

Wrocław, 27.11.2024r.

dr hab. inż. Jarosław Filipiak, profesor PWr  
Politechnika Wrocławska  
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej  
ul. Łukasiewicza 5  
50-371 Wrocław

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Jakuba Kamińskiego**

pod tytułem:

„Komputerowa symulacja właściwości mechanicznych tkanki kostnej na podstawie biomechanicznego modelu kości w oparciu o pomiary mikrotomograficzne kości zwierzęcych”

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została napisana pod opieką naukową dr hab. inż. Jacka Tarasiuka, profesora AGH, natomiast promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Sebastian Wroński, profesor AGH.

Recenzję opracowano na prośbę prof. dr hab. inż. Bartłomieja Szafrana, Dziekana Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (pismo WFiIS-b.510-27/552/24 z dnia 12.11.2024r.).

**1. Ocena aktualności wybranego tematu**

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Kamińskiego dotyczy opracowania i weryfikacji metody wyznaczania właściwości mechanicznych tkanki kostnej na podstawie danych uzyskanych z wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej. Obserwowany w okresie ostatnich 15 lat intensywny rozwój wysokorozdzielczych tomografów laboratoryjnych oraz coraz większa dostępność urządzeń sprawiają, że wzrasta liczba prac związanych z wielkoskalowym obrazowaniem tkanki kostnej, w szczególności kości gąbczastej i wyznaczaniem na tej podstawie charakterystycznych parametrów morfologicznych, topologicznych i teksturowych. Wyniki takich pomiarów wykorzystywane są np. do oceny wpływu nowych leków na strukturę kości, przebudowę tkanki kostnej pod wpływem bodźców zewnętrznych, czy też stopnia integracji implantu z tkanką kostną. Innym zagadnieniem o olbrzymim znaczeniu poznawczym jest wykorzystanie zarejestrowanej przestrzennej geometrii kości gąbczastej do obliczeń biomechanicznych w obrębie mikrostruktury kości gąbczastej, czy też pojedynczych beleczek/blaszek kostnych, z wykorzystaniem MES. Kolejnym zagadnieniem o olbrzymim znaczeniu poznawczym jest modelowanie komputerowe właściwości mechanicznych tkanki kostnej na podstawie danych pomiarowych z obrazowania medycznego, które obecnie jest jednym z istotniejszych wyzwań badawczych dla fizyków i biomechaników, obliczeniowców i doświadczalników. Oceniana rozprawa dotyczy właśnie tej tematyki. Jest to więc bardzo aktualny temat, który wzbudza zainteresowanie badaczy z różnych dziedzin nauki począwszy od nauk ścisłych i przyrodniczych, nauk technicznych

oraz środowiska medycznego. Zagadnienie jest niezwykle rozległe i interdyscyplinarne, natomiast Autor rozprawy skoncentrował się na aspektach biofizycznych i biomechanicznych rozpatrywanego problemu naukowego.

Uważam, że problem badawczy podjęty przez Pana mgr inż. Jakuba Kamińskiego w rozprawie doktorskiej jest uzasadniony, a samo sformułowanie tematu jest właściwe i bardzo dobrze oddaje ideę pracy i jej treść.

## **2. Struktura pracy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została napisana w języku polski i liczy 208 stron. Składa się z siedmiu rozdziałów i 170 stron tekstu zasadniczego, bibliografii liczącej 219 pozycji, dodatków A, B i C (zawierających szczegółowe wyniki badań i symulacji), a także spisu rysunków i tabel. Do pracy dołączono streszczenia w języku polskim i angielskim. Dołączono również życiorys Autora oraz dorobek naukowy.

W rozdziale I przedstawiono najważniejsze zagadnienia dotyczące funkcji i budowy kości na poziomie makro-, mezo- i mikrostruktury w zakresie niezbędnym do właściwego zrozumienia rozpatrywanego problemu. Omówiono istotę procesu przebudowy tkanki kostnej pod wpływem bodźców mechanicznych, a także przedstawiono najważniejsze teorie i modele opisujące proces adaptacji funkcjonalnej kości beleczkowej. Na zakończenie rozdziału zdefiniowano problem, cel badawczy, czyli opracowanie wieloskalowej symulacji komputerowej własności mechanicznych kości na podstawie modelu uśredniającego właściwości na bazie pomiarów wołowych kości udowych z mikrotomografii. W dalszej części Autor przedstawił zakres zaplanowanych badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych, które były niezbędne do osiągnięcia założonego celu badawczego.

