

Dr hab. inż. Dariusz M. Perkowski, prof. PB

Białystok, 14.10.2024 r.

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351

Email: d.perkowski@pb.edu.pl, tel. +48 571 443 034

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Burlaga
„Analiza właściwości mechanicznych struktur auksetycznych przy obciążeniach
dynamicznych”

wykonana pod opieką naukową:

Pana Promotora Dr. hab. Tomasza Stręka, prof. Politechniki Poznańskiej

oraz Pana Promotora pomocniczego Dr inż. Pawła Fritzковского

1. Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa CISZAKA, prof. PP o numerze DIM.075.197.2024 z dnia 1 lipca 2024.

2. Opis zawartości pracy:

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy modelowania oraz projektowania struktur o ujemnym współczynniku Poissona. Celem recenzowanej rozprawy doktorskiej było zbadanie zachowania przy obciążeniu dynamicznym struktur: struktura pierścieniowa z jednorodnym wypełnieniem, struktura pierścieniowa z komórkami typu re-entrant oraz struktura pierścieniowa z komórkami typu plaster miodu. Doktorant podjął się tematyki trudnej, a jednocześnie aktualnej, o dużych możliwościach aplikacyjnych w zastosowaniach inżynierskich, w tym tłumiki drgań poprzecznych i skrętnych, opon bezdętkowych, różnego rodzajów dysków. Wykazał się dobrą znajomością literatury związanej z badaną problematyką,

przygotował i przeprowadził wiele symulacji numerycznych przy użyciu Metody Elementów Skończonych związanych z zachowaniem dynamicznych struktur auksetycznych w odpowiedzi na wymuszenie skokowe siłą lub momentem. Do opracowania modeli geometrycznych Doktorant przygotował autorskie oprogramowanie w języku Python. Ponadto Doktorant zaproponował metodę wytwarzania tego typu struktur przy użyciu technik addytywnych. Wykonał również prototypy opracowanych struktur.

Struktury o ujemnym współczynniku Poissona stosowane są w różnych dziedzinach inżynierii tj. medycynie, lotnictwie, czy też w inżynierii wojskowej w celu zapewnienia odpowiedniej odpowiedzi dynamicznej na wymuszenie. Wymagania stawiane tego typu strukturom dotyczą przeważnie wytrzymałości, odporności na przebicie, zadanej odpowiedzi na wymuszenie dynamiczne jak to jest w przypadku tłumików różnego rodzaju, przy bardzo niskiej masie. Zastosowanie rdzeni strukturalnych pozwala spełnić te wymagania. Niemniej jednak wymagają one badań oraz opracowywania efektywnych technologii wytwarzania niejednokrotnie bardzo skomplikowanych struktur. Jak słusznie Doktorant zauważa użycie rdzeni akustycznych do tłumienia drgań na wymuszenie dynamiczne może skutkować znacznym polepszeniem charakterystyki dynamicznej projektowanych elementów konstrukcyjnych.

Doktorant w swojej pracy postawił sobie za cel zbadanie zachowania struktur pierścieniowych pod wpływem obciążeń dynamicznych i ten cel udało się w pełni zrealizować. W badaniach kluczowym elementem było zrozumienie, jak takie struktury, szczególnie auksetyczne, zachowują się pod wpływem różnych sił, takich jak siła pionowa, moment skręcający czy dynamiczne uderzenia. Pierwszy z celów – analiza wpływu siły pionowej – został osiągnięty poprzez przeprowadzenie symulacji numerycznych. Doktorant dobrze przygotował te badania i jasno pokazał, jak struktury reagują na takie obciążenia. Wyniki te są przydatne w projektowaniu konstrukcji narażonych na dynamiczne siły w rzeczywistych warunkach. Kolejnym krokiem było zbadanie, jak moment skręcający wpływa na te struktury. Doktorant również w tej części zrealizował cel pracy, pokazując dokładnie, jak zmienia się kąt skręcenia i co to oznacza dla stabilności struktury. Wyniki te mogą mieć znaczenie dla praktycznych zastosowań, szczególnie tam, gdzie konstrukcje narażone są na złożone, wielokierunkowe obciążenia. Trzeci cel dotyczył tego, jak struktury radzą sobie z uderzeniami. Dzięki odpowiednio przygotowanym symulacjom doktorant wykazał, że struktury auksetyczne dobrze pochłaniają energię, co jest bardzo cenne w kontekście projektowania elementów zabezpieczających, na przykład w samochodach. Ostatni cel – porównanie struktur o komórkach typu re-entrant i plastra miodu – także został zrealizowany. Doktorant przedstawił

wyniki, które pokazują, które struktury lepiej radzą sobie z obciążeniami dynamicznymi. Takie porównanie może być bardzo przydatne dla inżynierów projektujących materiały i konstrukcje o wysokiej wytrzymałości. Podsumowując, doktorant zrealizował wszystkie cele swojej pracy. Uzyskane wyniki mają realny potencjał do zastosowania w przemyśle, szczególnie tam, gdzie potrzebne są materiały o wysokiej odporności na dynamiczne obciążenia.

