

Dr hab. inż. Stanisław Kuciel, prof. PK

10 czerwiec 2023 r.

Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki
Politechnika Krakowska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Paweł Stabli

pt. „Experimental-numerical analysis of the mosaic pattern influence on strength of filament-wound CFRP composite structures”

promotor rozprawy: dr hab. inż. Wojciech Błażejowski, prof. Pol. Wrocławskiej,

drugi promotor prof. Lothar Kroll (Chemnitz University of Technology)

promotor pomocniczy dr hab. inż. Grzegorz Lesiuk

wykonanej na zlecenie Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej z dnia 9 marca 2023 r. przedstawionej w piśmie prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego (W10/D/24?2023)

1. Aktualność przedmiotu rozprawy i rozpoznawalność naukowa mgr inż. Pawła Stabli

Tematyka rozprawy doktorskiej jest aktualna i istotna dla przemysłu zbiorników ciśnieniowych i butli stosowanych w przemyśle lotniczym i samochodowym i ma szczególne znaczenie w rozwijaniu wiedzy o gospodarce opartej na wodorze. Rozprawa doktorska koncentruje się na przeglądzie dostępnych rozwiązań teoretycznych, a następnie na ich weryfikacji eksperymentalnej poprzez wycinanie cylindrycznych próbek kompozytowych w różnych stanach naprężenia ze zbiorników wytworzonych metoda nawijania. Podjęty temat badawczy ma charakter interdyscyplinarny i łączy w sobie zagadnienia z takich dziedzin jak inżynieria mechaniczna, inżynieria materiałowa czy informatyka techniczna i matematyka.

Dorobem naukowy publikacyjny i badawczy Autora jest znaczący i wynosi 13 artykułów z impact factorem, a liczba Hircha wg. web of science i bazy Scopus wynosi 5 przy 88 cytowaniach wg. stanu na dzień 30 maja 2023 r.

2. Ogólna charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Oceniana rozprawa obejmuje 142 strony maszynopisu w tym 108 stron rozprawy, spis rysunków i tabel oraz cytowanej literatury, który zawiera 142 pozycje. Uzupełnia tekst aneks, który na 14 strony pokazuje zastosowane procedury programowe.

Cytowana w rozprawie literatura zajmuje 21 stron. Rozprawa podzielona jest na 3 części i posiada 16 rozdziałów i 30 podrozdziałów. Zaprezentowany w 4 pierwszych rozdziałach przegląd literatury i wiedzy na temat mechaniki kompozytów jest wszechstronny i potwierdza aktualność przeprowadzonych badań oraz doświadczenie i wiedzę doktoranta.

Główny cel badań przedstawiony jest w tytule pracy i ma na celu sprawdzenie wpływu wzoru mozaikowego i kąta nawinięcia rur kompozytowych wykonanych w technologii nawijania włókien zarówno w ujęciu eksperymentalnym, jak i numerycznym. Dla tak postawionego celu badań konieczny był podział pracy na obszerny wstęp teoretyczny oraz zbudowanie modelu numeryczny metodą elementów skończonych, w którym zawarty jest wzór mozaikowy. Ponieważ parametr ten znacząco wpływa na rozkład materiału w kompozycie opracowano własny wbudowany skrypt ułatwiający intensywne obliczenia numeryczne.

W postępujących po wprowadzeniu rozdziałach 1-2 opisano mechanikę materiałów kompozytowych z uwzględnieniem definicji materiału anizotropowego i ortotropowego oraz podstawy klasycznej teorii laminatów. W rozdziale 3 wybrano do analizy dwa zdefiniowane kryteria zniszczenia materiałów kompozytowych - kryterium Tsai-Hill oraz Hashin. Następnie dokonano przeglądu literatury z zakresu badań kompozytowych rur nawijanych z uwzględnieniem wzoru mozaikowego przy różnych stanach obciążenia. W rozdziale 4 dokonano przeglądu rozwiązań w zakresie uwzględniania wzorów mozaikowych w obliczeniach numerycznych metodą elementów skończonych, wyodrębniono trzy strategie modelowania: podejście warstwowe lub subwarstwowe, podejście z wzorami mozaikowymi oraz podejście z wzorami mozaikowymi z uwzględnieniem linii przeplotów. W tym rozdziale scharakteryzowano również metodę emisji akustycznej i jej zastosowanie w badaniach materiałów kompozytowych. Prawidłowo przeprowadzono i metodycznie zaplanowano badania eksperymentalne. W poprawny technologicznie sposób wykonano odpowiednią ilość próbek dla weryfikacji obliczeń numerycznych. Różne konfiguracje wynikające z mozaikowego wzoru i uzwojenia kąt były badane w określonych warunkach obciążenia (na przykład ściskanie promieniowe i ściskanie osiowe, wynikające z przeglądu literatury). Prace doświadczalne i porównania teoretyczne rozwinięto dodatkowo wzbogaconp o metody

