

Gliwice, 5.06.2017

Prof. dr hab. inż. Antoni John  
Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej  
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18a

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Anastasiyi VINAKURAVEJ pt.**

**„Modeling of bone and bioceramic materials for biomechanic analysis of the hip-  
implant considering micropolar elasticity”**

### **1. Podstawa opracowania**

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo Pana Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa z dnia 19.04.2017 roku (dostarczone 11.05.2017). Wraz z pismem otrzymałem egzemplarz pracy doktorskiej.

### **2. Uwagi ogólne**

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim, liczy 117 stron. Rozprawa dotyczy badania możliwości zastosowania metody elementów skończonych w klasycznym ujęciu oraz w odniesieniu do ośrodków mikropolarnych w celu wykazania różnic w wynikach analizy wytrzymałościowej kości udowej po zabiegu alloplastyki oraz po resekcji wybranego fragmentu trzonu i zastąpieniu go wkładką bioceramiczną. Doktorantka przyjmuje, że zamodelowanie implantów bioceramicznych, jak i tkanki kostnej jako struktur mikropolarnych lepiej odwzorowuje rzeczywiste własności badanych struktur.

Mgr inż. Anastasiya Vinakurava stawia tezę:

“Application of micropolar theory of elasticity allows for better description of bone and bioceramic implant response for the external load when compared to classical solution.”

Co należy przetłumaczyć jako:

Zastosowanie mikropolarnej teorii sprężystości pozwala lepiej opisać odpowiedź kości i biokeramicznych implantów na obciążenie zewnętrzne w porównaniu z klasycznym rozwiązaniem.

Jako cele pośrednie stanowiące zakres pracy Doktorantka przedstawia:

- Development of constitutive model for bioceramics proposed for the bone replacement.
- Description of the mechanical properties of the material in micropolar theory.
- Development of the FEM code for the respective coupled multi-physical problem accounting for various external load and possible defects (microcracks, delaminations, small impurities, possible rigid stiffeners) exploiting micropolar theory.
- Investigation of influence of different implant size and placement on the stress distribution.
- Validation of the developed model by available solutions.

Co należy przetłumaczyć jako:

- Opracowanie konstytutywnego modelu bioceramiki zaproponowanej do wymiany/uzupełnienia ubytków kości.
- Opis właściwości mechanicznych materiału według mikropolarnej teorii sprężystości.
- Opracowanie programu/procedury MES dla danego sprzężonego problemu złożonego uwzględniającego różne obciążenia zewnętrzne i możliwe defekty (mikropęknięcia, delaminacje, małe zanieczyszczenia, możliwe sztywne usztywnienia) z wykorzystaniem teorii mikropolarnej.
- Badanie wpływu różnego rozmiaru implantu i położenia na rozkład naprężeń.
- Walidacja opracowanego modelu za pomocą dostępnych rozwiązań.

Trzeba stwierdzić, że przedstawiony przez Doktorantkę cel i zakres pracy dotyczą istotnych, z biomechanicznego i medycznego (praktycznego) punktu widzenia, zagadnień mających zastosowanie w procesie planowania zabiegów operacyjnych i ocenie skutków interwencji chirurgicznej na drodze wykorzystania metod i narzędzi mechaniki. Dlatego ***należy uznać, że przedstawiona praca mieści się w dyscyplinie naukowej mechanika a podjęte zagadnienia mogą stanowić temat pracy doktorskiej.***

### 3. Zawartość rozprawy

Praca składa się z ośmiu rozdziałów, spisu oznaczeń, spisu stosowanych skrótów, spisu literatury oraz streszczeń w języku polskim i angielskim.

Na początku, po spisie treści zamieszczono spis oznaczeń oraz spis stosowanych skrótów.

Rozdział pierwszy (3 strony) to wprowadzenie do zagadnienia rekonstrukcji tkanki kostnej niezbędnej w przypadku urazów mechanicznych lub zmian chorobowych (osteoporoza, zmiany nowotworowe).

Rozdział drugi (9 stron) zawiera przegląd literatury pod kątem zastosowania inżynierii tkankowej i biomateriałów w procesie rekonstrukcji tkanki kostnej. W końcowej części przytoczono prace poświęcone niesymetrycznej teorii sprężystości, w tym prace związane z mikropolarną teorią sprężystości.

W rozdziale trzecim (2 strony) przedstawiono cel i zakres rozprawy.

