

Częstochowa, 19 lipca 2023 r.

Dr hab. inż. Jerzy Winczek
Katedra Technologii i Automatykacji
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

**Recenzja rozprawy doktorskiej
p.t.:**

**„Modelowanie i badanie mikrostruktur wybranych
metamateriałów do zastosowań w biomechanice”**

**autorstwa
mgr inż. Rafała Drobnickiego**

Promotor: prof. dr hab. inż. Marek Pawlikowski

Recenzja została sporządzona na podstawie pisma Dziekana Wydziału Technologicznego Mechanicznego Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Tomasza Chmielewskiego nr MT.521.7.2023 z dn. 19.05.2023 r. informujące mnie, że zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej zostałem powołany na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Drobnickiego p.t. „Modelowanie i badanie mikrostruktur wybranych metamateriałów do zastosowań w biomechanice”. Przewód doktorski otwarty został w dyscyplinie mechanika mieszczącej się aktualnie w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

1. Uwagi ogólne, ocena ważności podjętego problemu naukowego i charakterystyka rozprawy.

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy modelowania struktur metamateriałów z optymalizacją budowy tych struktur przyjmując kryterium energii potencjalnej (z użyciem funkcjonału energii sprężystej).

Problem funkcjonalności materiałów stosowanych w biomechanice w dużym stopniu związany jest z możliwością przenoszenia obciążeń i kumulowania energii potencjalnej. Podjęcie tego tematu jest ważne w kontekście projektowania materiałów i optymalizacji rozwiązań konstrukcyjnych w biomechanice i inżynierii biomedycznej.

Rozprawa licząca 143 strony składa się ze strony tytułowej, podziękowań dla Ś.P. prof. Tomasz Lekszyckiego i promotora rozprawy prof. Marka Pawlikowskiego, streszczenia, abstractu, spisu treści, sześciu rozdziałów, bibliografii, spisu ilustracji i spisu tabel.

W rozdziale pierwszym (liczącym 3 strony) zatytułowanym *Wstęp*, w krótkim wprowadzeniu doktorant zdefiniował metamateriały, szczególnie metamateriały pantograficzne. Następnie autor sformułował cele pracy, spośród których za istotniejsze uważam:

- opracowanie modelu matematycznego struktury metamateriału,
- ocena zoptymalizowanej struktury pod kątem zastosowania w inżynierii biomedycznej do regeneracji tkanek.

Rozdział pierwszy doktorant zakończył opisem treści rozdziałów 2 – 6.

Wprowadzenie do biomechaniki w ujęciu historycznym inicjuje rozdział drugi. Następnie przedstawiono podstawy mechaniki ośrodków ciągłych. Rozdział (liczący 21 stron) zamyka opis anatomii stawu nadgarstkowego i jego kinematyki.

Rozdział trzeci (18 stron) autor poświęcił charakterystyce modelowania (fizycznego i matematycznego), opisowi modeli belek: ciągłego Eulera- Bernoulliego i dyskretnego typu Hencky'ego, oraz modelowaniu biomechanicznemu tkanek miękkich.

Rozdział czwarty (21 stron) rozpoczyna opis genezy, historii i rozwoju metamateriałów, w tym metamateriałów mechanicznych. Następnie autor charakteryzuje metamateriały pantograficzne i ich zastosowanie oraz na podstawie literatury opisuje modelowanie matematyczne tych metamateriałów oraz sposoby ich wytwarzania. Rozdział kończy opis badań wytrzymałościowych struktur pantograficznych.

Główną częścią rozprawy pod względem merytorycznym jej treści w funkcji postawionego celu pracy jest rozdział piąty (34 strony). Na jego wstępie omówiono narzędzia programistyczne, którymi doktorant posłużył się do wygenerowania 14 struktur pantograficznych, które następnie scharakteryzował konstrukcyjnie i materiałowo. Dla takich samych warunków brzegowych i obciążeniowych przeprowadzono obliczenia numeryczne dla układu dyskretnego i ciągłego. Na podstawie analizy porównawczej do dalszej analizy struktur pantograficznych i ich optymalizacji doktorant wybrał model dyskretny.

