

Białystok, 04 czerwca 2021

dr hab. inż. Szczepan Piszczatowski
profesor Politechniki Białostockiej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C
15-351 Białystok

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Jankowskiego

pt. „Konstrytywne modelowanie gąbczastej tkanki kostnej człowieka na poziomie mikrostrukturalnym”

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Pana Prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, Dziekana Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej (pismo WIP.480.5.2021), na podstawie decyzji Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

Oceny dokonano zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668) oraz Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. z dnia 30 stycznia 2018 r., poz. 261).

2. Struktura pracy

Rozprawa została przedstawiona na 118 stronach. Podzielono ją na 10 rozdziałów wliczając w tę liczbę wstęp i podsumowanie. Treść pracy uzupełniają: streszczenie (w języku polskim i angielskim), wykaz symboli, wykaz stosowanej literatury (łącznie 108 pozycji) oraz spisy rysunków i tabel.

Rozdziały od 2 do 4 poświęcono prezentacji literaturowego studium problemu. Przedstawione zostały: charakterystyka tkanki kostnej (rozdział 2), teoria równań

konstrytuwnych (rozdział 3) oraz modele konstrytuwne gąbczastej tkanki kostnej (rozdział 4). W rozdziale 5 sformułowano cele i tezę rozprawy. Rozdział 6 poświęcony został omówieniu metodyki badań, a w szczególności sformułowaniu równania konstrytuwnego, badaniu i identyfikacji jego parametrów oraz przygotowaniu próbek kości do badań eksperymentalnych. W rozdziale 7 omówiono badania wytrzymałościowe przeprowadzone na próbkach ludzkiej kości gąbczastej. Znalazła się tutaj zarówno krótka charakterystyka metod pomiarowych (nanoindentacja, testy relaksacji) jak też omówienie i interpretacja uzyskanych wyników badań własnych. Procedura identyfikacji parametrów materiałowych (hipersprężystych i lepkosprężystych) występujących w zaproponowanym równaniu konstrytuwnym została opisana w rozdziale 8. Wykonana była ona z wykorzystaniem symulacji numerycznej odtwarzającej, przy użyciu metody elementów skończonych, testy nanoindentacji opisane wcześniej w rozdziale 7. W rozdziale 9 przedstawiono walidację opracowanego modelu konstrytuwnego, do której wykorzystano badania symulacyjne prowadzone na modelach geometrycznych odzwierciedlających porowatą strukturę poszczególnych próbek kości, zrekonstruowaną na podstawie wyników badania μ CT. Podsumowanie badań oraz wskazanie możliwych kierunków dalszych działań naukowych zamieszczono w rozdziale 10.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej było sformułowanie równania konstrytuwnego tkanki kostnej gąbczastej, uwzględniającego jej nieliniową lepkosprężystość. Dla potrzeb identyfikacji parametrów tego równania wykorzystano zestaw eksperymentów przeprowadzonych z wykorzystaniem ludzkiej tkanki kostnej. Efektem użytecznym pracy była aplikacja opracowanego równania konstrytuwnego do programu komputerowego wykorzystującego metodę elementów skończonych.

Treść rozprawy odpowiada w tym zakresie celom sformułowanim w rozdziale 5 (str. 38). W założeniach autora miała ona pozwolić na weryfikację tezy sformułowanej w następującej postaci:

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

Problematyka rozprawy wpisuje się w bardzo aktualny nurt badań nad mechaniką materiałów tkankowych, stanowiąc kontynuację prac prowadzonych na Politechnice Warszawskiej, zainicjowanych wiele lat temu przez prof. Konstantego Skalskiego. Z uwagi na fakt, że lepsze zrozumienie mechaniki kości ma duże znaczenie, zarówno w zakresie badań podstawowych jak i aplikacyjnych (m.in. dla poprawy jakości implantów dokostnych, np.

endoprotez stawów), prace tego typu mają wielkie znaczenie dla rozwoju nauki i techniki. Dlatego też podjęcie prezentowanej tematyki przez mgr inż. Krzysztofa Jankowskiego należy uznać za w pełni zasadne i celowe.