W rozdziale czwartym (12 stron) opisano proces obrazowania medycznego i rekonstrukcji obrazów w aspekcie generowania modeli numerycznych pod kątem zastosowania metody elementów skończonych.

Rozdział piąty (18 stron) zawiera przegląd materiałów bioceramicznych i ich własności.

W rozdziale szóstym (22 strony) przedstawiono zastosowanie mikropolarnej teorii sprężystości do analizy wytrzymałościowej materiałów bioceramicznych wykorzystywanych w rekonstrukcji tkanki kostnej. W pierwszej części zaprezentowano podstawowe równania mikropolarnej teorii sprężystości oraz ich implementację w metodzie elementów skończonych. W dalszej części przedstawiono wyniki testów sprawdzających poprawność działania opracowanego programu i różnice w wynikach pomiędzy klasycznym podejściem (liniowa teoria sprężystości) a sformułowaniem niesymetrycznym (mikropolarnym) dla wybranych zagadnień (wpływ karbu, kontakt).

W rozdziale siódmym (32 strony) przedstawiono wyniki analizy stanu naprężenia i odkształcenia w kości udowej po wstawianiu implantów bioceramicznych oraz po zabiegu alloplastyki. W rozwiązaniu uwzględniono mikropolarny model materiału.

Rozdział ósmy (2 strony) zawiera wnioski końcowe. Podano w nim również kierunki dalszych badań.

Literatura zawiera 117 pozycji (9 stron).

#### 4. Uwagi merytoryczne

Przedstawiona w pracy tematyka dobrze wpisuje się w nurt prac, których celem jest uzyskanie wyników mogących mieć nie tylko teoretyczne, ale przede wszystkim praktyczne zastosowanie. Analiza struktur kostnych i bioceramiki z uwzględnieniem modelu materiału opisanego wg mikropolarnej teorii sprężystości jest zadanie trudnym, wymagającym sporej wiedzy i sporego zaangażowania z czym Doktorantka doskonale sobie poradziła.

Praca dotyczy zagadnień aktualnych i istotnych z praktycznego punktu widzenia. Doktorantka zajęła się w pracy nie tylko numeryczną symulacją kości udowej po zabiegu alloplastyki oraz po resekcji wybranego fragmentu trzonu i zastąpieniu go wkładką bioceramiczną w dostępnych systemach obliczeniowych (tutaj Ansys), ale również opracowała program (procedurę) umożliwiającą zastosowanie mikropolarnej teorii sprężystości w metodzie elementów skończonych. Jest to istotny, ważny element pracy decydujący o końcowym rezultacie. Bez opracowania dodatkowej procedury nie byłoby możliwe wykonanie obliczeń dla zaproponowanego modelu materiału ponieważ dostępne systemy obliczeniowe MES nie mają takiej opcji.

Szkoda, że Doktorantka nie podjęła się również doświadczalnej weryfikacji rozpatrywanego zagadnienia. Uważam, że jest to ważny, istotny etap. Bez weryfikacji doświadczalnej nie można mówić o wynikach, że są dobre czy złe bo można je odnieść jedynie do literatury, gdzie, jak na razie, jest mało informacji dotyczących tego samego zakresu badań.

Rozdział pierwszy „Introduction” nie budzi zastrzeżeń choć mogło się w nim znaleźć więcej informacji dotyczących struktur szkieletowych (scaffolds) opartych na biopolimerach i bioceramice, coraz częściej stosowanych w praktyce klinicznej.

Rozdział drugi „Literature review”, stanowiący przegląd literatury, moim zdaniem, zbyt mało przedstawia prac o ośrodku, który jest przedmiotem badań. Brak prac dotyczących budowy hierarchicznej kości i modeli ośrodków anizotropowych (Rho, Zioupos, Weiner, Rzeznikov, Colard, Telega, ...) jak również prac z ostatnich lat przedstawiających wyniki badań doświadczalnych struktur kostnych (Zysset, Isaksson, Binkowski, Nazarian, Tanck, Öchsner, Rodriguez-Floreza, ...). Przegląd bardzo historyczny – za mało prac z ostatnich lat (również dotyczących struktur szkieletowych).

Rozdział trzeci „Motivation, objectives and scientific thesis” bez uwag.

Rozdział czwarty „Processing of medical images for generation of finite-element model of bone” omawiający przetwarzanie danych tomograficznych na model numeryczny, w

zaprezentowanej postaci nie wnosi nic nowego do pracy i mógł być pominięty. Przedstawione informacje są ogólnie znane a jeżeli zamierzeniem Doktorantki było przedstawienie instrukcji, jak dobrze opracować model numeryczny na podstawie danych z tomografii komputerowej to podane informacje są na zbyt ogólnym poziomie i nie gwarantują prawidłowego przygotowania modelu numerycznego na potrzeby metody elementów skończonych.

