna

Wraz ze wzrostem możliwości technologicznych i pojawianiem się nowych technik wytwarzania materiałów, coraz więcej konstrukcji jest kształtowanych z wykorzystaniem sztucznych materiałów heterogenicznych o mikrostrukturach zaprojektowanych inżyniersko, aby sprostać stale rosnącym wymaganiom dotyczącym ich wytrzymałości, lekkości i innym właściwościom. Rosnąca złożoność na poziomie mikrostruktury znacznie komplikuje analizę zachowania konstrukcji, dając równocześnie nowe możliwości racjonalnego jej projektowania. Zastosowanie dobrze znanej metody elementów skończonych (MES) do analizy takich struktur poprzez łączenie wszystkich szczegółów i właściwości mikrostruktury oraz materiałów składowych, nawet jeśli jest możliwe numerycznie, nie może być rozumiane jako rozsądne podejście do analizy struktur z materiałów mikro-niejednorodnych, gdyż rozmiar modelu elementów skończonych dla rozwiązania zadania racjonalnego projektowania takiej struktury z łatwością przewyższy możliwości większości komputerów, którymi dysponujemy. Rozumie

to Autor ocenianej rozprawy (cytuje ze strony 9. dysertacji: " ...such a "brute force" approach is still relatively resource-inefficient ..."). Stąd podjęty przez Niego wysiłek doskonalenia metod modelowania ośrodków z mikrostrukturą, czemu poświęcona jest oceniana rozprawa doktorska.

Nie wątpię, że również czyste potrzeby poznawcze były motywacją napisania tej pracy doktorskiej, gdyż nawet jeśli wybrana metoda modelowania nie jest ani jedyna ani uniwersalna, to jednak zadanie jej wyraźnego udoskonalenia jest samo w sobie interesujące.

Praca doktorska Pana Kamila Bieńka poświęcona jest modyfikacji metody homogenizacji, znanej jako metoda Mori-Tanaka (MT), w ten sposób, aby możliwe było modelowanie w jej ramach efektów związanych z geometrią i właściwościami materiałowymi układu inkluzji (takich jak np. zapowiedziana w tytule anizotropia właściwości materiałów kompozytowych indukowana przez mikrostrukturę) oraz modelowanie numeryczne nieliniowych zachowań makroskopowych kompozytu uwarunkowanych mikromechanicznie. Nie było to w pełni możliwe w ramach klasycznej wersji modelu MT.

W tym sensie tytuł rozprawy doktorskiej jest sformułowany prawidłowo i dobrze odzwierciedla jej zawartość.

Należy również stwierdzić ponad wszelką wątpliwość, że **tak zrozumiana tematyka doktoratu sytuuje prowadzone rozważania w ramach dyscypliny „Inżynieria mechaniczna”**. Konkluzje tę wspierają również zagadnienia szczegółowe, którymi Autor egemplifikuje swoje tezy (optymalizacja wielokryterialna kompozytów metalowo-ceramicznych)

Wyraźnie sformułowane są również tezy doktoratu, choć zamiast klasycznej formy tezy podlegającej udowodnieniu w treści rozprawy – przybierają one postać celów naukowych, które Autor zamierza zrealizować. Są to następujące cele:

- Rozszerzenie i weryfikacja mikromechanicznego modelu klastra w metodzie pola średniego w nieliniowym zakresie odpowiedzi materiału (sprężysto-plastyczności i sprężysto-lepko-plastyczności) oraz
- zaproponowanie i przetestowanie procedur znajdowania optymalnej mikrostruktury kompozytu, biorąc pod uwagę jego pożądane właściwości dla różnych zastosowań.

Tezy te, lub raczej cele szczegółowe, zrealizowane są w pełni w rozprawie. Będzie to podkreślane w tej opinii raz jeszcze w jej dwóch końcowych sekcjach.

3.1. Rozdział pierwszy dysertacji zawiera w sekcji pierwszej sformułowanie ogólne przedmiotu rozważań, przedstawiając ogólnie problematykę ośrodków niejednorodnych. W części drugiej przedstawiono przegląd literatury zaś w części trzeciej tego rozdziału - cel i zakres pracy, w tym – cytowane już powyżej tezy rozprawy. Omówiono tu również krótko układ pracy i zapowiedziano syntetycznie treść poszczególnych rozdziałów.

