

Dr hab. inż. Jolanta Pauk
Profesor Politechniki Białostockiej
Wydział Mechaniczny
Instytut Inżynierii Biomedycznej
Wiejska 45C, 15-351 Białystok
e-mail: j.pauk@pb.edu.pl, tel. 510 034 086

Białystok, 26.08.2021

Recenzja

***rozprawy doktorskiej mgr Yunuhéna Hernández Rodrígueza
„Mathematical modeling and examination of interactions between bone
substitute, mandibular living tissue and tooth implant”***

Recenzję opracowano na podstawie pisma dziekana Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego z dnia 12.07.2021 roku. Pracę doktorską przygotowano pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Tomasza Lekszyckiego. Przewód doktorski otwarty został w dyscyplinie mechanika, aktualnie mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

1. Problem naukowy przedstawiony i rozwiązany w rozprawie

Rozprawa mgr Yunuhéna Hernández Rodrígueza dotyczy opracowania nowego modelu matematycznego przebudowy tkanki kostnej. Aby osiągnąć ten cel Doktorant przeprowadza prace eksperymentalne na próbkach kości wołowych, stosując nowoczesne techniki pomiarowe, a także prezentuje wyniki symulacji z wykorzystaniem opracowanego modelu.

W literaturze znane są procesy przebudowy tkanki kostnej, które znalazły akceptację środowiska naukowego. Do najbardziej znanych zalicza się prawo Wolffa, modele fenomenologiczne, teorię adaptacyjności Cowina oraz modele oparte na wykorzystaniu metod optymalizacji konstrukcji z uwzględnieniem wybranych czynników biologicznych lub mechanicznych. Istotną rolę w poznaniu tego procesu odgrywają uproszczone badania na modelach oraz symulacje numeryczne, które umożliwiają poznanie struktury tkanki

kostnej, zmiany jej objętości, zmiany rozkładu gęstości, a także wartości modułu sprężystości przy jednoczesnej redukcji lub eliminacji błędów pomiarowych, występujących w trakcie realizacji badań doświadczalnych. Poziom złożoności zjawiska, zależność od wielu czynników, a także od sygnałów z układu centralnego skłania naukowców do prowadzenia intensywnych badań z wykorzystaniem metody elementów skończonych, mających na celu zrozumienie natury i szczegółów mechanizmów biorących udział w tych procesach. Badania te koncentrują się głównie na analizie rozkładu naprężeń w implantach i kości wokół implantu, interakcji między kością a implantem, analizie różnych materiałów na implanty, a także projektowaniu protez. Istnieje jednak potrzeba opracowania podejścia, które umożliwi formalne wyprowadzenie związków matematycznych, opisujących różne modele funkcjonalnej adaptacji kości, przystosowanych do teoretycznych badań wybranych biomechanicznych efektów, które są możliwe do zaimplementowania w komercyjnych programach komputerowych do numerycznych symulacji badanych procesów. Takiej próby podjął się Doktorant, który w pracy zaproponował nowy matematyczny model przebudowy tkanki kostnej, odbiegający od znanych z literatury modeli o naprężeniu i uwzględniający dodatkowe funkcje.

Wybór tematu pracy uważam za interesujący i niezwykle aktualny. Mieści się on w ważnym i priorytetowym obszarze naukowym, który wpisuje się w dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna.

2. Zakres rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca składa się ze 156 stron, w tym ośmiu rozdziałów, które poprzedzają: streszczenie w języku polskim i angielskim i spis treści, a całość wieńczy spis literatury oraz zestawienie tabel i rysunków.

W rozdziale pierwszym Doktorant wskazuje argumenty przemawiające za wyborem tematu rozprawy i formułuje cel i zakres pracy (4 strony).

Rozdział drugi (54 strony) ma charakter przeglądowy w zakresie: podstawowych funkcji kości oraz ich budowy makroskopowej i mikroskopowej, procesów zachodzących w tkance kostnej, mechanizmów odpowiedzialnych za jej przebudowę, właściwości mechanicznych kości i materiałów porowatych, metod obrazowania kości, aplikacji i funkcjonalności metody elementów skończonych, a także modeli matematycznych kości i ich klasyfikacji.

