

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa JANKOWSKIEGO pt.: *„Konstrytywne modelowanie gąbczastej tkanki kostnej człowieka na poziomie mikrostrukturalnym”* wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Marka Pawlikowskiego, prof. uczelni

1. ZAKRES ROZPRAWY

Tkanka kostna, tworząca układ nośny organizmu ludzkiego, jest jedną z bardziej złożonych struktur ze względu zarówno na charakter właściwości wytrzymałościowych ale również ze względu na wyjątkowe zdolności adaptacyjne do zmiennych warunków obciążeniowych, wynikających z normalnych funkcji życiowych.

Kość jest materiałem, który pod względem budowy, jak i pełnionych funkcji nie znajduje odzwierciedlenia w żadnym z wytwarzanych przez człowieka materiałów.

Badaniami nad właściwościami mechanicznymi i zmieniającą się w czasie mikroarchitekturą tkanki kostnej od wielu lat zajmuje się szereg ośrodków naukowych na świecie. Badania te są niezwykle istotne ze względu na wzrastającą liczbę dysfunkcji układu kostnego, wynikającą z urazów i uszkodzeń układu ruchu a będących skutkiem działania sił o charakterze dynamicznym (np. wypadki komunikacyjne) ale również z wydłużającego się wieku życia społeczeństwa, któremu towarzyszą zmiany degeneracyjne tkanki kostnej (np. osteoporoza). O ile przez ostatnie lata większość badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych skupiała się na analizie materiału kostnego w układzie globalnym, to obecnie jedynie analiza mikrostrukturalna połączona z parametrami wytrzymałościowymi daje szerszą wiedzę z zakresu mechanobiologii tej złożonej struktury.

Należy podkreślić, iż opis właściwości mechanicznych tak złożonego „kompozytu” naturalnego jakim jest tkanka kostna nastrocza wiele trudności wynikających z niejednorodności jej budowy, różnic we właściwościach fizykochemicznych, złożonej geometrii przestrzennej oraz wielu innych czynników (takich np. jak płeć, wiek czy schorzenia towarzyszące). Jednocześnie rozwijanie modeli matematycznych w ścisłym połączeniu z badaniami eksperymentalnymi istotnie wpłynie na pogłębienie wiedzy z zakresu charakterystyki wytrzymałościowej tej struktury.

Z tego względu uzasadnione jest prowadzenie prac mających na celu stworzenie nowych modeli konstytutywnych tkanki kostnej bazujących na danych uzyskanych na podstawie analizy doświadczalnej parametrów mechanicznych materiału kostnego.

Zagadnienie to jest ważne dla rozwoju nowoczesnych metod leczenia układu kostnego człowieka. Rozwój cywilizacji przyczynia się z jednej strony do wydłużenia się życia człowieka, jednocześnie przyczyniając się do wzrostu uszkodzeń, a z czasem degeneracji układu kostnego. Stąd też wrasta zapotrzebowanie na zabiegi umożliwiające rekonstrukcję lub całkowite zastąpienie implantami zmienionych chorobowo elementów nośnych. Zastosowanie implantów, w tym rusztowań kostnych, w leczeniu zmian patologicznych tkanki kostnej stanowi nowy bardzo mocno rozwijający się kierunek w implantologii całego układu szkieletowego człowieka.

Rozprawa stanowi 117 stronicowe opracowanie o układzie typowym dla prac o awans naukowy, zawiera 10 głównych rozdziałów: wprowadzenie, badania literaturowe, cel pracy, opis badań doświadczalnych oraz opis modelu konstytutywnego z jego walidacją. Dodatkowo praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim i wykaz piśmiennictwa. Piśmiennictwo liczy 105 pozycji (oraz 3 odniesienia do stron internetowych), poprawnie dobranych, które wykorzystane są w pracy w sposób świadczący o dobrej znajomości podjętej tematyki.

