

RECENZJA pracy doktorskiej

mgr inż. Michała Szymańskiego

pod tytułem

*Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych
z nasycanym zbrojeniem*

Podstawa prawna oceny:

Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 24 lutego 2025 r. oraz pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP z dnia 04.03.2024 r. (nr DIM.075/57/2025)

KONKLUZJA

Przedstawiona do recenzji praca doktorska pt. *Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym zbrojeniem* w pełni potwierdziła posiadanie przez Doktoranta umiejętności dostrzegania, sformułowania i oryginalnego rozwiązania problemu badawczego, a w szczególności planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych. Świadczy ona o tym, że Doktorant opanował metody badawcze i potrafi się nimi prawidłowo posługiwać, posiada pogłębianą wiedzę teoretyczną i specjalistyczną w uprawianej dyscyplinie i jest samodzielny w zakresie prowadzenia pracy naukowej.

Praca ta, pomimo pewnych przedstawionych poniżej uwag krytycznych, spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie INŻYNIERIA MECHANICZNA, w związku z czym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Michała Szymańskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz wnioskuję o wyróżnienie pracy.

UZASADNIENIE

Tematyka rozprawy

Recenzowana praca doktorska koncentruje się na zaawansowanych materiałach inżynierskich, a konkretnie na kompozytach o osnowie metalowej, ze szczególnym uwzględnieniem procesu ich wytwarzania z wykorzystaniem nasycanego zbrojenia ceramicznego oraz analizy ich obrabialności poprzez skrawanie. Praca ta łączy w sobie aspekty inżynierii materiałowej



(projektowanie i wytwarzanie kompozytów), technologii odlewnictwa (wykorzystanie infiltracji próżniowej i form *Rapid Prototyping*) oraz inżynierii produkcji (badanie skrawalności). Tematyka rozprawy jest wysoce interdyscyplinarna i obejmuje zaawansowane zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej i inżynierii produkcji, aczkolwiek zasadniczy nacisk jest położony na ten drugi obszar, **wchodzący obecnie w zakres dyscypliny Inżynieria Mechaniczna**. Praca koncentruje się na opracowaniu innowacyjnej technologii wytwarzania hybrydowych kompozytów metalowo-ceramicznych o unikatowych właściwościach oraz na szczegółowej analizie ich obrabialności, co ma kluczowe znaczenie dla ich ewentualnego wdrożenia przemysłowego.

Rozprawa wpisuje się w obszar intensywnie rozwijanej tematyki zaawansowanych materiałów inżynierskich, jakimi są materiały kompozytowe o osnowie metalowej (MMC). Charakteryzują się one unikatowym połączeniem właściwości metali, w szczególności wysokiej wytrzymałości oraz przewodności cieplnej z właściwościami materiałów ceramicznych, jakimi są wysoka twardość oraz odporność na ścieranie. Takie połączenie pozwala na projektowanie materiałów o specyficznych właściwościach dostosowanych do konkretnych zastosowań w różnych gałęziach przemysłu.

Praca skupia się na specyficznej metodzie wytwarzania MMC, która polega na infiltracji porowatego zbrojenia ceramicznego ciekłą osnową metalową. Wykorzystanie infiltracji próżniowej jest istotnym elementem, mającym na celu minimalizację porowatości i uzyskanie wysokiej jakości połączenia między fazami. Dodatkowo, zastosowanie metod *Rapid Prototyping*, czyli druku 3D do wytwarzania jednorazowych form ceramicznych dla zbrojenia wprowadza element innowacyjności i elastyczności w kształtowaniu komponentów kompozytowych.

Badania przeprowadzone przez Doktoranta nie ograniczają się do jednoskładnikowego zbrojenia ceramicznego, ale uwzględniają też zastosowanie dwuskładnikowego zbrojenia składającego się z tlenku glinu (Al_2O_3) wzbogaconego włóknami glinokrzemianowymi. Taki hybrydowy charakter zbrojenia otrzymanego kompozytu ma na celu optymalizację jego właściwości mechanicznych i tribologicznych: wytrzymałości i odporność na ścieranie. Systematyczne badanie wpływu proporcji składników zbrojenia na właściwości końcowe uzyskiwanego materiału jest kluczowym elementem pracy wykonanej przez Doktoranta.