Oceniając przedstawiony przegląd literatury należy stwierdzić, że jest on wyczerpujący z punktu widzenia przyjętej w doktoracie metody analizy kompozytów, to znaczy analizy wywiedzionej z mechaniki inkluzji w nieskończonej matrycy. Prawidłowo wskazane są źródła tego podejścia: problem Eshelby'ego, zakładający pojedynczą inkluzję elipsoidalną w nieskończonym liniowo sprężystym ośrodku, poddaną jednorodnemu obciążeniu zewnętrznemu zlokalizowanemu w nieskończoności jako problem wyjściowy dla budowania teorii kompozytów, z właściwą im techniką uśredniania pól fizycznych i definiowania jednorodnych stałych materiałowych dla zapisu związków pomiędzy tymi uśrednionymi polami. W tym kontekście scharakteryzowano krótko model Mori-Tanaka (MT) oraz opisano wszystkie znane mi sposoby jego modyfikacji oraz metody pokrewne jak np. model autokoherentny (selfconsistent), wskazując jednocześnie prace, które mogą być rozumiane jako prekursorskie dla rozwiniętej przez Autora teorii klastra inkluzji jako modelu struktury niejednorodnej. **W tym sensie przedstawiony przegląd literatury jest kompletny.** Pewien

niedosyt pozostawia fakt, że bardzo niewiele powiedziano tu o innych możliwych i szeroko stosowanych teoriach kompozytów, takich jak metoda homogenizacji asymptotycznej (E. Sanchez-Palencia), metoda minimalnych warunków kinematycznych (S. Mesarovic and J. Padbidri). Bardzo krótko wzmiankowana jest, ważna dla rozważań podejmowanych w kolejnych rozdziałach, metoda eksperymentu numerycznego (Zohdi i Wriggers, czy B. Schrefler). W kontekście tych metod można było poprowadzić dyskusję porównawczą oraz dyskusję jakości zbudowanego w pracy przybliżenia w stosunku do rozwiązania dokładnego zagadnienia z mikrostrukturą.

3.2. W rozdziale 2. Doktorant wyjaśnia zasady budowy modelu klastrowego, jego teorię, procedurę zastosowania, a także analizuje jego zachowanie i zbieżność uzyskanych tą drogą wyników. Opracowany w doktoracie model jest rozszerzeniem klasycznego modelu Mori-Tanaki poprzez uwzględnienie interakcji między parami inkluzji oprócz (jak w klasycznym modelu MT) interakcji między inkluzjami a matrycą. W tym modelu tworzona jest elementarna objętość sześcienna (podobna do komórki periodyczności) zawierająca skończoną liczbę inkluzji, która jest następnie okresowo powielana w celu wypełnienia całej przestrzeni, reprezentując cały materiał. To klastrowe rozszerzenie modelu MT będę w dalszym ciągu tej opinii określał skrótem KMT.

W kolejnych sekcjach tego rozdziału Doktorant, nawiązując do prac Pani Promotor Jego rozprawy, formułuje podstawowe równania modelu KMT. Następnie formułuje algorytm podstawowy budowy modelu KMT w formie listy kolejnych kroków obliczeniowych. Dla uproszczenia rozumowanie to zastosowane jest tutaj do liniowych teorii termosprężystości i przewodności cieplnej. Nie zmniejsza to jednak ogólności rozważań, gdyż w przypadkach nieliniowych procedura ta może być powtarzana na każdym etapie rozwiązywania iteracyjnego. Ważnym elementem rozdziału 2. są trzy testy obliczeniowe pozwalające na ocenę niektórych cech modelu KMT.

