

Prof. dr hab. inż. Celina Pezowicz
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska
ul. Łukasiewicz 7/9
50-371 Wrocław

Wrocław, 02.08.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Laury Pałys-Żyty „*Metamodeling kompozytowej zastawki płatkowej do zastosowań medycznych*”

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Mrzygłód

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Maciej Gawlikowski

Podstawa opracowywania recenzji: pismo nr RR/476/2025 z dnia 14 maja 2025 r. Rektora Politechniki Opolskiej dr hab. inż. Marcina Lorenca z prośbą o opracowanie recenzji.

1. ZAKRES ROZPRAWY

Choroby układu krążenia pozostają wiodącą przyczyną zgonów i niepełnosprawności na świecie, stanowiąc trwałe wyzwanie oraz obciążenie dla systemów ochrony zdrowia i gospodarki. Szacuje się, że co roku odpowiadają one za blisko jedną piątą wszystkich zgonów globalnie, przy czym do wzrostu ryzyka przyczyniają się m.in. starzenie się populacji, nadciśnienie tętnicze, otyłość, cukrzyca, palenie tytoniu oraz utrwalone niekorzystne wzorce stylu życia. W tym kontekście szczególne znaczenie mają choroby serca, w tym patologie zastawek, które prowadzą do postępującej niewydolności krążenia, pogorszenia jakości życia i zwiększonej śmiertelności.

Wśród schorzeń zastawkowych najwięcej uwagi poświęca się patologii zastawki aortalnej i mitralnej. Jednak w ostatnich latach coraz lepiej rozpoznaje się społeczną skalę i konsekwencje niewydolności zastawki trójdzielnej. Postępująca niewydolność zastawki trójdzielnej prowadzi do przeciążenia i niewydolności prawej komory serca, nawracających hospitalizacji z powodu objawów zastoju żylnego, a w konsekwencji do pogorszenia rokowania.

Rozwój nowoczesnych implantów i technik przezskórnych zmienił dotychczasowy model leczenia zaawansowanej niewydolności zastawki trójdzielnej. Równolegle widoczne jest nowe podejście do projektowania i kwalifikacji implantów, w tym szczególnie w kierunku personalizacji tych elementów. W praktyce kliniczno-inżynierskiej oznacza to wykorzystanie danych obrazowych konkretnego pacjenta do budowy cyfrowych bliźniaków serca i aparatu zastawkowego, a następnie do planowania zabiegu i kształtowania implantu pod kątem indywidualnej anatomii, właściwości mechanicznych tkanek oraz warunków

hemodynamicznych. W tym nurcie mieszczą się m.in. modelowanie elementów skończonych płatków i pierścienia, symulacje przepływu krwi (CFD), szybkie prototypowanie addytywne oraz, co szczególnie istotne w niniejszej pracy, metamodelowanie czyli tworzeniu konstrukcji „zastępczych” modeli obliczeniowych pozwalających w ułamku czasu przeszukiwać rozległe przestrzenie parametrów konstrukcyjnych i tkankowych.

Tak rozumiane metamodelowanie kompozytowej zastawki płatkowej ma podwójny wymiar aplikacyjny. Po pierwsze, umożliwia prowadzenie iteracyjnego, wielokryterialnego projektowania (wytrzymałość, szczelność, trwałość zmęczeniowa, zgodność z ruchem pierścienia i strun ścięgniastych) bez konieczności każdorazowego uruchamiania kosztownych, pełnych symulacji nieliniowych czy serii testów bench-top. Po drugie, otwiera drogę do rzeczywistej personalizacji, dopasowania właściwości materiałowych kompozytu, geometrii płatków oraz strategii osadzenia do osobniczych różnic anatomicznych i biomechanicznych, co może przełożyć się na lepsze wyniki kliniczne i dłuższą trwałość implantów.

W erze rosnącej dostępności danych medycznych oraz telemedycyny kolejnym wyzwaniem staje się nie tyle sam pomiar, co jego interpretacja i przełożenie na decyzje terapeutyczne u konkretnego pacjenta. W przypadku leczenia niewydolności zastawki trójdzielnej oznacza to potrzebę łączenia wiarygodnych modeli biomechanicznych z algorytmami predykcyjnymi oraz procedurami walidacji tak, aby planowanie zabiegu i projekt implantu były nie tylko szybkie, ale i klinicznie pewne. Z uwagi na różnorodność fenotypów niewydolności zastawki trójdzielnej (czynnościowa, organiczna, mieszana) i zmienność osobniczą, uzasadnione jest poszukiwanie metod umożliwiających szybkie, a jednocześnie dokładne przewidywanie zachowania się kompozytowej zastawki płatkowej w warunkach rzeczywistych.