Oceniana praca wnosi nowe elementy naukowe, wśród których wymienić trzeba:

- wykorzystanie badań właściwości mechanicznych na poziomie mikrostruktury tkanki kostnej do wyznaczenia stałych materiałowych używanych do modelowania tego materiału w mikro- i makroskali;
- propozycję nowej postaci równania konstytutywnego tkanki kostnej gąbczastej, uwzględniającego jej nieliniowo lepkosprężyste właściwości, którego parametry można wyznaczyć w warunkach eksperymentalnych.

Dla osiągnięcia postawionych celów Autor rozprawy wykorzystał z powodzeniem skomplikowaną procedurę badawczą złożoną z powiązanych ze sobą elementów, wśród których należy wymienić:

- modelowanie matematyczne oparte na wykorzystaniu teorii z zakresu mechaniki ciała stałego, a w szczególności zastosowanie funkcji potencjalnych do opisu relacji występujących pomiędzy stanem naprężania a odkształcenia w odniesieniu do tkanki kostnej traktowanej na poziomie mikrostruktury jako materiał nieliniowo lepkosprężysty;
- zaawansowane badania eksperymentalne prowadzone z wykorzystaniem preparatów ludzkiej kości gąbczastej, a w szczególności:
 - nanoindentację,
 - mikrotomografię rentgenowską i rekonstrukcję struktur anatomicznych na podstawie uzyskanych danych obrazowych,
 - testy relaksacji przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej,
- modelowanie i symulacje numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych, z zastosowaniem procedur pozwalających na użycie własnego modelu materiału.

Wspomniana powyżej procedura pozwoliła Autorowi na opracowanie propozycji nowego modelu konstytutywnego materiału, z którego zbudowana jest kość gąbczasta, oraz identyfikację wartości jego parametrów, a tym samym osiągnięcie postawionego celu naukowego.

Realizacja opisanej procedury wymagała wszechstronnej wiedzy i umiejętności, a uzyskane rezultaty świadczą, iż Doktorant wykazał się niezbędnymi w tym zakresie kwalifikacjami.

Pozytywnie należy też ocenić osiągnięcie celu użytecznego, jakim była implementacja opracowanego modelu matematycznego materiału kostnego do komercyjnego systemu wspomagania analiz inżynierskich. Doktorant wykazał się w tym zakresie umiejętnościami, które pozwoliły mu na opracowanie procedury niezbędnej do wprowadzenia nowego równania konstytutywnego do systemu Abaqus. Szkoda jedynie, że kod takiej procedury nie został zamieszczony w załączniku do rozprawy.

Reasumując należy stwierdzić, że oceniana rozprawa dotyczy ważnego problemu naukowego, jakim jest opracowanie modelu matematycznego tkanki kostnej gąbczastej, będącego w stanie odtworzyć z wystarczającą dokładnością jej złożone właściwości, przygotowanego jednocześnie do możliwości aplikacji w systemach powszechnie używanych do wspomagania prac inżynierskich (CAE). Postawione cele zostały osiągnięte. Praca zawiera istotne elementy nowości, zarówno w zakresie zaprezentowanych koncepcji naukowych, jak też autorskich wyników badań. Wysoko należy ocenić zarówno samą koncepcję badań, jak też nowoczesność i stopień zaawansowania wykorzystywanych w nich metod analitycznych, eksperymentalnych i numerycznych.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Autor nie ustrzegł się pewnych błędów i nadmiernych uproszczeń. Najważniejsze uwagi krytyczne i polemiczne, o charakterze merytorycznym, przedstawiono poniżej.

