



Warszawa, 6.03.2026 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Świąszkowski  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechnika Warszawska

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anity Gryko

pt.: “ **Numeryczno-eksperymentalna optymalizacja architektury  
skaffoldów do zastosowań ortopedycznych**”

opracowana na zlecenie Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego  
Politechniki Białostockiej

### **1. Aktualność tematyki rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „*Numeryczno-eksperymentalna optymalizacja architektury skaffoldów do zastosowań ortopedycznych*” dotyczy istotnej i aktualnej problematyki badawczej z zakresu inżynierii biomedycznej, ukierunkowanej na projektowanie nowoczesnych rozwiązań materiałowych wspomagających procesy regeneracji uszkodzonych tkanek kostnych. Pani mgr inż. Anita Gryko koncentruje swoje badania na projektowaniu rusztowań tkankowych z wykorzystaniem metod komputerowych, odpowiadając tym samym na rosnące zapotrzebowanie na innowacyjne rozwiązania w ortopedii.



Uszkodzenia kości stanowią istotny problem zdrowia publicznego w skali globalnej – rocznie odnotowuje się ponad 179 milionów nowych przypadków. Ponad milion z nich dotyczy ubytków kostnych o rozmiarze krytycznym, przekraczającym kilka centymetrów, które nie goją się samoistnie i wymagają interwencji chirurgicznej. Krytyczne ubytki kostne najczęściej leczy się za pomocą autoprzeszczepów lub alloprzeszczepów. Autoprzeszczepy uznawane są za złoty standard ze względu na obecność żywych komórek oraz wysoką zdolność regeneracyjną, jednak ich zastosowanie jest ograniczone przez niewielką dostępność materiału oraz ryzyko powikłań w miejscu jego pobrania. Alloprzeszczepy oraz biomateriały kościozastępcze eliminują konieczność przeprowadzania dodatkowej operacji, jednak często wykazują słabszą integrację z tkanką kostną oraz niosą ryzyko reakcji immunologicznej organizmu pacjenta. Z tego powodu intensywnie rozwijane są strategie inżynierii tkankowej wykorzystujące biomateriały, komórki oraz czynniki wzrostu w celu skuteczniejszej regeneracji dużych ubytków kostnych.

Jednym z najważniejszych elementów warunkujących prawidłowe odtworzenie brakującej tkanki w inżynierii tkankowej jest bioaktywne i biofunkcjonalne trójwymiarowe rusztowanie komórkowe. Pełni ono rolę zastępczej macierzy pozakomórkowej, stanowiąc nośnik komórek oraz środowisko sprzyjające ich wzrostowi i tworzeniu nowej tkanki. W przypadku regeneracji tkanki kostnej, co stanowi obszar tematyczny recenzowanej pracy, trójwymiarowe podłoża do hodowli komórek kostnych wytwarza się najczęściej z biodegradowalnych materiałów polimerowych lub kompozytowych, które sprzyjają właściwej adhezji, proliferacji i różnicowaniu komórek, a po spełnieniu swojej funkcji ulegają degradacji. Znane są jednak również prace promujące zastosowanie rusztowań metalicznych, głównie ze względu na ich wysoką wytrzymałość mechaniczną oraz stosunkowo dobrą biozgodność. Są to przede wszystkim porowate materiały tytanowe wytwarzane w technologiach przyrostowych, charakteryzujące się zróżnicowaną porowatością oraz rozmiarem i geometrią porów. Zarówno właściwości mechaniczne, jak i architektura takich rusztowania mają kluczowe znaczenie dla powodzenia procesu odbudowy tkanki kostnej. Istotna jest również pierwotna stabilizacja rusztowania w miejscu ubytku, która umożliwia integrację implantu z otaczającą tkanką oraz zapewnia odpowiednie warunki mechaniczne do formowania się nowej tkanki wewnątrz struktury rusztowania.



Do powyższych zagadnień odnosi się również Kandydatka w swojej pracy doktorskiej, opisując nowe rozwiązania konstrukcyjne rusztowań kostnych wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V w technologii selektywnego topienia laserowego w złożu proszku. Dodatkowo, po analizie dostępnych metod mocowania implantów w kości, proponuje autorskie rozwiązanie stabilizacji rusztowania poprzez modyfikację jego geometrii. W swojej pracy wykorzystuje szeroko stosowane narzędzia numeryczne wspomagające projektowanie oraz analizy inżynierskie konstrukcji, a także opisane w literaturze modele matematyczne przedstawiające procesy biologiczne zachodzące podczas gojenia i tworzenia tkanki kostnej.

