AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, paw. B4, pok. 206

dr hab. Danuta Szeliga, prof. AGH
tel. +48 12 617 41 92, email: szeliga@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

„Modelowanie wieloskalowe materiałów hipersprężystych"

Autor rozprawy: mgr inż. Martyna Poręba-Sebastjan
Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wacław Kuś, Prof. PŚ

1. Przedmiot rozprawy

Recenzja została opracowana dla rozprawy doktorskiej liczącej 150 stron, 107 rysunków i 36 tabel. Praca ma klasyczny układ, została podzielona na siedem rozdziałów: wstęp, trzy rozdziały z opisem metod numerycznych zastosowanych do postawionego w pracy problemu, dwa rozdziały przedstawiające badania własne i ostatni rozdział będący podsumowaniem. W pracy zamieszczono również, obok bibliografii, wykaz najważniejszych oznaczeń, spis rysunków oraz tabel. Do rozprawy dołączono krótkie streszczenie w języku polskim i angielskim. W pozycjach literaturowych wymieniono trzy prace, których pierwszym współautorem jest Doktorantka.

Problematyka poruszona w rozprawie jest aktualna, zarówno w aspekcie modelowania numerycznego związanego z obliczeniami wielkoskalowymi, jak i w aspekcie zagadnień materiałowych, gdzie rozpatrywano materiały hipersprężyste spotykane w bardzo wielu dziedzinach, począwszy od zastosowań przemysłowych aż po nauki biologiczne.

Rosnąca moc obliczeniowa komputerów pozwala na prowadzenie obliczeń numerycznych dla coraz to bardziej złożonych modeli, w tym modeli wielkoskalowych, które uwzględniają rzeczywiste zjawiska zachodzące w analizowanym procesie i są bliższe fizyce tych zjawisk. Wyniki obliczeń z jednej strony umożliwiają szczegółową analizę modelowanego problemu, z drugiej mogą przyczynić się do ograniczenia liczby kosztownych doświadczeń fizycznych. Należy przy tym zwrócić uwagę na koszty obliczeniowe, które powinny być minimalizowane ze względu na czas i energię. Zapotrzebowanie na te zasoby wzrasta wraz ze stopniem skomplikowania modeli numerycznych. Alternatywą może być zastosowanie metod homogenizacji. W pracy opracowano wielkoskalową metodę niesprzężoną dla materiałów hipersprężystych, charakteryzujących się niejednorodną strukturą, będących najczęściej kompozytami złożonymi z materiałów hipersprężystych lub sprężystych i hipersprężystych. Prawidłowe zasymulowanie zachowania się tego typu materiałów podczas odkształcenia powinno uwzględniać ich niejednorodną strukturę. Wymaga to wykonania symulacji w różnych skalach: mikro dla odwzorowania struktury, i makro, dla odwzorowania zachowania całego elementu wykonanego z danego materiału podczas analizowanego procesu. Z uwagi na koszt

Biuro Dziekana
wpłynęło dnia 11.02.2021
nr 49/2020/2021 zał. –

obliczeniowy pełnego, sprzężonego modelu mikro-makro, gdzie modelowanie w każdej ze skal prowadzone jest najczęściej z wykorzystaniem jednej z metod dedykowanych rozwiązywaniu równań różniczkowych cząstkowych, np. metody elementów skończonych, Autorka rozprawy zaproponowała podejście znacznie obniżające ten koszt. Wykorzystała homogenizację do opisu własności mikrostruktury. W opracowanej metodzie zastosowano adekwatny dla analizowanego problemu jeden z modeli dla materiałów hipersprężystych dostępnych w literaturze, i wyznaczono, w oparciu o algorytm ewolucyjny, parametry tego modelu, co pozwoliło na jego użycie w skali mikro dla jednorodnego elementu reprezentatywnego, który włączono następnie do symulacji w skali makro. W ten sposób zaproponowany algorytm uwzględnia niejednorodną budowę materiału w obliczeniach w skali makro. Istotnym jest, że zaproponowane rozwiązanie zostało zweryfikowane dla materiałów hipersprężystych o odmiennej mikrostrukturze: kompozytu z wtrąceniami sferycznymi, kompozytu z wtrąceniami w postaci włókien oraz dla materiału biologicznego: substancji białej mózgu. Dla wszystkich badanych materiałów dokonano obliczeń dla wielu różnych obciążeń, wyniki modelu homogenicznego ze zidentyfikowanymi parametrami zastępczymi porównano z modelem kompozytu, oszacowano błędy, a także przeprowadzono obliczenia w skali makro dla wybranych elementów. Metoda została zweryfikowana, wykazano jej poprawność.

