



Częstochowa, dnia 09 września 2024 r.

Dr hab. inż. Arkadiusz Szarek, prof. PCz.

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Politechnika Częstochowska

***Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Mołody pt. „Wybrane zagadnienia modelowania numerycznego i badań eksperymentalnych w projektowaniu stentów biodegradowalnych”, napisanej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod kierunkiem naukowym dr hab. inż. Grzegorza Kokota prof. PŚl.***

Recenzja wykonana została na podstawie pisma RDIMe.512.5.2024 z dnia 10.07.2024r., Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr. hab. inż. Ewy Majchrzak, będącego wynikiem decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej. Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę **Inżynieria mechaniczna**.

Recenzja składa się z dwóch części: pierwszej – zawierającej charakterystykę rozprawy wraz z uwagami szczegółowymi do poszczególnych punktów dysertacji, kompozycji strukturalnej, źródeł literaturowych i strony technicznej, a także ocenę dysertacji pod względem obranej tematyki, zastosowanego podejścia badawczego i realizacji przyjętych celów badawczych; drugiej – stanowiącej konkluzję i rekomendację, co do dalszego postępowania przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.



Katedra Technologii i Automatykacji - Wydział Inżynierii Mechanicznej

Politechnika Częstochowska

ul. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa

tel. +48 34 325 05 09, e-mail: sekretariat.kta@pcz.pl

[www.wim.pcz.pl](http://www.wim.pcz.pl)

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 18.09.2024  
RDJMe114915112024  
nr ..... zał. ....



**I. Charakterystyka recenzowanej rozprawy, ocena dysertacji pod względem obranej tematyki, zastosowanego podejścia badawczego i realizacji przyjętych celów badawczych – uwagi szczegółowe**

Przedmiotem rozważań Doktorantki w przedłożonej dysertacji jest modelowanie numeryczne oraz prowadzenie badań eksperymentalnych w projektowaniu stentów biodegradowalnych. Podjęta w tym zakresie tematyka jest bardzo ciekawa, ale także ważna z punktu widzenia mechanicznych, medycznych, ekonomicznych i środowiskowych aspektów eksploatacji stentów wieńcowych w organizmie ludzkim. Wymagało to wieloetapowego prowadzenia badań, zarówno doświadczalnych, jak i symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych, co umożliwiło właściwy proces wnioskowania oraz weryfikację uzyskanych wyników.

Aplikacja wyników i wniosków wyciągniętych w dysertacji doktorskiej, których efektem było zaprojektowanie, badania numeryczne oraz eksperymentalne stentów biodegradowalnych, może przyczynić się do wprowadzenia i unifikacji zakresu badań numerycznych pozwalających na wdrożenie stentów biodegradowalnych wykonanych w technologii mikro wtrysku do praktyki produkcyjnej. Dwuetapowe badania zawierające w swej koncepcji badania doświadczalne weryfikowane badaniami numerycznymi mogą przyspieszyć proces opracowywania nowych kształtów oraz gabarytów stentów wieńcowych np. dla spersonalizowanych pod kątem patologii naczyń wewnętrznych. Przedstawione w pracy wyniki badań mają zatem charakter aplikacyjny, mogą być wykorzystane między innymi w projektowaniu i doborze stentów, przyspieszeniu i optymalizacji badań przedklinicznych oraz opracowywaniu coraz to nowych kształtów i wielkości implantów wewnątrznaczyniowych. Podjętą w rozprawie doktorskiej problematykę należy uznać zatem za trafną i aktualną, zarówno z punktu widzenia teoretycznych, jak i praktycznych wartości poznawczych.



