

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Laury Pałys-Żyty

pt.: Metamodeling kompozytowej zastawki płatkowej do zastosowań medycznych

1. Uwagi wstępne

Recenzję wykonano na prośbę Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej zgodnie z otrzymanym pismem od JM Rektora Politechniki Opolskiej dra hab. inż. Marcina Lorenca z dnia 14 maja 2025 roku. W kolejnej korespondencji został dołączony egzemplarz rozprawy doktorskiej mgr inż. Laury Pałys-Żyty.

Recenzowana rozprawa obejmuje 108 stron, zawiera wykaz skrótów i symboli, spis rysunków i tabel oraz 6 rozdziałów. Następnie znajduje się spis literatury obejmujący 107 pozycji. Na końcu zawarto streszczenia w języku polskim, angielskim oraz załącznik w postaci skryptu generującego geometrię zastawki aortalnej.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Mirosław Mrzygłód, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Maciej Gawlikowski.

2. Ocena doboru tematu rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy modelowania kompozytowej zastawki płatkowej do zastosowań medycznych. Obszar wiedzy w tym zakresie jest szeroki, ale nadal intensywnie rozwijany. Głównie z powodu rosnącego zapotrzebowania na nowe, lepsze rozwiązania. Jest to spowodowane między innymi rosnącą liczbą zachorowań na reumatyczne jak i niereumatyczne choroby zastawki takie jak: zwężenie, niedomykalność zastawki, zwężenie z niedomykalnością itp. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym zapotrzebowanie na nowe rozwiązania w odniesieniu do zastawek aortalnych jest starzejące się społeczeństwo. Nie bez znaczenia jest również możliwość wykorzystania nowych osiągnięć w zakresie biomechaniki, modelowania numerycznego (MES, CFD, FSI itp.), inżynierii materiałowej, medycyny (kardiologii, kardiochirurgii), bioinformatyki w celu opracowania nowych metod projektowania zastawek z nakierowaniem na personalizację leczenia, w tym dobór geometrii, technologii wykonania oraz wybór materiałów. Mamy zatem rosnące zapotrzebowanie na nowe rozwiązania w tym zakresie przy jednoczesnym szybkim tempie rozwoju narzędzi, metod,

materiałów możliwych do wykorzystania na rzecz nowych lub ulepszonych metod projektowania ze szczególnym uwzględnieniem zindywidualizowanego projektowania nastawionego na konkretnego pacjenta.

W mojej ocenie Doktorantka podjęła się aktualnej tematyki oraz zadania, którego efektem w głównej mierze ma być opracowanie uniwersalnej i prostej w aplikacji metodyki projektowania implantów zastawki serca dostosowanych do pacjenta. Zaproponowana przez Doktorantkę metodyka dzięki zastosowaniu modelowania parametrycznego 3D oraz optymalizacji geometryczno-materiałowej w środowisku symulacji multifizycznej umożliwi łatwe dostosowanie geometrii konstrukcji zastawki do konkretnego pacjenta.

Moim zdaniem poruszana przez Doktorantkę w dysertacji tematyka mimo iż jest interdyscyplinarna, ujmując całościowo, biorąc pod uwagę wykorzystane narzędzia naukowe, wiedzę, metody badawcze, jednoznacznie wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Zasadnicza część rozprawy zawarta jest w sześciu rozdziałach. Treści zawarte w tych rozdziałach związane są z tematem rozprawy oraz ze zdefiniowanym celem i zadaniami badawczymi.

W **rozdziale pierwszym** Doktorantka przedstawiła wprowadzenie do tematyki pracy, scharakteryzowała choroby serca, sposoby leczenia zastawki aortalnej, przedstawiła i scharakteryzowała znane implanty zastawki serca. W dalszej części Doktorantka dokonała przeglądu literatury w zakresie metod doboru zastawki zwracając szczególną uwagę na problem związany ze zmiennością średnicy pierścienia zastawki oraz związaną z tym potrzebą personalizacji projektowania geometrii zastawki w celu uniknięcia powikłań pozabiegowych. Następnie Doktorantka zaprezentowała przegląd literatury w zakresie przykładów projektowania zastawki w odniesieniu do parametryzacji wymiarów płatków zastawki. W dalszej części znajdują się informacje na temat aktualnych materiałów i metod wytwarzania zastawek. Na końcu rozdziału znajduje się zdefiniowany przez Doktorantkę cel i zakres pracy.

