

Gliwice, 10.02.2019 r.

Prof. dr hab. inż. Piotr Fedeliński
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A
Tel. 32 2371635, Fax: 32 2371282
E-mail: Piotr.Fedelinski@polsl.pl

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Majewskiego
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
pt. „Reprezentacja cech morfologicznych mikrostruktury
w mikromechanicznych modelach materiałów kompozytowych”
Promotor: dr hab. inż. Katarzyna Kowalczyk-Gajewska, prof. IPPT PAN**

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Nowoczesne technologie pozwalają na projektowanie i wytwarzanie materiałów o pożądanym cechach. Materiały produkowane na potrzeby nowoczesnych gałęzi przemysłu powinny charakteryzować się dobrymi własnościami mechanicznymi i termicznymi. Przy projektowaniu takich materiałów ich własności makroskopowe można wyznaczać na podstawie analizy mikrostruktury i badania modeli mikromechanicznych. Wielkość analizowanej mikrostruktury zależy od cech geometrycznych i mechanicznych materiału. Obecnie do analizy własności zastępczych wykorzystywana jest często homogenizacja numeryczna ze względu na coraz większe możliwości obliczeniowe sprzętu i programów komputerowych. Tworzone modele komputerowe mikrostruktury powinny jak najwierniej odwzorowywać rzeczywiste własności materiału i mogą być tworzone sztucznie lub na podstawie obrazów otrzymywanych metodą tomografii komputerowej. We wstępnym projektowaniu materiałów można wykorzystać analityczne modele mikromechaniczne, żeby określić podstawowe zależności między cechami materiału, a jego własnościami. Modele analityczne mogą być łączone z modelami komputerowymi.

Do najbardziej znanych metod analitycznych można zaliczyć regułę mieszanin, metodę Eshelby'ego, Mori-Tanaki, samozgodną, uogólnioną samozgodną i inne. Najczęściej modele analityczne uwzględniają wyłącznie wpływ udziałów objętościowych składników materiału i ich kształty na wyznaczone własności zastępcze, i nie zależą od wielkości składników oraz ich nierównomiernego rozmieszczenia, a także istnienia warstwy pośredniej. Dokładność modeli analitycznych zmniejsza się ze wzrostem udziału objętościowego wtrąceń w osnowie i dużą różnicą własności składników materiału niejednorodnego.

W pracach, które ukazały się w ostatnich latach stosowano koncepcję reprezentacji cech morfologicznych mikrostruktury za pomocą wzorców (ang. Morphologically Representative Pattern – MRP) dla materiałów izotropowych, liniowosprężystych i kulistego kształtu wtrąceń.

Doktorant w pracy doktorskiej wykorzystał metodę MRP, żeby sformułować i zweryfikować mikromechaniczny liniowy i nieliniowy model materiału, który uwzględnia wpływ rozmiaru wtrąceń i ich rozmieszczenia oraz warstwy pośredniej na własności makroskopowe kompozytu.

Oryginalnym elementem recenzowanej pracy jest wykorzystanie tej metody do oszacowania zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła oraz zastosowanie podejścia do określenia własności sprężysto-plastycznych kompozytów za pomocą przyrostowej linearyzacji nieliniowych związków konstytutywnych materiału.

Zakres tematyki rozprawy doktorskiej mieści się w dyscyplinie naukowej mechanika.

2. Przegląd treści rozprawy

Rozprawa doktorska napisana jest na 115 stronach i składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, pięciu rozdziałów, spisu literatury i trzech dodatków.

W rozdziale 1. Doktorant przedstawił podstawowe informacje dotyczące modeli analitycznych i komputerowych materiałów oraz dokonał przeglądu literatury dotyczącej modelowania mikrostruktury materiałów. W tej części rozprawy wymieniono przeprowadzone prace badawcze i sformułowano następującą tezę rozprawy:

Model morfologicznej reprezentacji mikrostruktury kompozytu jest efektywny obliczeniowo i pozwala poprawnie opisać wpływ rozmiaru i przestrzennego upakowania wtrąceń oraz efekt granicy międzyfazowej na makroskopową przewodność cieplną oraz sprężysto-plastyczną odpowiedź materiału kompozytowego. Homogenizacja numeryczna jest istotnym narzędziem do weryfikacji formułowanych analitycznych modeli mikromechanicznych.

