

dr hab. inż. Jarosław Filipiak, prof. PWr
Politechnika Wrocławska
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
ul. Łukasiewicza 5
50-371 Wrocław

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej dr inż. Rafała Drobnickiego
pt. „Modelowanie i badanie mikrostruktur wybranych metamateriałów do zastosowań
w biomechanice”

Recenzję opracowano na prośbę Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 10.05.2023r. (pismo MT.521.5.2023 z dnia 19.05.2023r.)

Tematyka rozprawy dotyczy modelowania właściwości mechanicznych metamateriałów. Właściwości metamateriałów w skali makroskopowej zdeterminowane są ich architekturą w skali mikroskopowej. Charakterystyczne mikrostruktury tworzące metamateriały umożliwiają projektowanie ich właściwości mechanicznych stosownie do planowanego przeznaczenia. W literaturze przedmiotu obserwuje się rosnące zainteresowanie metamateriałami ze względu na możliwość uzyskania materiałów o charakterystykach i właściwościach odmiennych w stosunku do klasycznych materiałów. Kierunki badań koncentrują się wokół dwóch głównych nurtów. Pierwszy związany jest z poszukiwaniami modeli matematycznych jak najwierniej odzwierciedlających istotę fizycznego zachowania się metamateriałów na poziomie ich mikrostruktury i makrostruktury pod wpływem przyłożonych obciążeń zewnętrznych. Drugi kierunek związany z metodami wytwarzania metamateriałów o różnorodnych strukturach. Obecnie postępowi badań nad metamateriałami oraz ich praktycznym zastosowaniom sprzyja rozwój technologii obróbki laserowej oraz technologii przyrostowego wytwarzania elementów z materiałów metalicznych, tworzyw sztucznych, ceramiki, czy też różnego rodzaju kompozytów. Łatwiejszy dostęp do technologii pozwala na weryfikację doświadczalną dotychczas opracowanych modeli matematycznych metamateriałów i optymalizacji ich mikrostruktury. Jednym z wielu przykładów metamateriału są struktury pantograficzne, charakteryzujące się wysoką odkształcalnością i wytrzymałością a jednocześnie niską masą. W ocenianej rozprawie, Doktorant podjął się zadania optymalizacji struktury pantograficznej w celu wykazania możliwości wykorzystania metamateriałów pantograficznych do wytwarzania elementów współpracujących z parami kinematycznymi układu kostno – stawowego oraz z wysoce odkształcalnymi strukturami tkankowymi, takimi jak np. skóra. Należy zatem stwierdzić, że tematyka rozprawy wpisuje się w aktualny kierunek badań związany z modelowaniem matematycznym materiałów konstrukcyjnych i projektowaniem ich właściwości mechanicznych. Tym samym rozprawa mieści się dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska została napisana w formie zwartej publikacji zawierającej sześć głównych rozdziałów oraz spis materiałów źródłowych zawierający 330 pozycji literaturowych, z czego blisko połowa to najnowsze prace z ostatnich dziesięciu lat. Pracę dopełniają spis rysunków i tabel, a także streszczenia w językach polskim i angielskim.

W rozdz. 1 przedstawiono tematykę rozprawy, oraz genezę podjętego problemu badawczego, argumentując zasadność podjęcia przedstawionego tematu badań. Wskazano potencjalne zastosowanie wyników rozprawy i zdefiniowano również wymagania funkcjonalne stawiane elementom konstrukcyjnym protez, stabilizatorów stawów człowieka, czy opatrunków stosowanych w rejonie stawów. W tym rozdziale został zdefiniowany cel naukowy rozprawy, który brzmi: „opracowanie i implementacja modelu matematycznego struktury metamateriału umożliwiającej uzyskanie szczególnie pożądanых charakterystyk mechanicznych w zastosowaniach biomechanicznych”. Cel badawczy został sformułowany poprawnie. Wskazano również potencjalne praktyczne zastosowanie opracowanego modelu do optymalizacji funkcjonalnej struktury pantograficznej w kontekście jej jak najlepszego biomechanicznego dopasowania do współpracy z tkankami miękkimi.

