

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

Białystok, 4 września 2023 r.

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Ul. Wiejska 45C, Białystok 15-351

Email: [d.perkowski@pb.edu.pl](mailto:d.perkowski@pb.edu.pl), tel. +48 571 443 034



**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Michalskiego**  
**„Odporność na przebicie płyty warstwowej z rdzeniem auksetycznym”**

***wykonana pod opieką naukową:***

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

**1. Podstawa opracowania recenzji:**

Pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa CISZAKA, prof. PP o numerze DIM.075.329.2023 z dnia 4 lipca 2023.

**2. Opis zawartości pracy:**

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy modelowania oraz badań doświadczalnych płyt warstwowych z rdzeniem strukturalnym. Do badań i analizy porównawczej zostały przyjęte dwa rodzaje rdzeni tj. auksetycznym oraz nieauksetycznym. Doktorant podjął się tematyki trudnej, a jednocześnie aktualnej, o dużych możliwościach aplikacyjnych w zastosowaniach inżynierskich. Wykazał się dobrą znajomością literatury związanej z badaną problematyką, przygotował i przeprowadził wiele symulacji numerycznych przy użyciu Metody Elementów Skończonych związanych z przebijaniem płyt warstwowych. Ponadto Doktorant przeprowadził testy doświadczalne pozwalające zweryfikować przyjęte modele.

Kompozyty przekładkowe stosowane są w różnych dziedzinach inżynierii tj. w lotnictwie lub inżynierii wojskowej. Wymagania stawiane tego typu materiałom dotyczą przeważnie

wytrzymałości, 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 płyt warstwowych może skutkować znacznym polepszeniem właściwości w porównaniu do klasycznych rdzeni o właściwościach nieauksetycznych.

W tym celu sformułował następujące cele badawcze tj. zbadanie odporności na przebicie płyt warstwowych z rdzeniem auksetycznym z uwzględnieniem różnych struktur rdzenia, które dotychczas nie były badane pod kątem zastosowania w kompozytach przekładkowych o zwiększonej odporności na przebicie. Drugim celem w pracy było porównanie uzyskanych wyników dla rdzenia auksetycznego oraz nieauksetycznego. Kolejnym celem pracy był dobór parametrów geometrycznych wybranego typu struktury auksetycznej na rdzeń kompozytu warstwowego. Ostatni cel pracy związany był z uproszczoną weryfikacją doświadczalną.

W pracy ponadto Autor sformułował tezę badawczą: *„Płyty warstwowe z rdzeniem w postaci struktury auksetycznej mają zwiększoną odporność na uderzenia z przebiciem w stosunku do płyt z rdzeniem nieauksetycznymi. Czyni to je potencjalnymi kandydatami do zastosowania w lekkich konstrukcjach ochronnych i wzmacniających. Mogą one być wykorzystywane w inżynierii mechanicznej, między innymi jako elementy osłon balistycznych w konstrukcjach z branży wojskowej i lotniczej. Ponadto, zmieniając efektywny współczynnik Poissona poprzez odpowiedni dobór parametrów geometrycznych struktur, można uzyskać większą poprawę odporności płyty warstwowej na przebicie.”*

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

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi opracowanie zawierające 110 stron, zaś zasadnicza część pracy zawarta jest na 106 stronach, pozostałe strony to bibliografia. Praca podzielona jest na 9 rozdziałów. Praca zawiera streszczenie w języku polskim oraz angielskim oraz spis literatury liczący 63 pozycje w tym artykuły i monografie, które zostały przez Doktoranta wcześniej zacytowane w rozprawie doktorskiej.

Rozdział pierwszy „WSTĘP” zawiera wprowadzenie do problematyki rozprawy doktorskiej. Omówione zostały tu podstawowe wady i zalety płyt warstwowych. Zwrócono również uwagę na możliwość zastosowania rdzeni o ujemnym efektywnym współczynniku Poissona, który

charakterystyczny jest dla auksetyków. W rozdziale tym przedstawiono narzędzia numeryczne przyjęte do symulacji nieliniowych problemów dynamiki kompozytów przekładkowych. Do obliczeń przyjęto Metodę Elementów Skończonych a użyte oprogramowanie to Abaqus 2022 oraz COMSOL Multiphysics. Ponadto wszystkie analizy numeryczne były przeprowadzane w ramach grantu obliczeniowego nr 577 w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym (PCSS). Omówiono również cele oraz postawioną tezę pracy doktorskiej. Rozdział ten zawiera także opis układu pracy.