W rozdziale 2. omówiono podstawowe parametry charakteryzujące kompozyt: udziały objętościowe, parametry upakowania i rozmiar warstwy pośredniej. Przedstawiono cztery różne rzeczywiste mikrostruktury kompozytów oraz odpowiadające im reprezentatywne wzorce. Na przykładzie zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła omówiono wpływ udziału objętościowego, własności elementów kompozytu i przyjętego modelu materiału. Przedstawiono podstawowe równania opisujące zagadnienie przewodzenia ciepła ze szczególnym uwzględnieniem oporu cieplnego na granicy materiałów. Wyprowadzono równanie określające zastępczy tensor przewodności cieplnej reprezentatywnej objętości kompozytu. Przedstawiono równania analityczne dla zastępczych współczynników przewodzenia ciepła kompozytu dwufazowego z izotropowymi składnikami modeli z rozproszonymi wtrąceniami, Mori-Tanaki, samozgodnych i uogólnionych samozgodnych, a także dla granicznych własności geometrycznych i materiałowych kompozytu. Pokazano przykładowe wyniki dla różnych modeli i kompozytów o różnych własnościach.

Niedoskonałość połączenia materiałów modelowano przez założenie nieciągłości przemieszczeń i równowagi sił powierzchniowych lub przez wprowadzenie warstwy pośredniej między materiałami.

Przedstawiono współczynniki koncentracji dla wybranych modeli mikromechanicznych. Określono wpływ własności materiałowych, udziału objętościowego i stopnia upakowania na zastępczy moduł objętościowej ściśliwości sprężystej i moduł sprężystości poprzecznej.

Rozpatrywano zachowanie kompozytu ze sprężysto-plastyczną osnową i sprężystymi wtrąceniami. Przyjęto kryterium uplastycznienia Hubera-Misesa, stowarzyszone prawo

płynięcia i izotropowe wzmocnienie potęgowe. Stosowano styczną i sieczną linearyzację równań konstytutywnych. Zbadano zależność naprężenia zredukowanego Hubera-Misesa od odkształcenia w kierunku rozciągania dla różnego upakowania wtrąceń.

W rozdziale 4. przedstawiono zastosowaną metodę homogenizacji numerycznej. Do analizy mikrostruktur wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). Stosowano dużą liczbę czworosiecznych 10-węzłowych elementów skończonych (od 40 do 100 tysięcy). Rozpatrywano kompozyty z kulistymi wtręciami o jednakowej wielkości, które były rozmieszczone regularnie lub losowo. Na podstawie analizy dwupunktowej funkcji prawdopodobieństwa ustalono, że statystyczny element objętościowy (SVE) powinien zawierać co najmniej 50 wtrąceń i należy używać co najmniej 100 takich elementów. Stosowano periodyczne warunki brzegowe i periodyczne SVE. Opisano procedurę generowania SVE przypominającą kompresję gazu i otrzymywanie rozmieszczenia wtrąceń o określonym upakowaniu.

Analizowano komórki jednostkowe o regularnym ułożeniu wtrąceń: system prosty, przestrzennie centrowany i ściennie centrowany. Wyznaczono trzy moduły Kelvina na podstawie analizy komórek, dla których zadano trzy różne periodyczne warunki brzegowe. Analizowano komórki o różnej sztywności wtrąceń i osnowy oraz różnym udziale objętościowym.

W rozdziale 4. przedstawiono porównanie własności zastępczych wyznaczonych metodami analitycznymi i metodą elementów skończonych. Obliczenia wykonano dla współczynnika przewodzenia ciepła, modułu ściśliwości objętościowej, modułu sprężystości poprzecznej oraz zależności naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa od odkształceń. Badano wpływ udziału objętościowego i stopnia upakowania na własności zastępcze.

Analizowano wpływ stopnia upakowania wtrąceń i możliwość styku wtrąceń lub pustek na własności zastępcze oraz zależność naprężenia zredukowanego Hubera-Misesa od odkształcenia. Badano wpływ grubości warstwy międzyfazowej i jej własności na zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła i moduł sprężystości poprzecznej.

