



Gliwice, 27 maja 2015



Dr hab. inż. Witold Beluch
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska

Recenzja pracy doktorskiej **mgra inż. Przemysława Makowskiego** pt. „**Wieloskalowe modelowanie tkanki kostnej**”

1. Podstawa opracowania

Pismo RMT0-685/D/006/14/15 Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego, prof. dr hab. inż. Arkadiusza Mężyka, informujące niżej podpisanego o powołaniu na recenzenta uchwałą Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego z dnia 8 kwietnia 2015 roku.

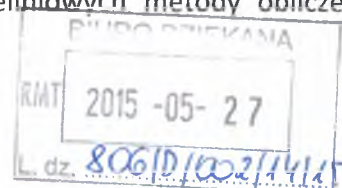
2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Praca doktorska składa się z 7 rozdziałów i liczy wraz ze streszczeniami w językach polskim i angielskim 124 strony. Wykaz literatury obejmuje 182 pozycje.

Rozdział pierwszy zawiera uzasadnienie wyboru przez Autora tematyki pracy, krótki przegląd jej zawartości jak również cel i tezę pracy.

Rozdział drugi jest poświęcony zagadnieniom modelowania tkanki kostnej, będącej strukturą niejednorodną i anizotropową o skomplikowanej geometrii. W początkowej części rozdziału przedstawiona została biologiczna budowa elementów układu kostnego człowieka wraz z budową tkanki kostnej w ujęciu hierarchicznym z uwzględnieniem różnych skal obserwacji (od skali nano do makro). W kolejnym podrozdziale przedstawiony jest przegląd stosowanych modeli materiału tkanki kostnej wraz z krótką dyskusją ich poprawności. Następny podrozdział prezentuje doświadczalne metody badań stosowane w celu określenia parametrów materiałowych próbek tkanek kostnych zarówno w skali makro jak i w skali mikro. Kolejne dwa podrozdziały koncentrują się na metodach pozwalających na obrazowanie struktury (dwu- lub trójwymiarowej) tkanki kostnej i wykorzystaniu tych danych do tworzenia modeli numerycznych. Szczególna uwaga została poświęcona metodom tomografii i mikrotomografii komputerowej, jako szczególnie nadającym się do obrazowania tkanek kostnych. Przedstawiono również procedurę tworzenia siatki metody elementów skończonych na podstawie danych tomograficznych. Kolejny podrozdział zawiera skrócony opis metody elementów skończonych jako metody przybliżonego rozwiązywania zagadnień brzegowych stosowanej w niniejszej pracy. W ostatniej części rozdziału drugiego Autor przedstawia obszerny przegląd literaturowy dotyczący inżynierii tkankowej ze szczególnym uwzględnieniem biorusztowań oraz stawianych im wymagań. Podejmuje również tematykę personalizacji biorusztowań i jej wpływu na skuteczność procesu leczenia.

Rozdział trzeci obejmuje przegląd literaturowy zagadnień modelowania wieloskalowego w mechanice ze szczególnym uwzględnieniem modelowania struktur kostnych. Przedstawione zostały metody wyznaczania efektywnych parametrów materiałowych materiałów ekwiwalentnych dla struktur niejednorodnych, w tym zastosowane w ramach pracy podejście wykorzystujące reprezentatywny element objętościowy (RVE) oraz metody numerycznej homogenizacji. W rozdziale tym Autor proponuje również zastosowanie w przypadku zagadnień nieliniowych metody obliczeń



wieloskalowych z zastosowaniem schematu niesprężonego, co pozwala na istotne zredukowanie kosztu obliczeniowego. Końcowy podrozdział rozdziału trzeciego stanowi krótki opis algorytmu ewolucyjnego zastosowanego do rozwiązywania zadań identyfikacji i optymalizacji.

Rozdział czwarty zawiera opis algorytmu homogenizacji numerycznej i jego zastosowania do modelowania wieloskalowego niejednorodnej struktury kości beleczkowej. Znajduje się tam ponadto opis przeprowadzonej weryfikację opracowanego algorytmu zarówno dla zagadnień liniowych jak i zagadnień z nieliniowościami fizycznymi (materiał hiposprężysty).