W rozdziale II również na podstawie literatury przedstawiono zagadnienia mechaniki ciała stałego dotyczące opisu właściwości mechanicznych oraz modelowania właściwości mechanicznych, koncentrując uwagę na modelach uśredniających oraz metodzie elementów skończonych. Rozdział zakończono zestawieniem wyników literaturowych właściwości materiałowych kości z podziałem na dane eksperymentalne i uzyskane z symulacji.

W rozdziale III omówiono szczegółowo preparatykę próbek w skali makro i mezo, pobranych z nasady bliższej wołowej kości udowej. Próbkę przygotowano w celu ich badania z użyciem nanotomografu rentgenowskiego. Część z przygotowanych próbek w postaci sześciątów o przybliżonych wymiarach 10 x 10 x 10 mm poddano jednoosiowemu quasi-statycznemu ściskaniu w trzech ortogonalnych kierunkach. Mini-układ obciążający wraz z badaną próbką umieszczono w komorze pomiarowej tomografu, co pozwoliło na uzyskanie danych o zmianie geometrii odkształconej sprężystości próbki. Na podstawie przeprowadzonych testów uzyskano krzywe  $\sigma - \epsilon$ , które posłużyły do wyznaczenia wartości modułu Younga w trzech ortogonalnych kierunkach. W rozdziale opisano również metodologię wyznaczania gęstości badanych próbek. Uzyskane wyniki w dalszej części pracy zostały wykorzystane w symulacjach MES.

W rozdz. IV Autor rozprawy przedstawia metodologię rejestracji danych 3D. Do tego celu zaadaptowano opisaną w literaturze i dobrze sprawdzoną w praktyce rejestrację opartą na

deskryptorach. Przeprowadzone prace umożliwiły rejestrację próbek kości z dwóch różnych skal.

Rozdział V przedstawia zagadnienia związane z przetwarzaniem i analizą danych. Autor opisał sposób binaryzacji próbek z pomiarów w skali mezo z użyciem progowania globalnego, a także binaryzacji obszarów w niższej rozdzielczości z użyciem progowania lokalnego. Przygotowane w ten sposób próbki posłużyły do przeprowadzenia analizy morfometrycznej próbek kości gąbczastej poprzez wyznaczenie parametrów morfologicznych, topologicznych i teksturowych. Na podstawie wyników analizy statystycznej korelacji pomiędzy parametrami morfometrycznymi dokonano weryfikacji doboru metody i parametrów progowania lokalnego.

W rozdziale VI przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem w skali mezo. Omówiono zagadnienia związane z przygotowaniem geometrii modeli obliczeniowych zgodnie z procedurami opisanymi we wcześniejszych rozdziałach (IV i V) oraz przyjętymi warunkami brzegowymi. Symulacje przeprowadzono z użyciem pakietu *ParOSol* z wprowadzonymi przez Doktoranta oryginalnymi rozszerzeniami. Na podstawie symulacji MES sześciu testów: ściskania w trzech prostopadłych kierunkach i ścinania w trzech kierunkach wyznaczono stałe materiałowe i tensor sztywności dla próbek o kształcie sześcianu o boku 10 mm (siatek obliczeniowych 3D) wygenerowanych w badaniu  $\mu$ CT dla objętości reprezentatywnej kości gąbczastej. Uzyskane wartości stałych materiałowych, frakcji objętościowej i anizotropii Autor wykorzystał do optymalizacji parametrów modelu Zysseta-Curniera.