Zasadnicza treść rozprawy, zawarta na 157 stronach, obejmuje w szczególności: wstęp, przegląd literatury (podpunkty 2.1-2.3 stanowiące charakterystykę układu krążenia, stentów oraz podsumowania przeglądu literatury), w punkcie trzecim cel i zakres pracy, 5 punktów empirycznych (4-8), zawierających badania przeprowadzone przez Doktorantkę, punkt 9 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe wraz z podkreśleniem oryginalnych elementów pracy oraz kierunkami dalszych prac badawczych. Struktura pracy została opracowana poprawnie, poszczególne punkty wprowadzają Czytelnika w badaną tematykę, odnoszą się do tematu zasadniczego dysertacji oraz wskazanych celów. Część uzupełniającą pracy stanowi: literatura (229 pozycji bibliograficznych), streszczenie i abstract. W przedłożonej dysertacji nie uwzględniono spisu rysunków, choć należy podkreślić, że Autorka umiejętnie wykorzystwała różnorodne formy graficzne, aby zobrazować wyniki badań, co znacznie wzbogaca walory poznawcze przygotowanej rozprawy.

We wstępie pracy mgr inż. Natalia Molęda nakreśliła motywy podjęcia tematu pracy oraz problemy badawcze, w dalszej kolejności dysertacja koncentruje się na rozważaniach natury teoretycznej, które zweryfikowano pod względem empirycznym badaniami własnymi. Poniżej przedstawiono charakterystykę poszczególnych składowych części teoretycznej i empirycznej pracy wraz z uwagami recenzenta.

Część teoretyczną dysertacji stanowi punkt 2 wraz z podpunktami, w których Autorka swoje rozważania oparła na 229 pozycjach literaturowych z czego około 20% to publikacje z ostatnich pięciu lat. Liczba cytowanych prac świadczy o dobrym rozeznaniu Autorki w literaturze przedmiotu. Pozycje literaturowe, na które powołuje się Doktorantka są bardzo aktualne i zaczerpnięte z renomowanych międzynarodowych czasopism naukowych, choć warto by przemyśleć zasadność cytowania w pracy doktorskiej pozycji literaturowych z przed 2000 roku, albowiem pozycje te mają jedynie wartość przeglądu historycznego. Szybki postęp nauki w tej dziedzinie wiedzy pod kątem zastosowania nowoczesnych badań (np. microDiC, MES), inżynierii materiałowej oraz implantologii jest obecnie opisywany w wielu

czasopismach i może stanowić cenne wskazówki dla wytyczenia aktualnego oraz przyszłego nurtu badań.

W opinii recenzenta, konstrukcja i zawartość treściowa części teoretycznej są poprawne i wyczerpują oczekiwania stawiane pracom doktorskim. Badania teoretyczne pozwoliły uporządkować wiedzę z obszaru wykorzystania nowoczesnych technik badawczych do oceny stanu naprężeń, odkształceń oraz przemieszczeń stentów wieńcowych o złożonym kształcie i różnej wielkości. Korelacja badań doświadczalnych i numerycznych pozwoliła na opracowanie zoptymalizowanego schematu badań przyspieszającego możliwość wstępnej weryfikacji mechanicznej wyrobu w postaci mikrowtrysku biodegradowalnego. Jednocześnie krytyczna analiza piśmiennictwa stanowiła podstawę dla badań empirycznych.

W punkcie 3 nakreślono prawidłowo cel i zakres pracy, w szczególności Doktorantka określiła trzy cele główne:

1. „Opracowanie metody projektowania postaci geometrycznej stentów biodegradowalnych,
2. Dostosowanie metody cyfrowej korelacji do pomiaru próbek o bardzo małych wymiarach, poprzez wdrożenie metody microDIC do badań eksperymentalnych protez wewnątrznaczyniowych,
3. Wykonanie wybranych symulacji numerycznych wraz z procesem walidacji modeli numerycznych bazującym na badaniach eksperymentalnych”.

Wskazała także, iż zweryfikowana zostanie jedna teza badawcza: *„Wykorzystanie nowoczesnych technik pomiarowych oraz symulacji numerycznych pozwala stworzyć wydajne narzędzie projektowania stentów biodegradowalnych”*. Cele badawcze, jak i teza są bardzo ogólne. Nie jest to jednak wada, ale pewnego rodzaju uproszczenie wprowadzone przez Doktorantkę, które w toku czytania pracy zostaje jednoznacznie wyjaśnione, jednakże teza badawcza powinna być jednoznaczna, zrozumiała i klarowna, aby czytelnik mógł łatwo zrozumieć, o co dokładnie chodzi Autorce.