Po sformułowaniu funkcjonału energii sprężystej struktury pantograficznej doktorant przystąpił do numerycznych symulacji dla przypadków rozciągania i ścinania. Rezultaty obliczeń autor przedstawił na 54-ech rysunkach ilustrujących konfiguracje modeli, rozkłady naprężeń normalnych i stycznych, odkształceń, energii potencjalnej i sztywności. W tej części pracy autor wykazał znajomość metod numerycznych i biegłość w programowaniu.

Tytuł *Wnioski* dla szóstego rozdziału (liczącego łącznie 3 strony) jest mylący. Jego komponentami są podrozdziały zawierające *Omówienie wyników*, *Dyskusja* i *Potencjalny kierunek rozwoju*. W dwóch pierwszych podrozdziałach można napotkać stwierdzenia, które można uznać za wnioski, ale w opinii recenzenta powinny one być wyodrębnione.

Bibliografia zawiera 330 pozycji (28 stron), spośród których doktorant jest współautorem trzech, a profesorowie Lekszycki i Pawlikowski łącznie sześciu. Doktorant sięgnął do klasyki literatury technicznej cytując prace Eulera z 1765 roku i Hencky'ego z 1921 roku.

Na końcu rozprawy zamieszczono *Spis ilustracji* (6 stron) i *Spis tabel* (1 strona).

Pierwsze cztery rozdziały (około połowa treści rozprawy) stanowią w istocie opis dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie historii biomechaniki, modelowania matematycznego w mechanice oraz metamateriałów (ich budowy, wytwarzania, zastosowania i badań własności mechanicznych). W tej części pracy doktorant wykazał wystarczające przygotowanie ogólne, a przynajmniej dobre rozeznanie w literaturze przedmiotu.

Rozdział piąty jest rozwiązaniem problemu, a więc efektem badań własnych autora w zakresie modelowania i optymalizacji metamateriałów. W opisie procedury badawczej autor epatuje czytelnika terminologią metod numerycznych, opisami programów, użytych funkcji i listami kodów, w mniejszym stopniu koncentrując się na mechanicznym sensie rozwiązywanego problemu. Doktorant w tej części rozprawy powinien położyć silniejszy nacisk i nadać większego znaczenia treści w kontekście dyscypliny, w której rozpoczął ubieganie się o stopień doktora.

Analiza wyników wykonanych numerycznych symulacji jest pobieżna i lakoniczna. W odniesieniu do licznie zaprezentowanych rezultatów obliczeń przedstawionych graficznie na 18 stronach można by oczekiwać bardziej wnikliwego ich rozpatrywania.

Wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych badań i rezultatów numerycznej analizy zawarte zostały w omówieniu wyników badań i dyskusji, natomiast powinny być wyszczególnione i usystematyzowane.

2. Ocena rozprawy doktorskiej w kontekście art. 187, ust. 1 i 2 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz.U. 2023 poz. 742).

Istotną częścią rozprawy jest przedstawione w rozdziale piątym rozprawy oryginalne rozwiązanie problemu optymalizacji struktury metamateriału bazującego na poliamidzie PA 2200 z przyjętym kryterium energetycznym (z wykorzystaniem funkcjonatu energii sprężystej). Opis realizacji tego zadania zaczyna się na stronie 72 rozprawy, a kończy na stronie 105, spośród których na 18-tu pełnych stronach są zawarte graficzne prezentacje wyników numerycznych symulacji.

Opracowano geometrie metamateriałów dla modelu ciągłego i dyskretnego. W celu optymalizacji doktorant napisał program w języku C, za pomocą którego wykonał symulacje numeryczne dla 14-stu przypadków struktur pantograficznych – od jednej do czternastu belek (zamodelowanych jako belki Eulera-Bernoulliego) w warstwie.

