

Gliwice, 26.11.2024

dr hab. inż. Małgorzata Szymiczek, prof. PŚ

Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

Wydział Mechaniczny Technologiczny

Politechnika Śląska

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krystiana Stachowiaka

pt.: **“Analiza badawcza i możliwości wykorzystania odpadów z recyklingu jako napełniaczy kompozytów polimerowych przeznaczonych do obróbki skrawaniem”**

promotor: dr hab. inż. Adam Gnatowski, prof. PCz

promotor pomocniczy: dr hab. inż. Rafał Gołębski, prof. PCz

### **Podstawa opracowania recenzji**

Niniejsza recenzja została opracowana zgodnie z Uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej nr 43/2023/2024 z dnia 26.09.2024 roku, o czym zostałam poinformowana pismem o nr R-WIMI-BOD-510-3/2021 z dnia 23.10.2024 r., które zostało podpisane przez Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Częstochowskiej, Pana dr hab. inż. Janusza Szmidla, prof. PCz.

## Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krystiana Stachowiaka pt.: "Analiza badawcza i możliwości wykorzystania odpadów z recyklingu jako napełniaczy kompozytów polimerowych przeznaczonych do obróbki skrawaniem" została zredagowana w języku polskim jako monografia licząca 185 stron łącznie z suplementem, w którym zestawiono karty techniczne zastosowanych materiałów. Praca zawiera spis treści, wykaz skrótów i oznaczeń, wstęp, siedem merytorycznych rozdziałów, bibliografię, a także katalog rysunków, tabel oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Na końcu niniejszej rozprawy, Doktorant zawarł stosowne oświadczenie dotyczące samodzielnego wykonania przedłożonej do recenzji dysertacji.

Recenzowana praca doktorska ma typową strukturę dla pracy naukowej, Autor po krótkim wprowadzeniu i zdefiniowaniu problemu, dokonuje zwięzłego opisu stanu wiedzy w oparciu o doniesienia literaturowe. Podjęta w pracy tematyka, dotycząca analizy wpływu wiórów ze stopów aluminium i mosiądzu zastosowanych jako napełniacze w kompozytach o osnowie termoplastycznych materiałów polimerowych – polimiadzie 6 oraz polieteroeteroetonie, na ich wybrane właściwości mechaniczne i termiczne oraz na proces obróbki skrawaniem wpisuje się w Gospodarkę Obiegu Zamkniętego. Postawiony w pracy problem badawczy wymagał od Autora interdyscyplinarnego podejścia, wiążącego inżynierię mechaniczną z materiałową.

Dysertacja jest podzielona na trzy części. W pierwszej Doktorant dokonuje przeglądu literatury, w którym przywołuje definicję i składowe budowy kompozytów polimerowych, technologie ich wytwarzania, metody recyklingu, ale w sposób bardzo ogólny, nie podając np. różnic pomiędzy kompozytami na osnowie z materiałów termoplastycznych, utwardzalnych i elastomerów. Następnie Autor, zdecydowanie dokładniej opisuje technologie obróbki skrawaniem. Omawia czynniki wpływające na jakość końcowego wyrobu, tj. parametry procesów obróbki skrawaniem, odpowiedni dobór narzędzi, których rodzaj i geometria są zdeterminowane przez obrabiany materiał, a także zwraca uwagę na czynniki oddziałujące na obróbkę ubytkową kompozytów. Dokładnej analizie poddano proces frezowania, a także topografię powierzchni po obróbce skrawaniem. Doktorant przedstawił również

charakterystyczne cechy termoplastycznych materiałów polimerowych, stopów aluminium i mosiądzu.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury Pan mgr inż. Krystian Stachowiak zdefiniował trzy tezy recenzowanej dysertacji, tj.:

*„... 1. Zawartość, frakcja i rodzaj napełniacza w postaci wiórów mosiądzu i aluminium w kompozytach z osnową polimerową w istotny sposób wpływa na ich właściwości termomechaniczne oraz strukturę wewnętrzną, w których kontekście istotne jest określenie wpływu znaczących trendów zmian.*

*2. Charakterystyka parametrów topograficznych powierzchni kompozytu po obróbce skrawaniem może zachowywać porównywalne trendy dla zmian parametrów obróbki tożsamyh w przypadku obróbki materiałów jednorodnych.*

*3. Wielkość frakcji zastosowanych napełniaczy istotnie wpływa na zmianę struktury kompozytu, tym samym oddziałując na zmiany wartości wolumetrycznych parametrów funkcyjnych powierzchni po obróbce skrawaniem...”,* oraz cele badawcze, które pozwalały na ewentualne potwierdzenie postawionych tez.