Doktorant porównał wyniki otrzymane metodą MRP z wynikami doświadczalnymi prezentowanymi w literaturze. Badania dotyczyły kompozytu o osnowie polimerowej z wtręciami tlenku glinu o różnej średnicy. W modelu MRP uwzględniono istnienie warstwy pośredniej i skupień wtrąceń zgodnych z obrazami mikrostruktury. Przeprowadzono dopasowywanie współczynnika przewodzenia ciepła i modułu Younga modelu do literaturowych badań doświadczalnych dla żywicy epoksydowej z wtręciami z glinu i jego związkami. Przeprowadzono modelowanie materiałów spiekanych na bazie związku międzymetalicznego nikiel-aluminium z domieszkami tlenku glinu o granulacji mikro i nano. Nie stwierdzono w materiałach porów i warstw pośrednich. Wprowadzono w modelach warstwę pośrednią w celu lepszego dopasowania wyników.

W rozdziale 5. przedstawiono szczegółowe wnioski z przeprowadzonych badań, wymieniono oryginalne osiągnięcia pracy i wskazano możliwe dalsze kierunki rozwoju proponowanej metody.

W trzech dodatkach, które znajdują się na końcu pracy przedstawiono tensory koncentracji pola gradientu temperatury i odkształcenia dla metod samozgodnej i ogólnej samozgodnej oraz parametry niedoskonałego połączenia materiałów i warstwy międzyfazowej.

Spis literatury zawiera 141 pozycji. Wiele z tych publikacji ukazało się w ostatnich latach. Doktorant jest współautorem dwóch publikacji.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana rozprawa reprezentuje wysoki poziom naukowy. Oryginalnym elementem pracy jest wykorzystanie metody reprezentacji cech morfologicznych mikrostruktury za pomocą wzorców do zbadania wpływu rozmieszczenia i rozmiaru wtrąceń oraz cech warstwy pośredniej na zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła. Kolejnym oryginalnym wkładem Doktoranta do rozwoju metody jest jej zastosowanie do analizy naprężeń i odkształceń w kompozytach sprężysto-plastycznych za pomocą procedury przyrostowej i linearyzacji nieliniowych związków konstytutywnych.

Doktorant przeprowadził weryfikacje zaproponowanych metod przez porównanie wyników otrzymywanych metodą MRP, metodami homogenizacji numerycznej MES i doświadczalnymi.

Przeprowadzenie weryfikacji MES wymagało bardzo czasochłonnych obliczeń. Obliczenia numeryczne wykonywano dla elementów reprezentatywnych o 50 wtrąceniach. W celu opracowania statystycznego wyników analizowano do 100 elementów reprezentatywnych.

O wysokim poziomie naukowym pracy doktorskiej świadczą publikacje i prezentacje konferencyjne. Doktorant przedstawił wyniki prowadzonych badań w dwóch artykułach, które ukazały się w czasopismach znajdujących się w bazie JCR „*Smart Materials and Structures*” i „*Composites Part-B-Engineering*” oraz w materiałach 5 konferencji o zasięgu międzynarodowym (*Solid Mechanics Conference, European Solid Mechanics Conference, International Conference on Computer Methods in Mechanics*). Praca była realizowana częściowo w ramach projektów badawczych Narodowego Centrum Nauki OPUS i PRELUDIUM.

Do recenzowanej rozprawy doktorskiej mam następujące uwagi:

1. str. 9, druga część tezy rozprawy „*Homogenizacja numeryczna jest istotnym narzędziem do weryfikacji sformułowanych analitycznych modeli mikromechanicznych.*” Przedstawiona teza jest oczywistym stwierdzeniem. Doktorant użył homogenizacji numerycznej, która może dokładniej odwzorować mikrostrukturę materiału, do weryfikacji znanych i proponowanych metod analitycznych.
2. str.57, Doktorant stosował linearyzację styczną i sieczną związków konstytutywnych. Rozwiązania otrzymywane metodą sieczną znacznie odbiegały od rozwiązań MES. Jaka jest przyczyna tak dużych różnic ?
3. str. 65-67, rys. 4.11-13, Rozwiązania otrzymywane metodą MES są bliższe rozwiązaniom wyznaczonym metodą GSC niż metodą MRP. Czy w takiej sytuacji metoda MRP jest konkurencyjna w stosunku do znanej metody GSC ?
4. str. 67, rys. 4.13b, Na wykresie względnego modułu sprężystości poprzecznej występuje duży rozrzut wyników wyznaczonych MES, a nie ma takich rozbieżności w przypadku innych wielkości. Czy tą właściwość metody można wyjaśnić ?