Odnosnie rozdziału piątego „Review of biomechanics materials and its properties”, to jest to istotny element ze względu na podjętą tematykę. Niestety, mam parę uwag. W pracach naukowych przedstawiając wyniki, rysunki czy tabele zaczerpnięte z innych prac należy podać źródło tych informacji. W rozdziale piątym, mimo wielu rysunków i tablic zaczerpniętych z innych prac nie ma odnośników do źródła informacji. Mam nadzieję, że w przyszłości Doktorantka będzie pamiętała regułę korzystania z prac innych autorów. Ze względu na brak odnośników trudno powiedzieć z jakich badań pochodzą przedstawiane dane, jednak studiując literaturę można zauważyć niewielką liczbę prac z ostatnich lat poświęconych wyznaczaniu własności mechanicznych biomateriałów (podobna uwaga jak w przeglądzie literatury).

Rozdział szósty w połączeniu z rozdziałem siódmym mają istotne znaczenie dla pracy, stanowią jej najważniejszy element. W rozdziale szóstym przedstawiono jedną za spotykanych w literaturze wersji podstawowych równań mikropolarnej teorii sprężystości, numeryczną implementację podanych równań oraz testy numeryczne sprawdzające działanie programu. W zagadnieniach wykorzystujących równania mikropolarnej teorii sprężystości istotną rolę odgrywają współczynniki występujące w związkach konstytutywnych. Od ich poprawnego przyjęcia zależy w praktyce dokładność i jakość otrzymanego wyniku. Doktorantka korzysta tylko z jednej pracy Lakesa sprzed ponad 30 lat. Czyżby nie było innych współczesnych prac badających te zagadnienia lub też może występują problemy z wyznaczeniem tych współczynników i stosowaniem teorii mikropolarnej w tkance kostnej i biomateriałach? O tym nie znalazłem w pracy informacji. Ze względu na kluczowe znaczenie tych informacji konieczne jest wyjaśnienie.

Opracowany program (według mnie najbardziej znaczący element pracy) został opisany bardzo skrótowo. Brak szerszego opisu procedur i metod numerycznego rozwiązywania równań macierzowych, układów równań czy całkowania numerycznego. Nie ma informacji o sposobie (procedurze) wprowadzania danych i prezentacji wyników. Czy korzystano z gotowego programu, czy opracowano własny?

Przykłady testowe dobrano prawidłowo jednak nie wyjaśniono dokładnie dlaczego wybrano właśnie takie przykłady, co jest interesującego w stanie naprężenia i odkształcenia w tego typu zagadnieniach, jakie są podejścia do tematu, jakie rozwiązania analityczne, jakie numeryczne.

W rozdziale siódmym przedstawiono efekty opracowanego programu i zastosowanego podejścia (teoria mikropolarna). Rozpatrywano zasadniczo dwa przypadki: pierwszy to resekcja fragmentu trzonu kości udowej (w trzech różnych strefach) i zastąpienie go bioceramiką, drugi to alloplastyka stawu biodrowego przy różnych wymiarach endoprotezy i różnych rodzajach pokryć. Przeprowadzone analizy i otrzymane wyniki ukazują znaczenie opracowanego programu MES i możliwości jego praktycznego wykorzystania.

Ogólna uwaga do analizy wytrzymałościowej i otrzymywanych wyników: dla materiałów o różnej wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie nie należy stosować hipotezy Hubera-Misesa (von Misesa) ponieważ z założenia przyjmuje ona jednakową wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie (faktycznie jest hipotezą odnoszącą się do granicy plastyczności). W przypadku takich materiałów jak tkanka kostna czy ceramika należałoby stosować hipotezy odnoszące się do warunku dekohezji (np. hipoteza Burzyńskiego czy Mohra) uwzględniające różną wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie a najlepiej hipotezy dla materiałów anizotropowych (np. warunek Rychlewskiego). Ocena stanu wytężenia na podstawie nieadekwatnej hipotezy nie upoważnia do praktycznego zastosowania uzyskanych wyników.

W podsumowaniu zbyt słabo wyeksponowano znaczenie opracowanego programu MES umożliwiającego zastosowanie równań mikropolarnej teorii sprężystości. Brak jest też szerszego uzasadnienia poprawności przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników. To wszystko jest pośrednio zawarte w pracy, jednak moim zdaniem nie zostało odpowiednio wyeksponowane.