Ważną częścią przedłożonej rozprawy jest analiza obrabialności wytworzonego kompozytu metodami skrawania. Należy pamiętać, że materiały kompozytowe o osnowie metalowej często, ze względu na różnice we właściwościach fizycznych i mechanicznych poszczególnych faz, powodują znaczące trudności w procesach obróbki. Z tego powodu, badanie wpływu parametrów skrawania na strukturę geometryczną powierzchni oraz trwałość narzędzi jest kluczowe dla



praktycznego zastosowania opracowanego materiału. Praca Doktoranta koncentruje się na toczeniu wykończeniowym z wykorzystaniem narzędzi wykonanych z supertwardych materiałów skrawających: regularnego azotku boru (CBN) i polikrystalicznego diamentu (PCD).

W celu zminimalizowania kosztownej i czasochłonnej obróbki mechanicznej Doktorant uwzględnił wytwarzanie kształtowych odlewów kompozytowych. Takie dążenie do uzyskania precyzyjnych odlewów, wymagających jedynie obróbki wykończeniowej, jest wysoce istotne z punktu widzenia ekonomii procesu produkcyjnego.

Tematykę recenzowanej pracy doktorskiej dobrze określa fraza kluczowa „*Metal Matrix Composites Fabrication Machining*”, dla której baza Scopus wykazuje liczbę ponad 8300 powiązanych z nią artykułów naukowych. Znacząca jest dynamika wzrostu liczebności artykułów: do roku 2008 pojawiało się przeciętnie rocznie kilkanaście prac powiązanych z tą tematyką, w latach 2009-2018 roczna liczba publikacji narastała od ok. 80 do nieomal 500, natomiast od roku 2019 obserwowane jest gwałtowne przyspieszenie: 575 w roku 2019, 785 w roku 2020, 828 w roku 2021, 1051 w roku 2022, 1119 w roku 2023 i 1443 w roku 2024. W pierwszym kwartale roku 2025 już jest zaindeksowanych 457 prac. Świadczy to o dużym zainteresowaniu tą tematyką i o posiadaniu przez prezentowaną technologię wciąż niewyczerpanego potencjału badawczego. Jednocześnie wzrasta waga działań aplikacyjnych przesuwających punkt ciężkości z badań podstawowych do obszaru nauk stosowanych. Właśnie w taki obszar aplikacyjny, dostarczając szeregu użytecznych informacji, wpisuje się recenzowana praca doktorska.

Charakterystyka i ocena rozprawy

Praca jest wydana w formie zwartej i ma objętość 128 stron numerowanych. Zawiera spis treści, streszczenie w języku polskim, streszczenie w języku angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, wprowadzenie, pięć numerowanych rozdziałów, a na końcu bibliografię składającą się ze 176 pozycji.

Tytuł rozprawy „*Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym zbrojeniem*” został sformułowany poprawnie i koresponduje z treścią przedstawioną w pracy.

Rozdział 1 zawiera szczegółowy przegląd literatury naukowej dotyczącej materiałów kompozytowych, ze szczególnym uwzględnieniem kompozytów o osnowie metalowej. Omawia wybrane właściwości metalowych kompozytów hybrydowych o osnowie aluminiowej. Przedstawia metody wytwarzania kompozytów z nasycanym zbrojeniem oraz wytwarzania porowatego zbrojenia ceramicznego. Obszernie omawia zagadnienia związane z oceną

skrawalności metalowych materiałów kompozytowych. Rozdział kończy się podsumowaniem analizy literatury i wnioskami do badań własnych.

Rozdział 2 zawiera sformułowanie celu głównego pracy, jakim jest analiza procesu wytwarzania kształtowych odlewów z nasycanym hybrydowym zbrojeniem ceramicznym oraz określenie wpływu warunków skrawania kompozytu hybrydowego na wybrane wskaźniki skrawalności. Określa szczegółowy zakres badań przeprowadzonych przez Doktoranta, w tym sprecyzowano badane materiały, stosowane narzędzia skrawające, parametry procesów i analizowane właściwości. Doktorant zamieścił szczegółową tabelę (Tab.3, str.48-49) z podziałem na wstępne i zasadnicze etapy badań, cele szczegółowe wykonywanych badań oraz odniesienia do rozdziałów, w których zamieszczono opis badań i uzyskane wyniki.

