

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Laury PAŁYS-ŻYTA**
pt. „Metamodeling kompozytowej zastawki płatkowej do zastosowań medycznych”

Podstawa opracowania: Pismo Rektora Politechniki Opolskiej

Dr hab. inż. Marcina Lorenca
nr RR/477/2025 z dnia 14 maja 2025r.

1. Motywacja podjęcia tematu rozprawy doktorskiej i jej zakres

Choroby układu krążenia stanowią dominujące schorzenie cywilizacyjne współczesnych, starzejących się społeczeństw. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) i polskich źródeł medycznych, do najczęstszych schorzeń układu krążenia należą nadciśnienie tętnicze, miażdżyca, żylna choroba zakrzepowo-zatorowa oraz wady serca, których konsekwencją są m. in. niedokrwienność serca, jego niewydolność czy zaburzenia rytmu, np. migotanie przedsionków. Wśród wiodących schorzeń związanych z wadami serca znajdują się głównie choroby zastawek serca, których leczenie często wymaga operacyjnej wymiany natywnej zastawki na sztuczną. Mimo szerokiego spektrum rozwiązań sztucznych zastawek dostępne warianty protez wiążą się z szeregiem powikłań i wad związanych z ich konstrukcją, zasadą działania i zastosowanymi materiałami skutkującymi нефизиologicznymi profilami przepływów, dużymi wartościami i gradientami odkształceń/naprężeń oddziałujących na elementy krwi w bezpośrednim sąsiedztwie implantów zastawek. Wady zastawkowe serca stanowią znaczące źródło zgonów i obciążeń zdrowotnych. Śmiertelność z powodu wad zastawkowych jest złożonym zagadnieniem, które nie jest ujęte wprost w statystykach WHO, ale dane te są przedmiotem badań na poziomie krajowym i regionalnym. Wg aktualnych danych choroby układu krążenia są główną przyczyną zgonów w Polsce, stanowiąc około 37 - 43% wszystkich zgonów w kraju. Śmiertelność z powodu chorób serca, w tym także z powodu wad zastawkowych, w latach 2021 – 2023 wykazuje w Polsce niewielką tendencję spadkową w statystyce na 100 tys. ludności: wśród mężczyzn z 1710 na 1369, wśród kobiet z 472 na 374. Po chorobie nowotworowej jest to najczęstsza przyczyna zgonu.

Proponowany temat i zakres pracy doktorskiej skupia się na innowacyjnym autorskim hybrydowym podejściu do projektowania i wytwarzania polimerowego implantu zastawki serca dopasowanego do danego pacjenta ('custom design approach'). Przedstawiona metodyka uwzględnia parametryczne modelowanie 3D oraz optymalizację geometryczno-materiałową w środowisku symulacji multifizycznej w projekcie konstrukcji oraz technologii wytwarzania zastawki osobniczo dedykowanej danemu pacjentowi. Praca lokuje się równocześnie w bardzo aktualnym i nowoczesnym trendzie współczesnej inżynierii materiałowej i bioinżynierii, tzw. meta materiałów, w szczególności w kontekście symulacji, optymalizacji i modelowania zachowania struktur w zakresie rozwiązań topologicznych, geometrii i zmiennych własności materiałowych.

Pracę rozpoczyna wstęp oraz część literaturową zawierające wprowadzenie do podjętej tematyki pracy, w szczególności nakierowane na rodzaje stosowanych zastawek aortalnych oraz metodykę doboru ich parametrów geometrycznych i przykłady ich projektowania. Następnie Autorka przedstawia cel i zakres swojej rozprawy doktorskiej. Kolejny rozdział to syntetyczny przegląd wybranych prac z zakresu symulacji numerycznych oraz stosowanych równań stanu w modelowaniu elementów strukturalnych zastawki aortalnej. Najważniejsze merytorycznie dla pracy to rozdziały 3, 4 i 5. W rozdziale 3 Autorka formułuje podstawy i założenia przyjętej metodyki projektowania zastawki aortalnej dostosowanej do indywidualnych cech anatomicznych i zmian patologicznych danego pacjenta. W rozdziale 4 Doktorantka przedstawia z kolei trzy przykłady projektowe metodycznie realizujące przyjętą procedurę meta modelowania z wykorzystaniem wielokryterialnych optymalizacji konstrukcji zastawki. Natomiast rozdział 5 zawiera przykłady procedur wytwarzania zaprojektowanych prototypów zastawki aortalnej w technologiach addytywnych druku 3D oraz metodą odlewania bezciśnieniowego. Walidację wybranego rozwiązania konstrukcyjnego zastawki Doktorantka przeprowadziła eksperymentalną metodą analizy obrazowej rozkładu prędkości cząstek w symulowanym przepływie aortalnym oraz w symulacjach numerycznych rozkładów pól prędkości dla wariantowych przypadków zamknięcia oraz całkowitego i częściowego otwarcia zastawki wraz z towarzyszącą im analizą strukturalną wyteżeń jej płatków. Pracę kończy rozdział 6 zawierający syntetyczne wnioski wynikające z realizacji prac badawczych oraz perspektywy dalszych kierunków badań.