pomiarowe, np. akustyczne emisję i mikroskopię w celu przeprowadzenia pogłębionej analizy rozwiązywanego problemu. Poprawnie przeprowadzono analizę krytyczną i sformułowano wnioski dotyczące wpływu wzoru mozaikowego na nawiniętych rur kompozytowych o różnych kątach nawijania i przy różnym obciążeniu. Największym osiągnięciem rozprawy jest udane połączenie badań teoretycznych i eksperymentalnych zbiorników wytwarzanych metodą nawijania, co szczegółowo opisano w rozdziale 6. Przeprowadzone liczne testy mechaniczne dla pozyskania stałych materiałowych przeprowadzane są poprawnie i z dużą starannością, szczególnie jeśli chodzi o ich wizualizację, dokładny opis schematów i stanowisk laboratoryjnych. Efektem tego było podsumowanie zawarte w podrozdziale 6.3.5 pozwalające na pozyskanie właściwości inżynierskich dzięki wykonanym badaniom wytrzymałościowym kompozytów z włóknem węglowym na osnowie żywicy epoksydowej z jednokierunkowego płaskiego laminatu nawijanego włóknem. Autor we wnioskach podkreśla dużą zgodność obliczeń z badaniami doświadczalnymi, niemniej w kilku sytuacjach ta zgodność nie jest taka oczywista i na pewno jest to dobry materiał do próby kolejnych symulacji i obliczeń. Np. na rysunkach 67 czy 68 krzywe przemieszczenia siły na podstawie danych eksperymentalnych i numerycznych dla kąta nawinięcia 55° i 75° próbki poddane ścisnaniu promieniowemu wykazują istotne różnice przy maksymalnych obciążeniach. Duża zgodność występuje w zakresie liniowo-sprężystym natomiast przy maksymalnych obciążeniach rezultaty badań są różne od obliczeń numerycznych. Ta rozbieżność może wskazywać, że w obszarze obciążeń krytycznych należy zastosować bardziej rozszerzony model materiału, bazujący na danych eksperymentalnych wyznaczonych w tym zakresie. Część eksperymentalna została bardzo udanie rozszerzona badania emisji akustycznej. Przetestowano i porównano dziewięć konfiguracji, korzystając z takich wskaźników jak: właściwości mechaniczne: wytrzymałość na ścisnienie i skorygowana energia pochłonięta. Przeprowadzono dodatkowo obserwacje makroskopowe i mikroskopowe w celu identyfikacji wad i przyczyn pękania. W podsumowaniu Autor zwraca słusznie uwagę na możliwość rozszerzenia zaproponowanej metody badawczej o bardziej skomplikowane struktury, otrzymane w wyniku nawijania włókien oraz na potrzebę zastosowania bardziej zaawansowanych modeli teoretycznych i symulacji komputerowych szczególnie dla przewidywania naprężeń w obszarze maksymalnego wyciężenia kompozytu.

3. Uwagi szczegółowe

Przedstawione poniżej uwagi czy pytania krytyczne nie pomniejszają wartości pracy. Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Stabli jest zgodna z aktualnym kierunkiem

teoretycznych i eksperymentalnych badań cylindrycznych próbek kompozytowych wykonanych metodą nawijania. Przedstawiony na rysunku 35-28 wykresy Krzywe przemieszczenia siły dla rur z kolejnymi mozaikami wskazują na dużą powtarzalność badań eksperymentalnych oraz sporą niezgodność funkcji numerycznej w okolicach obciążeń krytycznych, proszę o podanie przyczyny i próbę zaproponowania jakiegoś rozwiązania. Rysunek 48 jest trochę nieczytelny, warto w przyszłości wykorzystać całą szerokość strony. Rysunek 75 Mikrofotografia SEM pola przekroju okazu jest nieczytelny, znacznie lepiej prezentuje się następny rysunek 76. Sposób prezentacji cytowanej literatury jest niejednorodny i czasem trafiają się pozycje, które należałoby dokładniej opisać i wskazać cytowany fragment np. pierwsze trzy pozycje to całe książki, należałoby wskazać przynajmniej rozdziały.

4. Podsumowanie

Zarówno **przedłożona rozprawa doktorska, jak i dorobek publikacyjny, stanowią znaczny wkład Autora w rozwój inżynierii mechanicznej, a ściślej wiedzy o mechanice nawijanych kompozytów polimerowych.** Całokształt dorobku naukowego, a także zastosowane metody obliczeniowe i wykonane eksperymenty, świadczą pozytywnie o dojrzałości naukowej, oraz dogłębnej wiedzy Autora w badanej dziedzinie i zdolności do samodzielnego zaplanowania i przeprowadzenia eksperymentu. Reasumując, recenzowana rozprawa doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego. Autor podjął w niej problem, który ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego.. Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawy stawiane rozprawom na stopień doktora nauk technicznych określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku. **Niniejszym wnoszę do Rady Naukowej dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Politechniki Wrocławskiej o przyjęcie rozprawy, dopuszczenie Autora, mgr inż. Pawła Stabli, do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie mu stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

Stanisław Kuciel