1. Niekonsekwentnie i niejednoznacznie stosowany jest w rozprawie termin „tkanka kostna gąbczasta”, zarówno w odniesieniu do porowatej struktury jak i do materiału, z którego ta struktura jest zbudowana. W przypadku analizy właściwości mechanicznych, te dwa rodzaje materiału bardzo różnią się pomiędzy sobą, w szczególności co do wartości poszczególnych stałych materiałowych. Czytelność rozprawy poprawiłaby się, gdyby Autor zdecydował się na stosowanie bardziej precyzyjnej nomenklatury w tym zakresie.
2. Całość analizy literatury zawarta została na 25 stronach. Można odnieść wrażenie, że w szczególności analiza budowy i właściwości tkanki kostnej gąbczastej zostały przedstawione nazbyt pobieżnie, bez wymaganej w tym przypadku dogłębności. Brakuje w szczególności omówienia wewnętrznej budowy beleczki kostnej, kluczowej z punktu widzenia planowanych badań właściwości mechanicznych w skali mikro. Omówienie właściwości mechanicznych tkanki kostnej ograniczono do ich bardzo ogólnej charakterystyki (str. 19). W tej sytuacji informacje podane w pierwszym akapicie na stronie 33, dotyczące złożoności mechanicznych charakterystyk tkanki gąbczastej, sformułowano bez wystarczającego umocowania w analizie literatury. Utrudnia to później Autorowi wiarygodne uzasadnienie celowości badań własnych.
3. W przypadku testu nanoindentacji, opis procedury przygotowania próbek, wykonania testu oraz interpretacji wyników tego pomiaru jest niepełny. Nasuwające się pytania szczegółowe w tym zakresie:
 - a) Czy nanoindentacja była wykonana na całych próbkach (przygotowanych wg opisu na str. 46-47) czy były do testów pobierane pojedyncze beleczki lub przygotowywano np. cienkie preparaty, jakich używa się do badań mikroskopowych? Czy w przypadku pomiaru wykonywanego na całej próbce podjęto jakieś działania w celu wyeliminowania wpływu ugięcia porowatej struktury kości gąbczastej na wynik nanoindentacji, np. poprzez wypełnienie porów przy użyciu żywicy?

- b) Według jakich kryteriów dobrano obciążenie maksymalne oraz prędkość obciążania i odciążania? Dlaczego nie stosowano przetrzymania siły maksymalnej przez pewien czas? Dlaczego wybrano penetrator kulisty o średnicy 200 μm ?
 - c) Według jakiej zależności wyliczono moduł sprężystości? Informacja o automatycznym algorytmie zaimplementowanym w oprogramowanie maszyny pomiarowej wydaje się być niewystarczająca.
 - d) Wartości modułu Younga wyznaczone w badaniach istotnie różnią się od większości wyników prezentowanych w literaturze. Zrozumienie przyczyn tych różnic jest niemożliwe bez wyjaśnienia wątpliwości, o których jest mowa w powyższych punktach (a-c). W pracy przedstawiono wprawdzie pewną dyskusję na ten temat, jednak jej konkluzja sformułowana na str. 56 jest mało przekonująca.
4. Podczas symulacji testu nanoindentacji (rozdział 8.3) z użyciem metody elementów skończonych wprowadzono dość daleko idące uproszczenia. W szczególności duże znaczenie dla poprawności uzyskanych wyników mogło mieć:
- a) zamodelowanie beleczki kostnej w postaci cienkiej płyty prostopadłościennej o grubości 0,03 mm (3×10^{-2} mm), sztywno podpartej na całej dolnej powierzchni. W szczególności grubość modelu wydaje się zbyt mała, zarówno w porównaniu do maksymalnej głębokości odcisku (ok. 7×10^{-3} mm) jak też w odniesieniu do wymiarów rzeczywistych beleczek ($1 \div 2 \times 10^{-1}$ mm; opis na str. 17);
 - b) brak informacji o testowaniu wpływu zastosowanej dyskretyzacji modelu na wyniki symulacji (test zbieżności). Uwagę zwraca przy tym fakt, że na grubości płyty odtwarzającej beleczkę kostną wygenerowano jedynie trzy warstwy elementów prostopadłościennych;
 - c) pominięcie tarcia w kontakcie modelu penetratora z modelem kości.
5. W opisie testu relaksacji (rozdział 7.2) brakuje informacji na temat sposobu pomiaru odkształceń. Nie opisano też sposobu wyznaczenia wartości naprężenia ani rodzaju (składowej) naprężenia użytego do analizy i zaprezentowanego na wykresach (rys. 7.9). Podano jedynie wartość odkształcenia maksymalnego oraz czas jego osiągnięcia. W dyskusji zgodności wyników z doniesieniami literaturowymi jest z kolei wzmianka o wyliczeniu pola powierzchni podstawy próbki na podstawie modelu 3D, na potrzeby wyliczenia naprężenia. Nigdzie jednak nie podano w rozprawie bardziej szczegółowych informacji na ten temat.
6. W opisie symulacji numerycznej testu relaksacji, użytej do walidacji modelu konstytutywnego (rozdział 9.2.1.), nie wyjaśniono, w jaki sposób wyliczono wartość naprężenia (rys 9.4).
7. Autor ma tendencję do stosowania określeń wartościujących jakość prowadzonych przez siebie badań, podobnych do tego użytego na str. 49: „...co przyczyniło się do uzyskania geometrii struktury beleczkowej próbek odpowiadającej praktycznie w stu procentach geometrii próbek rzeczywistych”, lub na str. 64: „Krzywe opisane za pomocą nowego modelu konstytutywnego praktycznie całkowicie pokrywają się z krzywymi eksperymentalnymi”. Warto zastanowić się, czy nie jest to niekiedy podejście zbyt

