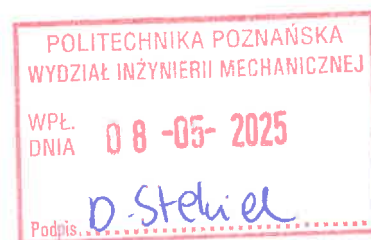


Prof. dr hab. inż. Norbert Radek
Politechnika Świętokrzyska
Centrum Laserowych Technologii Metali
Katedra Eksploatacji, Technologii Laserowych
i Nanotechnologii
Al. 1000-lecia P. P. 7
25-314 Kielce

Kielce, 29.05.2025 r.



RECENZJA rozprawy doktorskiej

***mgr inż. Michała Szymańskiego pt. „Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów
hybrydowych z nasycanym zbrojeniem”***

Promotor pracy: **dr hab. inż. Damian Przestacki, prof. PP**

Promotor pomocniczy: **dr hab. inż. Paweł Szymański**

1. Podstawa formalna

Podstawą formalną wykonania recenzji było pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP z dnia 04.03.2025 r. o sygnaturze DIM. 075.57.2025.

2. Tematyka rozprawy

Przez całą historię materiały definiowały naszą technologię i napędzały kreatywne myślenie, aby rozwiązywać różne problemy oraz rozwijać nasze możliwości. Obecnie materiały inżynierskie są klasyfikowane jako cztery główne grupy, które obejmują metale, polimery, ceramikę i kompozyty. Materiały kompozytowe na bazie metali, znane jako kompozyty o osnowie metalowej są jedną z głównych innowacji w nauce o materiałach i inżynierii od końca XIX wieku. Połączenie różnych materiałów może wytworzyć unikalny i korzystny zestaw właściwości, które pozwalają na dostosowywanie ich do konkretnych wymagań aplikacji poprzez zmianę frakcji materiału wzmacniającego, rozmiaru i kształtu wzmocnienia oraz metody produkcji. Kompozyty o osnowie metalowej powinny charakteryzować się zwiększoną wytrzymałością właściwą, sztywnością, odpornością na zużycie, wydajnością w wysokiej temperaturze, odpornością na korozję, odpornością na zmęczenie cieplne i mechaniczne oraz odpornością na pękanie. Kompozyty z matrycą metalową zapewniają duży stopień wszechstronności.

Materiały kompozytowe na bazie metali stają się ważnymi materiałami o wysokiej wytrzymałości dla przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego i obronnego ze względu na ich ulepszone właściwości fizyczne. Stosuje się je m. in. w konstrukcjach satelitarnych, śmigłowcach, turbopompach, łopatkach sprężarek, silnikach odrzutowych, elementach wysokotemperaturowych, tarczach hamulcowych, tłokach, tulejach cylindrów, konstrukcyjnych elementach samochodowych, elementach maszyn. W przypadku wielu z tych zastosowań znaczące zalety kompozytów o osnowie metalowej mogą bezpośrednio skutkować korzyściami w zakresie wydajności, takimi jak oszczędność energii i zwiększona trwałość eksploatacyjna komponentów.

Tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Michała Szymańskiego dotyczy wytwarzania kompozytów o osnowie metalowej z wykorzystaniem nasycanego zbrojenia ceramicznego oraz określenia ich skrawalności. Wytworzone hybrydowe kompozyty metalowo-ceramiczne powinny cechować się odpowiednimi właściwościami mechanicznymi i tribologicznymi, co ma istotne znaczenie w przypadku ich zastosowań przemysłowych. Ponadto ważnym elementem z punktu widzenia technologicznego i ekonomicznego jest obróbka mechaniczna wytworzonych metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym zbrojeniem oraz jej wpływ na wskaźniki skrawalności tj. parametry chropowatości powierzchni, trwałość ostrza skrawającego, wartość sił skrawania.