W świetle powyższych rozważań można stwierdzić, że tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej jest aktualna, a badania realizowane przez Doktorantkę bardzo dobrze wpisują się w aktualne trendy naukowe związane z rozwojem rusztowań tkankowych stosowanych w regeneracji tkanki kostnej.

## **2. Ogólna charakterystyka pracy - struktura, cel i zakres pracy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anity Gryko została przygotowana w języku polskim i stanowi obszernie opracowanie liczące 250 stron. Zasadnicza część pracy obejmuje 218 stron i ma klasyczny układ rozprawy doktorskiej – zawiera wstęp, siedem rozdziałów merytorycznych, podsumowanie wraz z wnioskami oraz plan dalszych badań. W poszczególnych rozdziałach przedstawiono tło i genezę analizowanych zagadnień, określono cele badawcze oraz zastosowaną metodykę, a następnie zaprezentowano uzyskane wyniki i sformułowano wynikające z nich wnioski. Pozostałą część pracy stanowią: wykaz literatury, spisy rysunków i tabel, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz załączniki. Taki układ rozprawy sprzyja przejrzystości prezentowanych treści i sprawia, że praca jest spójna oraz logicznie uporządkowana.

Rozprawa rozpoczyna się wykazem stosowanych skrótów. Po krótkim wprowadzeniu do tematyki badań, w rozdziałach 1–3 Autorka przedstawia aktualny stan wiedzy w obszernym, blisko siedemdziesięciostronicowym przeglądzie literatury. W rozdziale pierwszym omówiono podstawowe zagadnienia związane z anatomią i fizjologią tkanki kostnej, w tym jej strukturę na różnych poziomach organizacji, a także procesy



przebudowy i regeneracji kości. Autorka przedstawia również wybrane, często cytowane w literaturze naukowej matematyczne modele mechanoregulacji tkanki kostnej, w szczególności modele zaproponowane przez Cartera, Claesa i Heigela, Huiskesa oraz Prendergasta. Rozdział drugi poświęcony jest metodom leczenia krytycznych ubytków kostnych z wykorzystaniem przeszczepów oraz różnych sposobów stabilizacji pierwotnej. Doktorantka omawia zalety i ograniczenia stosowania przeszczepów autologicznych i allogenicznych, koncentrując jednak szczególną uwagę na podejściu inżynierii tkankowej oraz na rusztowaniach tkankowych pełniących funkcję sztucznej macierzy pozakomórkowej. W tej części pracy przedstawiono również przegląd materiałów stosowanych w inżynierii tkankowej oraz ich podstawowych właściwości. Autorka omawia ponadto kluczowe parametry architektury rusztowań, takie jak porowatość, rozmiar i geometria porów, a także ich wpływ na proces tworzenia nowej tkanki kostnej. Wspomina również o wybranych nowoczesnych technikach wytwarzania rusztowań tkankowych. W rozdziale trzecim zaprezentowano aktualny stan badań dotyczących optymalizacji architektury porowatych rusztowań tkankowych. Autorka omawia stosowane algorytmy optymalizacyjne, m.in. algorytmy genetyczne oraz metody bazujące na uczeniu maszynowym. Wskazuje także ich ograniczenia oraz przedstawia najczęściej wykorzystywane funkcje celu i zmienne projektowe.