Na wstępie Doktorant przedstawił problematykę prezentowaną w rozprawie w aspekcie literaturowym. Opisał budowę kości w ujęciu makro i mikroskopowym oraz jej podstawowe funkcje. Natomiast w rozdziale tym brakuje omówienia właściwości mechanicznych tkanki kostnej, które są jednym z głównych zagadnień badawczych podejmowanych w niniejszej pracy. Doktorant w jednym akapicie ujął, w olbrzymim skrócie, informacje o złożoności zagadnienia dotyczącego parametrów mechanicznych tej struktury. Uwzględniając prezentowane, w dalszej części rozprawy, badania eksperymentalne (w celu opisanie ich parametrów wytrzymałościowych) uzasadnione wydaje się być odpowiednio szerokie przedstawienie tego problemu, szczególnie że jest to zagadnienie niezwykle złożone. Kolejnym prezentowanym tematem było przybliżenie teorii równań konstytutywnych oraz istniejących w literaturze tematu modeli konstytutywnych tkanki kostnej gąbczastej.

Rozdział piąty zawiera sformułowaną tezę oraz cele naukowe realizowanej dysertacji. Rozdział szósty i siódmy poświęcony jest badaniom wybranych parametrów strukturalnych i mechanicznych tkanki gąbczastej, których wyniki zostały wykorzystane w zaproponowanym przez Doktoranta, w rozdziale szóstym, równaniu konstytutywnym tej tkanki. Nie do końca jasny jest układ tych dwóch rozdziałów, ponieważ rozdział szósty (po nazwą „Metodyka”) prezentuje opracowany przez Doktoranta model konstytutywny uwzględniający nieliniowe właściwości tkanki kostnej, który stanowi oryginalne rozwiązanie Autora i które umożliwiło, przeprowadzenie zaawansowanych symulacji, których celem była analiza właściwości mechanicznych na poziomie pojedynczych beleczek kostnych. Jednocześnie w tym samym rozdziale, przedstawiono materiał i metodę badań strukturalnych tkanki gąbczastej głowy kości udowej. Wydaje się, iż bardziej uzasadnione byłoby całościowe przedstawienie badań doświadczalnych w jednym spójnym rozdziale, który zawierałby opis przygotowania próbek i przeprowadzonych badań eksperymentalnych na poziomie mikro- i makroskopowym.

Efekty pracy zaprezentowane w dwóch wcześniejszych rozdziałach zostały wykorzystane w kolejnych etapach pracy tj. Identyfikacji parametrów hipersprężystych i lepkosprężystych. W tym celu Doktorant zastosował wcześniej zaproponowane równanie

konstrytuwne w obliczeniach właściwości mechanicznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W pierwszym etapie symulacji numerycznych stworzony został model pojedynczej beleczki kostnej poddawanej obciążeniom ściskającym odpowiadającym obciążeniom zastosowanym w badaniach nanoindentacji rzeczywistej tkanki kostnej gąbczastej człowieka. Analiza ta umożliwiła, zgodnie z przyjętym algorytmem identyfikacji parametrów równania konstytutywnego, na dopasowanie krzywych eksperymentalnych z krzywymi uzyskanymi na drodze symulacji według przyjętych kryteriów. Tak zweryfikowane parametry równania konstytutywnego zostały wykorzystane do ostatecznej walidacji modelu konstytutywnego. W tym celu Doktorant zbudował trójwymiarowy model struktury tkanki kostnej gąbczastej, odwzorowującej strukturę rzeczywistą tkanki wykorzystywanej w badaniach doświadczalnych, a następnie zasymulował relaksację naprężeń przy zastosowaniu tych samych parametrów jak podczas eksperymentu. Ostateczna weryfikacja modelu matematycznego została wykonana podczas symulowanego testu jednoosiowego ściekania na jednej próbce/modelu (63L), co w pewien sposób ograniczyło końcową walidację przyjętego modelu konstytutywnego.

Podsumowanie ze wskazaniem dalszego kierunku badań nad modelami konstytutywnymi tkanki kostnej sformułowano w kolejnym, ostatnim rozdziale rozprawy doktorskiej.

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy, przedstawiona problematyka i zaproponowany sposób rozwiązania podjętych zagadnień pozwala stwierdzić, iż wybrany przez Doktoranta temat jest w pełni uzasadniony oraz aktualny poznawczo i aplikacyjnie.

2. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant zaproponował w oparciu o własny model konstytutywny, uwzględniający właściwości hipersprężyste i lepkosprężyste tkanki kostnej oraz na podstawie badań eksperymentalnych, opracowanie nowego podejścia do modelowania właściwości mechanicznych tkanki kostnej gąbczastej na różnym poziomie jej organizacji. Wobec tak przedstawionego problemu Autor postawił jako cel główny sformułowanie nowego modelu konstytutywnego kości gąbczastej człowieka z uwzględnieniem jej zróżnicowanych parametrów wytrzymałościowych i hierarchicznej budowy strukturalnej. Celem dodatkowym było wykorzystanie stworzonego równania w analizach z zastosowaniem metody elementów skończonych zarówno pojedynczej beleczki kostnej jak i systemu beleczek kostnych tworzących jedną z podstawowych struktur układu nośnego człowieka.

Na podstawie przeanalizowanej literatury dotyczącej podjętego problemu i wyznaczonych celów pracy, postawiono tezę, iż:

Nowe równanie konstytutywne dla gąbczastej tkanki kostnej człowieka, sformułowane na podstawie testów nanoindentacji beleczek kostnych, pozwala na zaawansowane modelowanie jej właściwości mechanicznych w skali mikro- i makroskopowej.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy chciałabym zaliczyć:

- opracowanie własnego modelu konstytutywnego tkanki kostnej gąbczastej, uwzględniającego nieliniowe właściwości kości na poziomie pojedynczych beleczek oraz

przeprowadzenia walidacji przyjętego modelu, z wykorzystaniem metody elementów skończonych, z wynikami badań eksperymentalnych;

- opracowanie metodologii badań doświadczalnych wybranych parametrów mechanicznych i strukturalnych na różnym poziomie organizacji tkanki gąbczastej, tj. dla pojedynczych beleczek kostnych oraz kompleksu beleczek kostnych pobranych z głowy kości udowej;
- przeprowadzenie cyklu badań eksperymentalnych i scharakteryzowanie hierarchicznej pod względem budowy i właściwości wytrzymałościowych tkanki gąbczastej;
- opisanie właściwości mechanicznych tkanki gąbczastej w teście nanoindentacji, przy uwzględnieniu wpływu różnej, pod względem wartości, siły obciążającej i czasu obciążenia, oraz wykazanie wpływu tych czynników na uzyskane parametry (moduł Younga, energii nanoindentacji, sprężystości i dyssypacji);
- przeprowadzenie identyfikacji parametrów hipersprężystych i lepkoelastycznych beleczek kostnych przy zastosowaniu własnego algorytmu identyfikacji parametrów równania konstytutywnego, z wykorzystaniem wyników badań nanoindentacji uzyskanych na drodze badań doświadczalnych;
- przeprowadzenie walidacji przyjętego równania i jego parametrów na modelu odwzorowującym przestrzenną strukturę beleczkową kości gąbczastej;
- utylitarnie rozwiązanie, dające możliwość tworzenia nie tylko zróżnicowanych pod względem właściwości mechanicznych i strukturalnych tkanki kostnej, ale symulacji różnych stanów patologicznych układu nośnego w celu m.in. projektowania szkieletów kostnych lub implantów typu custom made wspomagających leczenie zmian w obszarze tkanki kostnej;
- umiejętne wykorzystanie różnych metod badawczych, doświadczalnych i analitycznych, w celu realizacji postawionych zadań badawczych;
- wyraźnie sformułowane cele badawcze i teza oraz konsekwentnie rozwiązane zadania szczegółowe.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty poznawcze. Pracą swoją Doktorant włączył się w bardzo ważny nurt badań nad biomechaniką tkanki kostnej. Matematyczny opis tkanek stanowi poważne wyzwanie naukowe i należy obecnie do jednych z trudniejszych, aktualnych zagadnień w biomechanice tkanek. Doktorant wykazał się gruntowaną znajomością tematyki oraz dojrzałością w rozwiązywaniu bardzo złożonych problemów badawczych i naukowych.

Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, w której rozwiązany został jeden z problemów badawczych, a którego wyniki mogą być z powodzeniem wykorzystywane w budowie i analizie złożonych modeli tkanki kostnej układu nośnego człowieka (w tym ze zmianami urazowymi, degeneracyjnymi i deformacyjnymi) przy wykorzystaniu metody elementów skończonych.

3. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Chciałabym przedstawić pewne wątpliwości i uwagi krytyczne, które nasunęły mi się po zapoznaniu się z recenzowaną pracą. Najważniejsze z nich to:

1. W rozprawie brak jest krytycznej oceny obecnego stanu wiedzy, co umożliwiłoby wykazanie ewentualnych braków, czy też niedostatecznych danych opisujących właściwości kości gąbczastej (szczególnie na poziomie mikrostrukturalnym) oraz luk w modelach konstytutywnych opisujących tę hierarchiczną i złożoną strukturę, a jednocześnie jednoznacznie wskazywałoby na konieczność podjęcia dalszych badań nad rozpatrywanym zagadnieniem.
2. W opisie podstaw budowy materiału kostnego (rozdział 2) Doktorant nie przedstawił ważnego elementu składowego tego materiału, tj. cieczy i związanego z tym zagadnienia przepływu cieczy w kanalikach kości. Jest to istotny element mechaniki kości (często niestety pomijany w analizach biomechanicznych) gdyż zmiany naprężeń i odkształceń w kości prowadzą do zmian przepływów w kanalikowo-zatokowym systemie kości a tym samym wpływają na właściwości mechaniczne tej struktury, co wydaje się być ważnym elementem w budowie modeli matematycznych kości.
3. We wstępie literaturowym, brakuje istotnej analizy stanu wiedzy z zakresu właściwości mechanicznych tkanki kostnej na różnym poziomie jej organizacji. Analiza taka umożliwiłaby zaprezentowanie zróżnicowania parametrów mechanicznych w zależności od stanu wykorzystanego materiału badawczego (tkanka zdrowa, zdegenerowana), wpływu różnych czynników na jej właściwości (np. płeć, wiek), zastosowanej metody badawczej czy przyjętej skali badań (mikro/makroskala). Pozwoliłoby to również Doktorantowi na przedstawienie klarownej i wnikliwej dyskusji uzyskanych wyników własnych na tle wyników innych autorów.
4. Rozdział 3.3. zawiera opis dotyczący podstawowej wiedzy z zakresu lepkosprężystości materiałów. Uważam, że tak podstawowa wiedza z zakresu wytrzymałości materiałów nie powinna być prezentowana z dysertacji doktorskiej. Brakuje natomiast odniesienia do opisu tkanki kostnej jako materiału o charakterze lepkosprężystym.
5. Badania właściwości mechanicznych tkanki kostnej prowadzone były na materiale pochodzącym z głów kości udowych poddawanych resekcji w wyniku zabiegu alloplastyki stawu biodrowego. Materiał kostny był następnie przechowywany w 95% etanolu co niezwykle istotnie wpływa na właściwości mechaniczne materiału biologicznego. Właśnie znaczące różnice w wartościach modułu Younga, w testach nanoindentacji, pojawiają się ze względu na stan tkanki kostnej, tzn. czy jest ona sucha czy z zachowaną wilgotnością charakterystyczną dla tkanki kostnej, która także zawiera wodę. Stąd też przy analizie właściwości mechanicznych materiału tkankowego, w tym także kości, należy uwzględniać warunki brzegowe, przy których realizowane były badania, szczególnie na poziome mikro i nano skali. Pojawia się więc pytanie czy Doktorant realizując badania doświadczalne i modelowe uwzględnił fakt, iż uzyskane wyniki dotyczą suchej tkanki kostnej i jak to wpłynęło na uzyskane wyniki?
6. W rozdziale 6.2 przedstawiono badania mikrostrukturalne tkanki kostnej gąbczastej. Wymieniono i opisano możliwość analizy wielu różnych paramentów

morfometrycznych opisujących m.in. liczbę beleczek kostnych, ich grubość czy przestrzenne ich ułożenie względem siebie. Natomiast ostatecznie Doktorant przeanalizował i przedstawił jedynie wartości porowatości tkanki kostnej analizowanych próbek. Wydaje się, iż szerszy opis parametrów morfometrycznych w pełni scharakteryzowałyby na poziomie mikrostrukturalnym analizowane próbki, co umożliwiłoby powiązanie tych cech z otrzymanymi właściwościami mechanicznymi.