Celem jest opracowanie możliwie uniwersalnej i prostej w aplikacji metodyki projektowania implantów zastawki serca dostosowanego do pacjenta. Zdaniem Doktorantki nowa metodyka, dzięki zastosowaniu modelowania parametrycznego 3D oraz optymalizacji geometryczno-materiałowej w środowisku symulacji multifizycznej umożliwi łatwe dostosowanie geometrii konstrukcji zastawki do konkretnego pacjenta.

Prace badawcze Doktorantka podzieliła na trzy etapy:

- opracowanie uniwersalnego modelu parametrycznego zastawki umożliwiającego łatwe wstępne dopasowanie implantu do pacjenta;

- opracowanie metodyki kalibracji wymiarów i własności materiałowych zastawki z zastosowaniem symulacji multifizycznej;
- wykonanie przykładowego fizycznego prototypu implantu, zaprojektowanie stanowiska do jego badań eksperymentalnych oraz przeprowadzenie badań walidujących.

W **rozdziale drugim** Doktorantka zaprezentowała założenia i parametry do analizy numerycznej zastawki aortalnej w środowisku symulacji multifizycznej. Po krótkim, ale wystarczającym wprowadzeniu do metod numerycznych wykorzystywanych podczas analiz i symulacji omawianych problemów badawczych Doktorantka przedstawiła modele konstytutywne materiałów hipersprężystych jako tych stosowanych na implanty zastawek płatkowych. Główną uwagę skupiła na modelu Ogden'a, jako najlepszy (zdaniem Doktorantki) model opisujący właściwości i zachowanie materiału typu silikon, który użyła do wykonania prototypu zastawki, który następnie poddała badaniom eksperymentalnych. W dalszej części rozdziału znajdują się warunki brzegowe, gdzie została zaprezentowana analiza czułości siatki elementów skończonych. Sprawdzone zostały cztery siatki o wymiarach elementów skończonych 0,2, 0,3, 0,4 oraz 0,5 mm. Odpowiedź modelu dla wszystkich rozmiarów była porównywalna, w związku z tym wykorzystując argumentację rozmiaru zadania i związanego z tym czasem obliczeń Doktorantka zdecydowała się na siatkę w rozmiarze 0,5 mm. Następnie zostały zdefiniowane parametry domeny strukturalnej. Doktorantka wybrała model *MAT_OGDEN_RUBBER pierwszego rzędu jako materiał płatków zastawki o parametrach $\mu = 1,73e-1$ MPa, wykładniku $\alpha = 4,39$ oraz gęstości 1200 kg/m^3 , co odpowiada właściwościom silikonu, później wykorzystywanego w badaniach. Biorąc pod uwagę domenę płynu Doktorantka argumentuje wybór modelu płyny newtonowskiego na podstawie rozmiaru aorty. Parametry płynu to gęstość 1060 kg/m^3 i lepkość dynamiczna $0,0035 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Został również zdefiniowany przebieg zmienności ciśnienia w cyklu otwarcia i zamknięcia zastawki.

Rozdział trzeci zawiera metodykę projektowania zastawki aortalnej dostosowanej do pacjenta. Doktorantka rozpoczęła od zaprezentowania sposobów modelowania geometrii zastawek aortalnych z zastosowaniem inżynierii odwrotnej, skupiając się na metodach obrazowania, wykorzystaniu obrazów z badań do określania wymiarów charakterystycznych zastawki. Następnie przedstawiono parametryzację konstrukcji zastawki, w tym: parametryzację geometryczną oraz parametryzację gradientowo-funkcyjną materiału zastawki. W dalszej części rozdziału zgodnie z deklaracją Doktorantki przedstawiono optymalizację implantu zastawki aortalnej w środowisku sprzężonej symulacji strukturalno-płynowej. Zwieńczeniem rozdziału jest zaproponowany przez Doktorantkę algorytm projektowania zastawki aortalnej dostosowanej do pacjenta.