Dlatego też, wybór tematyki pracy uważam za celowy i szczególnie cenny zarówno w aspekcie naukowym, technologicznym, a przede wszystkim aplikacyjnym. Recenzowana praca doktorska wpisuje się w aktualne trendy rozwoju innowacyjnych technologii wytwarzania nowoczesnych materiałów inżynierskich i wnosi wymierne korzyści poznawcze i użytkowe.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Michała Szymańskiego zawiera 128 stron podzielonych na 5 głównych rozdziałów (łącznie ze streszczeniami w języku polskim i języku angielskim), 87 rysunków oraz 17 tabel. Bibliografia zawiera 176 pozycji, w tym 1 publikację z udziałem Autora, która została poprawnie dobrana do proponowanej tematyki rozprawy. Około 58 % cytowanych pozycji literaturowych jest opublikowana po 2010 roku, co stanowi bardzo dobry wskaźnik udziału publikacji „nowych” do ogólnej liczby pozycji przedstawionej w bibliografii. Znaczna część cytowanej literatury pochodzi z renomowanych czasopism o zasięgu międzynarodowym np. The International Journal of Advanced Manufacturing

Technology, Materials & Design, Journal of Materials Processing Technology, Archives of Metallurgy and Materials, Wear, Materials, Archives of Foundry Engineering, Materials Today: Proceedings. Cytowana specjalistyczna literatura z zakresu inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej, technik wytwarzania, tribologii gwarantuje, że w pracy opisano aktualny stan wiedzy z kraju i zagranicy.

Przedstawiona rozprawa składa się z umieszczonego na początku streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń następnie pięciu rozdziałów zasadniczych oraz zawartego na końcu wykazu literatury. Praca napisana jest w układzie klasycznym, z podziałem na część analizy literaturowej zagadnienia oraz część badań eksperymentalnych. Część związana z analizą literaturową stanowi około 36 % tekstu, pozostała część tekstu to przedstawione wyniki badań własnych Doktoranta.

Tytuł rozprawy „*Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym zbrojeniem*” został sformułowany poprawnie i odpowiada zawartości pracy.

We *Wprowadzeniu* Autor uzasadnia celowość podjęcia tematu pracy oraz przedstawia właściwości użytkowe kompozytów o osnowie metalowej i ich potencjalne zastosowania w różnych gałęziach przemysłu. Wskazuje na problemy występujące przy kształtowaniu i obróbce w/w kompozytów. Zwraca uwagę na bardzo interesujące hybrydowe metody wytwarzania gotowych elementów z kompozytów metalowych tj. metody Rapid Prototyping (druk 3D) połączone z zaawansowanymi metodami odlewniczymi. Podnosi również kwestie obrabialności (technologiczne i ekonomiczne) obróbką skrawaniem materiałów kompozytowych z nasycanym zbrojeniem ceramicznym.

Rozdział 1 pt. *Analiza stanu wiedzy* jest bardzo obszerny i składa się z 7 podrozdziałów. W pierwszym podrozdziale Doktorant przedstawia rys historyczny materiałów kompozytowych na przestrzeni wieków i ich potencjalne zastosowania. Ponadto prezentuje podział materiałów kompozytowych oraz kombinacje kompozytów w układzie osnowa-zbrojenie. W rozdziale 1.2 Autor opisuje kompozyty o osnowie metalowej zwracając szczególną uwagę na ich właściwości użytkowe. W sposób syntetyczny charakteryzuje trzy rodzaje kompozytów metalowych ze względu na metodę wytwarzania tj. kompozyty zawieszinowe, kompozyty ze zbrojeniem nasycanym oraz kompozyty „in situ”. W kolejnym podrozdziale zostały opisane wybrane właściwości eksploatacyjne metalowych kompozytów hybrydowych tj. właściwości mechaniczne, właściwości tribologiczne oraz odporność korozyjna. W rozdziałach 1.4 i 1.5 Doktorant w sposób uporządkowany przedstawia proces technologiczny wytwarzania kompozytów z nasycanym zbrojeniem metodą infiltracji

próżniowej oraz wytwarzanie porowatego zbrojenia ceramicznego. Bardzo dokładnie opisuje metodę infiltracji próżniowej ze szczególnym uwzględnieniem jej zalet. Również skupia się na roli zwilżalności ceramicznego zbrojenia przez ciekły metal, która ma duży wpływ na właściwości funkcjonalne wytworzonych kompozytów metalowych z hybrydowym wzmocnieniem nasycanym. Doktorant ponadto dokonuje charakterystyki najczęściej stosowanych metod wytwarzania ceramicznego zbrojenia porowatego. W przedostatnim podrozdziale Autor przedstawia ocenę skrawalności kompozytów o osnowie metalowej skupiając się na zużyciu narzędzi skrawających i występujących mechanizmach zużycia podczas obróbek ubytkowych oraz analizie sił skrawania. Doktorant opisuje również wpływ parametrów technologicznych procesu skrawania metalowych materiałów kompozytowych na parametry chropowatości powierzchni obrobionej. Podsumowaniem rozdziału 1 jest podrozdział dotyczący wniosków z analizy literatury, które posłużyły do sformułowania celu pracy i zaplanowania badań własnych przez Doktoranta.

