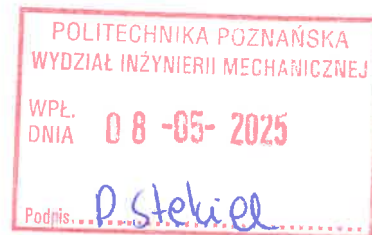


Wrocław, 25.04.2025 r.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Naplocha
Katedra Inżynierii Elementów Lekkich, Odlewnictwa i Automatyki
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska



Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Szymańskiego pt.: „Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym zbrojeniem”, którego promotorem jest dr hab. inż. Damian Przestacki z Politechniki Poznańskiej, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Paweł Szymański również z Politechniki Poznańskiej.

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie pisma DIM.075.57.2025 dr hab. inż. Bartosza Gapińskiego Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 4 marca 2025 r. oraz uchwały nr 4/III/02/2025 podjętej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej w dniu 24 lutego 2025 r.

2. Tematyka pracy i jej cel

Przedłożona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Michała Szymańskiego koncentruje się na zagadnieniach związanych z projektowaniem, wytwarzaniem oraz oceną właściwości mechanicznych i tribologicznych kompozytów metalowo-ceramicznych z wysokim udziałem fazy zbrojącej. Szczególne miejsce w pracy zajmuje zastosowanie metody infiltracji próżniowej ciekłym metalem do nasycania kształtek, które zawierają zarówno cząstki ceramiczne, jak i włókna. Autor podejmuje tematykę o dużym znaczeniu praktycznym i naukowym, wpisującą się w aktualne trendy rozwoju nowoczesnych materiałów inżynierskich, zwłaszcza w kontekście zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym.

Głównym celem pracy jest opracowanie i walidacja nowej technologii wytwarzania odlewów kształtowych z kompozytów metalowo-ceramicznych zawierających ponad 50% objętościowej fazy zbrojącej, której struktura nasycana jest w warunkach niskiego ciśnienia ciekłym metalem. Autor dąży do rozwiązania kluczowego problemu technologicznego, jakim jest uzyskanie jednorodnej dyspersji zbrojenia w osnowie oraz eliminacja aglomeracji cząstek, co dotychczas skutecznie ograniczało szerokie zastosowanie materiałów kompozytowych.

W ramach realizacji celu pracy dokonano przeglądu literatury dotyczącej aktualnego stanu wiedzy na temat metalowych kompozytów hybrydowych, analizując zarówno techniki ich wytwarzania, jak i możliwości obróbki skrawaniem. Autor wskazał na istotne luki badawcze, takie jak brak badań nad skrawalnością kompozytów z wysokim udziałem ceramicznego zbrojenia oraz ograniczenia wynikające z dotychczasowych metod nasycania zbrojenia ciekłym metalem.

Pomimo, że materiały kompozytowe są badane i rozwijane od wielu lat, pewne ich wady ograniczają szersze zastosowanie i wymagają dalszych analiz i udoskonaleń. Stąd do kluczowych zadań niniejszej pracy należy:

1. Zaprojektowanie i wytworzenie kształtki zbrojenia ceramicznego, możliwej do nasycenia ciekłym metalem.
2. Opracowanie technologii infiltracji próżniowej do nasycania wcześniej przygotowanego zbrojenia ciekłym metalem w warunkach kontrolowanych.
3. Ocena właściwości mechanicznych i tribologicznych wytworzonych materiałów.
4. Badania skrawalności kompozytów, w tym wpływu parametrów obróbki na siły skrawania i chropowatość powierzchni.

Tak sformułowane zadania o charakterze naukowym i utylitarnym, jak również zdefiniowane cele pracy, w moim przekonaniu zawierają pierwiastek nowości i będą stanowić oryginalny wkład do inżynierii kompozytów z nasycanym umocnieniem. Zakres prac obejmuje dwa zasadnicze obszary: badania wstępne dotyczące opracowania parametrów wytwarzania i nasycania kształtek ceramicznych oraz badania właściwości materiałów wraz z analizą skrawalności. Tematyka pracy ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej, technologii odlewnictwa, obróbki skrawaniem oraz badań tribologicznych.

3. Ocena redakcyjnej formy rozprawy

Przedłożona do oceny praca doktorska liczy 128 stron, z klasyczną sekwencją rozdziałów, obejmującą studium literaturowe oraz badania własne. Studium wraz ze spisem treści, wykazem oznaczeń i wprowadzeniem przedstawiono na 46 stronach. Zawiera ono 3 zasadnicze podrozdziały przedstawiające między innymi charakterystykę metalowych kompozytów o osnowie aluminiowej, wytwarzanie porowatego zbrojenia ceramicznego oraz ocenę skrawalności tych materiałów. Część ta charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym, logiczną strukturą i spójnością językową. Język pracy jest techniczny, lecz zrozumiały, a dobór literatury - szeroki i aktualny. Jednocześnie należy podkreślić, że przedstawione zestawienie badań i wniosków stanowi solidny fundament dla dalszych badań eksperymentalnych. W zamykającym podsumowaniu części teoretycznej zaakcentowano złożoność zjawisk, ich synergiczne oddziaływanie w zastosowaniach metalowych materiałów kompozytowych.