Do pewnych niedostatków tej części rozprawy można zaliczyć brak szerszego omówienia istniejących modeli wykorzystywanych bezpośrednio do analizy regeneracji kości wspomaganą przez rusztowania tkankowe oraz do badania zależności pomiędzy właściwościami rusztowań a przebiegiem procesów formowania nowej tkanki kostnej. W literaturze można znaleźć przykłady takich analiz, m.in. w pracach dr Camille Perier-Metz czy dr. Jose A. Sanz-Herrera. Ich przywołanie i krótkie omówienie mogłoby dodatkowo wzbogacić część przeglądową pracy, a także stanowić wiarygodny punkt odniesienia dla zaproponowanej w rozprawie metodyki badawczej. W rozdziale czwartym Autorka formułuje problem badawczy, określa cel pracy, hipotezy badawcze oraz zakres i metodykę realizowanych badań. Doktorantka formułuje główny cel pracy, który brzmi następująco: *„Celem badań przeprowadzonych w ramach niniejszej dysertacji było rozwiązanie opisanych problemów badawczych poprzez zaproponowanie odpowiedniego sposobu optymalizacji konstrukcji skaffoldu do uzyskania skutecznego połączenia z kością. W*



pracy przyjęto dwie hipotezy badawcze. Pierwsza z nich zakłada, że *„kontrola przestrzennego rozkładu porowatości (w zakresie 10-60%) i geometrii porów (o średnicy od 300  $\mu\text{m}$  do 1500  $\mu\text{m}$ ) w architekturze skaffoldu pozwala na lokalne dostosowanie sztywności do przewidywanych kierunków obciążenia, co minimalizuje ryzyko zniszczenia struktury i poprawia sposób przenoszenia obciążenia przez implant na tkanki kostne*”. Druga, pomocnicza hipoteza zakłada, że *„kontrola wielkości i kształtu porów oraz porowatości w strukturze metalicznego skaffoldu umożliwia uzyskanie sztywności w zakresie 15-20 GPa, odpowiadającej lokalnej sztywności ludzkiej kości korowej*”.

Hipotezy badawcze sformułowane w pracy są logicznie powiązane z przeglądem literatury i odnoszą się do kluczowych parametrów architektury rusztowań, takich jak porowatość oraz geometria porów, które istotnie wpływają na właściwości mechaniczne implantów. Mogłyby jednak być sformułowane bardziej precyzyjnie i w większym stopniu uwzględniać procesy biologiczne regeneracji kości, a nie jedynie parametry mechaniczne rusztowania.

W rozdziale czwartym Doktorantka syntetycznie przedstawia również główne zadania badawcze oraz zakres prac prowadzących do realizacji celu rozprawy. Metodyka badań została dodatkowo zilustrowana schematem algorytmu, pokazującym kolejne etapy postępowania badawczego oraz wzajemne zależności między nimi. Opracowany schemat obejmuje trzy główne etapy pracy: analizy numeryczne rusztowań i sposobów ich mocowania w kości, modelowanie i optymalizację geometrii rusztowań tkankowych oraz weryfikację numeryczną i doświadczalną zaprojektowanych optymalnych rusztowań. Takie przedstawienie metodyki ułatwia zrozumienie przyjętej koncepcji badawczej i logicznego przebiegu realizowanych badań.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badań numerycznych o charakterze podstawowym, których celem było opracowanie wytycznych projektowych wykorzystanych następnie w algorytmie do optymalizacji geometrii rusztowań ortopedycznych. Badania opisane w podrozdziałach 5.1–5.3 koncentrowały się na analizie kluczowych czynników wpływających na skuteczność przywracania ciągłości kości długich z użyciem rusztowań.

Pierwsze badania (podrozdział 5.1) dotyczyły wpływu porowatości (10%, 20%, 30%, 40%, 50% i 60%) oraz geometrii porów (kulisty, ośmiokątny, kwadratowy i trójkątny)



na właściwości mechaniczne rusztowań tkankowych wykonanych z różnych materiałów, takich jak stopy Ti6Al4V i CoCr oraz stal 316L. Szczególną uwagę poświęcono parametrom mechanicznym, takim jak moduł Younga i granica plastyczności, w kontekście ich dopasowania do właściwości naturalnej tkanki kostnej. Uzyskane wyniki umożliwiły określenie optymalnych zakresów parametrów, w tym wielkości i kształtu porów oraz porowatości, które stanowiły podstawę do dalszej optymalizacji i wprowadzenia do algorytmu. Jednocześnie niektóre wyniki mogą budzić pytania, dlaczego w przypadku niektórych geometrii sztywność rusztowań tytanowych była wyższa niż sztywność rusztowań wykonanych ze stali 316L.