W rozdziale 2 pt. *Cel i zakres pracy* mgr inż. Michał Szymański przedstawia cel pracy oraz zakres badań. W celu osiągnięcia celu (można sądzić głównego) pracy Doktorant zrealizował 12 celów szczegółowych badań, które opisuje w sposób syntetyczny. Ponadto Autor, aby zrealizować cel główny pracy zaplanował poszczególne etapy pracy wraz z ich celami oraz przeprowadzonymi badaniami (tabela 3).

Rozdział 3 pt. *Metodyka i technika badań* opisuje metodologię badań własnych oraz techniki badawcze stosowane przez Autora w pracy doktorskiej. Doktorant w sposób uporządkowany w kolejnych podrozdziałach przedstawia dobór składników zbrojenia ceramicznego i stopu osnowy, wyznaczanie minimalnej średnicy kapilary, badanie porowatości otwartej i gęstości pozornej. Ponadto w sposób syntetyczny opisuje proces technologiczny wytwarzania i nasycania kształtki ceramicznej. W rozdziale 3 przedstawia również metody badań właściwości mechanicznych (wytrzymałości na zginanie, wytrzymałości na rozciąganie, twardości) oraz tribologicznych (badania oporów tarcia) hybrydowego materiału kompozytowego. W/w rozdział kończy podrozdział dotyczący obróbki mechanicznej materiału kompozytowego o osnowie aluminiowej z dwuskładnikowym nasycanym zbrojeniem, w którym to Doktorant przedstawia stanowisko do obróbki mechanicznej (tokarkę CNC) oraz parametry procesu toczenia kompozytu metalowo-ceramicznego, mikroskop optyczny do analizy zużycia płytek skrawających, profilometr do pomiarów chropowatości powierzchni. Dodatkowym wzmocnieniem rozdziału 3 jest opis statystycznej obróbki wyników badań.

W rozdziale 4 pt. *Wyniki i analiza badań* mgr inż. Michał Szymański prezentuje wyniki badań doświadczalnych wraz z analizą uzyskanych rezultatów. Rozdział ten jest obszerny i stanowi ok. 31 % całości pracy. Wyniki badań eksperymentalnych Autor przedstawia w dwóch głównych podrozdziałach. Pierwszy podrozdział dotyczy analizy procesu wytwarzania metalowego kompozytu z nasycanym zbrojeniem, który został podzielony na kolejne 6 podrozdziałów. Trzy pierwsze podrozdziały odnoszą się do procesu technologicznego wytwarzania kształtek ceramicznych nasycanych stopem AlSi11. W sposób kompleksowy Doktorat skupia się na trzech zasadniczych kwestiach: obliczeniach minimalnej średnicy kapilary, ocenie porowatości preformy ceramicznej oraz jej nasycaniu ciekłym stopem aluminium. Kolejny podrozdział dotyczy badania wytrzymałości mechanicznej zbrojenia ceramicznego. Autor na podstawie przeprowadzonych badań rozpoznawczych polegających na badaniu odporności termicznej czterech rodzajów włókien wytypował włókna glinokrzemianowe ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) do wykonania dwuskładnikowego zbrojenia ceramicznego (cząstki Al_2O_3 /włókna $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$). W podrozdziale dotyczącym badania właściwości mechanicznych i tribologicznych hybrydowego materiału kompozytowego Doktorant w sposób syntetyczny opisuje uzyskane wyniki badań, poddaje je wnikliwej analizie i wyciąga konstruktywne wnioski. Dużym wzmocnieniem głównego podrozdziału 4.1 jest podrozdział (4.1.6), który w sposób uporządkowany prezentuje proces wytwarzania kompozytowego odlewu kształtowego, co może mieć istotne znaczenie w przypadku potencjalnych możliwości wdrożenia przemysłowego. Drugi główny podrozdział dotyczy toczenia wykończeniowego materiału kompozytowego. Autor dokonuje analizy wpływu parametrów technologicznych procesu toczenia w/w materiału na: trwałość narzędzi skrawających, wartość sił skrawania, wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni obrobionej. Do oceny zużycia ostrzy skrawających (wykonanych z regularnego azotku boru i polikrystalicznego diamentu) stosuje skaningową mikroskopię elektronową z mikroanalizą rentgenowską (SEM-EDS). Ustala rodzaje zużycia narzędzi skrawających i mechanizmy ich powstawania. Mam pewną uwagę odnośnie pomiarów struktury geometrycznej powierzchni kompozytu metalowo-ceramicznego. Doktorant przedstawia w pracy obrazy izometryczne powierzchni S-L (3D) hybrydowego kompozytu o osnowie metalowej z nasycanym ceramicznym zbrojeniem po skrawaniu wykończeniowym, podając przy tym parametry chropowatości R_a i R_z , które odnoszą się do profilu chropowatości (2D). W Mojej ocenie Autor powinien podać parametry struktury geometrycznej powierzchni