W rozdziale piątym Autor koncentruje się na badaniach własnych. W początkowej części rozdziału prezentuje proponowaną procedurę modelowania i optymalizacji spersonalizowanego biorusztowania kości. W podrozdziale 5.1 definiuje zadania wieloskalowej identyfikacji stałych materiałowych oraz wieloskalowej optymalizacji implantu spersonalizowanego. Rozdział 5.2 opisuje przebieg i prezentuje wyniki identyfikacji parametrów materiałowych próbki kostnej odpowiadającej RVE. Uzyskane wyniki są wykorzystywane w kolejnym podrozdziale do obliczenie zastępczych parametrów tkanki kostnej w skali makro. Podrozdział 5.4 zawiera opis trójskalowego modelu biorusztowania kości wytwarzanego z zastosowaniem przyrostowej metody osadzania topionego materiału. W następnym podrozdziale przeprowadzana jest wieloskalowa topologiczna optymalizacja ewolucyjna spersonalizowanego biorusztowania. Uzyskane wyniki zastosowano w podrozdziale 5.6 modelując bliższy koniec kości udowej człowieka z personalizowanym implantem i przeprowadzając analizę numeryczną układu z zastosowaniem MES.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie całej pracy oraz wnioski końcowe, dotyczące również planowanych kierunków dalszych badań Autora.

Rozdział siódmy zawiera spis literatury,

Podsumowując należy stwierdzić, iż jej układ całej pracy spójny i konsekwentny. Drobne zastrzeżenia można mieć jedynie do objętości poszczególnych rozdziałów. I tak rozdział 2 jest bardzo obszerny (33 strony) z kolei rozdział 4 obejmuje jedynie 11 stron. Zdaniem recenzenta bez szkody dla układu pracy można by było połączyć rozdziały 3 i 4 w jeden rozdział poświęcony zagadnieniom modelowania wieloskalowego i metod numerycznej homogenizacji. Z kolei rozdział 3.4, poświęconego algorytmom ewolucyjnym, bardzo pobieżnie traktuje istotną tematykę metody optymalizacji i identyfikacji stosowanej szeroko w ramach rozdziału piątego pracy.

3. Ocena merytoryczna pracy doktorskiej

Autor pracy postawił przed sobą ambitny cel opracowania spójnej metody modelowania wieloskalowego struktur kostnych i wykorzystania jej do przeprowadzenia wieloskalowej optymalizacji personalizowanych bioimplantów w postaci biorusztowań kości beleczkowej. Zrealizowanie tak postawionego zadania wymagało od Doktoranta szerokiej wiedzy, dotyczącej zarówno mechaniki, anatomii człowieka, metod optymalizacji z uwzględnieniem algorytmów biomimetycznych, metody elementów skończonych jak i informatyki.

Doktorant wykazał się ponadto zarówno umiejętnością przeprowadzania badań eksperymentalnych z zastosowaniem nowoczesnych metod (próby nanoindentacji, metoda cyfrowej korelacji obrazu) jak i analiz numerycznych z zastosowaniem zaawansowanych systemów metody elementów skończonych. Wykorzystanie metod homogenizacji numerycznej z zastosowaniem RVE pozwoliło na przeprowadzenie w akceptowalnym czasie obliczeń z jednoczesnym uwzględnieniem więcej niż jednej skali obserwacji.

Zdaniem recenzenta tytuł pracy nie oddaje w pełni szerokiej problematyki w niej zawartej. Oprócz samego modelowania na uwypuklenie niewątpliwie zasługują zarówno zagadnienia identyfikacji parametrów materiałowych tkanki kostnej, jak i przeprowadzenie wieloskalowej optymalizacji spersonalizowanych biorusztowań, obydwu z zastosowaniem algorytmów biomimetycznych.

Podjęty przez Autora temat pracy jest aktualny, ma istotne znaczenie praktyczne a sama praca wykazuje ponadto duży stopień oryginalności.

Do najważniejszych osiągnięć i oryginalnych elementów pracy należy zaliczyć:

- opracowanie i implementację komputerową metody ewolucyjnej identyfikacji osobniczych parametrów beleczek kostnych z wykorzystaniem danych eksperymentalnych;
- opracowanie i weryfikację algorytmów homogenizacji numerycznej, w szczególności dla zagadnień nieliniowych;
- zastosowanie metody Embedded Cell Approach wykorzystującą tzw. strefę buforową do rozwiązania trudności z zadawaniem periodycznych warunków brzegowych w przypadku nieperiodycznej siatki MES w zagadnieniach numerycznej homogenizacji;
- przeprowadzenie weryfikacji poprawności ekstrakcji próbki kostnej za pomocą ewolucyjnej identyfikacji kątów Eulera;
- jednoczesne uwzględnienie trzech skal (mikro, mezo i makro) w przypadku modelowania struktury personalizowanego bioimplantu – typowo stosowane są modele uwzględniające dwie skale;
- opracowanie metody wieloskalowego modelowania bioimplantów z uwzględnieniem technologii wytwarzania biorusztowań kości beleczkowej;
- przeprowadzenie wieloskalowej ewolucyjnej optymalizacji spersonalizowanych biorusztowań kości beleczkowej;
- przeprowadzenie numerycznych analiz wieloskalowej bliższego końca kości udowej z zaimplantowanym spersonalizowanym biorusztowaniem.