7. W rozdziale 7.2 pada stwierdzenia, że „Wyniki nanoindentacji pokazują, że decyzja o nienadaniu konkretnych wytycznych dotyczących miejsca wykonywania pomiarów na beleczce była właściwa”. Jest to dość zaskakująca informacja, zważywszy na fakt iż właściwości wytrzymałościowe nawet pojedynczej beleczki kostnej zależą od miejsca wykonywania pomiaru (w płaszczyźnie zgodnej z osią długą beleczki czy w płaszczyźnie poprzecznej). Pomiar w całkowicie dowolnym miejscu, daje różne wyniki i dane o właściwościach mechanicznych, co należy następnie skorelować. Co więcej, przyjęte jest, że realizując badania doświadczalne należy je wykonywać posiadając jasno sprecyzowany cel i plan.
8. Podczas identyfikacji parametrów hipersprężystych i lepkosprężystych przyjęto błąd dopasowania powierzchni pod krzywymi obciążenia i odciążenia uzyskanych w badaniach doświadczalnych i modelowych na poziomie 15%, natomiast błąd położenia piksu na poziomie 1,5%. Doktorant nie uzasadnił dlaczego przyjęto właśnie takie wartości i czym ta decyzja była podyktowana.

Konkludując należy stwierdzić, iż formalna strona pracy nie nasuwa poważniejszych zastrzeżeń, jakkolwiek Autor nie ustrzegł się od pewnych błędów, m.in.:

- Nieprawidłowo zastosowano nazewnictwo anatomiczne: główka kości udowej, powinno być głowa kości udowej.
- Doktorant często używa pewnych skrótów myślowych, nieodpowiednich dla tekstu naukowego, np. „... dla materiałów o prostszych właściwościach mechanicznych.” (str.21).
- Prezentując wiedzę z zakresu właściwości mechanicznych Doktorant powołuje się na literaturę w dość zaskakujący sposób „...np. [12, 65] oraz literatura cytowana w tych pracach”.
- W tabeli 6.1. nie podano jednostki wymiarów próbek.
- Rysunek 7.5 jest bardzo słabo czytelny i powinien zawierać przynajmniej zarys beleczek kostnych, na których wykonywane były pomiary.

Nieliczne usterki edycyjne pominięto w ocenie.

Przedstawione uwagi w niczym nie umniejszają pozytywnej oceny merytorycznej recenzowanej rozprawy doktorskiej.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując należy stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera cenne aspekty poznawcze w szeroko rozumianej dyscyplinie mechanika. Praca wykonana została poprawnie, a jej podstawowy cel zrealizowany, tzn. zaproponowano i zwalidowano nowy

model konstytutywny tkanki kostnej gąbczastej na różnym poziomie jej organizacji uwzględniający jej właściwości hipersprężyste i lepkosprężyste.

Praca będąc oryginalnym rozwiązaniem postawionego zadania badawczego stanowi autorski wkład naukowy w zakresie biomechaniki tkanki kostnej, w tym w zakresie modelowania matematycznego złożonej pod względem właściwości mechanicznych i strukturalnych tkanki kostnej człowieka. Dobór technik badawczych i umiejętne posługiwanie się nimi wskazuje na dobre przygotowanie Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych za pomocą nowoczesnych technik badawczych i umiejętności krytycznej analizy wyników.

Biorąc pod uwagę przedstawiony mi do zaopiniowania materiał, oryginalność rozwiązanego w rozprawie, istotnego zagadnienia naukowego, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności prowadzenia pracy naukowej i badawczej przez Doktoranta uważam, że przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów odpowiedniej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Krzysztofa Jankowskiego do publicznej obrony opiniowanej pracy.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'T. Jankowski', with a long horizontal line extending to the left from the start of the signature.