KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA
Wydział Inżynierii Metali
i Informatyki Przemysłowej
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Tel.:+48 (12) 617-29-21, Fax:+48 (12) 617-29-21
E-mail: Maciej.Pietrzyk@agh.edu.pl www.isim.agh.edu.pl

Kraków, 28.05.2015.

Prof. Maciej Pietrzyk

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Przemysława Makowskiego pt. "Wieloskalowe modelowanie tkanki kostnej".
Zlecenie na opracowanie recenzji otrzymałem od Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej pismem nr. RMTO-685/D/006/14/15 z dnia 9 kwietnia 2015 roku. Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Przemysława Makowskiego przedstawiam poniższą opinię.

1. PRZEDMIOT OCENY

Przedmiotem oceny jest praca doktorska składająca się ze spisu treści, wstępu, 4 rozdziałów zasadniczych oraz wniosków i spisu literatury, zawierająca 65 rysunków i 8 tablic. Spis literatury obejmuje 182 pozycje. W spisie literatury zawarto znane mi najważniejsze prace związane z tematyką rozprawy. Pracę uzupełniają streszczenia w języku polskim i angielskim.

2. OGÓLNA OCENA PRACY

Praca dotyczy modelowania wieloskalowego tkanki kostnej. W ostatnich latach obserwuje się ciągle rosnące zapotrzebowanie na modelowanie zjawisk w bioinżynierii. Rozwijane są modele wspomagające pracę lekarzy w różnych obszarach. Prawidłowe uwzględnienie złożonej struktury tkanek oraz określenie ich własności jest bardzo trudne i stanowi wyzwanie dla badaczy. Poszukiwanie korelacji pomiędzy parametrami skali mikro i zachowaniem się tkanki w skali makro jest ciągle w sferze zainteresowania naukowców, a celem prowadzonych badań jest jak najlepsze odwzorowanie rzeczywistości. W tym aspekcie uważam wybór tematyki pracy za w pełni uzasadniony.

Tytuł rozprawy odpowiada jej treści. Autor zaplanował i konsekwentnie zrealizował sekwencję rozważań teoretycznych zmierzających do zbudowania modelu wielkoskalowego tkanki kostnej. Rozdziały 2 i 3 stanowią wprowadzenie do tematyki pracy. Omówiono w nich budowę tkanki kostnej oraz metody badania własności tej tkanki a także metody modelowania i obrazowania tkanki kostnej. Szczególny nacisk położono na metody modelowania wieloskalowego i związane z tym modelowaniem metody homogenizacji. Ta część napisana jest przejrzyście i zwięźle i dobrze wprowadza czytelnika w zagadnienia poruszane w pracy. Omawiane zagadnienia potwierdzone są licznymi cytatami publikacji, w których wykorzystywano metody numeryczne do modelowania tkanki kostnej. Jednym z wniosków z rozdziałów 2 i 3 jest uwypuklenie trudności związanych z uwzględnieniem w modelach nierównomierności i anizotropii własności tkanki kostnej oraz długie czasy obliczeń, w których usiłowano uwzględnić te nierównomierności w sposób jawny. Na podstawie przeprowadzonej analizy Doktorant zaproponował szereg rozwiązań, które pozwoliły Mu opracować efektywny i dokładny model tkanki kostnej. Wymieniłbym tutaj takie rozwiązania jak zastosowanie tomo-

BIURO DZIEKANA
RMT 2015 -06- 03
L. dz. 825/D/006/2014/2015

grafii komputerowej do identyfikacji struktury tkanki kostnej, wykorzystanie homogenizacji numerycznej czy też zastosowanie periodycznych warunków brzegowych w RVE.

Głównymi celami pracy są budowa i identyfikacja modeli numerycznych w różnych skalach wymiarowych i połączenie tych modeli w jeden model wieloskalowy. Autor stara się osiągnąć ten cel w dwóch etapach. W pierwszym opracował algorytmy dla odwzorowania struktury tkanki kostnej oraz identyfikacji własności beleczek w tej tkance. W drugim etapie zastosował metody homogenizacji numerycznej dla wyznaczenia parametrów materiałowych tkanki kostnej w skali makro. W dalszej kolejności przeprowadził testy numeryczne dla porównania pełnego modelu niejednorodnego i modelu wieloskalowego, przyjmując ten pierwszy jako model odniesienia wiernie opisujący zachowanie się tkanki kostnej. Testy numeryczne zostały wykonane dla liniowej i nieliniowej sprężystości i wykazały znaczne skrócenie czasów obliczeń dla modelu wieloskalowego przy utrzymaniu rozsądnej dokładności tego modelu odniesionej do modelu niejednorodnego. W konsekwencji Autor opracował efektywny model wieloskalowy tkanki kostnej, który zastosował do zaprojektowania optymalnego spersonalizowanego implantu uzupełniającego ubytek kości w stawie biodrowym i opisu zachowania się tego implantu w warunkach obciążenia.