2. Ocena pracy doktorskiej

Tezę i cel pracy, zamieszczone w pierwszym rozdziale zatytułowanym „Wstęp", poprzedzają zwięzłe informacje o materiałach hipersprężystych. Następnie ogólnie została przedstawiona tematyka samej rozprawy. W mojej opinii, w tej części pracy brakuje samej definicji pojęcia materiału hipersprężystego oraz szerszego przeglądu literaturowego przedstawiającego aktualny stan badań nad tego typu materiałami w kontekście ich modelowania. Wówczas badania przeprowadzone przez Doktorantkę w ramach rozprawy lepiej wpisywałyby się w obecny stan wiedzy w tej dziedzinie.

Sama teza została skonstruowana poprawnie, wyszczególniono jeden, główny cel pracy, bez sformułowania celów szczegółowych. W dalszej części rozdziału opisano pokrótce zawartość pracy.

Rozdział drugi poświęcono bardzo dokładnemu omówieniu metody elementów skończonych (MES) w modelowaniu materiałów hipersprężystych. W rozdziale zamieszczono podstawowe wiadomości dotyczące MES dla materiałów sprężystych, przedstawiono sformułowanie słabe, a także włączono informacje o różnego rodzaju elementach stosowanych w MES, podając stosowane dla nich funkcje kształtu. Tę część pracy kończy zapis najważniejszych równań w formie macierzowej dla rozwiązania dyskretnego z uwzględnieniem warunków brzegowych i numerycznych metod rozwiązywania tego typu równań. W dalszej część rozdziału omówiono mechanikę materiałów hipersprężystych oraz opisano modele tych materiałów. Rozdział ma charakter przeglądowy, tak szczegółowe omówienie MES i mechaniki modeli może sugerować, że informacje w nim zawarte będą podstawą do własnej implementacji wybranych algorytmów w badaniach własnych. W dalszej lekturze pracy nie znajdujemy jednak bezpośredniego wykorzystania tych informacji. W mojej opinii rozdział drugi jest zbyt obszerny, choć, jak rozumiem, Autorka chciała pokazać, że metody modelowania materiałów hipersprężystych są jej dogłębnie znane.

W rozdziale trzecim zdefiniowano modelowanie wieloskalowe oraz przedstawiono metodę homogenizacji, które zostały przez Doktorantkę wykorzystane w badaniach własnych. Przedstawiono najpierw modele analityczne, w dalszej części przechodząc do homogenizacji numerycznej wykorzystującej reprezentatywny element objętościowy (RVE) i modelowanie wieloskalowe. Wspomniano również o statystycznie podobnym reprezentatywnym modelu objętościowym (SSRVE). Osobny podrozdział poświęcony został homogenizacji

niesprzężonej. Podobnie jak poprzedni, rozdział ma charakter przeglądu literatury, niemniej informacje w nim zawarte bezpośrednio dotyczą rozwiązywanych w pracy problemów, stąd jego zawartość jest uzasadniona. Autorka w tej części pracy używa wielu pojęć, które są niezdefiniowane, niektóre opisy nie są całkiem jasne, często fragmenty są niespójne, także w kontekście przyjętych oznaczeń. Referencje do literatury podane są zbiorczo na początku każdego zagadnienia, co nie ułatwia odnajdywania szczegółowych informacji. Rozdział ten, w mojej opinii, powinien być kompletnym źródłem podstawowych wiadomości dotyczących omówionych w nim zagadnień.

Rozdział czwarty dotyczy algorytmów ewolucyjnych. Algorytm ewolucyjny został zastosowany w pracy do identyfikacji zastępczych parametrów materiałowych w RVE. Autorka słusznie zamieściła w pracy opis jego działania. Na początku rozdziału znajdują się ogólne informacje dotyczące algorytmów optymalizacji, wymieniono zalety i wady każdej z grup, przy czym skupiono się na metodach ewolucyjnych. Opisano zasadę działania algorytmu, podstawowe operatory stosowane w rozwiązaniu, przedstawiono schemat blokowy. Rozdział kończy opis wielopopulacyjnego algorytmu ewolucyjnego, podano także jego schemat. Niemniej na podstawie przedstawionego opisu i schematu trudno byłoby zaimplementować tego typu rozwiązanie, bardzo dużo pojęć jest zbyt ogólnych, a sam schemat mało czytelny. Dalsza lektura związana z badaniami własnymi nie daje informacji jaki algorytm został zastosowany. Nie wiadomo także, czy była to implementacja własna, czy wykorzystano dostępne oprogramowanie.