Na tym tle niniejsza rozprawa doktorska podejmuje problem o jednoznacznie wysokiej wadze naukowej i wdrożeniowej: opracowanie podejścia metamodelowego do projektowania i oceny kompozytowej zastawki płatkowej do zastosowań medycznych z myślą o nowoczesnych terapiach zastawki trójdzielnej oraz o dalszym rozwoju spersonalizowanych interwencji strukturalnych serca. Jej wyniki odzwierciedlają globalny trend odejścia od uniwersalnych rozwiązań sprzętowych do indywidualnie dopasowanych, wspieranych przez wiarygodne modele komputerowe i skrócone cykle projektowo-walidacyjne.

Autorka przedstawiła opracowanie na 109 stronach maszynopisu, obejmujących tekst zasadniczy, tabele, rysunki oraz aneks programistyczny. Rozprawę podzielono na sześć rozdziałów: (1) Wstęp z wprowadzeniem do problematyki, przeglądem literatury oraz zdefiniowanymi celami i zakresem pracy; (2) Symulacja zastawki aortalnej w środowisku wielofizycznym (metody numeryczne, modele konstytutywne, równania ruchu, warunki brzegowe); (3) Metodyka projektowania zastawki aortalnej dostosowanej do pacjenta (modelowanie geometrii, parametryzacja geometryczna i materiałowa, schemat optymalizacji); (4) Przykłady projektowe (w tym przypadki z metamodelingiem); (5) Wytwarzanie i walidacja (FDM/UV-LCD/odlewanie, stanowisko PIV, wyniki eksperymentalne i ich porównanie z symulacjami); (6) Wnioski i perspektywy dalszych badań. Układ pracy jest w miarę spójny i czytelny: cel i zakres są osadzone w kontekście przeglądu literatury, a dalsze części konsekwentnie rozwijają przyjętą metodykę personalizacji zastawki.

Wyniki prowadzonych badań zilustrowane są bogatym materiałem graficznym (łącznie 77 rysunków) oraz 20 tabelami. Zestawienia te zwiększają przejrzystość prezentowanych analiz zwłaszcza w częściach poświęconych parametryzacji geometrii, definicjom materiałowym oraz ocenie wariantów optymalizacyjnych.

Praca zawiera wykaz literatury (ponad sto pozycji), streszczenie w języku polskim i angielskim. Na uwagę zasługują zacytowanie trzech prac naukowych, których współautorką jest Doktorantka. W części załącznikowej (Załącznik 1) zamieszczono skrypt generujący geometrię zastawki aortalnej w środowisku SpaceClaim (IronPython), co podkreśla aplikacyjny charakter zaproponowanej metodyki i wspiera praktyczną personalizację implantów.

Autorka otwiera pracę syntetycznym opisem anatomii i funkcji zastawki aortalnej oraz wskazuje na typowe procesy degradacji i dysfunkcji wynikające z chorób i wad wrodzonych. Rozdział zawiera opisy różnych podejść terapeutycznych leczenia, zaznaczając przejście od klasycznej kardiochirurgii do procedur przezcewnikowych. Omówiono także rodzaje implantów, z krótką charakterystyką stosowanych biomateriałów i technik ich wytwarzania. Dobrym uzupełnieniem jest przegląd dostępnych konstrukcji, stosowanych w praktyce, zastawek serca. Rozdział ten zawiera także istotną, choć mało obszerną analizę stanu wiedzy z zakresu parametryzacji geometrii płatków i korzenia aorty, co stanowi pewną podstawę do zaproponowanej przez Doktorantkę własnej metodyki projektowania. Rozdział zamyka zdefiniowanie „Celów i zakresu pracy”.

Kolejny rozdział porządkuje fundamenty obliczeniowe pracy. Omówiono w nim metody numeryczne stosowane do analizy sprzężonej płyn–struktura z wykorzystaniem formalizmu ALE. Następnie Autorka przedstawiła modele konstytutywne dla tkanek hiperelastycznych płatków zastawki, z wyszczególnieniem parametrów modelu Ogdena i tabelarycznym zestawieniem parametrów fizycznych i mechanicznych materiałów stosowanych na zastawki serca a także określiła warunki brzegowe dla dwóch domen: strukturalnej (utwierdzenia, ograniczenia kinematyczne, właściwości płatków) i płynowej (profile prędkości/ciśnienia na wlocie–wylocie, charakterystyka medium).