W podrozdziale 5.2 przedstawiono szczegółową analizę rozkładu naprężenia zredukowanego oraz gęstości energii odkształcenia (SED) w modelach kości zdrowej i kości z ubytkami kostnymi poddanymi obciążeniom charakterystycznym dla cyklu chodu człowieka. Do badań numerycznych wybrano trzy długości ubytków: 35, 45 i 55 mm, zlokalizowanych w dolnej, środkowej oraz górnej części trzonu kości udowej. Analizie poddano cztery warianty przywracania ciągłości kości: pojedyncza płytką, dwie równoległe płytki, pojedyncza płytką z rusztowaniem oraz dwie równoległe płytki z rusztowaniem. Wyniki symulacji numerycznych z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) jasno wskazują, że optymalną metodą przywracania ciągłości kości jest zastosowanie pojedynczej płytki w połączeniu z rusztowaniem. W tym wariantcie rozkład naprężeń był najbardziej zbliżony do modelu kości zdrowej. Przedstawione badania mają istotne znaczenie praktyczne, gdyż dostarczają wytycznych dla projektowania rusztowań ortopedycznych oraz ich mocowania metodami osteosyntezy,

W podrozdziale 5.3 przedstawiono analizę numeryczną dotyczącą metod kotwiczenia rusztowań tkankowych w ubytkach kostnych o rozmiarze krytycznym. W pracy przebadano cztery metody kotwiczenia rusztowania w ubytku o długości 60 mm: płytkę blokującą, pierścień zewnętrzny, gwóźdź śródszpikowy oraz podwójny klin antyrotacyjny. W tych analizach również uwzględniono obciążenia generowane podczas całego cyklu chodu człowieka. Oceniano parametry mechaniczne obejmujące maksymalne naprężenie Huber-Mises-Hencky, gęstość energii odkształcenia, przemieszczenie rusztowania, naprężenie styczne oraz szczelinę między rusztowaniem a kością. Wyniki badań wykazały, że najbardziej efektywnymi rozwiązaniami pod względem przenoszenia obciążeń są kotwiczenie przy użyciu



pierścienia zewnętrznego oraz podwójnego klina antyrotacyjnego. Autorka słusznie podkreśla, że skuteczność stosowania rusztowania w leczeniu uszkodzonej kości można znacząco poprawić poprzez odpowiedni dobór metody jego kotwiczenia, co stanowi istotną wskazówkę dla projektowania i stosowania implantów w praktyce klinicznej. W trakcie lektury podrozdziału 5.3 nasuwa się pytanie, dlaczego wyniki uzyskane w podrozdziale 5.2 nie zostały wzięte pod uwagę ani zestawione z omawianymi wynikami, co mogłoby ułatwić porównanie skuteczności różnych rozwiązań.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że wyniki przedstawione w podrozdziałach 5.1–5.3 zostały opublikowane w trzech odrębnych artykułach w uznanych czasopismach naukowych (odpowiednio *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *Journal of Computational Science*, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*), co potwierdza ich wysoką wartość naukową oraz znaczący wkład Autorki w rozwój wiedzy w zakresie projektowania i optymalizacji rusztowań ortopedycznych.

W rozdziale szóstym Doktorantka przedstawia autorski algorytm optymalizacji geometrii rusztowania tkankowego dla konkretnego ubytku kostnego. Rozdział klarownie opisuje strukturę algorytmu, przyjęte założenia oraz sposób jego praktycznego zastosowania. Fundamentem opracowania były wyniki badań numerycznych przedstawionych w poprzednim rozdziale, które pozwoliły określić zarówno zakres optymalizacji, jak i parametry wejściowe, obejmujące cechy geometryczne implantu oraz sposób jego kotwiczenia w kości. Na tej podstawie stworzono autorski program w środowisku APDL, w którym funkcją celu była minimalizacja masy implantu przy jednoczesnym zachowaniu jego zdolności przenoszenia obciążeń i zapewnieniu odpowiedniego bodźca mechanicznego dla regenerującej się tkanki kostnej. Algorytm umożliwia indywidualne dopasowanie struktury rusztowania do miejsca implantacji, co stanowi interesujący krok w kierunku zautomatyzowanego i spersonalizowanego projektowania struktur w inżynierii tkankowej. Należy jednak zaznaczyć, że zaproponowana metoda ma raczej charakter heurystyczny, a nie klasycznej optymalizacji strukturalnej, co warto uwzględnić przy interpretacji wyników i porównywaniu jej z innymi metodami optymalizacji.