W kolejnych rozdziałach od 3 do 5 Doktorant skupił się na pracy własnej i uzyskanych wynikach. Rozdział 3 zawiera szczegółowy opis metodologii i technik badawczych stosowanych w pracy przez Doktoranta. Znajdujące się tam podrozdziały obejmują dobór składników zbrojenia ceramicznego i stopu osnowy, metody wyznaczania minimalnej średnicy kapilary, badania porowatości i gęstości pozornej zbrojenia, opis procesu wytwarzania i nasycania kształtki ceramicznej. Przedstawione są metody badawcze dotyczące właściwości mechanicznych i tribologicznych hybrydowego materiału kompozytowego oraz szczegółowy opis planu badań obróbki mechanicznej materiału kompozytowego o osnowie aluminiowej z dwuskładnikowym nasycanym zbrojeniem.

Rozdział 4 to przedstawienie i szczegółowa analiza wyników przeprowadzonych badań. Wyodrębnione są dwa podrozdziały. Pierwszy z nich obejmuje analizę procesu wytwarzania metalowego kompozytu z nasycanym zbrojeniem, a w tym obliczenia minimalnej średnicy kapilary, ocenę porowatości preformy ceramicznej i jej nasycanie, badania wytrzymałości mechanicznej zbrojenia ceramicznego oraz właściwości mechanicznych i tribologicznych kompozytu, projektowanie i wytwarzanie odlewu kształtowego. Drugi z podrozdziałów to szczegółowe omówienie wyników toczenia wykończeniowego materiału kompozytowego z zastosowaniem różnych materiałów narzędziowych (ceramika, CBN, PCD) oraz analiza trwałości narzędzi wykonanych z PCD.

Rozdział 5 zawiera podsumowanie najważniejszych wyników przeprowadzonych badań i sformułowanie wniosków. Wnioski podzielone są na poznawcze dotyczące zdobytej wiedzy oraz użyteczne dotyczące potencjalnych zastosowań praktycznych. Zamieszczone są także wskazówki do ewentualnych dalszych badań.

Za oryginalny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny INŻYNIERIA MECHANICZNA (aczkolwiek praca jest interdyscyplinarna łącząc w sobie inżynierię materiałową oraz inżynierię mechaniczną), zaliczam:

- **innowacyjne połączenie metod wytwarzania**, w tym wykorzystanie *Rapid Prototyping* do formowania jednorazowych form ceramicznych dla nasycanego zbrojenia o złożonych kształtach oraz połączenie formowania *Rapid Prototyping* z infiltracją próżniową;
- **badanie hybrydowego zbrojenia ceramicznego**, w tym systematyczne zbadanie wpływu dwuskładnikowego zbrojenia (Al_2O_3 z włóknami glinokrzemianowymi) na właściwości mechaniczne i tribologiczne kompozytu AlSi11 oraz określenie optymalnego składu hybrydowego zbrojenia pod kątem pożądanych właściwości mechanicznych i tribologicznych dla potencjalnych zastosowań inżynierskich;
- **kompleksową analizę skrawalności**, w tym badanie skrawalności hybrydowego kompozytu Al/ Al_2O_3 / Al_2O_3 - SiO_2 przy użyciu zaawansowanych narzędzi skrawających (CBN i PCD), porównanie efektywności skrawania narzędzi z różnych supertwardych materiałów (CBN vs. PCD) dla kompozytu trudnoskrawalnego oraz określenie trwałości ostrza PCD i zidentyfikowanie limitujących parametrów skrawania pod kątem jakości powierzchni i sił skrawania;
- **wytwarzanie kształtowych odlewów kompozytowych z minimalną obróbką**, w tym opracowanie technologii wytwarzania precyzyjnych kształtowych odlewów kompozytowych, które wymagają jedynie obróbki wykończeniowej.

Uzyskane wyniki badań mogą zostać wdrożone do zastosowań praktycznych. Uznaję, że zamierzony zakres pracy został zrealizowany, a cel badawczy został w dużej mierze osiągnięty.

Ocena sprawności posługiwania się warsztatem naukowym

Doktorant wykazał się dobrą znajomością literatury przedmiotu, obejmującą zarówno zagadnienia związane z materiałami kompozytowymi o osnowie metalowej, metodami ich wytwarzania, jak i problematyką skrawalności materiałów trudnoskrawalnych. Praca zawiera obszerną analizę stanu wiedzy, która stanowi solidną podstawę do przeprowadzenia badań własnych.

Metodyka badań została starannie zaplanowana i obejmuje logicznie powiązane etapy: od doboru składników i wytwarzania porowatego zbrojenia, poprzez proces nasycania, aż po badania właściwości mechanicznych, tribologicznych i skrawalności. Zastosowana technika badań jest adekwatna do postawionych celów i umożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników.