Głównym celem badawczym było określenie wpływu napełniaczy w postaci wiórów aluminiowych i mosiężnych przy uwzględnieniu ich frakcji na strukturę, wybrane właściwości mechaniczne, termiczne, proces obróbki skrawaniem przygotowanych kompozytów na osnowie poliamidu 6 i polieteroeteroketonu, a także topografię powierzchni badanych materiałów.

Doktorant przedstawił metodologię badań, omówił zastosowane metody oceny własności pozwalające na potwierdzenie tez i osiągnięcie celów pracy. Dopiero w rozdziale czwartym opisał proces wytwarzania kompozytów metodą prasowania. Następnie Pan mgr inż. Krystian Stachowiak przeprowadził dokładną analizę wyników badań właściwości termicznych kompozytów przeprowadzonych metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC), termomechanicznych wyznaczonych metodą DMTA, charakterystyk mechanicznych (udarności metodą Charpy'ego wg ISO 179 i twardości Rokwella zgodnie z ISO 6508). Całości obrazu wyników dopełniła analiza topografii powierzchni badanych materiałów oraz rozkład napełniaczy w kompozycie określony metoda tomografii komputerowej. Na uwagę zasługują rozdziały 5.4 oraz 6.3 obejmujące wnioski odpowiednio z analizy wpływu napełniaczy na właściwości mechaniczne oraz badań strukturalnych. Całość pracy podsumowano wnioskami końcowymi. Autor wskazał również dalsze kierunki badań

obejmujące m.in. analizę możliwości wykorzystania różnorodnych materiałów, ocenę wpływu warunków środowiskowych na właściwości badanych materiałów.

Bibliografia dysertacji Pana mgr inż. Krystiana Stachowiaka obejmuje 120 pozycji. W tym 61 cytowanych prac jest z książek lub czasopism, które mają, wysoki współczynnik impact factor, a także posiadają uznaną pozycję w międzynarodowym środowisku naukowym. W pracy wskazano 10 norm, w tym 1 normę ASTM, jednak spis literatury obejmuje tylko 7 pozycji. Wynika to z braku zacytowania normy ISO 21920 oraz norm PN/EN ISO podanych bez numerów w rozdziale 3.1 pt.: „Charakterystyka wykorzystanych materiałów”. Autor uwzględnia również w bibliografii 8 pozycji ze źródeł internetowych, ale nie podaje dat dostępu. Jednak nie wykazuje ani jednej pozycji autorskiej lub współautorskiej, chociaż w swoim dorobku posiada takie, które tematycznie związane są z niniejszą pracą.

## **Tematyka rozprawy i problem badawczy**

Podjęta w niniejszej rozprawie tematyka jest związana z poszukiwaniem nowych aplikacji termoplastycznych materiałów polimerowych napełnianych różnymi modyfikatorami. W literaturze spotyka się wiele materiałów polimerowych, których właściwości są modyfikowane pod kątem palności, przewodności cieplnej i elektrycznej, często uwzględniając synergiczne oddziaływanie pomiędzy poszczególnymi napełniaczami.

Ciekawym obszarem badań są termoplastyczne materiały polimerowe i ich kompozyty modyfikowane proszkami metali, szczególnie w aspekcie aplikacji w przemyśle elektronicznym, szeroko rozumianych środków transportu czy budowlanym, co jest zdeterminowane pożądanymi charakterystykami eksploatacyjnymi. Osobnym zagadnieniem jest wykorzystanie materiałów odpadowych jako napełniaczy modyfikujących właściwości materiałów polimerowych przy uwzględnieniu potencjalnego recyklingu materiałowego uzyskanych kompozytów. Takie podejście odpowiada zasadom 6R: rethink – przemyśl, refuse – odmów, reduce – ograniczaj, reuse - użyj ponownie, recycle – odzyskaj, recover – naprawiaj, zgodnie z Gospodarką Obiegu Zamkniętego.