Kolejne rozdziały stanowią oryginalne wyniki uzyskane przez Autora. W rozdziale trzecim (5 stron) Doktorant przeprowadza badania eksperymentalne, mające na celu charakterystykę właściwości mechanicznych tkanki gąbczastej, na cylindrach wykonanych z kości wołowej. Rozwiązuje kilka istotnych problemów, spośród których należy wymienić: opracowanie procedury pomiarowej, przygotowanie próbek do badań eksperymentalnych, analizę uzyskanych wyników.

Rozdział czwarty (14 stron) stanowi uzupełnienie rozważań przedstawionych w rozdziale trzecim. Doktorant prezentuje wyniki testu ściskania wykonanego w Queen's Mary na Uniwersytecie Londyńskim i Politechnice Warszawskiej oraz przeprowadza analizę właściwości strukturalnych i mechanicznych kości gąbczastej.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, Doktorant opracowuje nowy model matematyczny przebudowy kości (rozdział piąty, 15 stron), który następnie wykorzystuje do analizy kości żuchwy pod kątem zmiany jej gęstości i testuje na wszczepionym implancie zębowym. Dobór metod i narzędzi numerycznych do modelowania i symulacji przebudowy kości wydaje się być prawidłowy. Trudno jednoznacznie ocenić poprawność analiz numerycznych ze względu na brak kodów źródłowych własnych skryptów, które mogłyby stanowić załącznik rozprawy.

Wyniki prowadzonych badań w rozdziale szóstym pracy (11 stron) dowodzą podobieństwa w zakresie gęstości kości między wynikami symulacji matematycznych a rzeczywistym przypadkiem klinicznym, zarejestrowanym za pomocą fotografii rentgenowskiej. Dowodzi to faktu, iż proponowany model może być przydatny do badań na różnym etapie stanów chorobowych.

Pracę zamyka podsumowanie wyników badań oraz dyskusja perspektyw przyszłych prac w tej dziedzinie (4 strony).

Rozprawa jest napisana poprawnie, zawiera odwołania do tabel i rysunków oraz odpowiednią liczbę źródeł bibliograficznych - 309 pozycji. Dowodzi to odpowiedniej wiedzy teoretycznej i dobrej orientacji w zakresie zagadnień będących przedmiotem rozprawy doktorskiej. Pewien niedosyt stanowi brak w tym wykazie prac, których Doktorant jest autorem/współautorem.

3. Ocena ogólna rozprawy doktorskiej

Procesy przebudowy tkanki kostnej są istotne z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania układu szkieletowego w różnych fazach: podczas wzrostu kości

w rozwijającym się organizmie, przebudowy kości w organizmie dojrzałym, a także w wyniku gojenia się złamań. Tematyka rozprawy doktorskiej nawiązuje do badań modelowych dotyczących przebudowy tkanki kostnej i zmian jej właściwości mechanicznych. Doktorant podejmuje się zagadnienia, które jest interesujące poznawczo w wielu aspektach: biologicznym, fizjologicznym, histopatologicznym, chirurgicznym oraz biomechanicznym, a jednocześnie ważne z aplikacyjnego punktu widzenia.

Opracowane nowe formuły matematyczne, łączące parametry mierzalne za pomocą mikrotomografii komputerowej z własnościami mechanicznymi mogą znaleźć zastosowanie w praktyce klinicznej, jako metoda przewidywania nieprawidłowej utraty masy kostnej w różnych stanach chorobowych. Jest to nowy element, który powinien przyczynić się do ulepszania konstrukcji implantów.

Dużą zaletą rozprawy jest jej całościowy charakter: zawiera ona część teoretyczną, doświadczalną i badania symulacyjne. W części teoretycznej Doktorant przedstawia dostępne modele przebudowy kości. W części doświadczalnej przeprowadza badania eksperymentalne na próbkach wołowej kości gąbczastej. Dobrze udokumentowanym osiągnięciem Doktoranta jest przeprowadzenie symulacji komputerowych w zakresie rozkładu gęstości tkanki kostnej zuchwy.