Autorka swoje opracowanie przedstawiła łącznie na 109 stronach maszynopisu zawierającego tekst, tabele, rysunki, wykaz 107 cytowanych pozycji literaturowych, spis

rysunków i tabel oraz załącznik zawierający kod źródłowy generujący geometrię zastawki aortalnej w programie ANSYS SpaceClaim.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Laura Pałys-Żyta przedstawiła własną, złożoną procedurę optymalizacji konstrukcji implantu zastawki aortalnej indywidualnie dopasowanej do osobniczych cech danego pacjenta. Opracowane i zaprezentowane w pracy aplikacje numeryczne wykorzystujące metody interpolacyjne i algorytmy genetyczne oraz podejście do modelowania gradientowo zmiennych własności materiałowych dowodzą, że Doktorantka posiada już rozległą i ugruntowaną wiedzę z zakresu modelowania nieliniowych geometrycznie i materiałowo układów biologicznych, w szczególności tkanki miękkiej, metod numerycznych oraz doświadczalnych. Prawidłowo potrafi ocenić podjęty przez siebie problem, właściwie sformułować cele badawcze, do realizacji których stosuje nowoczesne metody inżynierskie.

Do najważniejszych osiągnięć Doktorantki moim zdaniem należy zaliczyć:

- opracowanie metodyki własnego rozwiązania projektowego implantu zastawki aortalnej serca indywidualnie dedykowanego danemu pacjentowi w dwuetapowej technologii dopasowania modelu parametrycznego zastawki, uwzględniającego średnice wlotową i wylotową zastawki, wysokość płatków i wysokość korzenia aorty oraz procedury optymalizacji geometrycznej i materiałowej, co stanowi znaczący postęp w stosunku do dotychczas stosowanej w kardiochirurgii procedury doboru zastawki w oparciu o standard typoszeręgu dostępnych średnic nominalnych,
- opracowanie metodyki bazującej na nowoczesnych algorytmach optymalizacyjnych, w tym optymalizacji topologicznej, wykorzystujących metody interpolacyjne i algorytmy genetyczne oraz podejście do modelowania gradientowo zmiennych własności materiałowych,
- wykonanie prototypów zastawek aortalnych w technikach addytywnych druku 3D i odlewania oraz ich walidacja eksperymentalna metodą analizy obrazowej rozkładu prędkości cząstek w symulowanym przepływie aortalnym,
- wykonanie symulacji numerycznych rozkładów pól prędkości dla wariantowych przypadków zamknięcia oraz całkowitego i częściowego otwarcia zastawki wraz z towarzyszącą im analizą strukturalną wyżeń płatków zastawki.

3. Uwagi krytyczne

W punkcie tym przedstawiam pewne uwagi krytyczne, po części o charakterze polemicznym, które nasunęły mi się po zapoznaniu się z recenzowaną pracą:

- tytuł pracy moim zdaniem jest zbyt ogólny; praca przedmiotowo dotyczy modelowania zastawki aortalnej i to powinno być wyeksponowane w tytule rozprawy,
- praca nie ma typowego dysertacyjnego charakteru cechującego rozprawę doktorską, w szczególności dotyczy to następujących aspektów:
 - układ pracy nie jest zbyt czytelny i logicznie ujmujący sekwencję poszczególnych punktów i zadań realizowanych w rozprawie; przykładowo: jeden z najważniejszych elementów rozprawy ‘Cel i zakres pracy’ ujęty jako podpunkt rozdziału 1. „Wstęp”; rozdział 2. „Symulacja zastawki aortalnej w środowisku symulacji multifizycznej” to swoista hybryda łącząca w jednym rozdziale literaturowe doniesienia dotyczące podstaw aplikacji modeli numerycznych w modelowaniu zastawki aortalnej z teoretycznymi podstawami przyjętych równań stanu dla jej modelowania (równania konstytutywne i równania ruchu) z własnymi analizami MES przyjętych warunków brzegowych do określenia czułości siatki, czy cyklu pracy serca, w sytuacji gdy badania własne Doktorantki rozpoczyna dopiero rozdział 3. „Metodyka projektowania zastawki aortalnej dostosowanej do pacjenta”,
 - trzy symulacyjne przykłady projektowe przedstawione w rozdziale 4 optymalizujące konstrukcję zaworu motylkowego, topologię oraz funkcjonalnie gradowane własności kompozytowej zastawki aortalnej nie mają swojego jednoznacznego odzwierciedlenia w przedstawionej w punkcie 5 procedurze wytwarzania i walidacji zastawki aortalnej,
 - przegląd literaturowy zredagowany jest zbyt syntetycznie, a w dalszej części rozprawy mimo zamieszczonego obszernego i aktualnego wykazu piśmiennictwa z przedmiotowego dla pracy zagadnienia brak jest dyskusji własnych rozwiązań na tle osiągnięć innych Autorów, co jest standardem w pracach naukowo-badawczych,

- i może najważniejsza uwaga w tym punkcie, tzn. bardzo skromny i przedstawiony na dużym poziomie ogólności rozdz. 6 zawierający wnioski wynikające z realizacji pracy.
- przedstawiony na stronie 45 algorytm optymalizacyjny stosowany w projektowaniu zastawki aortalnej zawiera kryterium funkcjonalności, które nie jest zbyt czytelnie zdefiniowane; nie jest ono jednoznaczne i jest różne w zależności od funkcji celu przedstawionych w rozdziale 4 zadań projektowych; w przypadku optymalizacji konstrukcji zaworu motylkowego jest to maksymalizacja parametru przepływowego przy jednoczesnej minimalizacji jego masy i ... *obniżeniu naprężeń zredukowanych* ... - nie jest to jednoznaczne stwierdzenie; w przypadku pozostałych 2 zadań multimodelowych funkcja celu jest już bardziej precyzyjnie określona: odpowiednio minimalizacja wartości maksymalnych naprężeń ścinających dla jednego zadania oraz minimalizacja wartości naprężeń zredukowanych przy jednoczesnej maksymalizacji odkształceń części wolnej płata zastawki dla drugiego zadania,
- najważniejsze szczegółowe uwagi dotyczące strony redakcyjnej pracy to:
 - w funkcji gęstości energii odkształcenia w modelu Ogdena Doktorantka stosuje określenie ... *odcinki główne odkształcenia* ...; trochę dziwnie to brzmi, gdyż są to po prostu odkształcenia główne tensora odkształcenia,
 - w przedstawionych w opisie równań ruchu (str. 29) dla płynów nieściśliwych typu Navier’a-Stokes’a Doktorantka stwierdza ... *do takich płynów zaliczamy płyny, których liczba Macha jest mniejsza niż 0,3* ...; czy takie stwierdzenie jest stosowne w analizie hydrodynamiki układu krążenia? liczba Macha jest stosowana przy przepływach z bardzo dużymi prędkościami – głównie dla gazów ale też i płynów,
 - brak jest w pracy numeracji wzorów, co jest standardem w pracach naukowych,
 - Doktorantka używa konsekwentnie anglicyzmu *metamodeling*; istnieje w języku polskim określenie meta modelowanie,
 - przedstawione w pracy grafiki analiz numerycznych MES zawierają bardzo nieczytelne legendy – nie ułatwia to recenzentowi pracy,
 - na stronie 5 przedstawiono tylko wybrane symbole i oznaczenia stosowane w pracy.

4. Wniosek końcowy

Jako recenzent stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera nowe aspekty praktyczne i poznawcze, a jej podstawowy cel został zrealizowany, tzn. opracowano metodykę projektowania zastawki aortalnej w aktualnej technologii ‘na wymiar’, czyli dopasowanej do danego pacjenta wymagającego interwencji chirurgicznej. Praca jest własnym rozwiązaniem postawionego zadania badawczego i niewątpliwie stanowi autorski przyczynek naukowy mgr inż. Laury Pałys-Żyta w zakresie rozwoju algorytmów numerycznych w procesie optymalizacji konstrukcji implantu zastawki aortalnej serca.

Rozprawę doktorską mgr inż. Laury Pałys-Żyta można sklasyfikować w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Laury Pałys-Żyta odpowiada wymaganiom stawianym w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz. U. 1571 z 2024 r. z póź. zm.). Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie Autorki do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej.