bezkrytyczne. Co istotne, określenia takie są zazwyczaj formułowane na podstawie dość pobieżnej analizy uzyskanych wyników.

8. Część wniosków została sformułowana na podstawie jedynie jakościowej a nie ilościowej analizy uzyskanych wyników. Dotyczy to m.in. porównania wyników symulacji numerycznej z wynikami eksperymentalnymi testów nanoindentacji prowadzonych dla próbki określanej symbolem 63L (str. 88-89), a częściowo również walidacji modelu zaprezentowanej w rozdziale 9. Tego typu podejście utrudnia jednoznaczną ocenę poprawności wnioskowania.

Oprócz przedstawionych powyżej uwag merytorycznych trzeba zwrócić uwagę również na drobne błędy redakcyjne i językowe, np.:

- a) Brak odniesienia do literatury przy omawianiu aksjomatów teorii równań konstytutywnych (str. 20);
- b) Na rys. 3.3. a (po prawej) w opisie osi odciętych powinno być raczej ε zamiast t ;
- c) Na str. 31, na dole, powinno być raczej dwa typy „modeli” materiałów niż dwa typy materiałów;
- d) Na str. 36 – nieprecyzyjne użycie terminu „kalibracja” w stosunku do wyznaczenia parametrów materiałowych;
- e) W tabeli 6.1 nie podano zastosowanych jednostek długości;
- f) Na str. 47 oraz 91-92 Autor pisze o modelach 3D próbek kości zbudowanych z siatki trójkątów. Lepiej byłoby odnieść się wprost do nazwy modelu STL lub pisać o „modelu powierzchniowym” złożonym z siatki trójkątów;
- g) Autor dość często pomija słowo „wartość” w odniesieniu do parametrów materiałowych, np. na str. 51 napisano: „wyznaczenie dwóch właściwości mechanicznych”, a na str. 55: „wraz z uśrednionymi modułami Younga”,
- h) Na str. 56 napisano o energii, jaką badany materiał „generuje” podczas nanoindentacji,
- i) W tekście pracy można znaleźć nieliczne pomyłki określane jako tzw. „literówki”.

6. KONKLUZJA

Uwzględniając wysoką ocenę koncepcji badań, występujące w niej elementy nowości naukowej oraz zaawansowanie stosowanych technik analitycznych, eksperymentalnych i numerycznych uważam, że recenzowana rozprawa pt. „Konstytutywne modelowanie gąbczastej tkanki kostnej człowieka na poziomie mikrostrukturalnym” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim.

Uważam, że mgr inż. Krzysztof Jankowski podjął tematykę istotną pod względem naukowym i aplikacyjnym oraz osiągnął postawione cele, dlatego wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej przez niego rozprawy doktorskiej.

Zaprezentowane w recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne mają charakter polemiczny i powinny być przedmiotem dyskusji podczas publicznej obrony. Nie umniejszają one jednak wartości naukowej rozprawy.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Krzysztof Jankowski', written in a cursive style.