W **rozdziale czwartym** Doktorantka przedstawia przykłady projektowe. Przykład pierwszy dotyczył optymalizacji konstrukcji zaworu motylkowego w środowisku symulacji multifizycznej. Przykład ten można uznać za ćwiczebny, konstrukcja, zasada działania oraz wykorzystane materiały dość mocno odbiegają od podstawowego przedmiotu badań. W optymalizacji kształtu zaworu zdefiniowano trzy parametry: grubość zaworu oraz dwa promienie konstrukcyjne. Przechodząc do wyników, najdokładniejszą metodą opisywania zależności dla danych z przykładu pierwszego, okazała się metoda Krigingu. Przykład drugi dotyczył optymalizacji kompozytowej konstrukcji zastawki z zastosowaniem metamodelingu oraz środowiska symulacji multifizycznej. Doktorantka przedstawiła charakterystykę badanego obiektu. Do opisu właściwości krwi oraz zachowania się podczas analizy wykorzystano model nienewtonowskiego płynu z określonymi wartościami parametrów, następnie dokonano parametryzacji konstrukcji zastawki, a następnie optymalizacji konstrukcji zastawki. Na końcu tego podrozdziału Doktorantka zdefiniowała ważny wniosek, że urządzenie (element) o skomplikowanej budowie powinien opierać się na większej ilości punktów pomiarowych, a do funkcji celu powinno dodać się obiekt o przeciwnej charakterystyce, którym w tym przypadku mogła być zdolność do zatrzymywania przepływu.

Przykład trzeci dotyczył optymalizacji wielokryterialnej konstrukcji zastawki dostosowanej do konkretnego pacjenta. Podrozdział ten został napisany na podstawie pracy [67] autorstwa Doktorantki oraz Promotora. Doktorantka przedstawiła charakterystykę badanego obiektu, parametryzację konstrukcji zastawki, następnie optymalizację konstrukcji zastawki w środowisku symulacji multifizycznej. Testy optymalizacyjne przeprowadzono dla trzech modeli o różnych wymiarach średnicy zastawki. W wyniku badań optymalizacyjnych uzyskano trzy optymalne projekty dostosowane do pacjentów.

Rozdział piąty zawiera przykłady i sposoby wytwarzania oraz walidacji wykonanych zastawek. Pierwszym sposobem wykonania zaprojektowanej zastawki był wydruk w technologii FDM. Metoda ta nie spełniła oczekiwań ze względu na niedokładność wydruku skomplikowanych kształtów. Kolejną metodą była UV LCD. Jakość kształtowa i wymiarowa była lepsza, ale funkcjonalność wydrukowanej zastawki, w szczególności ruchowość płatków została mocno ograniczona poprzez utwardzenie określonych obszarów wydruku. Kolejną metodą było odlewanie modeli silikonowych z wykorzystaniem form wykonanych w technologii FDM. Była to metoda wystarczająca na potrzeby wykonania prototypów zastawek, które później mogły zostać poddane weryfikacji eksperymentalnej. W kolejnej części rozdziału zaprezentowano eksperymentalną ocenę konstrukcji zastawki aortalnej. Do tego celu Doktorantka zbudowała stanowisko badawcze i zaprezentowała wyniki badań. Przedstawiła zalety i wady wykorzystanej metody badawczej oraz możliwości oceny efektywności pracy zastawki przy użyciu zaproponowanego stanowiska badawczego. W dalszej części

zaprezentowano wyniki symulacyjne, gdzie Doktorantka podjęła próbę odtworzenia warunków eksperymentalnych.

Rozdział szósty zawiera wnioski i perspektywy dalszych badań.

Literatura zawiera 107 pozycji publikacyjnych oraz internetowych. Znajdują się tutaj prace starsze będące opracowaniami podstawowymi w przedmiotowej tematyce jak i aktualne związane z obecnie realizowanymi pracami związanymi z rozwijaną przez Doktorantkę tematyką.

4. Ocena rozprawy

W mojej ocenie Doktorantka podjęła się rozwiązania szeregu aktualnych problemów badawczych związanych z opracowaniem uniwersalnej i prostej w aplikacji metodyki projektowania implantów zastawki serca dostosowanej do pacjenta.

Za wkład Doktorantki w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna należy uznać:

- opracowanie uniwersalnego modelu parametrycznego zastawki umożliwiającego łatwe wstępne dopasowanie implantu do pacjenta;
- opracowanie metodyki kalibracji wymiarów i właściwości materiałowych zastawki z zastosowaniem symulacji multifizycznej;
- wykonanie przykładowego fizycznego prototypu implantu, zaprojektowanie stanowiska do jego badań eksperymentalnych oraz przeprowadzenie badań walidujących.