Przeprowadzono obliczenia numeryczne dla układu dyskretnego i ciągłego dla przypadku 7 belek przy takich samych warunkach obciążeniowych i brzegowych. Na postawie analizy porównawczej (zbliżone wartości wyników dla obu układów) do dalszych badań wybrano model dyskretny. Sformułowano funkcjonat sprężysty będący podstawą optymalizacji.

Doktorant wykonał optymalizację dla stanu rozciągania generując rozkłady naprężeń normalnych, sztywności, energii potencjalnej i naprężeń ścinających. Następnie poddano analizie rozkład naprężeń ścinających, sztywności i energii potencjalnej w sprężynach obrotowych (węzłach).

Powyżej scharakteryzowana optymalizacja, chociaż nie zakończona kwantyfikowanymi wnioskami, a jedynie kwalitatywnymi ocenami wyników analiz, stanowi rozwiązanie problemu mieszczącego się w zakresie mechaniki ciała stałego, (zarazem dyscypliny inżynieria mechaniczna) i zdaniem recenzenta spełnia formalne wymagania ust. 2-ego art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz.U. 2023 poz. 742).

Treści rozprawy zawarte m.in. w podrozdziałach 2.1. Mechanika continuum w mechanice, 3.2. Modelowanie matematyczne oraz 4.3.2. Modelowanie matematyczne metamateriałów pantograficznych prezentują wystarczającą ogólną wiedzę teoretyczną autora w zakresie mechaniki i dyscypliny inżynieria mechaniczna. Doktorant wykazał znajomość i umiejętność zastosowania MES oraz oprogramowania specjalistycznego do analizy układów mechanicznych. W mojej opinii wyczerpuje to wymagania ust. 1-ego art. 187 przywołanej wyżej Ustawy.

3. Komentarze, pytania i uwagi krytyczne

Pierwsze 57 stron rozprawy (do podrozdziału 4.3 zatytułowanego Metamateriały pantograficzne), pomijając stronę tytułową, streszczenia i spis treści, stanowi ogólny opis aktualnego stanu wiedzy w zakresie biomechaniki w ujęciu historycznym, mechanicznym (mechanika ośrodków ciągłych w biomechanice), medycznym (opis stawu nadgarstkowego) czy materiałowym (metamateriały). W tych częściach pracy (rozdziały 2, 3, oraz podrozdziały 4.1 i 4.2) autor dokonał obszernego przeglądu literatury w wyżej wymienionym zakresie zawierając treści ważne pod względem tematu rozprawy, (np. podrozdział *Modelowanie mechaniczne tkanek miękkich*), jak i elementarne np. str. 35 – 38. Niektóre z tych treści mają charakter informatywny, poznawczy (zwłaszcza w ujęciu historycznym i medycznym), ponieważ nie dotyczą zagadnień mechaniki (w której to dyscyplinie autor rozprawy otworzył przewód doktorski) lub nie odnajduje się ich czy ich znaczenia w dalszej części pracy.

Tytuł rozprawy doktorskiej stanowi o modelowaniu i badaniu mikrostruktur wybranych metamateriałów (liczba mnoga). Dla jakich metamateriałów opracowano modele i dokonano optymalizacji? Na bazie tylko poliamidu PA 2200, czy również dla stopu AISi10Mg lub innych?

Cel pracy został określony bardzo ogólnie. Zarówno w Streszczeniu jak i w podrozdziale 1.1 sformułowano go jako stworzenie modelu matematycznego metamateriału o specjalnych własnościach mechanicznych. Nie wyspecyfikowano tych specjalnych własności, jak i pożądanych charakterystyk mechanicznych (wspomnianych w podrozdziale 1.1). Nie przedstawiono zakresu pracy i zakresu badań własnych autora. Brak precyzyjnie zdefiniowanego celu pracy w powiązaniu z brakiem zakresu badań własnych doktoranta utrudnia ocenę osiągnięcia celu, jak również realizacji zadań wyznaczonych do osiągnięcia tego celu.