Rozdziały piąty i szósty są najważniejszymi rozdziałami w pracy, dotyczą przeprowadzonych przez Doktorantkę badań własnych. W rozdziale piątym zamieszczono autorski algorytm niesprzężonej metody wieloskalowej połączonej z algorytmem ewolucyjnym. Pokazano szczegółowo wszystkie schematy obciążenia, które były wykorzystywane w identyfikacji parametrów modelu homogenicznego, przykładowy model kompozytu modelowany z wykorzystaniem MES, zdefiniowano funkcję celu zdefiniowaną w optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego. Dla zadania optymalizacji, tym samym dla wyznaczenia parametrów zastępczych jednorodnego elementu RVE, podstawą jest poprawne zdefiniowanie funkcji celu. W pracy podana została wprawdzie ta funkcja, ale opis poszczególnych jej elementów nie do końca jest zrozumiały, co, podobnie jak w poprzednich rozdziałach, utrudnia zrozumienie, które parametry i w jakim modelu są poszukiwane. Do przedstawionego w rozdziale schematu blokowego rozwiązania również nasuwają się pytania, żaden model nie został włączony do pętli optymalizacyjnej, a przecież chodziło o identyfikację parametrów materiałowych modelu homogenicznego. Wyniki otrzymane przy użyciu opracowanego rozwiązania zostały porównane z metodą średniego pola dla przykładowego kompozytu, otrzymując lepszą zgodność modelu własnego z modelem MES niż dla modelu średniego pola, co wskazuje na poprawność przyjętego algorytmu. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach, podano także błędy ilościowe (brak jednak samej definicji błędu). Rozdział szósty rozpoczyna przegląd kompozytów o różnych własnościach i mikrostrukturach z uwzględnieniem modeli hipersprężystych dedykowanych tym materiałom. Warto zwrócić uwagę, że badano nie tylko problemy czysto mechaniczne, ale także zagadnienia biomechaniczne. Szkoda jedynie, że symbole dla odpowiednich wartości parametrów materiałowych i parametrów modeli nie są ujednolicone i nie zawsze korespondują z opisem modeli przedstawionym w rozdziale drugim. Następnie przedstawiono szczegółowo obliczenia przeprowadzone dla trzech różnych materiałów. Pierwszym analizowanym materiałem była sadza techniczna, którą zdefiniowano jako kompozyt hipersprężysty z wtrąceniami sferycznymi o różnych średnicach. Dane do wygenerowania elementu RVE, średnice wtrąceń i ich udział objętościowy, zostały pozyskane z histogramów na podstawie publikacji. Dla modelu homogenicznego przyjęto model Mooney'a-Rivlina, który wymagał identyfikacji dziesięciu parametrów. Element RVE poddany został odkształceniu, przeanalizowano siłę

reakcji w funkcji odkształcenia dla osiemnastu przypadków, po sześć dla rozciągania, ściskania oraz ścinania. Do identyfikacji parametrów modelu homogenicznego zastosowano opisany w rozdziale czwartym algorytm ewolucyjny z funkcją celu podaną w rozdziale piątym. Obliczenia zostały powtórzone ze względu na stochastyczny charakter procedury optymalizacji, pokazano zbieżność funkcji celu w funkcji liczby iteracji oraz zamieszczono wartości otrzymanych parametrów. Dla zidentyfikowanego modelu przeprowadzono obliczenia i porównano naprężenia dla elementu RVE i homogenicznego dla wszystkich stanów odkształcania, otrzymując zadowalającą zgodność. Element homogeniczny został następnie włączony do symulacji w skali makro. Analizowano uszczelkę samochodową, którą poddano odkształceniu. Podobny schemat postępowania został zrealizowany i opisany w pracy dla materiału hipersprężystego z wtrąceniami w postaci włókien, przy czym identyfikowano model neo-Hooke'a z trzema parametrami, a w skali makro analizowano uszczelnienie w połączeniu kołnierzowym. Ostatnim analizowanym materiałem był materiał biologiczny, substancja biała mózgu. Element RVE został zaprojektowany na podstawie literaturowego obrazu mikroskopowego, gdzie aksony były modelowane jako wtrącenia o stałej średnicy ułożone pod różnymi kątami. W tym przypadku dla elementu homogenicznego przyjęto model Ogdena, wymagający identyfikacji dwóch parametrów. Wyniki porównano z wynikami literaturowymi otrzymanymi przy wykorzystaniu metody uśredniającej kierunek aksonów. Wyniki porównania pokazały lepszą dokładność obliczeń dla opracowanego modelu.