Podstawowym problemem w przypadku tego typu kompozytów jest odpowiednie zhomogenizowanie materiałów, tak aby uzyskać wymagane aplikacjami struktury bez aglomeratów, pustek i innych wad będących wynikiem niewłaściwego

przygotowania cząstek modyfikujących charakterystyki, czy samego procesu wytwarzania kompozytów. Zatem opracowanie technologii minimalizującej wymienione wady jest zasadniczym czynnikiem determinującym charakterystyki eksploatacyjne, w tym technologiczne. Opracowanie nowych materiałów wiąże się również z określeniem warunków dalszej obróbki np. wykańczającej, która bardzo często jest obróbką skrawaniem. Jest szczególnie problematyczne przy kompozytach, w których komponenty wykazują zróżnicowanych właściwości.

W niniejszej rozprawie postawiony przez Doktoranta problem badawczy dotyczył wytworzenia kompozytów na osnowie poliamidu 6 i polieteroeteroketonu modyfikowanego wiórami aluminium i mosiądzu o zróżnicowanej wielkości, a następnie oceny możliwości obróbki skrawaniem (frezowania) przygotowanych kompozytów.

Zatem z punktu widzenia walorów naukowych oraz użytkowych należy jednoznacznie uznać, że tematyka przedłożonej do recenzji dysertacji jest ważna oraz aktualna. Spełnia ona wymagania jakie są stawiane pracom doktorskim, które są realizowane w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

## **Analiza i ocena merytoryczna rozprawy**

Na podstawie merytorycznej analizy zakresu jak i treści przedłożonej rozprawy należy jednoznacznie stwierdzić, że praca ma charakter interdyscyplinarny, ponieważ wymagała od Autora powiązania zagadnień z obszaru inżynierii mechanicznej, budowy maszyn, ale także z inżynierii materiałowej i wpisuje się dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna. Pan mgr inż. Krystian Stachowiak zrealizował postawione zadania badawcze, opracował technologię wytwarzania kompozytów na osnowach z wybranych termoplastycznych materiałów polimerowych modyfikowanych wiórami aluminium i mosiądzu, a także zaplanował i przeprowadził eksperymenty, które pozwoliły na osiągnięcie zdefiniowanych celów oraz potwierdzenie postawionych tez.

Warto zaznaczyć, że założony zakres pracy wymagał od Autora znajomości szeregu metod badawczych, a przede wszystkim, co świadczy o jego dojrzałości

naukowej, potrafił uzyskane wyniki właściwie zinterpretować i sformułować poprawnie wnioski.

Za najważniejsze osiągnięcie Pana mgr inż. Krystiana Stachowiaka uważam logiczne i wewnętrznie spójne powiązanie wyników badań eksperymentalnych na każdym etapie pracy, którego efektem jest opracowanie kompozytów na osnowie poliamidu 6 i polieteroeteroketonu z wiórami aluminiowymi, o wielkość cząstek 0,6-0,8 mm oraz 0,8-1,18 mm, i mosiężnymi o frakcjach w zakresach 0,2-0,4 mm, co znalazło odzwierciedlenie w prezentowanej na stronie 159 tabeli 7.1. W niniejszym zestawieniu powiązано badane charakteryki opracowanych kompozytów z właściwościami eksploatacyjnymi, szczególnie w aspekcie obróbki skrawaniem, trwałości i wytrzymałości.

Recenzowana rozprawa została przygotowana z dużą starannością oraz poprawnie pod względem merytorycznym jak i językowym. Niemniej jednak kilka kwestii poruszonych w dysertacji budzi pewne zastrzeżenia:

- Tytuł pracy sugeruje, że praca będzie poświęcona wielu różnym kompozytom polimerowym przeznaczonym do obróbki skrawaniem, czyli obok materiałów termoplastycznym, również utwardzalnym, elastomerowym czy nawet pianom, a Doktorant skupia się na dwóch wybranych materiałach polimerowych. W mojej ocenie tytuł dysertacji powinien być doprecyzowany.
- Przeprowadzony przegląd stanu wiedzy zawiera pewne uogólnienia, nieścisłości i skróty myślowe, które utrudniają czytelnikowi zapoznanie się z pracą. Przykładowo na stronie 9: *„...Polimery jako osnowa w strukturach kompozytów odgrywają ważną rolę, zapewniając równomierne rozłożenie obciążeń na napełniacz, wzmacniając oraz nadając finalnym produktom pożądane kształty. Ponadto decydują o właściwościach cieplnych i chemicznych oraz o palności kompozytów...”*.
- W tabeli 1.1. Autor przedstawia schemat możliwych kombinacji materiałów, ale są to tylko wybrane połączenia. Doktorant nie uwzględnia połączeń hybrydowych, czy napełniaczy naturalnych.
- W rozdziale 1.2 przedstawiono tylko wybrane metody wytwarzania kompozytów i nie wskazano kryteriów wyboru metody do przetwarzanego materiału.
- Na stronie 25 Autor pisze: *„...Do grupy termoplastów należą poliolefiny (PE, PP, PVC), styreny (PS, SAN, ABS, POM), termoplasty oparte na fluorze (PTFE, FEP,*