Pierwszy test ma na celu zbadanie wpływu wielkości klastra na jakość przybliżenia rozwiązania dokładnego. Zbadano zbieżność przybliżenia modułów ścinania, modułu sprężystości objętościowej oraz naprężenia zredukowanego. Wynik testu wskazuje na to, że wielokrotność siatki struktury podstawowej zapewnia coraz lepsze przybliżenie obserwowanych wielkości. Dzieje się tak mimo tego, że cała informacja o mikrostrukturze jest już zadana na elementarnej kostce z czterema, pięcioma i jedenastoma inkluzjami. Proszę wyjaśnić czemu w modelu KMT jedna komórka periodyczności prowadzi do wyników innych niż wielokrotna komórka periodyczności. Proszę też wyjaśnić czemu przyjęto tak drastyczne różnice sztywności pomiędzy matrycą a inkluzją. Trudno sobie wyobrazić interpretację fizyczną tej sytuacji i można się obawiać, że dla takich proporcji sztywności matryca przenosi w sposób niezauważalny oddziaływania od inkluzji (kompozyt pracuje jak zbiór oddzielnych inkluzji). Czy Doktorant wykonał podobny test rachunkowy dla bardziej fizycznych parametrów matrycy i inkluzji, takich jak w przykładach te z kolejnego rozdziału? Ciekaw jestem jak wyglądają wyniki dla takiego przypadku. Poszukując interpretacji przedstawionych testów rachunkowych: proszę odpowiedzieć na pytanie czy możliwe jest modelowanie granulatów tą metodą (na przykład ośrodka ziarnistego o jednorodnym uziarnieniu).

Drugi test numeryczny to badanie wpływu odległości pomiędzy ziarnami na wyniki otrzymane metodą klasyczną MT i autorską metodą KMT. Wyniki tych testów są bardziej zgodne z intuicją niż poprzednie choć nadal obliczenia przeprowadzono dla danych wyjściowych skrajnie skonstruowanych.

Trzeci z przedstawionych testów to badanie modelu KMT zbudowanego dla losowego rozkładu parametrów inkluzji przy ich identycznej zawartości procentowej w matrycy. Dla tej samej objętościowej frakcji inkluzji, ich przestrzenny rozkład (tj. ich układ) może być zupełnie inny. Klasyczny schemat MT dawałby identyczne wyniki dla każdej generacji losowej mikrostruktury. Model klastrowy KMT powinien jednak wykazywać różnice między nimi. Ten

przykład trafnie ujmuje bogate możliwości jakościowe modelu KMT w porównaniu z MT jednak w wynikach numerycznych ilustracja ta nie jest, moim zdaniem, wyraźna. Rozumiem, że dla innych proporcji parametrów inkluzji i matrycy nie udało się uzyskać wyników numerycznych bardziej wyraźnych?

3.3. Rozdział 3 zawiera walidację modelu klastrowego dla przypadku właściwości termosprężystych komponentów. W pierwszej części rozdziału (od sekcji 3.2) walidacja ta ma charakter numeryczny, narzędziem wykorzystywanym w tym celu jest metoda elementów skończonych. W drugiej części rozdziału (od sekcji 3.4) do walidacji modelu wykorzystano dane eksperymentalne z wstępnych eksperymentów na porowatych próbkach drukowanych w 3D. Część trzecia tego rozdziału (sekcja 3.5) ma charakter odmienny, aplikacyjny. Doktorant przedstawia w niej możliwości zastosowania wyprowadzonych dla modelu KMT procedur obliczeniowych do optymalizacji wielokryterialnej materiału z układem inkluzji dla przypadku zagadnienia liniowej termosprężystości komponentów. Optymalizacji podlegają tu globalne, efektywne właściwości mechaniczne (sztywność) i termiczne (przewodność cieplna, współczynnik rozszerzalności cieplnej).