Rozdział 2 zatytułowany „PŁYTY WARSTWOWE” dotyczy przeglądu literatury. Doktorant na wstępie przedstawia tutaj budowę i rodzaje płyt kompozytowych. Podrozdział 2.2 zawiera omówienie podstawowych zależności stosowanych do płyt. W kolejnym podrozdziale 2.3 Zastosowania zostały omówione wady, zalety oraz zastosowania płyt warstwowych. Autor zwrócił uwagę, iż najważniejszą cechą elementów wykonanych z kompozytów przekładkowych jest ich bardzo dobry stosunek masy do nośności. Kolejną cechą pozwalającą rozwijać i polepszać właściwości mechaniczne, zmniejszać masę, termoizolacyjność oraz zdolność do tłumienia drgań. Podrozdział 2.4 przedstawia pokrótce metody wytwarzania rdzeni wykonanych z metalu. Wskazuje, że rdzeń może być wykonany innymi metodami, jak na przykład rdzeń polimerowy, który można wytworzyć poprzez klasyczne metody wyłaczania lub wtryskiwanie. Zaznacza, iż metody przyrostowe mogą być przydane do wykonywania rdzeni kompozytów przekładkowych i pozwolą na wytworzenie bardzo skomplikowanych struktur.

Rozdział 3 „AUKSETYKI” poświęcony jest w całości omówieniu auksetyków, ich charakterystyce, rodzajów struktur, zastosowań oraz odporności na obciążenia udarowe. Podrozdział 3.1 Charakterystyka poświęcony jest omówieniu podstawowego fenomenu, który powstaje w strukturach auksetycznych związanemu z ujemnym współczynnikiem Poissona. Efekt ten uzyskuje się przez odpowiednie ukształtowanie komórki podstawowej. Podstawowymi strukturami auksetycznymi są: double arrowhead, re-entrant, heksa-chiralna, anty-tetra-chiralna oraz rotating squares. Można spotkać, również struktury auksetyczne typu n-star. Ponadto w rozdziale tym Doktorant dokonał przeglądu literatury omawiając w głównej mierze zastosowania struktur auksetycznych oraz ich odporność na obciążenia udarowe. Podsumowując Doktorant stwierdził, że w oparciu o przegląd literatury istnieje luka badawcza związana z niewielką ilością prac związanych z symulacją przebiega płyt kompozytowych. Zaznaczył także, że brakuje porównań otrzymanych wyników do kompozytów przekładkowych z rdzeniem nieauksetycznym.

Rozdział 4 związany jest omówieniem zastosowanych metod obliczeniowych w pracy. Przyjętą metodą do symulacji numerycznych procesu przebijania pociskiem była Metoda Elementów Skończonych. W tym rozdziale omawiane są szczegóły użytych metod numerycznych, w tym ogólny opis metody elementów skończonych oraz jej zastosowanie w analizach dynamicznych. Autor przedstawia również model materiałowy Johnsona-Cooka, który został wykorzystany we wszystkich analizach dynamicznych.

Następnie, rozdziały piąty, szósty i siódmy skupiają się na analizach numerycznych przeprowadzonych na różnych rodzajach płyt z rdzeniem auksetycznym. Autor porównuje wyniki dla różnych geometrii rdzenia i różnych warunków obciążenia, w tym uderzeń pod różnymi kątami i w różnych miejscach płyty. Dokładnie analizuje również wpływ różnicy mas między strukturami auksetycznymi i nieauksetycznymi na wyniki.

Rozdział ósmy opisuje eksperymenty fizyczne przeprowadzone na próbkach uzyskanych techniką przyrostową z żywicy. Autor wykorzystuje te badania do potwierdzenia wyników uzyskanych w analizach numerycznych. Wyniki prezentowane w tym rozdziale mają dobrą zgodność jakościową z wynikami uzyskanymi w przypadku zastosowania klasycznej metody elementów skończonych. Zaproponowane podejście ma bardzo duże znaczenie aplikacyjne do modelowania ośrodków warstwowych z rdzeniem klasycznym jak i auksetycznym.