Dalsza część rozprawy doktorskiej dotyczy badań własnych Autorki. W rozdziale 3 przedstawiono pełny łańcuch personalizacji: od pozyskania danych obrazowych, przez inżynierię odwrotną geometrii korzenia aorty i płatków, po parametryzację i optymalizację konstrukcji. Kluczowym elementem jest stworzenie uniwersalnego modelu parametrycznego, który generuje bazową trójpłatkową geometrię na podstawie wymiarów charakterystycznych oraz pomiarów własnych z obrazowania CT. Wprowadzono dwutorową parametryzację: geometryczną (m.in. wymiary płatka, średnice, wysokość) oraz gradientowo-funkcyjną materiału (możliwość różnicowania własności w strefach płatka). Na tej podstawie zdefiniowano proces optymalizacji w środowisku symulacji multifizycznej FSI oraz algorytm projektowania z pętlą oceny kryteriów funkcjonalnych i modyfikacji parametrów. Następnie (rozdział 4) zaprezentowano trzy studia przypadków, które stopniowo zwiększają złożoność problemu. Przypadek 1 (zawór motylkowy) to walidacja podejścia optymalizacyjnego w klasycznym układzie sprzężonym przepływ-struktura. Przypadek 2 przenosi metodykę na kompozytową konstrukcję zastawki aortalnej, z parametryzacją geometrii i metamodelingiem a Przypadek 3 dotyczy już zastawki spersonalizowanej dla konkretnego pacjenta

z optymalizacją wielokryterialną. Te trzy bloki spójnie dokumentują przejście od obiektu referencyjnego do personalizacji klinicznej.

W rozdziale 5 pani magister Pałys-Żyta omówiła trzy techniki zaproponowane do wytwarzania zaprojektowanych implantów: FDM, UV-LCD (UV LED) oraz odlewanie silikonowe z użyciem drukowanych form. Opisano ograniczenia FDM (m.in. problem z usuwaniem podpór wewnątrz płatków) oraz ryzyka chemiczne w przypadku żywic fotoutwardzalnych. Ważną częścią badań własnych Doktorantki była walidacja obejmująca badania na stanowisko PIV oraz symulacje numeryczne. Na ich podstawie wykazano, iż brak odwzorowania zatok Valsalvy w kanale pomiarowym nasila zaburzenia obmywania płatków a także wykazano, że zmiana grubości płatka zastawki sprzyja redukcji przepływu zwrotnego. Co istotne przeprowadzone analizy udowodniły, że zastawka spersonalizowana wykazuje szybszą reakcję (większe odkształcenia w tych samych fazach cyklu) niż model bazowy.

Pracę domykają przykłady personalizacji, wykonanie prototypu i wstępna walidacja eksperymentalna (PIV). W perspektywie wskazano skalowalność narzędzi oraz ewentualny potencjał wytwarzania addytywnego dla aplikacji klinicznych.

Taka konstrukcja logiczna pracy, od przeglądu i celów, przez metodykę oraz przykłady projektowe, po wytworzenie prototypu i walidację, nadaje rozprawie wyraźny ciąg decyzyjno-badawczy i dobrze wpisuje się w aktualne trendy personalizacji implantów.

Recenzowana rozprawa mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna a podjętą w niej problematykę można zaliczyć do istotnego nurtu rozwoju współczesnej bioinżynierii.

2. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorantka zaproponowała oryginalne podejście do rozwiązania problemu personalizacji i projektowania kompozytowej zastawki płatkowej serca: od dopasowania uniwersalnego modelu parametrycznego do indywidualnej anatomii i warunków hemodynamicznych pacjenta, poprzez metamodelowanie i optymalizację w środowisku sprzężenia płyn–struktura (FSI), aż po wykonanie prototypu i jego walidację eksperymentalną (PIV), z myślą o praktycznych zastosowaniach klinicznych w planowaniu i kwalifikacji zabiegów kardiologicznych.

Na podstawie przeanalizowanej literatury dotyczącej podjętego problemu postawiono cel rozprawy, której jest *opracowanie możliwie uniwersalnej i prostej w aplikacji metodyki projektowania implantów zastawki serca dostosowanego do pacjenta*.