Walidacja numeryczna opiera się na porównaniu wybranych, efektywnych parametrów kompozytu obliczonych zgodnie z wyprowadzonymi dla modelu KMT procedurami z tymi samymi parametrami uśrednionymi dla modelu numerycznego tego samego kompozytu, zbudowanego i rozwiązanego Metodą Elementów Skończonych (MES). Wyniki modelu MES są tu traktowane jako surogat rozwiązania dokładnego. Jak wiadomo, dla wystarczająco bogatej siatki elementów skończonych (wystarczającej w sensie p-zbieżności lub h-zbieżności) rozwiązanie MES jest zbieżne do rozwiązania dokładnego termosprężystego zagadnienia brzegowego. Nie zmienia to faktu, że w istocie porównywane są dwa rozwiązania przybliżone. Mając to na względzie, Autor poświęca wiele uwagi doborowi siatki elementów skończonych, wykonując eksperymenty zarówno w kierunku h-zbieżności (wymiar elementu) jak i p-zbieżności (stopień wielomianów funkcji kształtu). Wyniki tych analiz przedstawione są w stosownych tabelach i nie wymagają komentarza, gdyż zagadnienie jest bardzo regularne i dość typowe. Niektóre elementy opisu eksperymentu numerycznego, który Autor przeprowadza wymagają jednak wyjaśnienia. W związku z poszukiwaniem dostatecznie bogatej siatki elementów skończonych dziwi mnie rysunek 3.14. Czy istotnie siatka o takim drastycznie niekorzystnym parametrze kształtu elementu (aspect ratio) jak na rysunku 3.14a może dać dokładne wyniki obliczeń i całkowań? Czy siatka była wprowadzana ręcznie (jak sugeruje rys. 3.14) czy też generowana automatycznie (jak wynika z innych rysunków modelu MES)? Jeśli chodzi o technikę eksperymentu numerycznego: czemu warunki periodyczności na brzegu zastąpiono warunkami (3.1) identyczność wektorów AC i BD? Jak takie warunki zostały zrealizowane w obliczeniach? Jeśli istotnie zastosowano warunki periodyczne na brzegu rozpatrywanego obszaru to dotyczą one całego brzegu czy wybranych punktów? Rysunek 3.1 (prawa strona) jest w tym kontekście trudny do zrozumienia. Jak zapewniono realizację warunku (3.3) w obliczeniach? Jakiego kodu MES użyto? Tabele 3.2 – 3.4 powinny być zilustrowane odpowiednimi mapami naprężeń, o których w nich mowa. Pozwoliłoby to czytelnikowi na łatwą ocenę tych rozwiązań. Podobne uwagi mogą być sformułowane dla modelu MES użytego do wykonania porównania z modelem KMT: na rysunku 3.15 zaznaczone symbole (kółka i strzałki) są całkowicie nieczytelne, należy zapisać wyraźnie jakie więzy dotyczą jakich stopni swobody. Najprościej załączyć rysunek konfiguracji odkształconej i mapę stanu naprężenia dla rozciągania i ścinania. W jaki sposób zapewniono spełnienie warunków (3.7)? Ciekaw jestem, jak poprzednio, jak wyniki porównań wyglądają dla materiałów o realistycznych właściwościach fizycznych a nie silnie skonstrastowanych!

Po wyjaśnieniu tych podstawowych szczegółów budowy modeli MES można przejść do oceny wyników konfrontacji obu metod. Uważam, że pomimo zapisanych powyżej uwag

krytycznych, przedstawione przez Doktoranta wyniki porównań są zadowalające z jakościowego i z ilościowego punktu widzenia.

Walidacja eksperymentalna (opisana w sekcji 3.4) modelu teoretycznego KMT daje wyniki pozytywne. Uważam, że zgodność jakościowa i ilościowa obu metod jest zadowalająca. Tego typu eksperyment „rzeczywisty” uważam za ciekawy i podnoszący wartość pracy doktorskiej.

Podobnie, zastosowanie opracowanej metody KMT do optymalizacji wielokryterialnej wskazuje trafnie na przydatność tej metody w zastosowaniach inżynierskich. Zawartość tej sekcji oceniam wysoko. Podkreślam tu zwłaszcza metodę sprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej do sformułowania jednokryterialnego za pomocą funkcji celu w postaci (3.12) i kolejnych, podobnych. Pozwoliło to uniknąć poszukiwań frontu Pareto i związanego z tym minimum w sensie Pareto (co jest, jak uważam, zadaniem trudnym).