W pracy ponadto Autor sformułował tezę badawczą: *„Przeprowadzone badania udowadniają, że struktury auksetyczne charakteryzują się zdolnością do tłumienia drgań w większym stopniu niż materiały konwencjonalne. Potencjalnie, struktury pierścieniowe stworzone na podstawie już istniejących struktur powinny również charakteryzować się taką zdolnością i wykazywać lepsze właściwości niż struktury pierścieniowe powstałe na podstawie struktur o dodatnim współczynniku Poissona. Implikuje to możliwość zastosowania tych struktur przy absorpcji energii mechanicznej przy różnorodnych obciążeniach dynamicznych. Bezpośrednio z powyższej tezy wynika, że możliwym byłby jest zastosowanie tych struktur jako elementów bezpieczeństwa lub tłumiących w różnych dziedzinach inżynierii.”*

Określony cel pracy oraz jej zakres w ocenie recenzenta jest jak najbardziej prawidłowy i zasadny.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi opracowanie zawierające 96 stron, zaś zasadnicza część pracy zawarta jest na 82 stronach, pozostałe strony to bibliografia. Praca podzielona jest na 9 rozdziałów. Praca zawiera streszczenie w języku polskim oraz angielskim oraz spis literatury liczący 188 pozycje w tym artykuły i monografie, które zostały przez Doktoranta wcześniej zacytowane w rozprawie doktorskiej.

Rozdział 2: „Materiały auksetyczne”. Rozdział ten stanowi wstęp do pracy, w którym omówiono historyczne tło związane z materiałami auksetycznymi oraz ich właściwościami mechanicznymi. Przedstawiono przegląd literatury dotyczący współczynnika Poissona, główne typy struktur auksetycznych oraz aktualny stan wiedzy w tej dziedzinie. Autor zwraca uwagę na potencjalne zastosowania takich materiałów w inżynierii, szczególnie pod kątem tłumienia drgań i absorpcji energii w warunkach dynamicznych. Nasuwa się tu pytanie co oznacza sformułowanie: potencjalne zastosowania takich materiałów w inżynierii? Zdanie jest zbyt ogólne.

Rozdział 3: „Zastosowane metody obliczeniowe”. W trzecim rozdziale omówiono metody obliczeniowe wykorzystane w pracy. Rozpoczęto od krótkiego przeglądu historii

metody elementów skończonych (MES), a następnie przedstawiono podstawowe równania opisujące sprężystość materiałów, które zostały wykorzystane w symulacjach. Autor szczegółowo opisał różne metody numeryczne stosowane do analizy modalnej i do rozwiązywania zagadnień dynamicznych. Zwrócono uwagę na zalety i ograniczenia poszczególnych metod, w tym metody superpozycji modalnej.

Rozdział 4: „Model obliczeniowy”. Kolejny rozdział skupia się na algorytmach opracowanych przez Doktoranta do generowania struktur pierścieniowych o różnej geometrii komórek elementarnych. Mgr Burlaga wyjaśnia sposób modelowania struktur w programie ANSYS Mechanical oraz omawia parametry materiałowe użyte w symulacjach, takie jak model nieliniowy materiału neo-Hookeana stosowany do opisanie zachowania struktury pod obciążeniem.

Rozdział 5: „Analiza oddziaływania siły pionowej”. W tym rozdziale przedstawiono wyniki pierwszych symulacji numerycznych. Zbadano wpływ sił pionowych na zachowanie struktur pierścieniowych, analizując różne scenariusze symulacji. Autor podzielił analizy na trzy typy: badanie struktury pierścieniowej z jednorodnym rdzeniem, badanie wpływu grubości żeber oraz kształtu komórek na zachowanie struktur pod dynamicznymi obciążeniami.

Rozdział 6: „Wyniki analizy działania siły wzdłużnej”. Szósty rozdział jest kontynuacją wyników analiz, ale dla obciążeń poziomych. Struktura rozdziału jest analogiczna do poprzedniego, z tym, że zmieniono kierunek obciążeń. Autor szczegółowo omówił wyniki trzech typów analiz, skupiając się na zachowaniu struktur w czasie dynamicznych obciążeń.

Rozdział 7: „Wyniki analizy działania momentu obrotowego”. Ostatni rozdział dotyczy symulacji zachowania struktur pod obciążeniem momentem skręcającym. Autor przeprowadził analizy dynamiczne dla trzech przypadków, badając zachowanie struktur w różnych warunkach częstotliwościowych. Na koniec rozdziału zawarto krótkie podsumowanie wyników.

Rozdział 8: „Wyniki analizy uderzenia pocisku”. Ostatni rozdział pracy zawiera wyniki symulacji uderzeń w struktury. Autor przedstawił zmiany geometrii wynikające z tych obliczeń oraz omówił wpływ różnych parametrów, takich jak prędkość i masa elementu uderzającego, na zachowanie struktury.