Wobec tak przedstawionego problemu Autorka wyznaczyła trzy szczegółowe etapy pracy dotyczące przede wszystkim opracowania modelu parametrycznego, kalibrację w symulacjach wielofizycznych oraz wykonanie i walidację prototypu zastawki.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy chciałabym zaliczyć:

- zaprojektowanie dwuetapowej metodyki personalizacji implantów zastawek serca zawierającej szybkie dopasowanie uniwersalnego modelu parametrycznego do anatomii pacjenta, a następnie optymalizację kształtu i gradientowo-funkcyjnych właściwości materiałowych;

- opracowanie i wdrożenie uniwersalnego modelu parametrycznego umożliwiającego sprawne generowanie geometrii zastawki trójpłatkowej oraz jej personalizację na podstawie pomiarów z obrazowania CT;
- zdefiniowanie i udokumentowanie algorytmu projektowania zastawki dopasowanej do pacjenta (schemat decyzyjny z kryteriami funkcjonalnymi i pętlą modyfikacji parametrów), stanowiącego podstawę całej procedury od uniwersalnego modelu parametrycznego do ostatecznego wytworzenia spersonalizowanego prototypu;
- przeprowadzenie cyklu badań i symulacji z wykorzystaniem własnej metodyki projektowania implantów zastawki serca dostosowanego do pacjenta od pozyskania danych obrazowych po wytworzenie prototypu i jego walidację;
- przeniesienie i praktyczne zastosowanie zaproponowanej, oryginalnej metodyki dla przypadku spersonalizowanego, z porównaniem odpowiedzi modeli (bazowego w odniesieniu do personalizowanego) na drodze analiz numerycznych i badań eksperymentalnych;
- umiejętne wykorzystanie różnych metod badawczych i analitycznych, w celu realizacji postawionych zadań badawczych;
- wyraźnie sformułowany cel badawczy oraz konsekwentnie rozwiązane zadania szczegółowe.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera istotne aspekty poznawcze i aplikacyjne. Pracą swoją Doktorantka włączyła się w bardzo ważny nurt badań nad rozwojem spersonalizowanych implantów zastawkowych, opartych na modelowaniu wielofizycznym, metamodelowaniu i optymalizacji. Pani magister Pałys-Żyta wykazała się gruntowną znajomością biomechaniki i inżynierii obliczeniowej oraz dojrzałością w rozwiązywaniu złożonych problemów badawczych (sprężenie płyn-struktura, kryteria funkcjonalne, algorytm projektowania), co w mojej ocenie stanowi istotny wkład w rozwój nowoczesnych technologii projektowania i personalizacji kompozytowej zastawki płatkowej do zastosowań medycznych.

Rozprawa ma interdyscyplinarny charakter, w której rozwiązano istotny problem badawczy tj. opracowano oryginalną metodykę modelowania i personalizacji kompozytowej zastawki płatkowej. Uzyskane wyniki mogą być w przyszłości wykorzystywane w praktyce klinicznej do planowania zabiegów kardiochirurgicznych i doboru implantów, który w istotny sposób będzie ograniczać ryzyko powikłań i progresji niewydolności zastawkowej.

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 z zakresu różnych metodyk projektowania implantów zastawki serca, co umożliwiłoby wykazanie ewentualnych braków czy luk w obecnie stosowanych procedurach, a szczególnie technik optymalizacyjnych parametrów geometrycznych, co jednoznacznie wskazywałoby na konieczność podjęcia dalszych badań nad rozpatrywanym