3.4. W rozdziale 4. Doktorant przedstawia rozszerzenie modelu klastrowego na zagadnienia, w których składniki struktury kompozytowej mają właściwości sprężysto-plastyczne. W analizie przyjęto założenie, że w stanie plastycznym matryca jest lokalnie opisana przez funkcję płynięcia Hubera-von Misesa ze stowarzyszonym izotropowym prawem płynięcia (izotropowa plastyczność J_2) ze wzmocnieniem izotropowym zadany prawem potęgowym. W modelu tym odkształcenie i prędkość odkształcenia są addytywnie rozkładane na część sprężystą i plastyczną, a naprężenie lub prędkość naprężenia można uzyskać z liniowego prawa Hooke'a dla części sprężystej odkształcenia lub prędkości odkształcenia. To podejście jest całkowicie klasyczne i nie wymaga komentarza.

Zastosowanie tego klasycznego modelu wymaga jednak przedyskutowania przebiegu procesu uplastycznienia zapoczątkowanego w pewnym punkcie ośrodka, który zwykle jest ustalany drogą precyzyjnej lokalizacji bazującej na rozwiązaniu modelu efektywnego, następnie stosowany jest model uśredniony. Zamiast tego wprowadzono w pracy trzy operacje pozwalające na sformułowanie sprężysto-plastycznego modelu klastrowego MT. Te trzy operacje to linearyzacja, uniformizacja oraz izotropizacja. Operacje te są niezbędne aby dostosować rzeczywisty przebieg nieliniowych procesów fizycznych (termoplastyczność, ewolucja rozwiązania sprężysto-lepko-plastycznego) do wymagań formalnych (ograniczeń) modelu KMT. Linearyzacja nie wymaga komentarza, Autor wspomina o klasycznych metodach linearyzacji siecznej i stycznej oraz stycznej modyfikowanej, stosując w przykładach numerycznych schematu linearyzacji stycznej, przy pomocy (prawdopodobnie) standardowych realizacji numerycznych tych procedur.

Celem „uniformizacji” jest znalezienie akceptowalnego przybliżenia, które pozwoli zastąpić zmienny przestrzennie moduł styczny modelem jednorodnym (w przestrzeni, ale wciąż zmieniającym się w miarę rozwoju procesu uplastycznienia) i zaimplementować go do modelu klastra.

„Izotropizacja” zakłada zastąpienie wartości tensora sztywności stycznej, który w procesie rozwoju obszarów uplastycznionych staje się anizotropowy, pewną wartością zastępczą przyjętą dla izotropowego przybliżenia modułów ścinania. Wartości te przyjmuje się na podstawie precedensowych rozwiązań i propozycji znalezionych w literaturze. Jedynym racjonalnym argumentem jest tu, moim zdaniem, akceptowalność wyników modeli opartych na tak drastycznym założeniu formalnym, stwierdzona na podstawie eksperymentów numerycznych.

Ważnym elementem tego modelu jest również metoda ustalania uśrednionych naprężeń zredukowanych, oparta na obliczeniu najpierw lokalnych pól naprężeń zredukowanych a następnie ich uśrednieniu po objętości. To podejście może być dobrze uzasadnione teoretycznie moim zdaniem, choć w treści pracy jest raczej definiowane niż analizowane.

W kolejnych sekcjach rozdziału 4. Doktorant porusza dwa ważne tematy: pierwszy z nich to weryfikacja numeryczna zgodności modelu KMT z wynikami uzyskanymi przez

rozwiązanie odpowiadającego mu zagadnienia brzegowego metodą elementów skończonych; drugi - to optymalizacja wielokryterialna w zakresie sprężysto plastycznym. Badanie zgodności modelu KMT z wynikami uzyskanymi przez rozwiązanie odpowiadającego mu zagadnienia brzegowego metodą elementów skończonych sprowadzają się do porównania makroskopowego zredukowanego naprężenia von Misesa w funkcji równoważnego odkształcenia elasto-plastycznego. Porównania te we wszystkich przypadkach wypadają zadowalająco, globalna ewolucja jakościowa materiału ma podobny przebieg, również ilościowo trudno spodziewać się lepszej zgodności wykresów. Jednak opis eksperymentów numerycznych jest bardziej jeszcze lakoniczny niż w rozdziale trzecim. W porównaniach modeli MT i KMT trudno znaleźć informacje o rozmiarze klastra, nie wiadomo jak wygląda zagadnienie brzegowe modelowane metodą elementów skończonych, jak postawiono warunki rozciągania izochorycznego, rozciągania hydrostatycznego, jak praktycznie wyglądał rozwój deformacji oraz w jaki sposób obliczono dane dla wykresów w przypadku modelu MES. Nic nie wiadomo o doborze kroku w rozwiązaniu iteracyjnym (co będzie bardziej jeszcze istotne dla modelu lepko-plastycznego). Nawet jeśli informacje te rozbijałyby kompozycję pracy, można je było umieścić w załączniku.

Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej w zakresie sprężysto plastycznym ilustrowane jest przykładem, w którym Doktorant rozważa cztery różne właściwości makroskopowe kompozytu: naprężenie płynięcia, przewodność cieplna, współczynnik rozszerzalności cieplnej i gęstość. Pierwsze dwie są maksymalizowane a pozostałe dwie minimalizowane, zmienną niezależną pozostaje jedynie udział procentowy inkluzji w objętości kompozytu. Przedstawione wykresy wartości funkcji celu są zgodne z intuicją i możliwe do zinterpretowania.

3.5. Rozdział 5 zawiera rozszerzenie modelu KMT na sprężysto-lepkoplastyczność. Rozpatrywany jest uogólniony model materiału Maxwella z szeregowym połączeniem elementu lepkiego i elastycznego. Ta klasyfikacja jest bardzo przybliżona w zastosowaniu do superponowanych przez Doktoranta różnych modeli konstytutywnych, niezależnie dla materiałów matrycy i inkluzji. Zaproponowany związek konstytutywny łączący naprężenia i odkształcenia oraz ich prędkości wykorzystuje wiele hipotez dotyczących budowy tych relacji zaczerpniętych z literatury klasycznej oraz korzysta z nowych doświadczeń w tej dziedzinie, publikowanych w pracach zespołu naukowego w którym doktorat powstał. Rozdział ten zawiera w sobie tak wiele elementów i rozwiązań w problematyce budowania złożonej efektywnej relacji konstytutywnej, że mógłby być sam pełną rozprawą dokorską. Autor kompiluje bardzo twórczo elementy znanych modeli konstytutywnych budując przy ich pomocy efektywną relację konstytutywną zgodną z ideą metody KMT. Struktura tego rozdziału podobna jest do poprzednich: w pierwszej sekcji formułowane są równania modelu, następnie równania te są użyte w przykładach numerycznych mających na celu sprawdzenie, czy ich wyniki są podobne do rozwiązań uzyskanych techniką MES. W tym rozdziale ponownie rozważana jest potrzebna gęstość siatki elementów skończonych oraz szczególny nacisk położony jest na analizę procesu „izotropizacji”. Jest to bardzo ważne dla mojej oceny tej rozprawy gdyż uważam procedurę „izotropizacji” za najbardziej dyskusyjne ogniwo konstruowanej metody homogenizacji KMT. Jeśli chodzi o sposób przedstawienia techniki rozwiązywania przykładów numerycznych to moje dotychczasowe krytyczne komentarze pozostają aktualne również w odniesieniu do tego rozdziału. Wyniki obliczeń, przedstawione na wykresach, świadczą jednak (podobnie jak w poprzednich rozdziałach) o prawidłowym jakościowym i ilościowym działaniu opracowanej procedury klastrowej modyfikacji modelu Mori-Tanaka KMT.