Ostatni, siódmy rozdział, poświęcony jest wnioskom. Krótko opisano zalety opracowanego rozwiązania oraz wskazano te elementy metody, które decydują o poprawności obliczeń. Nie wskazano natomiast jakie czynniki powinny być wzięte pod uwagę przy wyborze modelu materiału dla elementu homogenicznego ani w jaki sposób dobrać testy obciążeniowe, których wyniki są wykorzystywane przy obliczaniu funkcji celu.

Podsumowując, opracowana przez Doktorantkę wieloskalowa, niesprzężona metoda dedykowana modelowaniu materiałów hipersprężystych oraz jej weryfikacja dla wybranych materiałów o odmiennej mikrostrukturze są wystarczające, aby udowodnić słuszność postawionej w pracy tezy. Sam opis zrealizowanych prac ma liczne niedociągnięcia, co rzutuje na wartość merytoryczną rozprawy. Na uwagę zasługuje fakt, że opracowana metoda obliczeniowa została zastosowana dla szerokiej gamy materiałów, począwszy od zastosowań przemysłowych aż po biomateriały. Warto podkreślić, że wartości liczbowe identyfikowanych parametrów były dla analizowanych materiałów znacząco różne, co pozwala stwierdzić, że opracowany algorytm można stosować dla dowolnych materiałów o różnorakiej niejednorodnej strukturze. Zaproponowana metoda wraz z przeprowadzonymi obliczeniami są najważniejszym osiągnięciem niniejszej rozprawy.

3. Uwagi szczegółowe

Praca nie jest pozbawiona błędów merytorycznych o większej bądź mniejszej wadze oraz nieprecyzyjnych określeń czy pojęć, których użycie wymagałoby wyjaśnienia lub podania referencji. Strona edycyjna też nie jest najmocniejszą stroną dysertacji. W rozprawie są liczne błędy interpunkcyjne, błędy składni i logiczne, co utrudnia jej czytanie. Nie sposób wymienić je wszystkie. Poniżej wymieniono najważniejsze z nich w kolejności ich występowania:

- Str. 6. „... *przeprowadzono na początku lat czterdziestych XIX w.*" Czy nie chodzi o wiek XX?
- Str. 6. „...*materiały ściśliwe, które w przejściach granicznych* ....". O jakie przejścia graniczne chodzi?
- Str. 7. Teza pracy rozpoczyna się słowami: „*Metoda homogenizacji niesprzężonej z użyciem algorytmu ewolucyjnego, skutecznie pozwala na wyznaczenie*.....", a, w mojej opinii, istotą

tezy jest, że: „*Metoda homogenizacji niesprzężonej z użyciem algorytmu ewolucyjnego,* ***pozwala na skuteczne*** *wyznaczenie....*".