5. str. 77-79, W pracy dobierano parametry warstwy pośredniej w celu uzyskania jak najlepszej zgodności rozwiązania wyznaczanego metodą MRP z wynikami badań doświadczalnych. Czy wyznaczone w ten sposób parametry są zgodne z własnościami warstwy pośredniej otrzymanymi metodami doświadczalnymi ?
6. str. 86-88. W badaniach dyfraktometrem rentgenowskim nie stwierdzono występowania w materiale faz pośrednich, natomiast w modelach MRP wprowadzono takie warstwy.
7. str. 91, Udział objętościowy wtrąceń i parametr upakowania wpływa jednocześnie na zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła i moduły sprężystości kompozytu. Czy zaobserwowano jednoznaczna bezpośrednią zależność między współczynnikiem przewodzenia ciepła i modułami sprężystości ?
8. str. 91, Wskazanie w kompozycie materiału osnowy i wtrącenia ma wpływ na rozwiązania otrzymywane metodą MRP. W przypadku, jeżeli w kompozycie trudno rozróżnić materiał osnowy i wtrąceń jak dokonać wyboru materiałów ?

Rozprawa doktorska jest bardzo staranie zredagowana. W pracy dostrzegłem kilka drobnych błędów redakcyjnych:

1. str. 3, „w przypadku kompozytów podstawowym parametrem skali jest wymiar ceramicznego wtrącenia”. Wtrącenie w kompozycie niekoniecznie jest materiałem ceramicznym.
2. str. 9, „odpowiedź sprężysto-plastyczna”. Użyte określenie jest nieformalne. Badano zależność między naprężeniami zredukowanymi i odkształceniami materiału sprężysto-plastycznego.
3. str. 11, „ t_{int}/R_{inc} ” – parametr rozmiaru wtrąceń (ang. size parameter)”. Wydaje się, że podstawowym wymiarem jest wymiar wtrącenia. W takim przypadku należałoby nazwać wielkość względną grubością warstwy międzyfazowej.
4. str. 19, „cała osnowa znajduje się w obszarach λ_k ”. λ_k nie jest obszarem tylko wymiarem (rys. 2.2). Poprawna forma – „osnowa otacza wtrącenia”.
5. str. 24, równ. (2.18) W równaniu wielkości dotyczące wtrącenia i osnowy oznaczono cyframi, a w innych równaniach, np. (2.17), indeksami *inc* i *m*.
6. str. 25, równ. (2.19) W równaniu użyto nowej zmiennej *R*.
7. str. 28, rys. 2.10, Użycie podobnych symboli o małej wielkości dla metod GSC, MT i DD utrudnia rozróżnienie wykresów.
8. str. 33, Tytuł rozdziału „Tensor sztywności sprężystej kompozytu w modelach klasycznych” powinien być zmieniony na „Tensory koncentracji odkształceń”.
9. str. 34, „miękkie wtrącenia w twardej osnowie (a) i (c) oraz twarde wtrącenia rozproszone w miękkiej osnowie podpunkty (b) i (d)”. Powinno być odwrotnie.
10. str. 62, rys. 4.8, Brakuje opisu rysunku (a).
11. str. 72, „dla parametru upakowania $t_{int}/R_{inc} > 1/50$ ”. To nie jest parametr upakowania.

4. Wnioski końcowe

W recenzowanej rozprawie Doktorant rozszerzył sformułowanie Morfologicznej Reprezentacji Mikrostruktury kompozytów zawierających wtrącenia w postaci kulistych cząstek w celu określenia wpływu rozmieszczenia wtrąceń i cech warstwy pośredniej na zastępcze własności termiczne i mechaniczne materiału. Opracowaną metodę zastosowano do analizy materiałów liniowosprężystych i sprężysto-plastycznych.

Porównanie otrzymanych wyników z własnościami materiałów wyznaczonymi metodą homogenizacji numerycznej MES i badaniami doświadczalnymi potwierdziło poprawność rozwiązań i efektywność metody.

Przedstawione w rozprawie nowe zastosowania metody Morfologicznej Reprezentacji Mikrostruktury są oryginalnymi osiągnięciami Doktoranta.

Temat rozprawy wymagał od Doktoranta wiedzy z zakresu mechaniki ciała stałego, metod numerycznych, metody elementów skończonych i metod doświadczalnych.

Krytyczne uwagi, przedstawione w punkcie 3. niniejszej recenzji, nie umniejszają wartości naukowej rozprawy.

Podsumowując recenzję, stwierdzam, że rozprawa doktorska przedstawiona przez mgr inż. Michała Majewskiego spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595) i może stanowić podstawę do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika.

Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony przed Radą Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