PVDF), poliamidy PA, termoplastyczne poliestry (PET, PPE, PEEK), polisulfony oraz polikondensaty PSU, PES, PPS, PI, PAI i PEI...” nie podając literatury, na podstawie której został przytoczony podział materiałów polimerowych, tym bardziej, że uwzględnia on błędy. Poza tym Autor nie wyjaśnia skrótów materiałów polimerowych, które są wprawdzie znane, ale dla czytelności pracy w mojej ocenie powinny być podane ich wyjaśnienia.

- W rozdziale 3.1. Pan mgr inż. Krystian Stachowiak pisze: „...*Jako wypełniacze zastosowano wióry o różnych frakcjach ze stopu aluminium PA6/2017 według PN/EN ISO AlCu4MgSi i mosiądzu MO58 wg PN/EN ISO CuZn40Pb2...*”. Myślę, że należałoby uzupełnić numery norm. Odnosząc się do suplementu, w którym zestawiono karty techniczne, uważam, że powinny być zestawione takie same charakterystyki, co ułatwiłoby analizy i proces wnioskowania.
- W mojej ocenie rozdział dotyczący przygotowania materiału badawczego powinien znaleźć się po charakterystyce materiałów, które zostały wykorzystane do wytwarzania kompozytów na osnowie poliamidu 6 i polieteroeteroketonu z wypełniaczami w postaci wiórów aluminium i mosiądzu. Jednocześnie nasuwa się pytanie, jak były przygotowane wypełniacze?
- Z czego wynikają rozbieżności pomiędzy danymi zawartymi w tabeli 4.2 a tabeli 6.9. Czy w tabeli 6.9 ujęto udział objętościowy? Nie jest to doprecyzowane.
- W mojej ocenie, biorąc pod uwagę proponowane ewentualne zastosowanie, brakuje w pracy badań, które uwzględniałyby potencjalne aplikacje. Podniosłoby to znacznie wartość pracy.
- Myślę, że schemat planu badań, który w dużym stopniu uporządkowałby pracę i wskazał swego rodzaju związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy poszczególnymi etapami eksperymentu wpłynąłby na czytelność recenzowanej rozprawy.

Poza tym:

- W pozycjach literaturowych 16, 34-37, 82, 100, 101 oraz 119 nie wskazano daty dostępu.
- Nie uwzględniono w spisie literatury normy ISO 21920, norma ISO25178-2:2021 jest na pozycji 57, a nie jak napisano na stronie 31 pod numerem 54. Na stronie 45 podano normy bez numerów, które nie zostały wykazane w bibliografii.

- Autor nie ustrzegł się również drobnych błędów interpunkcyjnych, „literówek”, czy potocznego słownictwa.

## **Wniosek końcowy**

Należy podkreślić, że zawarte w mojej recenzji uwagi oraz sugestie nie wpływają na holistyczną ocenę rozprawy doktorskiej, która jest jednoznacznie pozytywna. Autor wykazał się wiedzą, umiejętnością planowania eksperymentu, realizacją badań naukowych, oraz rzetelną oceną i interpretacją uzyskanych wyników, co świadczy o predyspozycjach do prowadzenia prac naukowych przy jednoczesnym bardzo praktycznym podejściu do rozwiązywania problemów i zadań naukowych. Postawione tezy zostały potwierdzone, a cele osiągnięte.

**Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Krystiana Stachowiaka pt.: “Analiza badawcza i możliwości wykorzystania odpadów z recyklingu jako wypełniaczy kompozytów polimerowych przeznaczonych do obróbki skrawaniem”, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa, tj. ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U 2018 poz. 1668 ze zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.**