Kolejne dwa rozdziały mają charakter przeglądowy. W rozdz. 2 przedstawiono zagadnienia związane z mechaniką continuum, skupiając się na analizie ruchu i deformacji ośrodków ciągłych za pomocą opisów Lagrange’a i Eulera. Omówiono również anatomię i kinematykę nadgarstka wskazując na cechy szczególne i funkcjonalne tego elementu układu kostno – stawowego. W rozdz. 3 Doktorant omawia zagadnienie modelowania obiektów mechanicznych skupiając się na modelowaniu matematycznym podstawowych elementów strukturalnych układów mechanicznych. Omawia model ciągły belki Eulera-Bernulliego, czy dyskretny model belki typu Hencky’ego. Następnie przedstawione są modele matematyczne tkanek biologicznych, a w szczególności tkanek miękkich, cechujących się złożoną, wieloelementową strukturą o właściwościach anizotropowych i charakterystykach mechanicznych typowych dla materiałów hipersprężystych. Szczególną uwagę autor poświęcił modelowaniu zagadnień związanych z procesami wzrostu skóry, jej regeneracji oraz gojenia się ran. Należy podkreślić, że przedstawiony w rozdziałach 2 i 3 syntetyczny przegląd wiedzy zawiera bardzo cenny, merytoryczny materiał. Jednak odczuwalny jest brak komentarza własnego do poruszanych wątków tematycznych. Mam na myśli komentarz, w którym Doktorant wyjaśniłby w jaki sposób i dlaczego ta wiedza i fakty są istotne dla realizacji celu rozprawy a także, które elementy i w jakim zakresie wykorzystuje w rozprawie. Oczywiście czytelnik może się domyślać intencji Autora ale będą to tylko spekulacje.

W rozdz. 4 przedstawiono historię rozwoju metamateriałów i ich zastosowania w różnych obszarach techniki i nauki. Szczególną uwagę poświęcono metamateriałom mechanicznym, zwracając uwagę na możliwość projektowania ich właściwości mechanicznych poprzez dobór rodzaju struktury i geometrii elementów strukturalnych. Autor zwraca uwagę na możliwość uzyskiwania metamateriałów o specyficznych właściwościach, jak np. charakteryzujących się ujemnym modułem sprężystości. Doktorant słusznie zauważa, że metamateriały mechaniczne wykazują duży potencjał aplikacyjny w wielu dziedzinach techniki, w tym w inżynierii biomedycznej. Najważniejsza część rozdz. 4 jest poświęcona metamateriałom pantograficznym. Scharakteryzowano ideę struktury pantograficznej i omówiono jej specyficzne właściwości, takie jak: zdolność ulegania dużym odkształceniom sprężystym, wysoka wytrzymałość na uszkodzenie, stabilne makroskopowe zachowanie mechaniczne towarzyszące nieznacznym zmianom w mikrostrukturze, właściwości anizotropowe. W tym rozdziale przedstawiono również założenia do przyjętego przez Doktoranta modelu matematycznego opisującego strukturę metamateriału pantograficznego. Jest to model

wieloskalowy, w którym na poziomie mikroskali zastosowano opis typu Hencky'ego, na poziomie mezoskali wykorzystywana jest teoria nieliniowych belek Eulera-Bernulliego, natomiast w makroskali zastosowano model homogenizacji zgodnie z teorią drugiego gradientu. Doktorant właściwie uzasadnia koncepcję modelu i słuszność przyjętych założeń.