- zagadnieniem. W efekcie, trudno oceniać innowacyjność przedstawionego przez Doktorantkę algorytmu projektowania zastawki aortalnej dopasowanej do pacjenta.
2. Jednocześnie brakuje uzasadnienia przyjętych kryteriów optymalizacji wykorzystanych w zaproponowanej przez Autorkę metodyce, stąd zasadne byłoby mocniejsze umotywowanie tych wyborów poprzez porównanie z alternatywnymi funkcjami celu opisanymi w literaturze tematu.
 3. Parametry materiału zastępczego wykorzystywanego w rozważaniach, przyjęto m.in. na podstawie danych dla silikonu Prochima Cristal Rubber, a następnie zastosowano je w analizach i prototypowaniu. Jest to działanie trafne dla prototypu, ale nie odpowiada wprost docelowemu materiałowi kompozytowego płatka. Sama Autorka przytacza w pracy, że model tkanki (powołanie na prace Holzapfel i wsp.) daje inną odpowiedź właściwości mechanicznych niż odpowiedź silikonu, co przekłada się na różnice w wartościach uzyskiwanych odkształceń. Stąd też wydaje się, iż zasadne byłoby przeprowadzenie pewnego rodzaju kalibracji na materiał docelowy oraz dyskusji wpływu tej rozbieżności na wyniki FSI i wnioski projektowe.
 4. Na str. 28 Autorka napisała: „Wyniki symulacji wykazały, że model tkanki jest *znacznie miększy*.” Co to znaczy z punktu widzenia mechaniki, co to za parametr?
 5. Czy analizę parametrów geometrycznych (rozdział 3.1) wykonano dla skanu serca zdrowego czy patologicznie zmienionego?
 6. Dlaczego pomiar parametrów geometrycznych aorty i zastawek był wykonywany dla pojedynczego pomiaru? Przy tak niskiej rozdzielczości obrazów należało wykonać minimum trzy powtórzenia dla określonego, mierzonego wymiaru, z określeniem wartości średniej czy błędu średniej. Pojedynczy pomiar może wносить dodatkowy błąd pomiaru, w już i tak trudno mierzalnym środowisku. Jaki był błąd pomiaru?
 7. Doktorantka proponowała konstrukcję płatka zastawki aortalnej z podziałem na strefy funkcjonalne, powołując się na zmienne obciążenia działające na różne obszary płatka zastawki. Proszę podać jakie są to obciążenia. Lakoniczne stwierdzenie „W literaturze istnieją dowody ...” to zbyt mało, należałoby rozwinąć ten temat, aby jednoznacznie uzasadnić zaproponowany w rozprawie podział na tzw. strefy funkcjonalne i wyjaśnić czy w modelowaniu numerycznym obszary te były obciążane adekwatnie do warunków rzeczywistych.
 8. W rozdziale 4.2 w tabeli 4.6. Doktorantka przedstawiła porównanie parametrów optymalizacyjnych zaworu bazowego i optymalnego. Brakuje pewnej dyskusji lub komentarza przyjętej konstrukcji „optymalnej”, szczególnie gdy niektóre z parametrów różnią się niemalże o 100% (Imprint 1 mm). W jaki sposób zmiany te wpłynęły na konstrukcję całej protezy, w tym szczególnie na jej właściwości sprężyste?
 9. W pracy brakuje przeprowadzenia dyskusji naukowej uzyskanych wyników własnych na tle wyników prezentowanych w literaturze tematu. Oczywiście wyniki badań są szeroko przeanalizowane i częściowo zinterpretowane, jednakże to nie zastąpi dyskusji, która wskazuje jak wyniki uzyskane w badaniach własnych prezentują się na tle innych autorów.
 10. Kwestie językowe i redakcyjne:

- W pracy występuje bardzo dużo błędów typograficznych (tzw. sieroty) oraz błędów literowych i interpunkcyjnych (np. brak przecinków przy wtrąceniach);
- Stosowane jest niejednolite formatowanie symboli (kursywa dla wielkości fizycznych);
- W języku polskim, w zapisie liczbowym, należy używać separatora dziesiętnego w postaci przecinka a nie kropki.

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 i aplikacyjne w szeroko rozumianej dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Praca została wykonana poprawnie, a jej cel podstawowy zrealizowany: opracowano i wykazano zasadność oraz skuteczność dwuetapowej metodyki personalizacji kompozytowej zastawki płatkowej (dopasowanie uniwersalnego modelu parametrycznego do anatomii pacjenta; optymalizacja kształtu i właściwości w środowisku FSI), sfinalizowane wykonaniem prototypu i walidacją PIV. Rozwiązanie to potwierdzono na przykładach projektowych i w eksperymentach przepływowych, co świadczy o dojrzałości koncepcji i jej potencjale wdrożeniowym.

Rozprawa, stanowiąc oryginalne rozwiązanie postawionego zadania badawczego, wnosi autorski wkład do inżynierii zastawek serca. Dobór technik badawczych oraz umiejętne posługiwanie się nimi wskazują na bardzo dobre przygotowanie Doktorantki do samodzielnego prowadzenia badań z użyciem nowoczesnych narzędzi obliczeniowych i eksperymentalnych; dodatkową wartością jest udostępnienie skryptu generującego geometrię, wzmacniającego odtwarzalność wyników.

Biorąc pod uwagę przedstawiony do zaopiniowania materiał, oryginalność i wagę rozwiązanego w rozprawie zagadnienia naukowego oraz potwierdzone umiejętności prowadzenia pracy badawczej, uważam, że przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Doktorantce stopnia doktora nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów odpowiedniej Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.) wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Laury Pałas-Żyto do publicznej obrony opiniowanej pracy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.