Rozdział siódmy przedstawia kompleksowe podejście do projektowania, optymalizacji i weryfikacji rusztowań tkankowych, łącząc badania numeryczne z testami



eksperymentalnymi. Zaprezentowano proces digitalizacji geometrii kości, przeprowadzono analizy numeryczne oceniające wpływ różnych typów rusztowań na ich wytrzymałość oraz przebudowę tkanki kostnej po implantacji. Analizowano rusztowanie heterogeniczne o zmiennych porach oraz trzy rusztowania homogeniczne o porowości minimalnej, średniej i maksymalnej. W badaniach oceniano przebieg procesu przebudowy tkanki zgodnie z teorią Huijskesa, zmiany gęstości kości oraz lokalne wartości modułu Younga, a wytrzymałość poszczególnych wariantów określano na podstawie naprężenia zredukowanego, odkształcenia rzeczywistego i SED. Wyniki wskazały, że najbardziej efektywny pod względem biomechanicznym i przebudowy tkanki było rusztowanie heterogeniczne. W celu walidacji numerycznych przewidywań, wybrany wariant heterogeniczny oraz rusztowanie homogeniczne o porowości 40% wytworzono w technologii PBF-LB z Ti6Al4V i umieszczono w modelach fizycznych kości Sawbones. Następnie, przy użyciu autorskiego stanowiska eksperymentalnego, przeprowadzono testy układu kość-implant pod zadaniem złożonym stanem obciążenia, a system wizyjny pozwolił na rejestrację przemieszczeń. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały zaskakującą zbieżność z symulacjami numerycznymi, biorąc pod uwagę istotne różnice między modelem fizycznym a numerycznym. Włączenie analizy ilościowej wytworzonych rusztowań, np. poprzez porównanie ich geometrii z modeli CAD, mogłoby stanowić wartościowe uzupełnienie, potwierdzające zgodność modeli numerycznych i eksperymentalnych. W opisie brakuje również informacji, czy do mocowania implantu w kości zastosowano cement kostny. W przypadku jego użycia warto byłoby odnieść się do tego, w jaki sposób mocowania implantu w badaniach eksperymentalnych odpowiada warunkom brzegowym przyjętym w modelu numerycznym.

Ostatnia część rozprawy doktorskiej stanowi spójne i merytorycznie dojrzałe podsumowanie przeprowadzonych badań. Doktorantka w sposób klarowny, logiczny i syntetyczny prezentuje najważniejsze wyniki, formułując jednoznaczne wnioski końcowe, które wynikają bezpośrednio z przedstawionych analiz i eksperymentów. Kandydatka przedstawia także sugestie dalszych kierunków badań. Jedynym elementem, którego zabrakło w tej części, jest wyraźne odniesienie się do pierwotnie założonego celu pracy oraz sformułowanych hipotez badawczych.

W rozprawie Doktorantka przedstawia również swój dorobek naukowy, obejmujący zarówno wykaz publikacji, jak i aktywność konferencyjną. Wśród wymienionych prac



znajdują się trzy artykuły bezpośrednio związane z tematyką rozprawy doktorskiej, a także inne publikacje powiązane pośrednio lub bezpośrednio z prowadzonymi badaniami. Na podkreślenie zasługuje również udział Doktorantki w licznych konferencjach międzynarodowych, podczas których prezentowała wyniki swoich prac. Przedstawione osiągnięcia wskazują, że już na obecnym etapie kariery Doktorantka wykazuje wyraźną dojrzałość naukową oraz aktywnie uczestniczy w wymianie myśli naukowej.

Zasadniczą część pracy uzupełnia obszerny i starannie dobrany spis literatury, liczący 505 pozycje. Przywołana literatura jest merytorycznie spójna z tematyką doktoratu i obejmuje zarówno monografie, jak i artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych.

Rozprawę zamykają wykazy rysunków, tabel i równań oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Do pracy dołączono również obszerne załączniki zawierające wyniki uzupełniające dane przedstawione w zasadniczej części rozprawy.