Analiza wyników badań jest przeprowadzona w sposób rzeczowy i poparty licznymi wykresami i tabelami. Doktorant wykazuje umiejętność interpretacji uzyskanych danych oraz

formułowania wniosków na ich podstawie. Wnioski końcowe są logicznie wyprowadzone z przeprowadzonych badań i obejmują zarówno aspekty poznawcze, jak i użytkowe.

Uwagi krytyczne

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Szymańskiego zawiera w mojej opinii niewielkie niedociągnięcia, które jednak nie zmieniają pozytywnej oceny całej pracy:

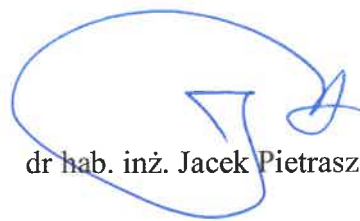
- a) po zapoznaniu się z recenzowaną pracą odczuwam pewien brak głębszej analizy mechanizmów infiltracji próżniowej na poziomie mikrostrukturalnym. Nie przedstawiono szczegółowych badań dotyczących zwilżalności powierzchni zbrojenia przez ciekły metal, kinetyki procesu wnikania oraz potencjalnych defektów powstałych na granicy faz. Niedostatecznie, w mojej opinii, omówiono wpływ parametrów procesu nasycania (np. temperatura, czas trwania, poziom podciśnienia) na mikrostrukturę i jednorodność kompozytu. Brak jest szczegółowych danych dotyczących optymalizacji tych parametrów w celu minimalizacji porowatości i uzyskania homogenicznej struktury.
- b) dyskusja wyników badań skrawalności jest stosunkowo powierzchowna. Nie zauważyłem pogłębionej analizy mechanizmów zużycia narzędzi skrawających (zarówno CBN, jak i PCD) w kontekście specyficznej mikrostruktury wytworzonego kompozytu np. obecności i rozkładu włókien glinokrzemianowych, porowatości. Niedostatecznie powiązano uzyskane parametry chropowatości powierzchni obrobionej z mikrostrukturą kompozytu i mechanizmami skrawania. Brak jest analizy morfologii wióra oraz identyfikacji dominujących mechanizmów powstawania nierówności powierzchni.
- c) praca w niewielkim stopniu ilustruje mikrostrukturę wytworzonego kompozytu. Nie dostrzegłem reprezentatywnych obrazów mikrostruktury, które pozwoliłyby na ocenę jednorodności rozkładu zbrojenia, obecności porów, defektów oraz charakterystyki granicy faz osnowa-zbrojenie. Uzupełnienie pracy o zdjęcia mikrostruktury kompozytu (zarówno przed, jak i po obróbce skrawaniem) z wykorzystaniem mikroskopii optycznej i elektronowej znacząco podniosłoby jakość prezentowanych wyników i ułatwiło ich interpretację.
- d) we wnioskach użytkowych brakuje mi odniesienia do aspektów ekonomicznych. Opracowanie technologii wytwarzania i obróbki kompozytów ma sens praktyczny tylko wtedy, gdy jest to konkurencyjne pod względem kosztów w stosunku do rozwiązań już istniejących. Rozważenie, choćby w sposób jakościowy, porównania kosztów wytwarzania opracowanego kompozytu oraz kosztów jego obróbki (w tym uwzględnienie trwałości narzędzi) z kosztami alternatywnych materiałów i technologii byłoby bardzo interesujące;



e) praca, przy całym bogactwie badań materiałowych i technologicznych, jest dość uboga w zakresie analizy statystycznej. Nie zauważyłem żadnej próby tworzenia modeli prognostycznych ani pogłębionej analizy porównawczej wyników (ANOVA, grupy jednorodne, różnice istotne). Przedstawiane wyniki są ograniczone jedynie do prezentacji tabelaryczno-graficznej wartości średnich i odchyłeń standardowych.

Ogólnie sugerowałbym też ograniczenie na przyszłość przesadnej liczby cyfr w wynikach tabelarycznych; w tej kwestii zdecydowanie sugeruję zapoznanie się z treścią normy ISO 80000-1, a już szczególnie z jej Dodatkiem B. Mało wiarygodnie wyglądają wyniki podawane z 7 cyframi rzekomo znaczącymi (Tab. 14, 15).

Oczekuję ze strony Doktoranta udzielenia wyjaśnień odnośnie powyższych uwag.



dr hab. inż. Jacek Pietraszek, prof. PK