W rozdziale VII opisano symulacje komputerowe, których celem było wyznaczenie i przeprowadzenie analizy rozkładu właściwości materiałowych i parametru BV/TV w nasadzie bliższej kości udowej krowy. Doktorant dążąc do jak najwierniejszego odtworzenia warunków biomechanicznych opracował model tylnej kończyny krowy uwzględniający układ kostno-stawowy oraz mięśniowo-stawowy. W celu uproszczenia zadania obliczeniowego Autor zastosował model hybrydowy. W modelu nasada bliższa kości udowej – rejon dociekań badawczych w niniejszej rozprawie – została dokładnie odwzorowana na podstawie siatki obliczeniowej otrzymanej z danych mikrotomograficznych. Trzon kości udowej i jej nasadę dalszą, a także kość piszczelową i kość śródstopia wraz z kością kopytową zamodelowano jako trójwymiarowe elementy belkowe o przekroju rurowym. W modelu uwzględniono uproszczony układ mięśniowy stabilizujący kończynę tylną. Poszczególne mięśnie zamodelowano jako elementy prętowe, którym przypisano właściwości termiczne, a także nadano odpowiednie pole przekroju poprzecznego oraz właściwości materiałowe. W węzłach na powierzchni zewnętrznej panewki odebrano wszystkie stopnie swobody, natomiast obciążenie przyłożono do kości kopytowej. Na modelu przeprowadzono symulacje w celu zbadania wpływu zastosowania segmentacji kości zbitej i gąbczastej oraz anizotropii na wyniki modelowania parametrów mechanicznych kości. Wyniki symulacji przedstawiono w postaci pola naprężenia zredukowanego Hubera-von Misesa na powierzchni nasady bliższej oraz rozkładu wartości składowych modułu Younga w charakterystycznym przekroju poprzecznym nasady.

Przyjęta struktura rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Kamińskiego jest poprawna pod względem formalnym i zgodna z przyjętą koncepcją badawczą.

### **3. Ocena przeprowadzonej analizy literaturowej**

Spis literatury, do której odwołuje się Doktorant, liczy 219 pozycji. Są to głównie artykuły naukowe opublikowane w renomowanych czasopiśmie o światowym zasięgu oraz w mniejszym zakresie prace opublikowane w materiałach konferencyjnych. Należy podkreślić, że zdecydowana większość to publikacje z ostatnich 10-15 lat. Doktorant powołuje się również na starsze źródła, ale są to zazwyczaj fundamentalne prace w dziedzinie rozważanego problemu badawczego. W pierwszych rozdziałach zawierających wprowadzenie do rozważanej tematyki przeprowadzono szczegółową analizę literatury w zakresie budowy oraz funkcjonalności kości, jej budowy chemicznej i procesu przebudowy tkanki kostnej. Przeanalizowano również literaturę w zakresie badań makro-, mezo- i mikrostruktury tkanki kostnej oraz modelowania właściwości mechanicznych tkanki kostnej. W kolejnych rozdziałach dotyczących badań własnych, przyjęto zasadę przedstawiania na wstępie aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematycznym rozdziału. Każdy rozdział Autor podsumowuje uzyskane wyniki dyskusją i ich odniesieniem do wyników prezentowanych przez innych badaczy, wskazując podobieństwa, czy też różnice, czy nawet wskazując potencjalne kierunki rozwoju badań w przyszłości.

Szczegółowa i krytyczna analiza literaturowa i przeprowadzone na jej podstawie wnioski w aspekcie wyboru metod badawczych oraz modeli obliczeniowych świadczą o dużej wiedzy i dobrej orientacji w tematyce rozprawy.

### **4. Wartość merytoryczna rozprawy**

Cel pracy został jasno sprecyzowany i jest zgodny z tytułem rozprawy. W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych z użyciem mikrotomografii komputerowej i mniestanowiska obciążającego, a następnie przeprowadzonych symulacji numerycznych Doktorant opracował metodę wieloskalowej symulacji komputerowej właściwości mechanicznych kości na podstawie modelu uśredniającego właściwości na bazie mikrotomograficznych pomiarów kości wołowej. Badania nad metodą prowadzono na materiale pochodzenia zwierzęcego, jednak metodologię badań zaplanowano tak, aby mogła być stosowana również do kości ludzkich. Istotnym jest fakt wskazujący na potencjał użytecznego wykorzystania wyników przedstawionych w rozprawie do czego Doktorant odnosi się w podsumowaniu rozprawy.