Autorka wskazuje, że „w ramach pracy opracowano nową metodę projektowania stentów biodegradowalnych, którą nazwano metodą dwuetapową. Następnie stosując symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne zweryfikowano jej przydatność”.

Badania numeryczne są tak dokładne jak wprowadzone dane wejściowe zarówno pod kątem danych materiałowych, warunków brzegowych i obciążeniowych. Zdaniem recenzenta w tej części powinien zostać przygotowany oddzielny podrozdział, aby czytelnik mógł przeanalizować proces planowania badań numerycznych oraz materiałowych.

Prezentację wyników dociekań empirycznych zawarto w punktach 4-8, w których opisano badania zarówno eksperymentalne, jak i numeryczne. W obszarze badań eksperymentalnych mgr inż. Natalia Molęda wskazuje, że „opracowała i wdrożyła modyfikację metody cyfrowej korelacji obrazów, pozwalającą na pomiary przemieszczeń i odkształceń konstrukcji w skali mikro pod zadanymi obciążeniami mechanicznymi”. Na szczególną uwagę zasługuje tu adaptacja stanowiska do badań microDiC do badań stentów. Opracowana koncepcja jest bardzo nowatorska i wymagała dużego zaangażowania, aby odpowiednio zaplanować i przeprowadzić badania eksperymentalne. W dalszej kolejności przeprowadzono symulacje numeryczne wybranych przypadków obciążeń dla procesu implantacji wszczepów stentów. Ta część badań własnych nie jest pozbawiona pewnych treści dyskusyjnych. W szczególności należy podkreślić, że brak jest gruntownego opisu warunków obciążeniowych oraz materiałowych. Wydaje się, że należałoby albo bardzo szczegółowo opisać przeprowadzone badania w zasadniczej części pracy, albo w aneksie pracy umieścić wszystkie niezbędne informacje dotyczące badań z wykorzystaniem MES.

Choć podjętą tematykę w części empirycznej rozprawy doktorskiej można uznać za celową, to słabszą stroną tej części dysertacji jest przede wszystkim graficzna strona prezentacji zakresu badań oraz wyników, np. rysunki prezentujące postać geometryczną stentów byłyby bardziej czytelne, gdyby zostały zaprezentowane w

rzutach aksonometrycznych oraz przekroju (rys.: 7.1-7.7). Dodatkowo zastosowanie skali pozwoliłoby na jednoznaczne zwizualizowanie gabarytów analizowanych próbek, np. rysunki 4.15-4.16 zaprezentowane w odpowiednich rzutach umożliwiłyby jednoznaczną interpretację uzyskanych wyników. Przy tak zwizualizowanym wyniku pojawia się np. pytanie: Dlaczego w wariancie 1 maksymalne wartości przemieszczeń występują liniowo a nie na całej powierzchni stenta? Podobnie bardziej stosowne jest indywidualne dobieranie skali wartości map (przemieszczeń, naprężeń) do każdego z prezentowanych wariantów. W tak zaprezentowanym układzie nie ma możliwości interpretacji uzyskanych wyników na wariantach 2 oraz 3. Właściwe i jednoznaczne prezentowanie map w opinii recenzenta powinny stanowić kluczowy element, zważywszy na podjęte w kolejnych punktach badania empiryczne.

Część wykresów nie posiada właściwie opisanych osi, a mianowicie Autorka pominęła jednostki, a na rysunkach 8.7-8.9 brak jest agendy i omówienia skrótów zastosowanych do porównywanych stentów. Nazewnictwo (BT, BL, CSC...) jest dość specyficzne i nieczytelne dla szerszej grupy czytelników i winno zostać obciążone szczegółowym opisem konstrukcji oraz producenta umieszczonym pod wykresem. Interpretacja niektórych rysunków np. 7.11 oraz 8.2 jest bardzo utrudniona, albowiem wygenerowana została skala, jednak nie wygenerowano map rozkładu gdzie intensywność kolorów odzwierciedla wartości numeryczne.

Reasumując, część empiryczna pracy jest opracowana poprawnie. Percepcję zawartych w niej treści w dużym stopniu ułatwiają liczne rysunki.

