

Prof. dr hab. inż. Paweł Pyrzanowski
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24
00-665 Warszawa

Warszawa, 3.01.2026

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Balcer

Podstawą do wykonania recenzji pracy doktorskiej są: *Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późniejszymi zmianami), Uchwała nr 2/11/2025/2026 Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich z dnia 4.11.2025 oraz zawiadomienie dr. hab. inż. Łukasza Muślewskiego, prof. PBS – Przewodniczącego RND inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich nr 2/NB.520.5.2025 z dnia 5.11.2025.

1. Układ pracy i uwagi ogólne

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Katarzyny Balcer pod tytułem: „Analiza właściwości mechanicznych termoplastycznych laminatów metalowo-włóknistych zbrojonych tkaniną węglową wytwarzanych metodą prasowania na gorąco” wydana została jako zwięzła monografia w języku polskim. Liczy łącznie 202 strony, w tym wykaz skrótów, symboli i jednostek, spis treści, część merytoryczną, zawierający 447 pozycji przegląd literatury oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Główna, merytoryczna część pracy podzielona została na 7 rozdziałów z licznymi podrozdziałami i zawiera 159 stron.

W pierwszym i drugim rozdziale Autorka zawarła wprowadzenie oraz przegląd obecnego stanu wiedzy. Na podkreślenie zasługuje bardzo szeroki przegląd literatury, niespotykany powszechnie w rozprawach doktorskich. W rozdziale trzecim podano uzasadnienie podjęcia się tematu rozprawy oraz główną tezę, jaką jest możliwość wytwarzania termoplastycznych laminatów metalowo-włóknistych z osnową na bazie politereftalanu butylenu o właściwościach mechanicznych nie gorszych niż szerzej stosowana osnowa poliamidowa. W kolejnych rozdziałach przedstawiono i krótko scharakteryzowano użyte metody badawcze oraz obiekty badań. W najdłuższym i najważniejszym rozdziale 6 Autorka przedstawiła wyniki własnych eksperymentów i symulacji, a w ostatnim, siódmym rozdziale, wyciągnięte z nich wnioski oraz perspektywę dalszych badań.

Praca dotyczy trudnych i wciąż badanych zagadnień mechaniki kompozytów, przy czym Autorka skupiła się przede wszystkim na analizie eksperymentalnej bardzo trudnej ich klasy, jaką są zbrojone kompozyty metalowo-włókniste. Badania kompozytów realizowane są w czołowych ośrodkach naukowych świata oraz publikowane w renomowanych czasopismach, ale oczywiście Doktorantka znalazła nieopisaną w piśmiennictwie niszę w tych badaniach. Dodatkowo podkreślić należy potencjał wdrożeniowy wykonanych analiz, co sprawia,

że uzyskane przez nią wyniki mogą znaleźć szerokie zainteresowanie nie tylko wśród wąskiego grona naukowców, ale także wejść do praktyki przemysłowej. Z tych powodów uważam, że rozwiązywane zagadnienia są aktualne i ważne, i mogą być tematem pracy doktorskiej, a wybór dyscypliny naukowej – *inżynieria mechaniczna* – jest jak najbardziej uzasadniony.

Na podkreślenie zasługuje także praktyczny aspekt wykonanych badań – w przyszłości, po wykonaniu dodatkowych prac omówionych przez Autorkę, uzyskane wyniki mogą być z powodzeniem wykorzystane w przemyśle do tworzenia lepszych materiałów kompozytowych.

2. Uwagi merytoryczne

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter przede wszystkim eksperymentalny i opisuje wykonane przez Autorkę badania z wykorzystaniem oprzyrządowania będącego na wyposażeniu zespołu, w którym pracuje. Uzyskane w ten sposób wyniki posłużyły do identyfikacji stałych materiałowych użytych w modelach analitycznych i numerycznych oraz weryfikacji wyników tych modeli.

Głównie eksperymentalny charakter rozprawy nie jest w żadnym wypadku wadą, a wręcz przeciwnie. Przy wciąż widocznym zalewie prac czysto teoretycznych oraz ograniczonych do modelowania numerycznego taki, najtrudniejszy do wykonania, charakter pracy zasługuje na wyraźne docenienie. Podkreśla to bardzo staranna analiza błędów z wykorzystaniem testów statystycznych dostępnych w programie *Statistica*.