np. parametr Sq (średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni) i parametr Sa (średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni od powierzchni średniej).

Należy podkreślić, że Doktorant właściwie wykorzystuje zastosowane w pracy techniki badawcze, które posłużyły do oceny wytworzonego materiału kompozytowego o osnowie aluminiowej z nasycanym zbrojeniem.

Wyniki badań Autor bardzo starannie analizuje i interpretuje, co świadczy o Jego dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej z zakresu inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej, technik wytwarzania oraz tribologii. Dodatkowo wyniki badań są dokumentowane w postaci bardzo dobrej jakości fotografii (np. obrazów mikrostruktury kompozytu metalowo-ceramicznego) oraz wykresów (np. pomiarów parametrów chropowatości).

Zrealizowane przez Doktoranta badania stanowią cenne uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy i są ważnym osiągnięciem naukowym zawartym w niniejszej rozprawie.

W rozdziale 5 pt. *Wnioski końcowe* sformułowano wnioski podsumowujące uzyskane wyniki badań. Wnioski zostały podzielone na 3 grupy tj. poznawcze, użytkowe oraz do dalszych badań.

Bibliografia została bardzo starannie dobrana na podstawie aktualnego stanu wiedzy publikacji krajowych oraz w głównej mierze zagranicznych i odpowiada zagadnieniom poruszonym w poszczególnych rozdziałach rozprawy doktorskiej.

Za oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny *inżynieria mechaniczna* zaliczam:

- wybór materiału osnowy oraz materiałów zbrojenia,
- szeroki zakres badań eksperymentalnych hybrydowego kompozytu o osnowie metalowej z nasycanym ceramicznym zbrojeniem,
- wnikliwą analizę uzyskanych wyników badań,
- możliwość zastosowania wytworzonego kompozytu metalowo-ceramicznego w przemyśle elektronicznym.

Do pewnych mankamentów występujących w pracy zaliczam:

- dosyć uboga analiza mikrostrukturalna kompozytu,
- brak badań strukturalnych hybrydowego materiału kompozytowego metodą dyfrakcji rentgenowskiej,
- brak badań odporności korozyjnej metalowego kompozytu z nasycanym zbrojeniem,
- brak wyeksponowania aspektów ekonomicznych opracowanej technologii wytwarzania kompozytu metalowo-ceramicznego,

- zbyt skromna analiza statystyczna wyników.

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Szymańskiego ma charakter doświadczalno-aplikacyjny. Uzyskane wyniki badań mogą zostać wdrożone do różnych gałęzi przemysłu. Opracowanie redakcyjne rozprawy jest na bardzo wysokim poziomie edycyjnym.

Rozprawę doktorską mgr inż. Michała Szymańskiego oceniam bardzo wysoko i stwierdzam, że przedstawione wyniki badań poszerzają wiedzę w zakresie wytwarzania hybrydowych materiałów kompozytowych. Ponadto chciałbym podkreślić, że niniejsza rozprawa doktorska stanowi oryginalny wkład w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*, a szczególnie w rozwój wiedzy w zakresie technik wytwarzania, inżynierii powierzchni oraz inżynierii materiałowej.

4. Uwagi krytyczne i błędy edytorskie

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Szymańskiego zawiera pewne nieścisłości oraz błędy redakcyjne. Poniżej szczegółowa lista uwag.