Liczba pozycji literaturowych do których odwołuje się Autor jest co najmniej wystarczająca i świadczy o świadomym i analitycznym podejściu Autora do badań. Podkreślić ponadto należy, iż nie występują w pracy tzw. cytowania seryjne.

Poniżej zestawione zostały uwagi, które nasunęły się recenzentowi w trakcie czytania pracy. Należy nadmienić, iż uwagi te mają w dużej mierze charakter dyskusji i nie umniejszają wysokiej merytorycznej oceny całej pracy.

Uwagi ogólne:

1. Autor wielokrotnie posługuje się pojęciem „model dokładny” (np. str. 6, 28, 57, 59, 65, 78, 99, 106). Modelowanie zawsze wiąże się z ograniczeniami i uproszczeniami, np. według prof. J. Dietrycha („System i konstrukcja”) „model jest układem celowo dobranych cech rozpatrywanego układu” a zatem ze swej natury nie może być dokładny.
2. W kilku miejscach (strony 19, 20, 72, 77) występuje pojęcie „dokładne pomiary”. Z wielu powodów (np. niedokładność przyrządów i metod pomiarowych czy zmienność warunków otoczenia) wynik pomiaru zawsze różni się od prawdziwej wartości wielkości mierzonej.

3. Autor posługuje się w stosunku do elementu skończonego określeniem „element skończony o liniowej funkcji kształtu” (np. str. 57, 68), co niesłusznie sugerowałoby jedną funkcję kształtu dla danego elementu skończonego.
4. Na stronie 20 Autor pisze: „Metodą eksperymentalną pozwalającą na określenie parametrów kości beleczkowej w skali mikro (pojedyncze beleczki kostne) oraz skalach niższych jest metoda nanoindentacji”, z czego można wnioskować, iż jest to w rozważanym problemie jedyna możliwość. Dwa akapity dalej jednakże Autor pisze: „Parametry materiałowe beleczki kostnej mogą zostać również określone na podstawie próby trójpunktowego zginania pojedynczej beleczki kostnej oraz symulacji numerycznej MES eksperymentu.” bez stosownego skomentowania tego faktu.
5. Na stronie 45 Autor pisze: „Wraz z rozwojem MES zaczęto stosować bardziej zaawansowane modele materiału oraz dokładniejsze geometrie 3D kości”. Wydaje się, że oprócz rozwoju samej metody niezwykle istotna jest też stale rosnąca moc obliczeniowa komputerów.
6. W rozdziale 5.4 Autor prezentuje modelowanie struktury personalizowanego bioimplantu z zastosowaniem 3 różnych skal, co jest spowodowane przyjętą metodą jego wytwarzania. Należy takie podejście uznać za bardzo cenne, gdyż o parametrach makroskopowych decydują zarówno własności w skali mikro, związane zarówno z zastosowanym w procesie wytwarzania przyrostowego materiałem jak i z parametrami samego procesu wytwarzania, jak i parametry geometryczne i topologiczne struktury biorusztowania w skali mezo. W związku z powyższym pewien niedosyt odczuwa się przy lekturze kolejnego podrozdziału, w którym optymalizacja jest procesem obejmującym wyłącznie 2 skale (mezo i makro).
7. Na stronach 88 i 89 Autor opisuje materiały stosowane jako do tworzenia biorusztowań kości i stwierdza, że biopolimer PLGA jest z nich najwłaściwszy. W następnym akapicie informuje, że "wytworzono z termoplastycznego materiału ABS (kopolimer akrylonitrylo-butadienostyrenowy), skalowaną, wzorcową strukturę biorusztowania kości" pozostawiając wybór materiału bez komentarza.
8. Na stronie 90 znajduje się fragment: „Analiza numeryczna MES struktury biorusztowania o rozmiarze ubytku kostnego, z zachowaniem stopnia dokładności na poziomie mikro (osadzone ścieżki) dla całego obszaru implantu nie jest możliwe, szczególnie w przypadku zadań optymalizacji i identyfikacji.” Powyższe stwierdzenie wymagałoby uzasadnienia.
9. W pracy występują niekonsekwencje w stosowaniu angielskiego słownictwa – nie jest jasne, czym Autor się kierował w podawaniu angielskich odpowiedników polskich nazw, pomijając tłumaczenie w innych przypadkach.
10. W pracy występuje spora liczba usterek interpunkcyjnych, stylistycznych oraz tzw. literówek, co świadczy o pewnej niestaranności w przygotowywaniu pracy.