W rozdz. 5 przedstawiono prace związane z optymalizacją analizowanej struktury pantograficznej, która w założeniu jest wytwarzana z poliamidu PA 2200 (materiał bazujący na PA 12) metodą druku 3D. Zadanie optymalizacyjne polegało na poszukiwaniu struktury pantograficznej o liczbie belek w warstwie oraz sztywności walców łączących belki, zapewniających równomierny rozkład energii potencjalnej układu. Rozpatrywane zagadnienie analizowano dla dwóch przypadków obciążenia: osiowego rozciągania i ścinania. W celu realizacji optymalizacji rozpatrywanej struktury pantograficznej Doktorant opracował własną procedurę iteracyjną w języku C, w której obliczenia w kolejnych iteracjach prowadzone były za pomocą metody elementów skończonych. W tym miejscu należy podkreślić odczuwalny brak schematu ilustrującego ideę funkcjonowania opracowanej procedury iteracyjnej, powiązań pomiędzy poszczególnymi blokami procedury. Zastosowany przez Autora wyłączenie tekstowy opis procedury iteracyjnej istotnie utrudnia czytelnikowi ocenę logiki powiązań pomiędzy poszczególnymi blokami procedury, a z drugiej strony, uniemożliwia Autorowi pochwalenie się zastosowanymi pomysłami i oryginalnymi rozwiązaniami.

Efekty symulacji w przypadku osiowego rozciągania analizowano na podstawie pola naprężenia normalnego, naprężenia ścinającego oraz rozkładu energii potencjalnej w sprężynach obrotowych i sztywności w sprężynach obrotowych. W przypadku testu ścinania analizę prowadzono na podstawie wartości naprężenia ścinającego, oraz rozkładu energii potencjalnej i sztywności sprężyn obrotowych. Za niefortunne uważam prezentowanie wykresów i rysunków z uzyskanymi wynikami w ramach symulacji rozciągania i ścinania na 20 stronach bez ich omówienia. Takowe znajduje się dopiero w następnym rozdziale. Skomentowanie najpierw wyników związanych z przypadkiem rozciągania, a następnie tych dotyczących ścinania niewątpliwie uczyniłoby przekaz czytelniejszym. Kontynuując kwestię omówienia wyników należy zwrócić uwagę, że dokonując oceny rozpatrywanych struktur pantograficznych Doktorant zastosował wyłącznie porównania jakościowe, pomijając zupełnie analizę ilościową. Tymczasem przeglądając rysunki przedstawiające rozkłady naprężenia normalnego dla porównywanych konfiguracji oraz sposobu prowadzenia optymalizacji można zauważyć zróżnicowanie wartości naprężenia. Ta kwestia została zupełnie przemilczana. Inny przykład, na str. 106 (wiersz 16) Autor stwierdza „Dla modelu 14 optymalizowanym zarówno pierwszym i drugim sposobem, uwidoczniał się efekt pęcznienia materiału ...”. Podobny efekt można również zauważyć w przypadku modelu 10 (rys. 44, rys. 47), ale o tym Autor nie wspomina. Identyczna sytuacja pojawia się na str. 107, gdzie Doktorant wspomina o widocznym na rys. 80 i rys. 82 „zwiększaniu wymiaru poprzecznego w czasie rozciągania próbki, typowym dla materiałów auksetycznych”. Można byłoby uniknąć tego typu wątpliwości wprowadzając analizę ilościową. Również w przypadku rozkładu energii potencjalnej można byłoby wprowadzić ilościowy parametr określający np. procentowy udział węzłów, w których wartość energii potencjalnej osiąga wartość w określonym przedziale. Jestem przekonany, że analiza ilościowa w znacznym stopniu wzbogaciła by ocenę porównywanych struktur pantograficznych.

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że cel rozprawy został osiągnięty, tzn. opracowano model matematyczny struktury metamateriału umożliwiającej uzyskanie charakterystyk mechanicznych, szczególnie pożądaných w zastosowaniach biomedycznych. Opracowany model został zaimplementowany do programu komputerowego, co pozwoliło na

przeprowadzenie symulacji numerycznych funkcjonalności metamateriału o strukturze pantograficznej. Do oryginalnych osiągnięć naukowych zaprezentowanych przez Doktoranta należy zaliczyć:

1. Opracowanie wielkoskalowego modelu matematycznego metamateriału o strukturze pantograficznej, w którym na poziomie mikroskali zastosowano opis typu Hencky'ego, na poziomie mezoskali wykorzystywana jest teoria nieliniowych belek Eulera-Bernulliego, natomiast w makroskali zastosowano model homogenizacji wg teorii drugiego gradientu.
2. Opracowanie implementacji modelu do iteracyjnej procedury symulującej pozwalającej na prowadzenie optymalizacji geometrii struktury pantograficznej, tak aby uzyskać jak najbardziej równomierny rozkład energii potencjalnej w całej strukturze.
3. Wykazanie istotnej roli walcowych elementów łączących elementy belkowe struktury pantograficznej w jej zachowaniu się pod wpływem przyłożonego obciążenia.

Należy również podkreślić, że Doktorant jest współautorem dwóch publikacji o tematyce bezpośrednio związanej z tematyką rozprawy. Publikacje ukazały się w *New Achievements in Continuum Mechanics and Thermodynamics: A Tribute to Wolfgang H. Miller* (2019r.) i w *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, legitymującym się IF = 2.600 (2023r.). Publikacje są cytowane w ocenianej rozprawie i stanowią bardzo dobre wsparcie merytoryczne.

Wymienione osiągnięcia stanowią rozszerzenie możliwości modelowania metamateriałów o strukturze pantograficznej. Szczególnie ważna jest możliwość wykorzystania modelu matematycznego do optymalizacji struktur pantograficznych pod kątem ich biomechanicznego dopasowania do współpracy z tkankami miękkimi. Stwarza to możliwość projektowania zindywidualizowanych protez, ortez, czy opatrunków.

Lektura ocenianej rozprawy doktorskiej nasuwa recenzentowi pewne wątpliwości i pytania, które wymagają wyjaśnienia i ustosunkowania się Doktoranta. Poniżej przedstawiam kilka z nich:

1. W rozdz. 4.3.4. przedstawiono badania doświadczalne na rzeczywistych próbkach o strukturze pantograficznej i wykonanych z PA 12 metodą SLS. W przypadku testu rozciągania zastosowano rozciąganie mimośrodowe. Tymczasem symulacje numeryczne przeprowadzono dla rozciągania osiowego. Proszę o wyjaśnienie tej rozbieżności.
2. Czy model matematyczny został zweryfikowany doświadczalnie? Jeśli tak to w jaki sposób?
3. Opisując warunki brzegowe przyjęte w symulacji podano, że „wartość narzuconego przemieszczenia w kierunku rozciągania i ścinania wynosi 0,07 m”. Jakie jest uzasadnienie przyjęcia takiej wartości?
4. W symulacjach komputerowych związanych z testem rozciągania optymalizację prowadzono na dwa sposoby (opisane na str. 83). Omawiając wyniki symulacji w rozdz. 6 Doktorant stwierdza różnice w otrzymanych wynikach w zależności od przyjętego sposobu optymalizacji jednak w konkluzji nie rozstrzyga, który z tych sposobów lepiej oddaje rzeczywistość. A być może oba sposoby mogą znaleźć zastosowanie? Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.

5. W podrozdziale 6.2. zatytułowanym „Dyskusja” zamieszczono pewne ogólne sformułowania, które są raczej podsumowaniem uzyskanych wyników i ich analiz, a nie dyskusją. Brakuje odniesienia wyników i spostrzeżeń uzyskanych przez Doktoranta do dotychczasowego stanu wiedzy. Proszę o ustosunkowanie się do tej kwestii.

Przedstawione uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na moją pozytywną ocenę merytoryczną osiągnięć Doktoranta opisanych w dysertacji.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska stanowi udokumentowanie ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązania oryginalnego problemu naukowego. Jednocześnie stwierdzam, iż rozprawa doktorska Pana Rafała Drobnickiego pt.: „Modelowanie i badanie mikrostruktur wybranych metamateriałów do zastosowań w biomechanice” jest osiągnięciem naukowym i spełnia wymagania ustawy. W związku z powyższym stawiam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