1. str. 11 - Autor użył zwrotu: w przemyśle wojskowym. Proponuję używać zwrotu: w przemyśle zbrojeniowym lub w przemyśle obronnym.
2. str. 15 - Autor użył zwrotu: Średni ubytek materiału ... Powinno być: Średni ubytek objętości materiału ...
3. str. 21 - Autor użył zwrotu: Hybrydowe kompozyty z metalową osnową metalową ... Powinno być: Hybrydowe kompozyty z metalową osnową ...
4. str. 49 - we wzorze 6 wytrzymałość na zginanie R_g jest podana w jednostce $[kg/mm^2]$. Dlaczego Autor stosuje jednostkę spoza układu SI ?
5. str. 51, 52, 53, 55, 64, 73 - gęstość jest podana w jednostce $[g/cm^3]$. Dlaczego Autor stosuje jednostkę spoza układu SI ?
6. str. 53, 64 - Twardość Brinella HB podana jest w jednostce $[kg/mm^2]$, a powinna być w $[N/mm^2]$.
7. str. 66, 80, 83, 84 - wyraz jest napisany „przeciw-próbka”, pisze się „przeciwpróbka”.
8. str. 66 - Autor użył zwrotu: ... struktury geometryczne powierzchni ... Powinno być: ... struktury geometrycznej powierzchni ...
9. str. 70 - Autor użył zwrotu: Badania chropowatości struktury geometrycznej powierzchni ... Należy użyć poprawnego zwrotu: Pomiary struktury geometrycznej powierzchni ...
10. str. 81 - Autor użył zwrotu: ... szerokość ścieżki ... Powinno być: ... szerokość śladu zużycia ...

11. str. 81 - Autor użył zwrotu: ... gdzie dochodzi do stabilizacji procesu zużycia. Powinno być: ... gdzie dochodzi do stabilizacji współczynnika tarcia.
12. str. 84 - Autor użył zwrotu: ... w warunkach suchych ... Powinno być: ... w warunkach tarcia technicznie suchego ...
13. str. 84 - Autor użył zwrotu: ... waha się od 0.5 do 0.65 ... Powinno być: ... waha się od 0,5 do 0,65 ...
14. str. 91 - Autor użył zwrotu: ... wartość przekraczającą 1 *Ra*. Powinno być: ... wartość przekraczającą 1 μm .
15. str. 96 - Autor użył zwrotu: Zaobserwowano również lokalne przypawanie cząstek kompozytu ... Proszę wyjaśnić, co to jest lokalne przypawanie cząstek kompozytu ?

Uwagi krytyczne zawarte w tym punkcie recenzji nie obniżają wartości merytorycznej i ogólnej pozytywnej oceny rozprawy. Mają one charakter dyskusyjny i porządkowy, co powinno pomóc Autorowi podczas przygotowywania artykułów do czasopism naukowych.

W ramach dyskusji proszę, aby Doktorant ustosunkował się do poniższych pytań:

1. Na jakiej podstawie Autor określił parametry wytwarzania kształtek ceramicznych? Czy przeprowadzono optymalizację procesu?
2. Jakie było kryterium wyboru tribotestera Bruker UMT2 do przeprowadzenia badań tribologicznych wytworzonego hybrydowego materiału kompozytowego?
3. Jaka jest perspektywa wdrożenia do gospodarki narodowej opracowanej technologii wytwarzania kompozytu metalowo-ceramicznego?

5. Wniosek końcowy

Reasumując można stwierdzić, że Doktorant w pełni opanował techniki pomiarowe, przeprowadził szeroko zakrojone badania i uzyskał oryginalne wyniki zarówno o znaczeniu poznawczym, jak i przede wszystkim aplikacyjnym. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Z lektury dysertacji wynika, że Autor posiada szeroką wiedzę w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna oraz potwierdza nabycie umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne mają w większości charakter dyskusyjny oraz odnoszą się do uchybień natury wydawniczej. Należy podkreślić, że nie rzutują one jednak istotnie na wysoki poziom naukowy rozprawy.

Dlatego stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca mgr inż. Michała Szymańskiego pt. „Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym

zbrojeniem” spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto dysertacja zasługuje na wyróżnienie, o co niniejszym wnioskuję. Za wyróżnieniem rozprawy przemawiają moim zdaniem bardzo dobrze przeprowadzone i udokumentowane badania eksperymentalne, uzyskane wartościowe wyniki i ich wnikliwe przeanalizowanie oraz duże znaczenie aplikacyjne uzyskanych rezultatów badań.