Uwagi szczegółowe:

1. Ze względu na chronologię podrozdział 1.2 powinien nosić tytuł „Cel i teza pracy” miast „Teza i cel pracy”.
2. Określenie „skala meso” powinna zostać zmieniona na polską formę „skala mezo”.
3. Na str. 12 znajduje się łacińskie tłumaczenie: „(...) tworząc beleczki kostne (*trabecula*)” . Ponieważ w innych przypadkach Autor nie podawał łacińskich odpowiedników nazw polskich, wydaje się to zbędne.
4. Podpis pod Rys. 2.7 zawiera nie do końca zrozumiałe odwołanie do literatury. Jeśli w pozycji 125 są pozostałe użyte odwołania, to raczej nie należy ich dodatkowo zamieszczać.

5. Strona 13: stwierdzenie „W skali makro kość jest materiałem jednorodnym o zastępczych parametrach materiałowych (...)” wymaga uzasadnienia.
6. W pracy występują zamiennie dwie formy: „materiał liniowo-sprężysty” i „materiał liniowo sprężysty”
7. Autor w kilku miejscach w pracy w odniesieniu do rzeczowników policzalnych stosuje „ilość” zamiast „liczba”, np. w odniesieniu do płaszczyzn symetrii (strony 15 i 16), rzutów obiektu (strona 23) czy niejednorodności mikrostruktury (strona 49).
8. Strona 19: opis prób trójpunktowego i czteropunktowego zginania jest lakoniczny (brak np. informacji o rozmieszczeniu sił w próbie czteropunktowego zginania, tej próbie nie towarzyszy też stosowny rysunek, jak to ma miejsce w przypadku próby trójpunktowego zginania).
9. Podpis pod Rys. 2.11 powinien zawierać odwołanie do źródła.
10. Początek strony 21: po zdaniu kończącym się: „(...)przez Allana McLeoda Cormacka.” wskazane byłoby odwołanie do literatury.
11. Wzór 2.10 jest niewłaściwy i sugeruje dzielenie przez zero.
12. Użyte na stronie 26 określenie „komercyjnych oprogramowań” jest językowo niepoprawne.
13. Na stronie 27 niepotrzebnie zostają ponownie wyjaśnione akronimy *CT* oraz μCT .
14. Strona 28: brak choćby krótkiej informacji, na czym polega technika progowania.
15. Strona 29: Autor pisze „Obszary poddane progowaniu reprezentowane są przez osobne maski”, bez wyjaśnienia, czym jest maska w kontekście techniki progowania.
16. Strona 30: określenie „trójkąt równoboczny o równych kątach wewnętrznych” zawiera niepotrzebną nadmiarowość informacji.
17. Strona 32: Autor nie wyjaśnia na czym polegają metody kary i eliminacji; brak też odesłania czytelnika do literatury.
18. Na stronie 44 znajduje się zdanie: „Przeprowadzając analizy z użyciem metody homogenizacji realizowane jest przejście pomiędzy skalami, ze skali mikro do makro.” Ponieważ inne skale niż mikro i makro też mogą być rozpatrywane, stosowniejsze byłoby bardziej ogólne sformułowanie „ze skali wyższej do skali niższej”.
19. Strona 51: fragment „w modelu RVE z wykorzystaniem równań liniowych (*ang. Multi Point Constraints, MPC*)” sugeruje, że MPC to angielska nazwa równań liniowych
20. Podpisy pod równaniami 3.4 oraz 3.5 zawierają elementy wyjaśnione wcześniej (na stronie 49).
21. Nie jest jasno określone, z czego wynika postać równania 4.2.
22. Podpis pod Rys. 5.2 nie odpowiada zawartości tego rysunku (schemat blokowy prócz optymalizacji obejmuje również wytwarzanie i implantację).
23. Skala barw na Rys. 5.4 ułatwiłaby jego interpretację.
24. Nie jest jasne, z czego wynika inny niż kwadratowy kształt obszaru, w którym odczytywano przemieszczenia w metodzie DIC (Rys. 5.5).
25. Strona 75: Wysokie koszty i czasy obliczeniowe są spowodowane nie tylko, jak pisze Autor, iteracyjnością algorytmu ewolucyjnego, ale również jego populacyjnym charakterem.
26. Strona 75: „zastosowano wariant algorytmu ewolucyjnego z dwoma podpopulacjami” jest określeniem nie w pełni precyzyjnym, jest to raczej algorytm typu wyspowego/migracyjnego w którym dla potrzeb pracy przyjęto liczbę podpopulacji równą 2.