Doktorantka zaproponowała metodykę projektowania, która bazuje na modelowaniu parametrycznym 3D oraz możliwości optymalizacji geometryczno-materiałowej w oparciu o środowisko symulacji multifizycznej (sprężone analizy strukturalno-płynowe). Na potrzeby szybkiego modelowania, na podstawie pomiarów własnych oraz zależności matematycznych określających wymiary geometryczne zastawki ich wzajemne zależności, Doktorantka zaproponowała uniwersalny model parametryczny (UMP) implantu zastawki. Metodyka projektowania zakłada dwuetapowe dostosowanie implantu do pacjenta. Pierwszy etap obejmował szybkie dopasowanie modelu parametrycznego UMP do konkretnego pacjenta. Etap drugi dotyczył finalnego kształtowania i gradientowo-funkcyjnego określania właściwości materiałowych zastawki uzyskiwanych w wyniku optymalizacji konstrukcji 3D w środowisku symulacji multifizycznej. Doktorantka swoje rozważania i założenia poparła kilkoma przykładami zaprojektowanych spersonalizowanych zastawek oraz wykonała prototyp zastawki. Na szczególną uwagę zasługuje opracowanie stanowiska do badań eksperymentalnych i wykonanie testów PIV (Particle Image Velocimetry). Pozwoliło to Doktorantce na sprawdzenie funkcjonalności prototypu i walidację parametrów użytkowych.

Zrealizowane prace badawcze, zaproponowana metodyka projektowania spersonalizowanej zastawki płatkowej może przyczynić się do opracowania metody szybkiego

wytwarzania implantów na potrzeby szpitali. W dalszej perspektywie korzystne byłoby poszerzenie pola jej zastosowania na sztuczne serce dostosowane do pacjenta.

5. Uwagi, komentarze

Moim zdaniem struktura pracy jest właściwa, poszczególne rozdziały w ukierunkowany sposób wprowadzają czytelnika w tematykę od przeglądu stanu wiedzy, przez opis poszczególnych zadań badawczych wraz z opisem otrzymanych wyników i wyciągniętych wniosków. Cel i zakres pracy zostały przedstawione w zwięzły i zrozumiały sposób. W mojej ocenie Doktorantka właściwie i wystarczająco uargumentowała potrzebę dopasowania zastawki serca w celu uniknięcia powikłań po zabiegowych wynikających z niewłaściwego dopasowania wymiarowego zastawki do pacjenta.

W rozdziale drugim Doktorantka właściwie opisała wykorzystywane narzędzia, modele oraz planowaną analizę MES. Niedosyt można odczuć podczas analizy podrozdziałów opisujących możliwe do wykorzystania modele konstytutywne do opisu zachowania się tkanek zastawki płatkowej. Doktorantka dość lakonicznie pisze o dwóch grupach modeli i w bardzo zwięzły sposób deklaruje, że do analiz wykorzysta model pierwszego rzędu Ogden'a. Warto by tutaj przeprowadzić bardziej dogłębną analizę modeli izotropowych oraz anizotropowych z dokładniejszym uargumentowaniem, że wybrany model jest w swych uproszczeniach najkorzystniejszy. Szczególnie w porównaniu z modelami anizotropowymi Holzapfel–Gasser–Ogden'a (HGO) oraz Fung'a.

W rozdziale trzecim Doktorantka właściwie i wystarczająco wyjaśniła sposoby oraz metody pozyskiwania informacji z badań obrazowych na potrzeby zdefiniowania parametrów geometrycznych projektowanej zastawki. Podrozdział 3.3 moim zdaniem również jest potraktowany zbyt skrótowo. Ważna część dotycząca procesu optymalizującego jest przedstawiona w sposób utrudniający analizę oraz jednoznaczną ocenę przyjętych założeń oraz podstawę wyboru określonych rozwiązań (rys. 3.13, rys. 3.14). Podrozdział 3.2.5 (zła numeracja powinno być 3.3.3) zdecydowanie powinien być bardziej szczegółowo opisany. Dotyczy to zaproponowanego algorytmu projektowania zastawki aortalnej dostosowanej do pacjenta, w moim mniemaniu (oraz na podstawie deklaracji Doktorantki) ważnej części osiągnięcia zaprezentowanego w rozprawie.