Na stronie 13 Autor stwierdza: „Obecnie w mechanice można wyróżnić cztery kluczowe działy” i wymienia: statykę, kinematykę, kinetykę i dynamikę. Pomijając niezbyt właściwe sformułowanie „można wyróżnić cztery kluczowe działy” (jest ich więcej? mniej kluczowych?), powyższa klasyfikacja wymagałaby przynajmniej odwołania się do źródeł

literatury, ponieważ w ujęciu mechaniki klasycznej termin kinetyka jest równoważny z dynamiką, a przewód doktorski został otworzony w dyscyplinie mechanika.

Czy rozważania (wzory) przedstawione w rozdziale drugim są autorstwa doktoranta czy innych autorów? Przy niektórych wzorach czy fragmentach tekstu są odwołania do pozycji literatury, a w innych przypadkach nie, np. wzory 2.11, 2.14, 2.17 – 2.22.

Na stronach 41 i 42 zamieszczono wzory dotyczące energii dyskretnej oznaczonej $E_n^3(\mu)$. Ta część podrozdziału jest w istocie opracowaniem bazującym na pracy Aliberta i in. zatytułowanej *Convergence of Hencky-Type Discrete Beam Model to Euler Inextensible Elastica in Large Deformation: Rigorous Proof*. Wskazaniem byłoby wyraźne wskazanie tego faktu poprzez odpowiednie odwołania. Inaczej może to sugerować autorskie rozważania doktoranta.

Na str. 43 w równaniu 3.3.1 pojawiają się wielkości tensora naprężenia Pioli Kirchhoffa S_{ij} i odkształcenia Greena-de Saint Venanta E_{ij} , których znaczenia w tym wzorze autor nie wyjaśnia. Natomiast autor koncentruje się na ułamku $1/2$ nazywając go współczynnikiem. Czy jest to współczynnik w sensie fizycznym czy matematycznym?

Czy treści (wzory i ich merytoryczna analiza) zawarte w podrozdziale 3.2.3. Modelowanie biomechaniczne tkanek miękkich są autorstwa doktoranta czy zagadnienia opisane w tym podrozdziale zostały opisane na podstawie innych źródeł?

W podrozdziale 4.3.3 *Wytwarzanie materiałów pantograficznych* na stronie 67 (Rys. 17 i 18) zamieszczono zdjęcia próbek metamateriałów o mikrostrukturze pantografu wykonanych z poliamidu PA 2200 i ze stopu AlSi10Mg. Czy próbki te zostały wykonane w ramach badań własnych autora rozprawy? Czy były one przedmiotem badań doktoranta?

W podrozdziale 4.3.4 *Testy eksperymentalne* opisano rodzaje badań wytrzymałościowych metamateriałów. Doktorant w tym rozdziale wymienia rodzaje badań własności mechanicznych materiałów pantograficznych przywołując pozycje literatury, spośród których współautorem jest jednej (M. Laudato, F. Di Cosmo, R. Drobnicki, P. Göransson, *Dynamical vector fields on pantographic sheet: Experimental observations, New Achievements in Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2019, 108, p. 257-269). Które testy opisywane w przywołanym podrozdziale wykonywał autor?

Przedmiotem badań określonym w tytule rozprawy doktorskiej są mikrostruktury (...) metamateriałów. Na stronie 73 podano wymiary modelu dyskretnego 7 cm x 21 cm z odległością pomiędzy belkami wynoszącą 1 mm. W układzie SI skala mikro oznacza wymiar 10^{-6} , natomiast 10^{-3} oznacza skalę mili. Ponieważ, jak autor stwierdził na stronie 57 „metamateriały mechaniczne są sztucznymi strukturami, gdzie ich architektura jest w skali mikroskopowej”, przyjęcie ww. wymiarów modelu wymaga komentarza.

Z kolei na rysunkach 33, 34, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 48, 49, 51, 52, 54, 55, 65, 66, 68, 69, 71, 72, 74, 75, 77, 79, 81, 83 nie zawarto informacji o jednostkach wielkości prezentowanych na tych rysunkach, jak również nie zawarto tej informacji w podpisach pod rysunkami.