Modelowanie analityczne ograniczone zostało do minimum i Autorka nie wniosła tu wiele nowego, korzystając ze znanych reguł.

Uzyskane dane eksperymentalne wykorzystane zostały w analizie numerycznej, w której Autorka wykonała model MES badanych przez siebie próbek oraz wykonała obliczenia. Ta część pracy pokazuje umiejętność prowadzenia również tego typu badań.

Ogólnie pracę oceniam bardzo dobrze, brak w niej istotnych błędów oraz nieścisłości, choć można znaleźć fragmenty wymagające doprecyzowania lub niewielkiej korekty. Poniżej przedstawiam główne uwagi i pytania, zaznaczając te, na które chciałbym uzyskać odpowiedź podczas publicznej obrony.

a. Uwagi redakcyjne i językowe

Praca napisana jest poprawnym językiem, choć zawiera pewne niedoskonałości niezauważone podczas prac redakcyjnych. Przykładem mogą być:

- Brak precyzji wypowiedzi (9₂₁) „w kierunku 0°”. Oczywiście jest, że Autorce chodziło o kierunek ułożenia włókien kompozytu w stosunku do kierunku działania obciążenia, ale powinno to być jasno zapisane.
- Niejasne sformułowania (13₁₅₋₁₇) „włókna poprzeczne, ze względu na niższy moduł sprężystości w kierunku działania siły, wykazują większe odkształcenie w porównaniu z włóknami poprzecznymi”. Same włókna uznać można za izotropowe, choć o bardzo dużej smukłości. Użyte przez Autorkę stwierdzenie odnosi się chyba do kompozytu z odpowiednio ułożonymi włóknami.

- Zła nazwa metody (16³) „metody takie jak autoklaw”. Autoklaw jest urządzeniem używanym do wygrzewania próbek i wyrobów z kontrolowaną temperaturą i ciśnieniem (zazwyczaj podciśnieniowo), a nie nazwą metody.
- Błędne użycie określeń (19¹⁸) „w procesach jednorazowych”. Autorce chodziło zapewne o procesy jednoetapowe.
- Rzadko używane słownictwo (23_{4,5}) „ułamek objętościowy”. Częściej, zwłaszcza w branży lotniczej, używa się określenia „udział objętościowy”.
- Liczne „literówki”, złe użycie przecinków i tym podobne błędy nie wpływające w istotny sposób na czytelność i zrozumienie pracy.

b. Uwagi merytoryczne

- Autorka w wielu miejscach (np. 10₄ do 11²; 40₁₁₋₁₅; 56¹⁸) założyła, że tkaniny używane do wytwarzania kompozytów zawsze mają budowę symetryczną, tzn. połowa włókien ułożona jest wzdłuż jednej, a połowa drugiej, prostopadłej do pierwszej, osi. Pomimo że jest to najczęściej wykorzystywany rodzaj tkanin istnieją również takie o innym stosunku, np. 70/30%; 80/20%, a nawet praktycznie jednokierunkowe.
- Rysunek 2.2 (13) jest nieopisany, osoby nieznające tematu mogą nie zrozumieć o co w nim chodzi.
- Niedokładny opis metody DIC (51⁵⁻⁸). Metoda ta ściśle biorąc pozwala na znalezienie rozkładu przemieszczeń, odkształcenia są następnie obliczane. Jest to o tyle istotne, że otrzymane mapy przemieszczeń są zawsze dokładniejsze niż mapy odkształceń. W świetle tego zdanie (51₅₋₇) staje się mało zrozumiałe. Przy opisie kamery mniej istotne jest podanie jej nazwy, a bardziej rozdzielczości (istotnej w metodzie DIC) oraz czy posiada ona matrycę monochromatyczną czy kolorową.
- Niekompletny opis modelu numerycznego (rozdział 4.2.8.b). Na rysunku 4.12 pokazano siatkę MES, nie zamieszczono jednak istotnych informacji o liczbie elementów, stopni swobody oraz rozmiarów elementów (co pozwala na oszacowanie jakości tej siatki). Analiza rysunku prowadzi do wniosku, że o ile w części uchwytowej próbek zastosowano metodę regularną tworzenia siatki, o tyle w najbardziej istotnej części środkowej metodę swobodną. Jest to szybsze i łatwiejsze, ale wiąże się z większymi błędami numerycznymi.
- Niejasny wykres 5.2 (65₂) oraz 5.4 (67¹). Na wykresie umieszczono 2 osie pionowe – dla temperatury oraz ciśnienia, a tylko po jednej linii dla każdego z materiałów. Zazwyczaj krzywe zmienności temperatury i ciśnienia nie pokrywają się ze sobą, w związku z czym nie wiadomo, który parametr opisują zamieszczone linie.
- Kontrowersyjne stwierdzenie na temat technologii cięcia kompozytów (68). Metoda cięcia wodą wskazana jest jako zalecana w przemyśle lotniczym, stawiającym największe wymagania co do jakości obróbki. Przy frezowaniu często dochodzi nie tylko do przegrzania (o czym Autorka wspomniała), ale także powierzchnia cięcia może być uszkodzona. Powstawanie delaminacji, o których wspomina Doktorantka, zapewne spowodowane było złym doбором parametrów obróbki strumieniem wody.
- Wykresy na rys. 6.1-6.3 (74-75) pokazują tylko po jednej krzywej dla każdej z próbek i parametrów próby, co nie pozwala na zorientowanie się w zmienności tych parametrów. Nigdzie nie podano jasno liczby badanych próbek. Co prawda dane zamieszczone w tabelach 6.11-6.14 (76-77) sugerują, że było ich 3 lub 5, ale musi to być jawnie napisane.