- Str. 10. „*Związki fizyczne zależności między odkształceniami...*". Powinno być albo „*Związki fizyczne...*", albo „*Fizyczne zależności...*".
- Str. 17. „*Do przeprowadzenia tej metody, wykorzystuje się ...*". Raczej powinno być: „*W metodzie wykorzystuje się ...*".
- Str. 23. „*... wpływu wektorów naprężenia na powierzchnie materialne ośrodka....*". Co to są „powierzchnie materialne"?
- Str. 23. Zdanie nad równaniem (2.59) jest niezrozumiałe, nie podano też związku z wcześniejszymi równaniami.
- Str. 25. „*Zgodnie z literaturą...*". Jaką?
- Str. 26. „*... zachowują pierwotne własności....*". O jakie własności chodzi?
- Str. 27. „*W związku z tym, że podczas dużych odkształceń, materiały nie zawsze zachowują się w ten sam sposób. Dlatego należy za każdym razem określić model równania ...*". Ten fragment jest niezrozumiały.
- Str. 28. „*... może służyć jako dobry punkt startowy.*". Do czego?
- Str. 30. „*Model ..., został odkryty...*". Raczej: model opracowano. I dalej: „*Na celu było w jak najbardziej prawidłowy sposób opisać ...*". Nie do końca prawidłowa składnia zdania.
- Str. 34, równanie (3.9) oraz zdanie nad: „*... natomiast dla wtrącenia, odkształcenia i przemieszczenia równe są 0, ale naprężenia:*"?? Zdanie niezrozumiałe, nie opisano symbolu „$-\sigma_{ij}^{*}$".
- Str. 34. „*... analizowane są pola pomocnicze, które określają odchylenie od niektórych rozwiązań*". Zdanie niezrozumiałe.
- Str. 35 – 37. W tym fragmencie zostało wprowadzonych wiele symboli, bez ich objaśnienia, przez co treść jest mało czytelna, a w badaniach własnych nie znajduje odzwierciedlenia.
- Str. 42. „*... seria testów materiałów numerycznych...*". Co to są „materiały numeryczne"?
- Str. 44. Równanie (3.41). Proszę o wyjaśnienie symboli użytych w tym równaniu; „*... wszystkie zmierzone punkty...*", o jakie punkty chodzi i co to jest $n_{krok}^{[\alpha]}$, „*para*"?
- Str. 45, równanie (3.45). Proszę o podanie związku tego równania z wcześniejszymi zależnościami.
- Autorka używa nieprecyzyjnych określeń, bądź kolowializmów czy skrótów myślowych, których w opracowaniu naukowym należy unikać, przykładem może być „*moduł objętościowy*". Czy nie chodzi o moduł sprężystości objętościowej?
- Rozdział 2.3 Modele materiałów hipersprężystych. W opisie modeli nie podano żadnych jednostek, ani dla funkcji energii odkształcenia *W*, ani dla parametrów i stałych, które występują w równaniach w tym rozdziale. Symbolem *W* w tym rozdziale oznaczono funkcję energii odkształcenia, w spisie oznaczeń napisano, że jest to funkcja gęstości energii odkształcenia. Należałoby uściślić to pojęcie, a podanie jednostki rozwiałoby wszelkie wątpliwości.
- Rozdział 2.3.5. Dla modelu Arruda-Boyca wprowadzono pojęcie „statycznych segmentów". Nie ma jednak wyjaśnienia tego pojęcia.
- Rozdział 3.2, str. 40 i 41. „*W przypadku, gdy histogram nie jest dostępny, SSRVE można utworzyć poprzez minimalizację funkcji najmniejszych kwadratów z uwzględnieniem odpowiednich różnic miar statystycznych dla rzeczywistej mikrostruktury i SSRVE*". Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób dobrać te miary bez histogramów? I w jaki sposób oraz w jakim celu wykonywana jest analiza wrażliwości?
- Rozdział 5.1, str. 57. Przedstawiono wzór (5.1), który jest kluczowy dla rozwiązania zaproponowanego przez Doktorantkę. Wartości „*x*", które się w nim pojawiają, nazwano

„*wartością dla testu numerycznego*". Nie podano jednak, jaka wielkość jest tą wartością. Zdefiniowana zależność jest funkcją „**ch**", symbol nie został opisany. Chodzi tu zapewne o wektor, którego składowymi są parametry modelu materiałowego, objaśnienie tego wektora powinno znajdować się bezpośrednio pod tą zależnością. Co więcej, w opisie „x_0" jest „*wartością ... dla modelu homogenicznego....*", a przecież to właśnie ta „*wartość*" jest funkcją poszukiwanego wektora **ch**. Dla „x" napisano jedynie, że jest „*wartością dla testu numerycznego*", nie precyzując o jaki model chodzi. Uważam błędy i braki w opisie zależności (5.1) za duże niedociągnięcie.

- W tym samym rozdziale 5.1 przedstawiono na rys. 5.4, str. 59, schemat blokowy opracowanego algorytmu. To również jeden z ważniejszych elementów pracy. Pętla „*kolejna iteracja*" nie powraca do żadnego z modeli (powinna do modelu homogenicznego), wobec powyższego nie wiadomo dla jakiego modelu wykonywana jest analiza numeryczna dla różnych przypadków obciążenia. Z kolei z bloku „*Analiza numeryczna ... (rys. 5.1)*" wychodzą dwie strzałki, na dół i z prawej strony, nie jest to jednak blok warunku. Na podstawie tego schematu nie wiadomo więc jakie instrukcje i w jakiej kolejności są wykonywane w algorytmie.
- Str. 60. „*Zdyskretyzowany model osnowy i wtrąceń przedstawiono na rys. 5.2.*". Zapewne chodzi o rys. 5.5.
- Str. 63, tabela 5.7. Nie podano definicji obliczonego błędu względnego.
- Rozdział 6, str. 85, tabela 6.8. Na jakiej podstawie określono ograniczenia dla optymalizowanych parametrów?
- W rozdziale 6 w opisie parametrów i modeli powinny być stosowane dokładnie takie same oznaczenia jak w opisie modeli w rozdziale 2, a nie zawsze tak jest, np. str. 115, tabela 6.23.
- Str. 87, rys. 6.29. Brak podpisu osi poziomej.
- Str. 91. Podano czasy obliczeń dla dwóch modeli, nie sprecyzowano jednak jaki komputer został użyty w obliczeniach i czy uzyskane przyspieszenie jest niezależne od maszyny obliczeniowej.
- Str. 91, rys. 6.33. Nie podano jednostki przy wymiarowaniu.
- Str. 94, zależność (6.1). Nie opisano symboli „n" i „m", zapewne mają to samo znaczenie jak w funkcji celu (5.1), jednak powinny być zdefiniowane.
- W spisie literatury znajdują się pozycje, dla których nie znalazłam odniesienia w tekście rozprawy: 4, 21, 22, 42, 47, 48, 61, 81, 82, 98, 101, 102, 106 , 115, 117, 121.