Zakończenie pracy stanowi zbiór wyników, wniosków, tez i twierdzeń wpływających zarówno ze studiów i dociekań teoretyczno-metodologicznych, jak i z bezpośrednio prezentowanych badań własnych i analiz empirycznych. Słabszą stroną są bardzo skromnie opisane kierunki dalszych prac badawczych, co również warto zaprezentować szczególnie w tak ciekawej i przyszłościowej tematyce.



Mimo, że dociekania naukowo-badawcze mgr inż. Natalii Molędy można ocenić pozytywnie, to rozprawa doktorska, jak każda praca naukowo-badawcza nie jest wolna od pewnych mankamentów i uwag dyskusyjnych. Recenzent zgłasza następujące uwagi merytoryczne do części empirycznej i wniosków z przeprowadzonych badań:

- 1) W modelach numerycznych nie opisano warunków brzegowych i obciążeniowych proszę o opisanie tych parametrów, np. na rysunku 7.13 przyłożenie sił skupionych można interpretować jako „obciążenie ciągłe” przyłożone do wierzchołków uźebrowania stentów – proszę o szczegółowe opisanie warunków obciążeniowych,
- 2) W badaniach modelowych uwzględniono różne kształty stentów, proszę o odniesienie się do zagadnienia: na jakiej powierzchni dochodzi do kontaktu stenta z naczyniem i jak to wpływa na stan naprężeń i odkształceń stenta,
- 3) Wyniki badań numerycznych prezentują naprężenia zredukowane, z czego wynika taka interpretacja i czy nie bardziej właściwym byłoby zaprezentowanie wielkości fizycznych głównych tj. zgodnie z osiami głównymi próbki.
- 4) Badania doświadczalne dotyczą jedynie obciążenia płaskimi powierzchniami, co nie stanowi grupy reprezentatywnej, czy prowadzone były próby obciążenia odzwierciedlające rzeczywistą pracę stentu wewnątrz naczynia,
- 5) Na jak licznej populacji wykonywane były badania doświadczalne stentów, czy prowadzona była analiza statystyczna oraz walidacja badań,
- 6) Na jak licznej populacji wykonywane były badania wytrzymałościowe (rys 6.8; 6.9), czy prowadzona była analiza statystyczna oraz walidacja badań,
- 7) Naprężenia w koronie stentu zdaniem Autorki (czwarty akapit od góry str. 76) w rejonie zaokrąglenia wynoszą 3,04 [MPa] oraz 11 [MPa] tak duża rozbieżność wymaga szerszego omówienia,

- 8) Proszę o szersze omówienie stwierdzenia str. 128, - 9 linijka od góry „...aby uzyskać wyniki które można porównać z eksperymentem rezultat dla siły radialnej należy... pomnożyć przez liczbę przęseł”. Czy aby na pewno parametry tj. naprężenie, odkształcenie czy przemieszczenie będą takie same dla przęsta skrajnego, a dla przęsta wewnętrznego, stabilizowanego poprzez sąsiadujące przęsta?
- 9) Część empiryczna pracy zawiera bardzo dużą ilość ciekawych i nowatorskich badań, jednak ich opis i analiza jest bardzo skromna,
- 10) Rysunki porównawcze badań doświadczalnych i numerycznych są zbyt duże, co szczególnie w przypadku wyników numerycznych generuje niepotrzebne dane. Zdaniem recenzenta do prezentacji należy wyrugować jak najbardziej precyzyjnie obszar podlegający analizie.
- 11) W podsumowaniu wskazano na aplikacyjność pracy w opracowaniu nowych materiałów (kompozytów polimerowych) służących do produkcji implantów, ale w treści pracy nie przedstawiono konkretnych rozwiązań technologicznych.