Pod względem edytorskim rozprawa doktorska została przygotowana z dużą starannością. Jej układ jest logiczny i przejrzysty, a zastosowany język, słownictwo oraz terminologia naukowa są w większości poprawne i spójne. Pojawiają się tylko nieliczne odstępstwa, takie jak sporadycznie nieprecyzyjne nazewnictwo polimerów czy stosowanie określenia „scaffold” zamiast dobrze funkcjonującego w języku polskim terminu „rusztowanie tkankowe”. W rozdziale poświęconym addytywnym technikom wytwarzania rusztowań tkankowych pojawia się również zaczerpnięte z języka potocznego określenie „kratkowanie”. Do drobnych nieścisłości merytorycznych można zaliczyć sposób objaśnienia natury porospężystości tkanek (str. 23). Praca została wzbogacona licznymi ilustracjami, wykresami i tabelami, które w istotny sposób podnoszą jej wartość merytoryczną oraz czytelność. Do nielicznych uwag krytycznych dotyczących strony edytorskiej należą drobne błędy językowe oraz sporadyczne nieścisłości w opisach rysunków (np. na rys. 1.5 zamiast określenia „historia odkształceń hydrostatycznych” właściwsze byłoby „historia ciśnienia hydrostatycznego”, a w opisie pola w prawym dolnym rogu wykresu określenie „tkanka włóknista” powinno zostać zastąpione „tkanką kostną”).



### 3. Ocena merytoryczna i uwagi do pracy

Recenzowana praca doktorska bardzo dobrze wpisuje się w aktualne kierunki badań w obszarze inżynierii tkankowej w regeneracji krytycznych ubytków kości. Zawarte w niej wyniki mają wysoką wartość merytoryczną i są istotne z punktu widzenia zdobywania nowej wiedzy w dyscyplinie Inżynieria biomedyczna, szczególnie w zakresie projektowania rusztowań metalicznych z zastosowaniem metod numerycznych.

Doktorantka w sposób właściwy przedstawiła problem badawczy oraz aktualny stan wiedzy w obszarze tematyki rozprawy. Trafnie sformułowała cel pracy i dobrała odpowiednie metody badawcze do realizacji zaplanowanego zakresu badań. W części numerycznej Kandydatka z powodzeniem i dużą starannością wykorzystwała komercyjne oprogramowanie CAD/CAE do tworzenia modeli trójwymiarowych oraz przeprowadzania analiz wytrzymałościowych z zastosowaniem metody elementów skończonych w środowisku ANSYS. Na podkreślenie zasługuje również umiejętność dostosowania stosowanej metody MES do rozwiązywanych zagadnień poprzez opracowanie autorskich algorytmów w języku skryptowym APDL, uwzględniających wybrane teorie z zakresu mechanobiologii. Warto również zwrócić uwagę na zaprojektowanie i wykonanie autorskiego stanowiska badawczego umożliwiającego symulację zachowania układu implant–kość w złożonym stanie obciążenia, co stanowi cenne uzupełnienie części numerycznej o weryfikację eksperymentalną.

Analiza przeprowadzonych badań pozwala stwierdzić, że cel pracy został w pełni osiągnięty, a postawione hipotezy, mimo swojej ogólnej formuły, zostały potwierdzone zarówno w wynikach symulacji numerycznych, jak i w badaniach eksperymentalnych. Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy opracowanie narzędzia numerycznego, które pozwala kompleksowo analizować zachowanie modeli jednostek komórkowych i całych trójwymiarowych konstrukcji porowatych przy zmiennych parametrach materiałowych i geometrycznych. Jednocześnie należy zaznaczyć, że zastosowane modele zawierają pewne uproszczenia i przyjęte założenia, co jest naturalne w badaniach tego typu.

Kolejnym znaczącym osiągnięciem Doktorantki jest opracowanie modeli rusztowań z różnymi metodami ich mocowania oraz przeprowadzenie na ich podstawie zaawansowanych symulacji numerycznych, uwzględniające m.in. maksymalne



naprężenie zredukowane, gęstość energii odkształcenia, przemieszczenia styczne, naprężenia styczne oraz zmiany szczeliny kość-rusztowanie w kierunku pionowym. Wyniki tych badań pozwoliły jednoznacznie określić najbardziej efektywny sposób mocowania rusztowania w tkance kostnej, co ma istotne znaczenie dla zapewnienia stabilności implantu i skutecznej regeneracji kości.

