

25 MAJ 2018

PAŃSTWOWY INSTYTUT  
WYŻSZEJ MECHANICZNEJ TECHNOLOGICZNEJ  
dr hab. inż. Anna Tymotejczuk,  
prof. zw. w Pol. Śl.

**Prof. dr hab. inż. Tadeusz BURCZYŃSKI, czł. koresp. PAN**

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ul. A. Pawińskiego 5B

02-106 Warszawa

e-mail: [tburczynski@ippt.pan.pl](mailto:tburczynski@ippt.pan.pl)

Warszawa, 19.05.2018

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej**  
mgra inż. Łukasza Cyganika

***Wyznaczanie własności mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej na podstawie obrazowania mikrotomograficznego***

**1. Uwagi ogólne**

Rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Cyganika jest poświęcona opracowaniu metody umożliwiającej wyznaczenie własności mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej na podstawie obrazów pozyskanych za pomocą ilościowej mikrotomografii komputerowej.

Podjęcie tej tematyki badawczej należy uznać za niezwykle trafne z uwagi na prowadzone badania nad opracowaniem nowych nieinwazyjnych metod wyznaczenia własności mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej.

Praca powstała na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej, a jej promotorem jest dr hab. inż. Grzegorz Kokot.

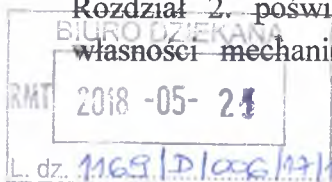
Biorąc pod uwagę cel i zakres rozprawy, można ją z całą pewnością zakwalifikować do dyscypliny mechanika.

**2. Zakres rozprawy**

Rozprawa zawiera 97 stron. Składa się ze spisu treści, ośmiu rozdziałów, bibliografii oraz streszczeń w j. polskim i angielskim.

Rozdział 1. ma charakter wprowadzenia i zawiera zwięzłe, syntetyczne informacje dotyczące zagadnień związanych z badaniem własności mechanicznych kości, cel i tezę rozprawy oraz przegląd treści rozprawy.

Rozdział 2. poświęcony jest opisowi podstaw tomografii komputerowej w badaniach własności mechanicznych tkanek kostnych. W rozdziale tym przedstawiono istniejące



w literaturze przedmiotu zależności opisujące własności mechaniczne tkanki kostnej, a także wyprowadzono nową zależność opartą na pracy Wagnera.

Ogólną koncepcję opracowanego podejścia przedstawił Doktorant w rozdziale 3.

Rozdział 4. poświęcony jest opisowi przebiegu badań eksperymentalnych jakie wykonał Doktorant, polegających na próbach ściskania próbek z kości gąbczastej wraz z pomiarami odkształceń i przemieszczeń metodą cyfrowej korelacji obrazu.

Podstawy MES przedstawił Doktorant w rozdziale 5.

Rozdział 6. zawiera opis symulacji komputerowych prób ściskania próbek.

Porównanie odkształceń i naprężeń z prób eksperymentalnych i symulacji komputerowych przedstawił Doktorant w rozdziale 7.

W rozdziale 8. znajduje się omówienie uzyskanych wyników.

Podsumowanie uzyskanych wyników znajduje się w rozdziale 9.

Bibliografia zawiera 83 pozycje literaturowe, w tym 2 pozycje są współautorstwa Doktoranta.

### **3. Ocena merytoryczna**

Oceniana rozprawa doktorska poświęcona jest ważnej i aktualnej problematyce badawczej związanej z opracowaniem metody oceny parametrów mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej na podstawie nieinwazyjnych badań opartych na obrazowaniu za pomocą ilościowej mikrotomografii komputerowej.

Ilościowa mikrotomografia komputerowa umożliwia określenie struktury kości gąbczastej oraz rozkładu gęstości mineralnej tkanki kostnej. Stosując odpowiedniej zależności pomiędzy modułem Younga, a gęstością mineralną tkanki kostnej, można następnie wyznaczyć modułu Younga wewnątrz struktury kości gąbczastej.

Doktorant stawia tezę, że:

*„Metoda wyznaczania własności mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej na podstawie ilościowego obrazowania mikrotomograficznego, wykorzystująca nową, opracowaną zależność pomiędzy modułem Younga i gęstością tkanki kostnej, umożliwia skuteczne i efektywne wyznaczanie własności mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej”.*

W literaturze przedmiotu istnieje wiele formuł opisujących zależność modułu Younga od gęstości tkanki kostnej, ale do tej pory nie ma jednoznacznych wyników badań wskazujących, która zależność jest najbardziej wiarygodna. Dlatego główną trudnością w opracowaniu metody oceny własności tkanki kostnej gąbczastej jest wykreowanie odpowiedniej zależności korelującej moduł Younga z gęstością o wysokiej dokładności przewidywania własności mechanicznych.

W ramach badań przeprowadzonych przez Doktoranta zaproponowano nową zależność łączącą moduł Younga z gęstością mineralną tkanki kostnej oraz zweryfikowano ją pod

względem dokładności przewidywania własności mechanicznych. Przy okazji zbadano także kilka innych zależności dostępnych w literaturze. Badania przeprowadzone przez Doktoranta obejmowały eksperymentalne testy mechaniczne przeprowadzane na sześciennych próbkach kości gąbczastej, w których wykorzystano metodę cyfrowej korelacji obrazu do pomiaru rzeczywistych pól przemieszczeń i odkształceń próbek kości poddanych statycznemu ścisaniu. Następnie Doktorant przeprowadził szereg analiz numerycznych, w których symulował statyczne próby ścisania próbek kości gąbczastych wykonanych w ramach eksperymentów mechanicznych. Modele numeryczne próbek kości, oparte na metodzie elementów skończonych, zbudowane zostały na podstawie danych pozyskanych z ilościowej tomografii komputerowej, która umożliwiła wygenerowanie przestrzennych modeli 3D struktury gąbczastej próbek oraz ocenę rozkładu gęstości wewnątrz tkanki kostnej. Do tego celu zastosowano oprogramowanie Mimics 15.0. Własności mechaniczne tkanki kostnej wyznaczano w modelach numerycznych na podstawie wytypowanych przez Doktoranta sześciu zależności modułu Younga od gęstości tkanki kostnej.