Na zakończenie pracy, autor przedstawia wnioski oparte na wynikach uzyskanych dla różnych przypadków oraz zawiera bibliografię, która odnosi się do istotnych źródeł literaturowych. Praca ta stanowi kompleksowe podejście do badania odporności na przebicie płyt warstwowych z rdzeniem auksetycznym, łącząc analizy numeryczne i eksperymentalne w celu zgłębienia tej problematyki.

### **3. Oryginalność pracy**

Praca doktorska przedstawia badania przeprowadzone przez doktoranta w dziedzinie odporności na przebicie płyt warstwowych z rdzeniem auksetycznym. Autor dokładnie opisuje swoje badania, wykorzystując zarówno symulacje komputerowe, jak i testy fizyczne, aby zbadać różne aspekty odporności na przebicie.

Jednym z ważniejszych osiągnięć tej pracy jest zrozumienie wpływu współczynnika Poissona na odporność na przebicie. Wyniki badań numerycznych wskazują na istotną rolę tego parametru i sugerują, że rdzenie o ujemnych wartościach współczynnika Poissona mogą być

bardziej odporne na przebicie. Ten wniosek ma istotne znaczenie i może mieć praktyczne zastosowanie w projektowaniu elementów ochronnych.

Kolejnym istotnym aspektem pracy jest porównanie struktur auksetycznych z ich nieauksetycznymi odpowiednikami. Autor wykazał, że struktury auksetyczne wykazują większą odporność na przebicie w różnych warunkach, co stanowi ważne osiągnięcie i może być użyteczne w przemyśle.

Dodatkowo, doktorant eksperymentował z redukcją efektywnego współczynnika Poissona w przypadku struktury 4-star auksetycznej, co przyniosło jeszcze lepsze wyniki w kwestii odporności na przebicie. To ciekawe podejście może znaleźć zastosowanie w praktyce.

Potwierdzenie wyników symulacji testami fizycznymi stanowi ważny punkt weryfikacji obliczeń numerycznych.

Podsumowując, praca doktorska doktoranta jest godna uwagi i wnosi istotny 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 odpornych na przebicie.

#### **4. Wartości użytkowe pracy**

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się podstawowym charakterem badań, niemniej jednak uzyskane wyniki wyróżniają się potencjałem praktycznego wykorzystania do obliczeń oraz projektowania konstrukcji wymagających zastosowania kompozytów warstwowych z rdzeniem strukturalnym. Ponadto, zyskane wyniki mają istotny wpływ na stan wiedzy dotyczącej modelowania i projektowania kompozytów warstwowych z rdzeniem 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 ochronnych odpornych na przebicie może być użyteczne w różnych aplikacjach inżynierskich np. konstrukcje ochronne. 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 zwięźle i przejrzysto, zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analiz zagadnień przebicia stanowi istotny wkład do problematyki naukowej związanej z rozwojem modelowania ośrodków o strukturze warstwowej. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest wysoka. Rozprawa doktorska porusza ważne problemy i przedstawia oryginalne i wartościowe rezultaty. Opracowane nowe modele numeryczne przy użyciu metody elementów skończonych podparte testami fizycznymi pozwalają twierdzić, iż zaproponowane podejście oraz uzyskane wyniki mogą znaleźć szerokie uznanie. Pozwala to stwierdzić, iż postawiona teza badawcza została potwierdzona, a płyty z rdzeniem auksetycznym mogą z powodzeniem być stosowane w elementach ochronnych odpornych na przebicie.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem są następujące:

1. Dlaczego w przypadku kompozytów z rdzeniem o strukturze plastra miodu przyjęto tylko orientację równoległą do przekładek?
2. Dlaczego w pracy pominięto analizę kolejnych etapów niszczenia podczas przebicia?
3. W pracy brakuje analizy wyników w kontekście warstwy przejściowej pomiędzy rdzeniem a przekładkami.
4. Czy Autor mógłby skomentować w jaki sposób modelowano zjawisko wyboczenia i jego wpływ na uzyskane wyniki.

Praca jest napisana poprawnie pod względem językowym oraz redakcyjnym. Niemniej jednak w pracy znajdują się 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. Jakuba Michalskiego 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. Jakuba Michalskiego 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.).

**Dariusz Mariusz  
Perkowski**

Elektronicznie podpisany  
przez Dariusz Mariusz  
Perkowski  
Data: 2023.09.08 13:24:58  
+02'00'