Jednym z kluczowych osiągnięć Doktorantki jest także opracowanie autorskiego algorytmu optymalizującego geometrię rusztowań tkankowych dostosowanego do konkretnego przypadku ubytku kostnego. Opracowane narzędzie z pewnym przybliżeniem umożliwia indywidualne dopasowanie struktury rusztowania do geometrii konkretnego ubytku i wymaganych parametrów mechanicznych. Takie podejście nie tylko umożliwia wstępne przewidywanie funkcjonalności struktur bez potrzeby kosztownych i czasochłonnych eksperymentów, ale również stanowi innowacyjne narzędzie wspierające projektowanie spersonalizowanych rusztowań tkankowych.

Kolejnym istotnym osiągnięciem Doktorantki jest skuteczna walidacja opracowanych metod numerycznych poprzez badania doświadczalne z wykorzystaniem wytworzonych rusztowań. Do realizacji eksperymentów zastosowano autorskie stanowisko badawcze umożliwiające symulację złożonych, biomimetycznych obciążeń układu kość-implant. Tak kompleksowe podejście pozwoliło nie tylko potwierdzić trafność modeli numerycznych, ale również ocenić rzeczywiste zachowanie rusztowań tkankowych w warunkach zbliżonych do klinicznych, co znacząco zwiększa praktyczną wartość prowadzonych badań.

Pomimo wysokiej jakości przeprowadzonych badań, podczas lektury rozprawy nasuwają się pewne uwagi i pytania zarówno dotyczące przyjętej metodyki, jak i uzyskanych wyników:

- W rozdziale trzecim, dotyczącym metod optymalizacji rusztowań, pojawiają się pewne nieścisłości i stwierdzenia wymagające doprecyzowania. Przykładowo, teselacja Woronoja, choć generuje struktury o cechach biomimetycznych, nie stanowi w klasycznym sensie metody optymalizacji. Ponadto, w odniesieniu do algorytmów wykorzystujących uczenie maszynowe (ML), stwierdzenie, że „modele oparte na danych są ograniczone zakresem danych treningowych i nie są w stanie generować kształtów ani właściwości komórek wykraczających poza rozpoznane



wzorze” jest nieprecyzyjne. Jedną z kluczowych zalet metod ML jest bowiem zdolność do generalizacji, umożliwiającą generowanie wartościowych wyników również dla danych spoza zbioru treningowego. Podobnie stwierdzenie o skłonności algorytmów genetycznych do przedwczesnej konwergencji wymaga doprecyzowania. W praktyce algorytmy genetyczne efektywnie eksplorują przestrzeń rozwiązań, a przedwczesna konwergencja zwykle wynika z nieoptymalnej konfiguracji, a nie z samej metody.

- Wyniki analizy porównawczej metod kotwiczenia rusztowań ortopedycznych w rozdziale V budzą pewne wątpliwości. Niejasne pozostaje, czy stabilizacja implantu z podwójnym klinem antyrotacyjnym w modelach MES opiera się wyłącznie na połączeniu kształtowym i czy przyjęty kontakt tarciovy wiernie odwzorowuje rzeczywiste warunki mechaniczne. Weryfikacja eksperymentalna w rozdziale VII wskazuje natomiast, że rusztowanie i kość łączono cementem kostnym, co może nie odpowiadać założeniom symulacji numerycznych. Dodatkowo powołane publikacje uzasadniające zastosowanie podwójnego klina antyrotacyjnego nie w pełni odzwierciedlają sytuację eksperymentalną przedstawioną w pracy.
- W rozdziale VI przedstawiono autorski algorytm optymalizacyjny, którego celem była minimalizacja masy implantu przy jednoczesnym zachowaniu zdolności przenoszenia obciążeń i zapewnieniu bodźca mechanicznego dla kości, opierając kryteria na teorii Claesa i Heigele. Zastosowanie odkształcenia jako jedyne go parametru mechanobiologicznego budzi jednak wątpliwości, ponieważ model Claesa i Heigele wskazuje również na istotną rolę ciśnienia hydrostatycznego w procesie różnicowania komórek i przebudowy tkanki kostnej. Ponadto, zaproponowany algorytm iteracyjny, choć funkcjonalny i praktyczny, posiada ograniczenia i wady typowe dla podejść heurystycznych, które w pracy nie zostały wystarczająco omówione.
- Zastosowana w rozdziale VII teoria Huiskesa, choć użyteczna do oceny ogólnych tendencji przebudowy kości, jest znacząco uproszczona w kontekście lokalnej adaptacji tkanki w złożonych, porowatych strukturach. Model nie uwzględnia faktycznej inwazji komórek w pory rusztowania ani udziału różnych typów tkanek (np. włóknistej czy chrzęstnej) w procesie regeneracji, co ogranicza jego zgodność z rzeczywistymi procesami biologicznymi. W takich przypadkach bardziej