W pracy zawarto obszerny, uzyskany na drodze dużego nakładu pracy, materiał dotyczący bardzo trudnego problemu teoretycznego opisu zachowania się tkanki kostnej. Można wyróżnić szereg szczegółowych osiągnięć Autora zawartych w opiniowanej pracy, takich jak:

1. Wykonanie wirtualnego odwzorowania tkanki kostnej z wykorzystaniem nowoczesnych metod tomografii komputerowej i analizy obrazu.
2. Opracowanie i weryfikacja algorytmu homogenizacji numerycznej dla tkanki kostnej i zaimplementowanie tego algorytmu w programie Metody Elementów Skończonych (MES).
3. Przeprowadzenie identyfikacji własności beleczek kostnych na podstawie próby ściskania próbki wyciętej z kości.
4. Opracowanie algorytmu homogenizacji numerycznej i wykorzystanie tego algorytmu do określenia zastępczych parametrów kości beleczkowej. W tym rozwiązaniu Doktorant wykorzystał własną metodę wprowadzania periodycznych warunków brzegowych dla elementu RVE charakteryzującego się brakiem zgodności węzłów siatki na przeciwległych powierzchniach.
5. Opracowanie modelu wieloskalowego charakteryzującego się znacznie krótszymi czasami obliczeń niż pełny model niejednorodny, przy utrzymaniu dokładności symulacji na rozsądnym poziomie.
6. Zaprojektowanie mikrostruktury biorusztowania dającej zastępcze parametry materiałowe bliskie tkance kostnej. Mikrostruktura została zaprojektowana z wykorzystaniem optymalizacji topologicznej, w której zmiennymi projektowymi były wymiary elementów oraz odległości między nimi, a celem było uzyskanie własności w skali makro najbliższych własnościom tkanki kostnej. To podejście, wykorzystujące wcześniejsze wymienione powyżej autorskie rozwiązania, uznaję za główne osiągnięcie pracy o charakterze nowatorskim.
7. Zastosowanie opracowanej metodyki do modelowania biorusztowania kości i do budowy modelu układu kość-implant spersonalizowany. Doktorant opisał sekwencję działań wykonywanych dla zbudowanie tego modelu, obejmujących identyfikację parametrów materiałowych i homogenizację struktury kości beleczkowej. Wykonane symulacje potwierdziły funkcjonalność tego modelu.

Sumarycznie oceniam pracę w pełni pozytywnie. Szczegółowa analiza poszczególnych badań opisanych w pracy budzi jednak pewne wątpliwości i oczekiwałbym szerszych wyja-

śnień od Autora dotyczące kilku aspektów rozprawy. Kluczowe dla skutecznego wykorzystania w praktyce opracowanego modelu jest prawidłowe określenie własności tkanki kostnej i jej elementów (beleczek), czyli identyfikacja parametrów modelu. Moje główne krytyczne lub może raczej dyskusyjne uwagi dotyczące właśnie identyfikacji własności, a także drobne usterki dostrzeżone w pracy, są następujące:

1. Zbyt ogólnikowo opisana jest część doświadczalna pracy. Recenzent zdaje sobie sprawę, że głównym osiągnięciem naukowym Doktoranta są zaproponowane rozwiązania i modele numeryczne, ale lepszy opis wykonanych prób doświadczalnych pozwoliłby na głębszą ocenę prawidłowości identyfikacji parametrów materiałowych. Poniżej podaję główne wątpliwości dotyczące części doświadczalnej. Na ile własności kości badanej poza organizmem różnią się od własności kości żywej? Tylko hasłowo skomentowano czynniki wpływające na własności kości: wiek, stany chorobowe, płeć itp. Zbyt słabo ustosunkowano się do nierównomierności własności w objętości kości. Zbyt ogólnikowo opisano również wykorzystanie w pracy próby nanoindentacji. Nie jest jasne czy Autor wykonał te próby, a jeżeli tak to powinny zostać zamieszczone wyniki i sposób wyznaczenia modułu Younga beleczek kostnych.
2. Brakuje uzasadnienia wyboru metod optymalizacji w różnych częściach pracy. Czy zawsze najlepszą metodą były algorytmy genetyczne? Przykładowo, czy w rozdziale 5.1 gdzie w identyfikacji własności występują tylko dwie zmienne projektowe, nie powinna być zastosowana inna metoda?
3. W całej pracy brakuje dyskusji jednoznaczności rozwiązania zadania identyfikacji.
4. Nie jest jasna różnica między rysunkami 2.16a i 2.16b, szczegóły tej różnicy powinny być omówione w pracy.
5. Jak interpretować rys. 4.3? Nie podano skali. Wizualnie nie zachowano wymiarów z rys. 4.2.
6. Przy podawaniu czasów obliczeń, np. w Tablicy 4.1, należałoby podać na jakim sprzęcie komputerowym wykonano obliczenia.
7. Z równania (4.2) wynika bardzo duży spadek modułu Younga wraz z odkształceniem. Wskazany byłby komentarz.
8. Na rys. 4.10 i 5.11 nie objaśniono symboli d.
9. Na rys. 5.5, obszar z lewej strony (dane eksperymentalne) ma złożony kształt. Z czego to wynika?
10. Pod równaniem (5.11): δ_{ij} jest liczbą o jak najmniejszej wartości – niejasne.
11. Równanie (5.15): Należy interpretować, że poprawa w wyniku transformacji wyraża się tym, że suma szarych liczb w równaniu (5.11) jest mniejsza niż w równaniu (5.10)
12. Na rys. 5.16 wskazane byłoby podanie rzędu wymiaru poszczególnych skal.
13. Omówienie postępowania w rozdziale 5.5 powinno być szersze. Brak jest opisu osi odciętych na rys. 5.17.
14. Powinna zostać podana matematyczna postać funkcji celu dla identyfikacji zmiennych w równaniu (5.21).
15. Dlaczego warunków podanych na str. 95 nie wprowadzono jako ograniczeń w optymalizacji?
16. Jak modelowano połączenie implantu z kością?

Podsumowując ogólną ocenę pracy stwierdzam, że Doktorant udowodnił dobre przygotowany do prowadzenia oryginalnych badań naukowych w zakresie modelowania w bioinżynierii. Potwierdził On swoją wiedzę i bardzo dobre zrozumienie problemów w tym zakresie. Wykazał się biegłością w stosowaniu zaawansowanych metod modelowania numerycznego, a w szczególności meto identyfikacji parametrów materiałowych na potrzeby modelowania. Wymienione w recenzji w dużej części mają charakter polemiczny i nie podważają faktu, że

Autor samodzielnie rozwiązał istotny problem naukowy. Stąd sumaryczna ocena pracy jest bardzo dobra.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując opinię należy stwierdzić, że Autor:

- Wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych obejmujących symulację odkształcania tkanki kostnej i zastosował te umiejętności do rozwiązania bardzo skomplikowanego zagadnienia, jakim jest zaprojektowania spersonalizowanego implantu i symulacja zachowania się kości połączonej z implantem,
- Dla osiągnięcia tego celu zastosował opracowane własne rozwiązania w zakresie identyfikacji parametrów materiałowych i homogenizacji.

Zawarte w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na sumaryczną bardzo dobrą merytoryczną ocenę pracy. Praca stanowi samodzielne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie mechanika i spełnia wymagania zawarte w odpowiedniej ustawie. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Przemysława Makowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnioskuję również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Makowskiego. Jako uzasadnienie propozycji wyróżnienia rozprawy podaję:

- Praca dotyczy bardzo ważnego i trudnego zagadnienia, jakim jest modelowanie tkanki kostnej.
- Doktorant osiągnął istotny zarówno z teoretycznego jak i z praktycznego punktu widzenia cel, jakim było zaprojektowanie spersonalizowanego implantu kości. Udowodnił, że zaprojektowany implant ma własności zbliżone do własności tkanki kostnej.
- Dla osiągnięcia tego celu Doktorant opracował szereg autorskich rozwiązań w zakresie identyfikacji parametrów materiałowych i w zakresie homogenizacji własności tkanki kostnej.