Należy podkreślić, że przyjęty zakres i etapy pracy układają się w logiczny ciąg badań i analiz, które pozwalają na prześledzenie toku dedukcji i dochodzenia do założonego celu rozprawy. W argumentacji daje się zauważyć dążenie do obiektywności i logiki wnioskowania. Wyniki badań eksperymentalnych i obliczeniowych Autor rozprawy poddaje analizie statystycznej poprawnie dobierając metody analizy i sprawnie wykorzystuje źródła literaturowe do omówienia i interpretacji uzyskanych wyników.

### **5. Ocena oryginalności rozprawy, wartość naukowa rozprawy**

Doktorant wykorzystując wiedzę i doświadczenie w zakresie rejestracji, przetwarzania i analizy obrazów z badania mikrotomograficznego oraz opanowanie i sprawne posługiwanie się modelami i narzędziami analitycznymi służącymi do przetwarzania obrazów, opracował kompleksową metodologię przetwarzania danych pomiarowych z mikrotomografii komputerowej i ich aplikację w wieloskalowej symulacji MES w celu szacowania właściwości

materiałowych tkanki kostnej. Opracowana metodologia jest oryginalna i stanowi rozwinięcie oraz wzbogacenie dotychczasowego stanu wiedzy w dyscyplinie *nauk fizycznych* oraz *w inżynierii biomedycznej*.

Za główne osiągnięcie należy uznać wykazanie kluczowej roli takich parametrów jak: orientacja ortotropowa, mapowanie wartości frakcji objętościowej i stopień anizotropii, w modelowaniu biomechanicznym kości gąbczastej. Uzyskanie efektu końcowego pracy było możliwe poprzez osiągnięcie następujących celów cząstkowych:

1. Opracowanie metody automatycznej rejestracji obrazów próbek i nasad kości udowych, skalibrowanej na bazie lokalnych deskryptorów,
2. Opracowanie metody binaryzacji obszarów po rejestracji ze zbliżoną do próbek morfometrią, skalibrowaną z użyciem progowania lokalnego,
3. Cyfrowe „wycięcie” optymalnych rozmiarowo obszarów kości pokrywających się z głównymi osiami anizotropii,
4. Wykonanie symulacji MES ściskania i ścinania trójwymiarowych modeli utworzonych na bazie wokseli,
5. Powiązanie kierunkowości z analizy obrazów kości z orientacją uzyskaną w symulacjach poprzez analizę anizotropii i optymalizacji tensora sztywności,
6. Wyznaczenie wejściowych stałych materiałowych do symulacji i modelu uśredniającego,
7. Opracowanie wielkoskalowego modelu numerycznego kończyny krowy, uwzględniającego elementy układu kostno-stawowego i mięśniowego.

Należy podkreślić, że wprawdzie metoda została opracowana i przetestowana w warunkach laboratoryjnych i na modelu zwierzęcym, to jednak ma ona potencjał aplikacyjny również w praktyce klinicznej. Już dzisiaj obwodowa tomografia komputerowa o wysokiej rozdzielczości, czy tomografia wiązki stożkowej stwarza możliwości uzyskiwania obrazów o odpowiedniej rozdzielczości. Zatem można sobie wyobrazić wykorzystanie opracowanej metody, np. do nieinwazyjnej diagnostyki stopnia integracji implantu stawu biodrowego z tkankami kości udowej lub projektowania implantu indywidualnie dopasowanego biomechanicznie dla konkretnego pacjenta.

## **6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

Czytając rozprawę mgr inż. Jakuba Kamińskiego zyskuje się przekonanie o szerokiej, interdyscyplinarnej wiedzy Doktoranta oraz duży nakład pracy niezbędny do samodzielnego przeprowadzenia badań eksperymentalnych i obliczeniowych zakrojonych na tak szeroką skalę. W efekcie końcowym umożliwiło kompleksowe ujęcie problematyki i realizację postawionego celu pracy.

Pytania i szczegółowe uwagi:

1. W badaniach mikrotomograficznych testowano sześciennie próbki w stanie nieobciążonym oraz po ich osiowym odkształceniu (3,5%). Autor podaje, że czas trwania pomiaru dla jednego stanu wynosił 45 min. Zatem pomiar próbki nieodkształconej i odkształconej wymaga 90 min. Dodatkowo, na str. 42 pojawia się informacja o wykonywaniu pomiarów  $\mu$ CT dla pośrednich odkształceń (0,5; 1,5; 2,5%). Przekłada się to na czas rejestracji wynoszący minimum 360 min. Ponadto, te same próbki badano w teście ściskania w trzech prostopadłych kierunkach. Zatem łączny czas badań można

oszacować na minimum 495 min. W związku z tym rodzi się pytanie o wpływ zmiany wilgotności badanych próbek na uzyskane wyniki. Czy analizowano to zagadnienie? Czy podejmowano specjalne działania mające na celu ograniczenie efektu zmiany wilgotności badanych próbek w czasie pomiarów?