Na zakończenie pracy, autor przedstawia wnioski i podsumowanie oparte na wynikach uzyskanych dla różnych przypadków oraz zawiera bibliografię, która odnosi się do istotnych źródeł literaturowych. Praca ta stanowi kompleksowe podejście do badania odpowiedzi

dynamicznej struktur auksetycznych na wymuszenia proste siłą, momentem oraz uderzenie. Autor w podsumowaniu i wnioskach zaproponował i przedstawił prototypy opracowanych struktur.

3. Oryginalność pracy

Praca doktorska przedstawia badania przeprowadzone przez Doktoranta dotyczące pierścieniowych struktur auksetycznych. Autor opisuje swoje badania oparte na symulacjach komputerowych przy użyciu oprogramowania komercyjnego ANSYS Mechanical.

Jednym z ważniejszych osiągnięć tej pracy jest zrozumienie wpływu współczynnika Poissona na odpowiedź dynamiczną struktur auksetycznych. Wyniki badań numerycznych wskazują na istotną rolę tego parametru i sugerują, że rdzenie o ujemnych wartościach współczynnika Poissona mogą powodować lepsze tłumienie drgań. Ten wniosek ma istotne znaczenie i może mieć praktyczne zastosowanie w projektowaniu elementów o zadanych charakterystykach dynamicznych.

Kolejnym istotnym aspektem pracy jest opracowanie algorytmu generowania struktur przy użyciu autorskiego oprogramowania w języku Python. Niemniej jednak w pracy nie zawarto kodu, który recenzent mógłby zweryfikować. Ponadto Autor porównywał odpowiedź dynamiczną elementu wykonanego ze struktury auksetycznej oraz z ich nieauksetycznymi odpowiednikami. Autor wykazał, że struktury auksetyczne wykazują większą zdolność do tłumienia drgań, co stanowi ważne osiągnięcie i może być użyteczne w przemyśle.

Podsumowując, praca doktorska wnosi znaczny wkład w projektowanie konstrukcji struktur z ujemnym współczynnikiem Poissona. Jej wyniki stanowią solidną podstawę do dalszych badań i mogą mieć praktyczne zastosowanie w projektowaniu elementów, ze szczególnym uwzględnieniem odpowiedzi dynamicznej.

4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się podstawowym charakterem badań, niemniej jednak uzyskane wyniki mają potencjał do praktycznego wykorzystania do projektowania konstrukcji wymagających zastosowania struktur auksetycznych. Ponadto, uzyskane wyniki mają istotny wpływ na stan wiedzy dotyczącej modelowania i projektowania struktur o ujemnym współczynnikiem Poissona, a także generują nowe kierunki badań i tym samym wywierają wpływ na rozwój tej dziedziny wiedzy.

Ponadto, zaproponowane podejście do modelowania i projektowania elementów tłumiących może być użyteczne w różnych aplikacjach inżynierskich np. konstrukcje różnego typu mechanizmów o zadanych właściwościach dynamicznych. Jest to szczególnie ważne z uwagi na stawiane coraz to wyższe wymagania materiałom oraz konstrukcjom inżynierskim.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji praca jest oryginalna i wartościowa, napisana z wiarą i przejrzystością, zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analiz zagadnień odpowiedzi dynamicznej struktur auksetycznych stanowią istotny wkład do problematyki naukowej związanej z rozwojem modelowania ośrodków o strukturze auksetycznej, jak i samych auksetyków. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest dobra. Rozprawa doktorska porusza ważne problemy i przedstawia oryginalne i wartościowe rezultaty. Opracowane nowe modele numeryczne przy użyciu metody elementów skończonych podparte wnioskami oraz przygotowanym prototypem pozwalają twierdzić, iż zaproponowane podejście oraz uzyskane wyniki mogą znaleźć szerokie uznanie. Ponadto opracowany przez Doktoranta algorytm generowania geometrii nowych struktur można uznać za wartościowy. Pozwala to stwierdzić, iż postawiona teza badawcza została potwierdzona, a materiały auksetycznym mogą z powodzeniem być stosowane w rozwiązaniach inżynierskich.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem są następujące:

1. Dlaczego w pracy nie zawarto kodu a podano jedynie algorytmu pozwalający zrozumieć etapy generowania nowych struktur auksetycznych?
2. Czy już na etapie generacji struktury można określić efektywny współczynnik Poissona?
3. Dlaczego w pracy podano jedynie ogólne wartości stałych materiałowych nie podając jaki jest to dokładnie materiał?
4. W pracy brakuje podania szczegółowo warunków mechanicznych.
5. Czy Autor mógłby skomentować założone współczynniki Poissona od dodatnich do ujemnych w kontekście generacji i walidacji z modelem numerycznym?

Praca jest napisana poprawnie pod względem językowym oraz redakcyjnym. Niemniej jednak w pracy można znaleźć tzw. literówki oraz błędy redakcyjne.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dziedziny nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669). **Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Bartłomieja Burlaga do publicznej obrony.**

W związku z powyższym przedstawiam pozytywną konkluzję i uprzejmie wnoszę o przyjęcie przedmiotowej rozprawy doktorskiej oraz wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Bartłomieja Burlaga do kolejnych etapów przewodu doktorskiego - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 roku poz. 478 ze zm.).