3.6. Rozdział 6. zawiera uzupełniające rozważania cech geometrycznych mikrostruktury dwóch z trzech rozpatrywanych w doktoracie sieci regularnych: regularnej sześciennej (RC) i sześciennej centrowanej (BCC). W pierwszej części tego rozdziału

Doktorant opisuje szeroko plan eksperymentów numerycznych polegających na badaniu rozkładu „śladu” matrycy i inkluzji w „odwiertach” prowadzonych w sposób regularny bądź losowy w wybranych kierunkach w materiale kompozytowym. Prawdziwe jest, moim zdaniem, intuicyjne przekonanie Autora, że dane geometryczne z tak przeprowadzonych eksperymentów skorelowane są z właściwościami efektywnymi kompozytu jednak brak ścisłego sformułowania problemu nie pozwala, moim zdaniem, na rzetelną dyskusję tego fragmentu pracy. Można jedynie stwierdzić, że (dość spekulatywne) rozważania mogą być przyjęte jako wyjaśnienie obserwowanych efektów anizotropii jednak narzędzia matematyczne wykrywania ewentualnej korelacji pomiędzy zbiorami danych sprowadzają się tu do obserwacji i dyskusji jakościowej wykresów obserwowanych wielkości. Przykładem spekulatywnego charakteru tych rozważań może być choćby ciąg równań (6.4)-(6.7). Nawet jeśli pojedynczy „rdzeń” można uznać za fragment struktury warstwowej (!) to za ekstrapolacją tej obserwacji na moduł efektywny właściwy dla kompozytu nie ma żadnego argumentu. Jak uzasadnić możliwość wyciągania jakościowych wniosków kiedy nawet układ „odwiertów” jest losowy? Zwłaszcza, że jedyne narzędzie analizy korelacji to wykres danych po ich „uporządkowaniu”. Moim zdaniem ten rozdział powinien się pojawić w doktoracie nie jako analiza problemu ale jako jej zapowiedź przy omawianiu perspektyw dalszych badań.

Podobną opinie zmuszony jestem wyrazić na temat zawartości merytorycznej drugiej części tego rozdziału. Ryzyko ewentualnej niestabilności geometrycznej matrycy w materiałach porowatych, tak jak zostało przedstawione w tej części rozdziału 6. niewątpliwie istnieje, jednak poziom naukowy (sformułowanie problemu i wpisanie go w metodę KMT) tego rozdziału odbiega rażąco od poziomu rozdziałów poprzednich.

3.7. Rozprawa doktorska kończy się rozdziałem 7., w którym podsumowano główne osiągnięcia naukowe doktoratu i możliwe przyszłe prace kontynuujące te tematykę. Autor zebrał w tym rozdziale główne wnioski, które są dobrze uzasadnione w treści pracy. Rozdział kończy wyliczenie elementów pracy, które mają charakter osiągnięcia naukowego Doktoranta.

4. Ogólna ocena rozprawy, jej innowacyjność i oryginalność

Poniżej przedstawię te elementy ocenianej pracy doktorskiej, które mają charakter nowych i oryginalnych osiągnięć jej Autora.

- Niewątpliwym osiągnięciem Doktoranta jest sformułowanie procedur znajdowania tensora interakcji czwartego rzędu opisującego wpływ morfologii mikrostruktury na model klastra pola średniego dla ośrodka termo-sprężystego.
- Kolejnym osiągnięciem jest rozszerzenie tego modelu na przypadek elasto-plastycznego oraz lepko-elasto-plastycznego związku konstytutywnego założonego dla materiałów inkluzji i matrycy.
- Ważnym elementem tych nowych, „klastrowych” rozszerzeń klasycznego modelu Mori-Tanaki jest ich walidacja. Autor przeprowadził walidację numeryczną zaproponowanych w pracy procedur, przeprowadzając (dla każdej z trzech opracowanych teorii) serię eksperymentów numerycznych przy pomocy metody elementów skończonych skalibrowanej do tego celu. Rozwiązania otrzymane tą metodą są traktowane jako surogat rozwiązania dokładnego. Porównał też, tam gdzie to było możliwe, wyniki teorii klastrowej z wynikami otrzymanymi dla klasycznej metody Mori-Tanaki.

Uzyskanie tych wyników możliwe było dzięki zastosowaniu szeregu nowych i oryginalnych koncepcji szczegółowych, które Doktorant twórczo włączył w budowę trzech głównych teorii, wymienionych powyżej. Te osiągnięcia szczegółowe to:

- Wyprowadzenie wzorów w postaci zamkniętej dla składowych tensora interakcji dla najczęściej stosowanych regularnych układów inkluzji (RC, BCC, FCC).