## 5. Uwagi szczegółowe

Praca jest ogólnie poprawnie napisana jednak w trakcie czytania można natrafić na nieliczne literówki, niefortunne (niewłaściwe) sformułowania i pewne błędy edytorskie. Oto niektóre z nich.

- Spis treści: tytuł rozdziału 5. (również w tekście): „Review of biomechanics materials...”  
Powinno być „Review of biomechanics materials...”
- Strona 22, Fig. 4.1. – skąd zaczerpnięte, źródło? Podobnie Fig. 4.2. str. 23.

– Strony 28, 29 – puste miejsce na dole strony 9 złe formatowanie).

– Strona 34,

“The bone properties from the point of view of materials science:

1) The specific weight (density) of compact bone substance - (1.8 - 2.0) g/cm<sup>3</sup>;  
spongy 1.5 g/cm<sup>3</sup>

2) Shear Strength - (5.05 - 11.8) kg/mm<sup>2</sup>

3) Young's Modulus - (1,38 - 1,94) × 10<sup>3</sup> kg/mm<sup>2</sup>

4) Plastic deformation - (0.16 - 0.02)%

5) Cyclic Fatigue - (1 - 3) × 10<sup>6</sup> cycles at amplitude stresses 3.5 kg/mm<sup>2</sup>

6) Impact implementation into the bone - the maximum secant modul has value 1.8 × 10<sup>3</sup> kg/mm<sup>2</sup>

7) Breaking stress - 27.5 kg/mm<sup>2</sup>”

Jednostki spoza układu SI (oprócz pkt. 4), gęstość jest czasami podawana w g/cm<sup>3</sup>, pozostałe należy zmienić. Skąd zaczerpnięto dane, jakie źródło?

To samo dotyczy Tab. 5.1. - skąd zaczerpnięto dane, jakie źródło?

– Strona 36, Fig. 5.1, Tab. 5.3 - Skąd zaczerpnięto dane, jakie źródło? Podobnie strona 37 Fig. 5.2., strona 41 Fig. 5.3.

– Strona 46 – dlaczego Tab. 5.5 podzielona na dwie strony? To samo dotyczy Tab. 5.8. strona 48. Jak jest źródło danych z Tablic 5.5 – 5.10?

– Strona 60 – Fig. 6.7. – podział na elementy skończone budzi wątpliwości.

– Strona 63 – Fig. 6.11, strona 64 – Fig. 6.12 i dalsze – dlaczego w przypadku porównywania wyników programu komercyjnego (liniowa sprężystość) z wynikami procedury własnej (mikropolarna teoria sprężystości) W jednym przypadku skala jest dyskretna a w drugim ciągła? To utrudnia porównanie.

– Strona 70, Fig. 6.21 – chociaż w podpisie są odniesienia do pozycji a), b) i c) to na rysunku brak takich oznaczeń.

– Strona 73, Fig. 7.1 – brak odniesienia do źródła.

– Strony 77 – 83 – złe formatowanie – puste miejsca na dole stron (również w dalszej części)

– Strona 90, Fig. 7.20, Fig. 7.21 – podobnie jak strona 70, Fig. 6.21.

– Strona 95, Fig. 7.25 – źródło?

– Strona 104, Fig. 7.35 – rysunek nieczytelny.

– w spisie literatury pozycja 46 i pozycja 110 – brak danych do identyfikacji publikacji, pozycja 149 – błędy przy formatowaniu.



## 6. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska wnosi nowe elementy do modelowania numerycznego rekonstrukcji tkanki kostnej w obszarze zastępowania ubytków tkanki kostnej materiałami bioceramicznymi. Doktorantka przy wykonaniu tej pracy wykazała się wiedzą zarówno od strony analiz numerycznych, jak i opracowywania procedur numerycznych (programów komputerowych) i ich praktycznej implementacji.

Recenzent w przedstawionej do oceny pracy znalazł pewne błędy, które jednak nie wpływają na całościową ocenę merytoryczną. Należy podkreślić, że Doktorantka wykonała pracę doktorską na dobrym poziomie z widocznym dużym nakładem pracy potwierdzonym licznymi analizami z wykorzystaniem aktualnych dostępnych metod i technik badawczych.

Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku, z późniejszymi zmianami) i

**stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Anastasiyi Vinakuravej.**