Symulacje komputerowe przeprowadzone za pomocą metody elementów skończonych za pomocą MSC.Marc&Mentat dla tak przygotowanych modeli, pozwoliły uzyskać numeryczne rozkłady pól przemieszczeń i odkształceń. Wyniki te były dla Doktoranta danymi porównawczymi do rozkładów tych pól zmierzonych za pomocą metody cyfrowej korelacji obrazu. Porównanie wyników otrzymanych z pomiarów eksperymentalnych oraz wyników symulacji numerycznych dla łącznie 11. różnych próbek kości, pozwoliło Doktorantowi na oszacowanie dokładności przewidywania własności mechanicznych tkanki kostnej dla każdej badanej zależności. Największą dokładność uzyskał Doktorant dla zaproponowanej przez siebie modyfikacji formuły Wagnera opisującej zależność modułu Younga od gęstości tkanki kostnej. W ten sposób Doktorant potwierdził postawioną tezę, że zastosowanie tej zależności w połączeniu z ilościową tomografią komputerową tworzy nową metodę nieinwazyjnego wyznaczania własności mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- zaproponowanie modyfikacji formuły Wagnera opisującej zależność modułu Younga od gęstości tkanki kostnej gąbczastej,
- przeprowadzenie eksperymentalnych badań mechanicznych ścisania 11 próbek,
- zbudowanie modeli numerycznych i przeprowadzenie symulacji komputerowych prób ścisania próbek kości gąbczastej,
- porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji komputerowych
- podsumowanie wyników badań oraz zaproponowanie metodologii badań nieinwazyjnych własności mechanicznych tkanki kostnej.

Oryginalne wyniki swoich prac przedstawił Doktorant w opublikowanych pracach [22, 23].

Zamieszczone w rozprawie wyniki badań świadczą o bardzo dobrej znajomości problematyki badawczej, dużej pomysłowości i profesjonalności Doktoranta.

Struktura rozprawy jest logiczna i dobrze przemyślana, chociaż samodzielny rozdział 5. dotyczący podstaw metody elementów skończonych (MES) wydaje się zbyteczny, ponieważ metoda jest dobrze znana i wystarczyłoby podać kilka istotnych faktów na jej temat w rozdziale 6. Zwraca uwagę duża pieczołowitość w przygotowaniu wyników badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych.

### **Uwagi dyskusyjne**

- Zaproponowana przez Doktoranta modyfikacja formuły Wagnera opisująca zależność między modułem Younga, a gęstością tkanki kostnej jest niewątpliwie istotnym postępem w poszukiwaniu dokładniejszych relacji między tymi dwoma parametrami. Biorąc jednak pod uwagę większe lub mniejsze osobnicze własności mechaniczne tkanki kostnej, wynikające m.in. z genetycznych i zależnych od wieku uwarunkowań, sformułowanie wiarygodnej deterministycznej relacji między modułem Younga i gęstością tkanki kostnej jest praktycznie niemożliwe. Wydaje się, że jedynym wyjściem jest zaproponowanie niedeterministycznej relacji między modułem Younga, a gęstością tkanki kostnej, uwzględniającej modele niepewności bazujące na modelu probabilistycznym, przedziałowym lub rozmytym, np. poprzez wprowadzenie współczynników w postaci liczb losowych, liczb interwałowych lub liczb rozmytych.
- Przeprowadzone symulacje komputerowe próby ściskania próbek bazują na złożonych geometrycznie modelach 3D, ale nie uwzględniają podejścia bazującego na modelu wielkoskalowym, które coraz częściej stosowane jest w analizie tkanek kostnych. Jakiej zmianie uległyby wyniki symulacji komputerowych, gdyby uwzględnić podejście wielkoskalowe oraz faktyczną anizotropowość tkanki kostnej?
- Pory żywej tkanki kostnej gąbczastej wypełnione są płynem (szpik kostny). W jaki sposób można uwzględnić ten fakt w modelu numerycznym i na ile zmieniłyby on ostateczne wyniki symulacji komputerowych?

### **4. Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Cyganika jest interesującym studium z zakresu opracowania metody oceny parametrów mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej na podstawie nieinwazyjnych badań opartych na obrazowaniu za pomocą ilościowej mikrotomografii komputerowej.

Zamieszczone w rozprawie badania eksperymentalne i symulacyjne świadczą o bardzo dobrym rozeznaniu Doktoranta w obszarze objętym rozprawą.

Główny cel rozprawy polegający na udowodnieniu, że zaproponowana modyfikacja zależności pomiędzy modułem Younga, a gęstością tkanki kostnej gąbczastej w połączeniu z ilościową tomografią komputerową, może być podstawą nowej metody nieinwazyjnego wyznaczania własności mechanicznych tkanki kostnej, został osiągnięty, a uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i symulacji komputerowej potwierdzają tę tezę.

Doktorant wykazał się bardzo dużą wiedzą i doświadczeniem oraz posiada istotny i wartościowy dorobek publikacyjny.

Biorąc pod uwagę przedstawioną opinię stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Cyganika w pełni odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim.

Doktorant jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Dlatego uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska w pełni spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez obecnie obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.



Tadeusz Burczyński