realistyczne odwzorowanie mechanizmów wrastania kości mogłoby zostać osiągnięte dzięki zastosowaniu modelu Prendergasta, który uwzględnia dodatkowe aspekty mechanobiologiczne oraz stochastyczne zachowania komórek w porowatej strukturze.

Powyższe uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i drugorzędny i w żaden sposób nie wpływają na wysoką ocenę rozprawy. Opiniowana praca wyróżnia się wysoką wartością merytoryczną oraz istotnymi walorami poznawczymi i stanowi oryginalny wkład Doktorantki w rozwój inżynierii tkankowej i biomedycznej. Szczególnie godne podkreślenia są uzyskane wyniki badań dotyczące opracowania narzędzi wspomagających projektowanie tytanowych rusztowań tkankowych, precyzyjnie dostosowanych do indywidualnej anatomii pacjenta. Przedstawione rozwiązania wnoszą znaczący wkład w rozwój tej dziedziny, łącząc wartość naukową z potencjałem praktycznych zastosowań klinicznych. Osiągnięcia te tworzą solidną podstawę do dalszych, pogłębionych badań, które mogłyby obejmować bardziej szczegółowe symulacje oraz weryfikację biologiczną *in vivo*, umożliwiając jeszcze pełniejszą ocenę skuteczności opracowanych metod w praktyce klinicznej.

#### **4. Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę przedstawioną problematykę badawczą, zastosowane metody oraz uzyskane wyniki, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Anity Gryko pt. *„Numeryczno-eksperymentalna optymalizacja architektury skaffoldów do zastosowań ortopedycznych”* stanowi wartościowe i oryginalne osiągnięcie naukowe w obszarze inżynierii biomedycznej. Praca podejmuje aktualny i istotny problem badawczy związany z projektowaniem rusztowań tkankowych dla zastosowań ortopedycznych, a zaproponowane podejście badawcze, łączące zaawansowane modelowanie numeryczne z weryfikacją eksperymentalną, świadczy o wysokim poziomie warsztatu naukowego Doktorantki.

Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie autorskich narzędzi wspomagających proces optymalizacji architektury rusztowań, które wpisują się w nowoczesny nurt badań nad spersonalizowanymi implantami biomedycznymi.



Uzyskane rezultaty mają zarówno znaczenie poznawcze, poszerzając aktualny stan wiedzy w zakresie projektowania i analizy implantów porowatych, jak również potencjał aplikacyjny w kontekście rozwoju nowoczesnych metod wspomaganego leczenia ubytków kostnych. Przeprowadzone analizy, sposób sformułowania problemu badawczego oraz poziom dyskusji wyników wskazują, że Doktorantka posiada szeroką wiedzę teoretyczną, bardzo dobre przygotowanie metodologiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych w obszarze inżynierii biomedycznej. Warto również podkreślić, że wyniki badań przedstawione w rozprawie stały się podstawą publikacji trzech artykułów naukowych w uznanych czasopismach międzynarodowych, co potwierdza ich wysoki poziom merytoryczny oraz znaczenie dla środowiska naukowego.

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Anity Gryko spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z późn. zm.). W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie mgr inż. Anity Gryko do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy rozprawy, oryginalność i aktualność podjętej problematyki badawczej, istotny wkład uzyskanych wyników w rozwój inżynierii biomedycznej, a także ich potwierdzoną wartość naukową w postaci publikacji w renomowanych czasopismach międzynarodowych, uważam, że rozprawa spełnia przesłanki do jej wyróżnienia.

Wojciech Świążkowski