Konkludując należy stwierdzić, iż formalna strona pracy nie nasuwa poważniejszych zastrzeżeń, jakkolwiek Autorka nie ustrzegła się od drobnych błędów stylistycznych i interpunkcyjnych. Przypisy prawidłowo określają wykorzystane źródła, a rysunki ilustrują przeprowadzone badania. Kompozycja strukturalna pracy jest logiczna i przejrzysta. Układ poszczególnych punktów wyraźnie nawiązuje do podziału dysertacji na dwie części: część teoretyczną (punkt 2) oraz część badawczą (w szczególności punkty 4-8). Sposób prowadzenia wywodu myślowego, zarówno w części teoretycznej, jak i empirycznej jest logiczny i bardzo uporządkowany. Należy zaakcentować, że część teoretyczna i empiryczna pracy, mimo wskazanych uwag charakteryzują się komunikatywnym, gładkim językiem, a omawiane w nich kwestie i pojęcia są w większości poprawnie wyjaśnione. Zawartość merytoryczna poszczególnych podrozdziałów jest adekwatna do ich tytułów.



Reasumując, opiniowana rozprawa należy do interesujących i aktualnych, napisana jest w sposób jasny i przejrzysty. Problematyka zawarta w dysertacji jest niezwykle ważna. Wewnętrzna spójność i logika wyводу powoduje, iż praca doktorska autorstwa mgr inż. Kaludii Mołody stanowi uporządkowaną i klarowną całość. Przeprowadzone przez Autorkę rozważania dotyczące badań eksperymentalnych i numerycznych mają nie tylko aspekt poznawczy, ale przede wszystkim aplikacyjny. Doktorantka przeprowadziła zarówno badania doświadczalne, jak i numeryczne. Opracowała własny model „dwuetapowy” projektowania stentu biodegradowalnego, który może zostać wdrożony do usprawnienia produkcji mikrowtrysków o różnym skomplikowanym kształcie – co zasługuje na szczególne uznanie. Czyni to empiryczną część pracy wysoce interesującą, może stanowić podstawę do dalszych kierunków badań i dyskusji naukowych. Autorka w poszczególnych etapach prowadzonych rozważań nie dokonała jednak konsekwentnej i rzetelnej analizy wyników własnych badań (doświadczalnych oraz modelowych). Zdaniem recenzenta spowodowane jest to pewnymi ograniczeniami wynikającymi np. z tajemnic projektowych lub późniejszego postępowania patentowego, jednak należy ten aspekt podkreślić w recenzji.

Reasumując, ogólna ocena zastosowanego podejścia badawczego jest pozytywna, aczkolwiek z pewnym w/w zastrzeżeniem. Doktorantka wykazała się wystarczającą zdolnością samodzielnego przygotowania i przeprowadzenia badań (literaturowych, doświadczalnych oraz modelowych) oraz umiejętnością prawidłowego wnioskowania w oparciu o uzyskane wyniki.

## II. Konkluzja i rekomendacja

Charakterystyka rozprawy wraz z uwagami pozwala stwierdzić, iż przedłożone do recenzji dzieło mgr inż. Natalii Mołody: *„Wybrane zagadnienia modelowania numerycznego i badań eksperymentalnych w projektowaniu stentów biodegradowalnych”*, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Pragnę podkreślić, że przedstawione w recenzji pewne uwagi merytoryczne i kwestie dyskusyjne nie obniżają w najmniejszym stopniu wartości naukowej całej rozprawy doktorskiej. Rozprawa doktorska stanowi samodzielne, merytorycznie dojrzałe opracowanie naukowe.

W ocenie recenzenta, mgr inż. Natalia Molęda opanowała ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna oraz umiejętność prowadzenia samodzielnych badań naukowych, a recenzowana dysertacja spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w świetle zmian wprowadzonych do Ustawy z dnia 21 kwietnia 2017 r. o zmianie ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw.

Recenzent rekomenduje przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. mgr inż. Natalii Molędy: *„Wybrane zagadnienia modelowania numerycznego i badań eksperymentalnych w projektowaniu stentów biodegradowalnych”*, napisanej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod kierunkiem naukowym dr hab. inż. Grzegorza Kokota prof. PŚl, przez Radę Dyscypliny Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej oraz dopuszczenie mgr inż. Natalii Molędy do publicznej obrony przedłożonej dysertacji.

*Arkadiusz Szarek*

Dr hab. inż. Arkadiusz Szarek, Prof. PCz.