W rozdziale czwartym, ponownie zbyt lakonicznie został potraktowany opis metod optymalizacyjnych. Przedstawione są skrótowo wybrane tabele z parametrami określonych przykładów. Zdecydowanie utrudnia to analizę. Zbyt mało uwagi Doktorantka poświęciła również na zdefiniowanie parametrów modelu MES w szczególności części strukturalnej.

W rozdziale piątym Doktorantka wystarczająco dokładnie opisała problemy z wykonaniem prototypu zastawki z wykorzystaniem technologii druku 3D, budowę stanowiska badawczego

oraz wyniki eksperymentalne. Zbyt skrótowo natomiast zostało potraktowanie dojście do grubości płatków zastawki o wartości 0,8 mm.

W rozdziale szóstym zatytułowanym „WNIOSKI I PERSPEKTYWY DALSZYCH BADAŃ” bardziej znajduje się sprawozdanie z tego co udało się zrobić niż wnioski dające pogląd czytelnikowi jakie wartości cech geometrycznych zastawki płatkowej ilościowo i jakościowo wpływają na parametry pracy zastawki.

Tekst napisany jest starannie, niemniej jednak można znaleźć mniej lub bardziej wpływające na odbiór całokształtu pracy błędy redakcyjne i stylistyczne, oto niektóre z nich:

- „*Metody obrazowani mają tutaj...*” str. 15,
- „*Przy czym współczynnik dopasowani funkcji w żadnym...*”, str. 16,
- „*...skutkowałaby zredukowaniem kosztem wytworzenia...*”, str. 21,
- „*...własności materiałowych zastawki zastosowaniem symulacji multifizycznej...*”, str. 23,
- „*Najlepsze efekt uzyskano stosując metodę Kriging’a...*”, str. 46,
- „*...jakość powierzchni formy do odlewania...*”, str. 78,
- „*...jest potwierdzono w literaturze...*”, str. 81,
- „*...krok czasowi powoduje...*”, str. 82,
- „*Pracę zilustrowano badan kilkoma przykładami projektowania...*”, str. 89,
- „*Pozwoliło to na sprawdzeni funkcjonalności prototypu...*”, str. 89.

Wskazane w powyższych uwagach niedoskonałości nie wpływają na wartość merytoryczną pracy, mają charakter dyskusyjny, niemniej jednak utrudniają w pewnym stopniu analizę i odbiór recenzowanej rozprawy.

6. Pytania szczegółowe

1. Jakiego typu elementy skończone stosowała Pani do modelowania domeny strukturalnej. Czy była konieczność stosowania określonej liczny elementów na grubości płatków zastawki?
2. Czy podejmowała Pani próby wykorzystania modeli anizotropowych Holzapfel–Gasser–Ogden’a (HGO) oraz Fung’a do modelowania materiału zastawki. Jeśli nie, dlaczego? Jeśli tak, dlaczego zdecydowała się Pani na model pierwszego rzędu Ogden’a?
3. W rozdziale 2.4 opisuje Pani badanie czułości siatki dla czterech wymiarów elementów skończonych 0,2, 0,3, 0,4 oraz 0,5 mm. Decyduje się Pani na wymiar 0,5 mm. Jak to się ma do informacji, że grubość modelowanych płatków zastawki w późniejszych rozważaniach przyjmuje Pani równą 0,3 mm?
4. Na rysunku 2.2 charakterystyki dla wymiarów 0,3, 0,4, 0,5 mm w początkowej fazie się pokrywają, jedynie wymiar 0,2 mm odbiega. Jak Pani to wytłumaczy?

5. W modelu płatków zastawki widoczne jest załamanie powierzchni (np. rys. 4.9). Czy jest to wierne odtworzenie geometrii, czy uproszczenie? Jak to wpływa na otrzymywane charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe?
6. Jakie inne (lepsze) metody wytwarzania zaproponowałaby Pani do wykonania prototypu zastawki, które można by wykorzystać w Pani algorytmie projektowania zastawki aortalnej dopasowanej do pacjenta?
7. Na czym w Pani pracy polega *metamodeling*?

7. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Uważam, że tematyka poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej wchodzi w zakres dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Biorąc pod uwagę wartość naukową rozprawy, zakres przeprowadzonych prac oraz to, że Doktorantka wykazała się umiejętnością rozwiązywania oryginalnego problemu naukowego, a także ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu realizowanej tematyki pracy stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. **Podsumowując, wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej o dopuszczenia mgr inż. Laury Pałys-Żyty do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**