27. Strony 75 i 94, parametry algorytmu ewolucyjnego: 1. Z zestawienia parametrów wynika, iż nie był wykorzystywany żaden operator krzyżowania. 2. Brak uzasadnienia przyjęcia takich a nie innych wartości poszczególnych parametrów.
28. Nieliczne dane zamieszczone w Tab. 5.1 z powodzeniem można było zawrzeć w samym tekście rozdziału.
29. Na stronie 76 znajduje się niezbyt fortunne określenie: „obliczona na drodze eksperymentalnej”.
30. Na stronie 78 znajduje się fragment „W modelach ECA stosowane są warunki brzegowe Neumanna lub Dirichleta (Rys. 5.7)”, przy czym na wspomnianym rysunku nie występują wymienione warunki brzegowe.
31. Strona 79: Autor nie wyjaśnia (ani nie odsyła do literatury) czym są „zdegenerowane elementy skończone niskiej jakości”.
32. Strona 79: nie jest jasne, dlaczego przyjęto taką a nie inną grubość strefy buforowej i czy przeprowadzono badania, jak wielkość strefy buforowej wpływa na wynik homogenizacji.
33. Strona 82: Autor stwierdza, iż „minimalizację przeprowadzono z użyciem algorytmu ewolucyjnego” nie podając żadnych dodatkowych informacji (np. dotyczących wartości parametrów algorytmu).
34. Strona 83: powtórne wprowadzenie angielskiego odpowiednika strefy buforowej.
35. Strona 84: akronim „SD” nie jest wyjaśniony.
36. Wykres na Rys. 5.17 nie zawiera opisu osi.
37. Strona 94: Autor pisze: „Optymalizacja polegała na minimalizacji funkcji celu” bez podania postaci tejże funkcji.
38. Strona 94: „(...)optymalna struktura biorusztowania osobniczego została znaleziona już w 18 iteracji” – skąd pewność, że znalezione najlepsze rozwiązanie jest optymalne w sensie globalnym?
39. Rys. 5.19: brak jednostek przy opisie osi pionowej wykresu.
40. Rys. 5.20: miast „widok z przodu b) widok z lewej strony c) widok z góry” bardziej jednoznaczne byłoby opisywanie widoków z zastosowaniem widocznego na rysunku układu współrzędnych.
41. Rys. 5.23: 1. Brak na rysunku osi z, do której w tekście odwołuje się Autor. 2. Brak skali barw umożliwiającej interpretację wyników.
42. Strona 99: we fragmencie „(...) struktury zoptymalizowanej w rozdziale 5.4” powinno się znajdować odwołanie do podrozdziału 5.5.
43. Na Rys. 5.25 nie został umieszczony układ współrzędnych, do którego osi odwołania znajdują się w Tab. 5.5 (indeksy składowych sił obciążających).
44. Na Rys. 5.27 zabrakło jednostek naprężeń i przemieszczeń.
45. Strony 104 i 105: Autor porównuje wyniki analiz numerycznych; zestawienie wyników w postaci tabeli ułatwiłoby czytelnikowi takie porównanie, w szczególności, gdyby w tej samej tabeli znajdował się „zakres odkształceń występujących w kości beleczkowej in vivo”, oraz „naprężenia maksymalne dla kompozytu biopolimeru PLGA z hydroksyapatytem” po które czytelnik zostaje odesłany do literatury.
46. Strona 106: sformułowanie „identyfikacji optymalnych poziomów obciążania stawu” nie jest zbyt fortunne w kontekście pracy, w której jednym z rozwiązywanych zagadnień jest zadanie identyfikacji.
47. Brak odwołania w tekście do pozycji 124 literatury.

Reasumując należy stwierdzić, że podjęty cel został przez Autora w pełni zrealizowany a teza pracy została udowodniona.

4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, iż mgr inż. Przemysław Makowski wykazał się szeroką wiedzą w dyscyplinie mechanika oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam również, iż recenzowana praca doktorska spełnia wszelkie merytoryczne i formalne kryteria stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14 marca 2003r (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Krzysztof Żelud