4. Uwagi dyskusyjne

Po przeczytaniu rozprawy nasuwają się także uwagi dyskusyjne, które zebrano poniżej.

- Str. 29, rozdział 2.3.3. Autorka stwierdza, że model Ogdena jest zdecydowanie bardziej kosztowny obliczeniowo. Proszę doprecyzować w porównaniu z jakimi modelami i dlaczego?
- Jakie przyjęto kryteria dla doboru modelu materiału w elemencie homogenicznym? Na przykład dla sadzy przyjęto model Mooney'a-Rivlina.
- Na jakiej podstawie w algorytmie ewolucyjnym przyjęto liczbę populacji równą 2 i liczbę osobników 16? Jak dobrano parametry algorytmu przedstawione w tabeli 6.9?
- Wykres 6.29. Jakie wartości przedstawiono na tym wykresie, czy jest to przykładowy przebieg, czy średnia z dwudziestu? Jakie przyjęto kryterium stopu? Na wykresie widać, że funkcja celu stabilizuje się, jednak obliczenia były prowadzone dalej. To podniosło koszt obliczeniowy identyfikacji.

- Dla niektórych problemów liczba identyfikowanych parametrów była niewielka. Czy brano pod uwagę zastosowanie innych metod optymalizacji, na przykład deterministycznych, które są tańsze obliczeniowo w porównaniu z algorytmami ewolucyjnymi?
- Analizując wykres 6.45 (str. 103) przedstawiający zmianę wartości funkcji celu w kolejnych iteracjach oraz wykresy od 6.46 do 6.48 (str. 104), na których przedstawiono zmiany wartości optymalizowanych parametrów w kolejnych krokach, nasuwa się pytanie o jednoznaczność rozwiązania. Czy różne kombinacje parametrów nie dają, jeśli nie takiej samej wartości funkcji celu, to wartości niewiele się od siebie różniące? Jakie są wartości parametrów i funkcji celu w 11, 16 i 21 iteracji? Czy w związku z tym na podstawie przeprowadzonych obliczeń można wnioskować o jednoznaczności rozwiązania? Czy otrzymane wartości są minimum globalnym postawionego problemu?
- We wnioskach (rozdział 7, str. 129) pada stwierdzenie, że opracowana metoda pozwala na przeprowadzenie obliczeń „*w akceptowalnym czasie*". To pojęcie jest bardzo nieprecyzyjne. Jakie czasy Autorka uznaje za akceptowalne?
- W tym samym rozdziale, str. 129, napisano: „*Krytyczne* [powinno być krytyczny] *dla opracowanej metody jest dobór testów numerycznych kompozytu w skali mikro oraz dobór modelu konstytutywnego...*". W jaki sposób planować testy i dobierać modele? Czy możliwe jest sformułowanie wytycznych?

5. Podsumowanie

Pomimo wielu uwag szczegółowych, a także dyskusyjnych, recenzowaną rozprawę doktorską można uznać za wartościową pozycją naukową. Modelowanie wielkoskalowe materiałów hipersprężystych połączone z homogenizacją i algorytmami ewolucyjnymi w zastosowaniu do wyznaczanie zastępczych parametrów materiałowych w homogenicznym elemencie RVE, pozwoliło na znaczne obniżenie kosztów obliczeniowych złożonych modeli. Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia warunki określone w obowiązującej ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym. Wnioskuję zatem o dopuszczenie Pani mgr inż. Martyny Poręby-Sebastjan do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, 14.01.2021 r.

Dariusz Leśny