- Zastosowanie procedur linearyzacji, uniformizacji oraz izotropizacji do rozszerzenia liniowej wersji rozszerzenia klastrowego teorii Mori-Tanaki na problemy fizycznie nieliniowe oraz szczegółowa analiza procedury izotropizacji.
- Zastosowanie metody zwanej przez Autora metodą „drugich momentów naprężeń” do obliczania naprężenia zredukowanego w kompozycie.
- Wykorzystanie addytywnego prawa interakcji stycznej oraz zastosowanie nieliniowego prawa Perzyny dla części lepkiej interakcji w rozszerzeniu KMT na zagadnienia elasto-lepko-plastyczne.
- Przedyskutowanie jakościowej i ilościowej zgodności rozszerzenia klastrowego metody MK dla jej wszystkich wyprowadzonych w doktoracie przypadków.
- Wykorzystanie wyprowadzonych teorii do optymalizacji wielokryterialnej właściwości kompozytu z mikrostruktura inkluzji.
- Ciekawa próba zastosowania eksperymentów realnych przeprowadzonych na kompozytach drukowanych techniką druku trójwymiarowego do walidacji wyprowadzonych modeli teoretycznych ośrodka z mikrostrukturą.

Praca doktorska porusza interesujący i aktualny temat mechaniki ośrodków z inkluzjami. Zaproponowane rozszerzenie teorii klasycznej, pozwalające na uwzględnienie nie tylko zawartości inkluzji w macierzy ale także sposobu ich ułożenia w macierzy oraz ich zmienne właściwości mechaniczne jest bardzo istotne i wyraźnie poszerza zakres jej stosowalności i rozmaitość efektów mechanicznych, które mogą być w ten sposób modelowane. Istotne jest rozszerzenie klasycznego modelu MT na zagadnienia fizycznej nieliniowości materiałów składowych kompozytu.

Praca doktorska doprowadziła do sformułowania wielu ciekawych konkluzji jakościowych i ilościowych dotyczących możliwych zastosowań praktycznych materiałów z inkluzjami.

Wszystkie te cechy składają się na jej wysoką ocenę. W recenzji sformułowałem wiele uwag krytycznych, które w większości dotyczą zbyt lakonicznego, moim zdaniem, opisu zrealizowanych modeli numerycznych MES.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Oryginalnym osiągnięciem naukowym mgr inż. Kamila Bieńka jest opracowanie rozszerzenia teorii klasycznej Mori-Tanaki, pozwalającego na uwzględnienie nie tylko zawartości inkluzji w macierzy ale także sposobu ich ułożenia w macierzy oraz zmienne właściwości mechaniczne wtrąceń. Szczegółowy przegląd Jego osiągnięć zamieściłem w punkcie 4. tej opinii.

Zgadzam się z większością stwierdzeń sformułowanych przez doktoranta w treści rozprawy. Uważam, że świadczą one o jego dużej dojrzałości naukowej i umiejętności dokonania krytycznej i porównawczej analizy teorii naukowych, w tym tych, które tworzy. Jest to warunek rozwoju opracowanego modelu, stanowi też bardzo istotny przyczynek do praktyki modelowania teoretycznego i numerycznego zagadnień związanych z mechaniką kompozytów. Doktorant zna współczesne metody numeryczne rozwiązywania zagadnień inżynierskich, potrafi odszukiwać potrzebne informacje w literaturze przedmiotu.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dokonane przez Doktoranta, a także wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez jej Autora.

Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”. Autor wykazał się dobrą znajomością najważniejszych prac naukowych i inżynierskich związanych z tematem rozprawy doktorskiej, ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu objętego tematem rozprawy oraz ogólna i specjalistyczną wiedzą teoretyczną związaną z mechaniką ośrodków niejednorodnych.

Praca wyróżnia się całościowym ujęciem tematu, dojrzałością syntetycznych przeglądów stanu wiedzy w dziedzinie modelowania numerycznego w mechanice kompozytów, dojrzałością krytycznej i porównawczej analizy otrzymanych wyników.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska magistra inż. Kamila Krystiana Bieńka spełnia wymagania artykułu 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



Marek Lefik