Poza tym duże odchylenia widoczne w tych tabelach sugerują zbyt małą liczbę próbek użytych w testach. Bardzo proszę podczas obrony o przedstawienie pełnych wykresów krzywych rozciągania dla jednego lub 2 materiałów i omówienie zagadnienia wyznaczenia krzywych uśrednionych oraz doboru liczebności próby, zwłaszcza dla gotowych kompozytów, co opisano w kolejnych rozdziałach.

- Mapy odkształceń pokazane na rys. 6.20 i 6.21 (104-105) pokazują duże niejednorodności, oraz (w przypadku ϵ_y) pasmowe ułożenie pod kątem około 45° . Czy Autorka może wyjaśnić takie zachowanie próbek? (*pytanie na obronę*). Jakiego programu użyto do analizy DIC?
- Nie jest jasne jak otrzymano wykresy będące podstawą do wyznaczenia w rozdziale 6.4 współczynników Poissone'a, zwłaszcza w jakich miejscach były one wyznaczane. Pokazane na wcześniejszych wykresach rozkłady odkształceń cechują się dużą niejednorodnością, co może być przyczyną dużych błędów w wyznaczeniu wartości tego współczynnika (*pytanie na obronę*).
- W tabeli 6.33 (119) wynik obliczeń E_t modelu dla materiału A/PA6/1/25 (45,6 GPa) przedstawiono jako różniący się od wyniku eksperymentu (45,0 GPa) o ponad 20%, co jest oczywistym błędem, nie wiadomo jednak czy merytorycznym, czy redakcyjnym. W tabelach prezentujących wyniki eksperymentu i modelu powinny być podane także różnice procentowe w stosunku do wzorcowego eksperymentu, co być może pozwoliłoby na szybsze wyłapanie przez Autorkę tego błędu.
- Na wykresach przedstawionych na rys. 6.27a-d (129-131) pokazano po 2 wykresy (lewy i prawy) nie opisując ich. Być może jest to tylko błąd redakcyjny, ale bardzo utrudnia zrozumienie otrzymanych wyników.
- Brak informacji w jaki sposób uzyskano mapy topologiczne na rys. 6.37 (158). Dobrze by było także zamieścić skale.

3. Podsumowanie

Mgr inż. Katarzyna Balcer zrealizowała pracę badawczą składającą się z części eksperymentalnej, analizy analitycznej i numerycznej. Otrzymane wyniki są poprawne, co potwierdza umiejętność prowadzenia tych rodzajów działalności naukowej. Wykorzystana literatura jest właściwa i aktualna. Przedłożona dysertacja wskazuje na umiejętność Autorki prowadzenia działalności badawczej.

Biorąc pod uwagę ogólną jakość rozprawy, jej aktualną tematykę oraz umiejętność rozwiązania przez Autorkę istotnego problemu naukowego, uważam że praca pod tytułem: „Analiza właściwości mechanicznych termoplastycznych laminatów metalowo-włóknistych zbrojonych tkaniną węglową wytwarzanych metodą prasowania na gorąco” spełnia warunki stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późniejszymi zmianami), i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

P. Pyzdek