Autor wielokrotnie używa sformułowania „Rozkład normalnego naprężenia ...” (podpisy pod rysunkami 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53). Powinna być użyta liczba mnoga – naprężeń normalnych.

W mechanice w odniesieniu do naprężeń wywołanych siłami tnącymi (poprzecznymi) używa się określenia naprężenia styczne zamiast naprężenia ścinające.

Szczegółowy opis funkcjonalności programów Salome czy Code-Aster wraz z historią ich powstania, możliwościami zastosowania, nazwami komend czy fragmentami kodów mogła być pominięta. Temat rozprawy nie dotyczy zagadnień z zakresu dyscypliny Informatyka techniczna i telekomunikacja. Fragmenty kodów mogłyby być zamieszczone w dodatku.

Wyniki obliczeń przedstawione na rysunkach 32 – 83 wymagałyby głębszej analizy, również w relacji do ich wartości. Ogólnikowe obserwacje zawarte w podrozdziale 6.1. *Omówienie wyników* (np. „widać symetrię w rozkładzie naprężeń normalnych”, „można zaobserwować brak symetrii”) są niewystarczające dla tak licznie przedstawionych rezultatów numerycznych symulacji.

Rozdział 6-ty zatytułowany *Wnioski* w istocie (jak autor sam wyznaczył tytułami podrozdziałów) jest w głównej mierze omówieniem wyników i ich dyskusją, które powinny stanowić osobny rozdział, co koresponduje z uwagą zamieszczoną powyżej.

Natomiast wśród wniosków powinny być zawarte szczegółowe (zwłaszcza w odniesieniu do analizowanych 14-tu modeli materiałowych) i przedstawione najlepiej w wypunktowanej formie. Oczywiście cenne są również wnioski ogólne (jakościowe), które są wymienione w podrozdziale 6.1. *Omówienie wyników*.

Autor wskazał przykład praktycznych możliwości wykorzystania opracowanych przez niego modeli metamateriałów (opatrunek lub orteza nadgarstka), ale nie było konieczne poświęcenie całego podrozdziału anatomii i kinematyce nadgarstka (str. 27 – 32).

Bibliografię sporządzono częściowo w języku angielskim używając przy wymienianiu autorów publikacji spójnika „and” oraz skrótu „et al.”

Liczne błędy edytorskie, stylistyczne, np.:

str. 10 „Analizy numeryczny posłużyły ...”,

str. 11 „...dokładnie opisano związki kinematyczne opisują ruch ciał ...”,

str. 16 „... funkcję je położenia ...”,

str.44 „...żywe tkanki, nie będących perfekcyjnie elastycznych...”,

str. 59 „Mikrostruktura składa się z powtarzających jednostek zwanych komórka elementarna”,

str. 72. „... w programie Salome będący oprogramowaniem ...”,

str. 82, w podpisach rysunków 30 i 31 „pod kątem”,

str. 106 „...testem sosowanym”, w ogóle nie są wyteżone pracują...”, „Stosując optymalizację drugim sposobem analizując rozkłady naprężeń...”,

str. 107 „Dobór odpowiedniego modelu, który w pełni zamodeluje ...”,

nie wymieniając wielu brakujących znaków interpunkcyjnych (np. przecinków)

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest interesującą pracą dotyczącą budowy, badania i modelowania metamateriałów. Charakteryzuje się aspektem poznawczym pod względem historycznym, medycznym i mechanicznym (biomechanicznym). Doktorant wykazał ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w postaci modelowania i optymalizacji metamateriałów.

Biorąc pod uwagę całość pracy, t.j. jej wartość poznawczą i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, stwierdzam, że pomimo uwag krytycznych, rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Drobnickiego p.t. „*Modelowanie i badanie mikrostruktur wybranych metamateriałów do zastosowań w biomechanice*” spełnia formalne wymogi art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz.U. 2023 poz. 742).

Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do obrony w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, podczas której to obrony doktorant powinien w sposób klarowny i jednoznaczny określić wkład własny w rozwiązanie problemu postawionego w tytule rozprawy, jak również odnieść się do pytań i uwag recenzentów.