Podsumowując, do oryginalnych elementów rozprawy zaliczam:

1. Opracowanie nowego modelu matematycznego przebudowy tkanki kostnej.
2. Weryfikację modelu matematycznego na przypadkach klinicznych.

4. Critical comments

I have some remarks, which require discussion during the defense:

1. A dissertation hypothesis is the most important part of scientific research, as it is a testable prediction statement around which a scientist build an investigation. Therefore, all the parts of the thesis, especially the conclusion, must be closely related to the hypothesis, which should be stated clearly using appropriate terminology. The PhD Candidate formulated the hypothesis at the beginning of the dissertation. However, a comparison between results and initial hypothesis in different parts of the dissertation was not provided.
2. The specimens were kept in wet 37⁰C conditions – what kind of solution was used? How does it affect mechanical properties if it's simply warm water and not a solution representing body pH like physiological fluid?

3. Compression is only static at 10% of strain. However, it is known that biological tissues are viscoelastic – mechanical properties depends on the strain rate and at different strain rates, the tissues will behave differently (different stress-strain curves for different strain rates). It seems like there is a limitation here. Why the testing was not performed at different strain rates?
4. Specimens are made from bovine femoral condyles. Chapter 5 shows a FE model of the mandible. How femoral bone is similar/different from the mandible. Moreover, the mandible is human while femoral specimens are from bovine – an animal. How compression testing is related to bone remodelling?
5. How the specimen geometry was obtained? There is no information about image segmentation.
6. How the boundary conditions for finite element model were defined?
7. Have the effect of X-rays during scanning, finite element mesh refinement and the boundary conditions on the properties of trabecular bone been analysed?
8. Please, explain the inclusion/exclusion criteria for the clinical case included in the study?
9. Please, characterize a bone substitute material used in the study.

5. Editorial notes

1. Unbalanced work structure. The volume of chapter 2 differs few times from the others chapters („Literature review” has been described on 54 pages). The lack of balance is treated as an editorial glitch.
2. A complete dissertation always includes an abstract outlining the objectives or research questions of the dissertation, the key, research methods, results and conclusions. There is a lack of objectives and conclusions in the Polish abstract. Moreover, there are many grammatical errors in the section. Moreover, the translation of specialist vocabulary from English is very confusing in many parts of the abstract. The paper was written in English. Some editorial errors was found:
 - inappropriate references e.g. „after []”, „from []”,
 - low quality description in Fig. 2.2, 2.4, 2.9.

6. Wniosek końcowy

Wskazane wyżej usterki nie podważają pozytywnej ogólnej oceny pracy. Recenzent wyraża przekonanie, że wobec widocznej kompetencji doktoranta w zakresie objętym tematem pracy, będzie on w stanie ustosunkować się do przedstawionych uwag i obronić swoje stanowisko podczas publicznej dyskusji nad pracą.

Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy i zaproponował nowy model matematyczny przebudowy kości. Stwierdzam, że przedstawiona przez mgr Yunuhéna Hernández Rodríguez rozprawa „*Mathematical modeling and examination of interactions between bone substitute, mandibular living tissue and tooth implant*” odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim przewidzianym rozporządzeniem MNiSW z dnia 19 stycznia 2018 r. Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna o dopuszczenie mgr Yunuhéna Hernández Rodríguez do publicznej obrony.

The work is the original solution of the posed problem, valuable in terms of research and application. The work confirms the theoretical knowledge and practical skills of the doctoral student in the area related to the work and constitutes an evidence of his ability to independently conduct scientific work. I conclude that the dissertation "*Mathematical modeling and examination of interactions between bone substitute, mandibular living tissue and tooth implant*" prepared by MSc Yunuhéna Hernández Rodríguez meets the requirements of the Act of 19 January 2018 on Degrees and the Academic Title and Scientific Degrees and Title in the field of art, and put the request to the Council of the Discipline Mechanical Engineering of the Warsaw University of Technology for its release to the public defense.

Yolante Beech