2. W tym samym rozdziale przyjęty zakres odkształcenia 3,5% ustalono na podstawie literatury. Czy Autor przeprowadził test ściskania próbek własnych do ich zniszczenia? Wówczas na podstawie pełnej charakterystyki możliwe byłoby precyzyjniejsze określenie zakresu odkształceń sprężystych dla konkretnych próbek.
3. Na str. 41 (wiersz 21) Doktorant podaje: „W wyniku tak przeprowadzonych testów, dla każdego z kierunków otrzymano kilka przedziałów (chodzi o zależność  $\sigma$ - $\epsilon$ ), w których zależność dla kości była liniowa i dla każdego z tych przedziałów możliwe było wyznaczenie wartości modułu Younga.” Proszę o sprecyzowanie w jaki sposób wyznaczany był moduł Younga dla badanych próbek i co Autor ma na myśli wspominając o „kilku przedziałach”?
4. W modelu numerycznym całej kończyny zastosowano panewkę jako komponent stanowiący podparcie dla główki kości udowej i tym samym całego układu. W jaki sposób zamodelowano panewkę i jej połączenie z główką kości udowej?
5. Na rys. 5.11 przedstawiono ilustrację koncepcji obrotu i wycięcia określonego podobszaru. Czy przedstawione na trzech zdjęciach obrazy dotyczą tej samej struktury w kolejnych etapach procedury? Wpatrując się w poszczególne obrazy nie sposób dostrzec ich związek między sobą.
6. Na str. 41 (linijka 11) Autor używa określenia: “W celu wyznaczenia pozornych właściwości mechanicznych w postaci modułów Younga...”. Powinno być: ... wyznaczenia właściwości mechanicznych wyrażonych za pomocą pozornego modułu Younga. Określenie „pozorny” dotyczy konkretnego parametru – modułu Younga, a nie wszystkich właściwości mechanicznych badanego obiektu, w tym przypadku kości gąbczastej.
7. Wykresy zamieszczone na rys. 3.8 byłyby łatwiejsze do interpretacji gdyby zastosowano te same zakresy naprężenia na osi y.

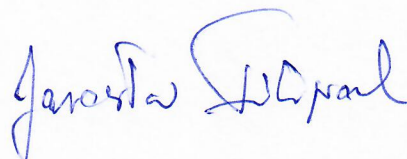
Należy podkreślić, że rozprawa została napisana bardzo starannie i widać dużą dbałość o szczegóły edytorskie. Na uwagę zasługują elementy graficzne w postaci zdjęć z  $\mu$ CT, wykresów i schematów ilustrujących tok postępowania, czy ideę rozwiązania. Interesującym narzędziem są interaktywne fotografie (dostępne w wersji elektronicznej pracy) umożliwiające czytelnikowi w pełni korzystać z informacji uzyskanych z pomiaru  $\mu$ CT.

## 8. Ocena końcowa

Na podstawie zrealizowanych badań eksperymentalnych i prac teoretyczno-obliczeniowych Doktorant opracował oryginalną metodologię łączącą wysokorozdzielcze obrazowanie mikrotomograficzne, analizę trójwymiarowych obszarów kości gąbczastej oraz wieloskalowe symulacje MES do symulacji komputerowej właściwości mechanicznych kości na podstawie modelu uśredniającego właściwości z wykorzystaniem wyników pomiarów z mikrotomografii.

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje wiedzę ogólną Doktoranta w dyscyplinie *nauki fizyczne* oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że sposób realizacji badań naukowych, których wyniki przedstawiono w recenzowanej rozprawie świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia działalności naukowo-badawczej.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w Art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie *nauki fizyczne*.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jarosław Szlachetka', is written on the right side of the page.