Badania własne, które stanowią ok. 2/3 całości, są opisane w kilku rozdziałach, logicznie ze sobą powiązanych, z wiodącym wątkiem i celem badań. Czytelnik bez trudu może wyodrębnić kolejne etapy prac, zapoznać się z ich wynikami i interpretacją. Każdy etap badań jest częścią spójnej całości dającej pogląd na temat wpływu zastosowanych parametrów wytwarzania na strukturę i właściwości kompozytów. Większość badań jest udokumentowanych graficznie, a ich wyniki uporządkowane na wykresach, dając możliwość szybkiego wglądu w uzyskane efekty.

Należy podkreślić, że Doktorant właściwie łączy różne wątki badań, kładzie nacisk na istotne zagadnienia wykazując się dojrzałością i doświadczeniem w prowadzeniu pracy naukowej. Pomimo przeanalizowania różnych czynników i podawania dużej ilości danych ich przyswajanie nie wymaga większego wysiłku. Jakość fotografii czy też udokumentowanych obrazów mikroskopii elektronowej jest bardzo dobra. Ogólnie praca sprawia wrażenie rzetelnej dokumentacji badawczej, bez zbędnych ozdobników i nieprzydatnych odniesień.

4. Wyniki badań i wnioski

Przedłożona rozprawa doktorska stanowi efekt kompleksowej analizy procesu wytwarzania i obróbki mechanicznej hybrydowych kompozytów metalowo-ceramicznych o osnowie aluminiowej. Autor dokonał wszechstronnej oceny wpływu składu materiału oraz parametrów procesu infiltracji i obróbki skrawaniem na właściwości mechaniczne, tribologiczne i technologiczne otrzymanego materiału. Praca zawiera zarówno istotne wnioski poznawcze, jak i

użyteczne, które mogą znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej oraz stanowić punkt wyjścia dla dalszych badań.

Jednym z kluczowych osiągnięć autora jest wykazanie, że infiltracja próżniowa stanowi skuteczną metodę wytwarzania kształtowych odlewów kompozytowych, przy jednoczesnym ograniczeniu porowatości gazowej i zachowaniu integralności strukturalnej zbrojenia ceramicznego. Jest to istotne osiągnięcie w kontekście dotychczas dominujących metod infiltracji ciśnieniowej, które często prowadzą do degradacji struktury zbrojenia. Autor szczegółowo analizuje zjawiska kapilarne towarzyszące procesowi infiltracji i formułuje zasady doboru parametrów nasycania. Na szczególną uwagę zasługują rozważania teoretyczne i obliczenia minimalnej średnicy kapilary. Autor w przejrzysty sposób identyfikuje kluczowy parametr procesu nasycania, tj. wymaganą średnicę porów kapilarnych, niezbędną do zajścia infiltracji. Prezentacja warunku ciśnienia wypadkowego $\Delta P > 0$ jako podstawy termodynamicznej procesu oraz wyznaczenie wartości granicznej średnicy kapilary wynoszącej 29 μm potwierdzają staranność obliczeń oraz umiejętność operowania teorią zjawisk powierzchniowych. Taki sposób podejścia jest istotny nie tylko z punktu widzenia naukowego, ale także praktycznego, gdyż pozwala na świadome projektowanie parametrów mikrostruktury kształtki ceramicznej.

W dalszej części pracy Autor przedstawia pomiary porowatości kształtek zbrojących, co umożliwiło oszacowanie udziału objętościowego obu faz: ceramicznej i metalowej. Pomiary wykonano dla jednej konkretnej zawartości włókna glinokrzemianowego (3,66%), a wskazana wartość porowatości (ok. 49,8%) jest wystarczająca dla skutecznego nasycania metalem. Ocenę samego procesu nasycania Autor oparł na analizie metalograficznej, która potwierdza wysoką jakość uzyskanego materiału: równomierny rozkład faz, brak dużych, nienasyconych porów oraz skuteczne wypełnienie osnową metaliczną struktury ceramicznej. Autor prawidłowo interpretuje wpływ ziarnistości umocnienia (tylko ceramika o ziarnistości FEPA100 została skutecznie nasycona), co pozwala na uzasadnione ograniczenie dalszych badań do tej jednej granulacji. Opis badań jest przejrzysty, logiczny i spójny. Autor płynnie przechodzi od analizy teoretycznej do eksperymentu, a następnie do interpretacji wyników. Szczegółowość opisów oraz odniesienia do tabel i rysunków wzmacniają wiarygodność przedstawionych danych, mimo że drobne uproszczenia stylistyczne oraz unifikacja terminologiczna mogłyby zwiększyć czytelność i przejrzystość przekazu.

Badania wytrzymałościowe obejmują wnikliwą analizę wpływu temperatury wyżarzania oraz zawartości włókien glinokrzemianowych na wytrzymałość ceramicznych kształtek zbrojących. Zastosowanie włókien o wysokiej odporności termicznej zostało dobrze uzasadnione, a uzyskane wyniki wykazały istotny wzrost wytrzymałości mechanicznej do optymalnej zawartości 3,66%.

Badania wytrzymałości na rozciąganie, podobnie jak poprzednio, potwierdzają że obecność włókien glinokrzemianowych wpływa korzystnie na wytrzymałość do pewnego poziomu, po czym następuje jej spadek. Autor odwołuje się przy tym do mechanizmów mikrostrukturalnych, takich jak spiętrzenie dyslokacji i różnic w rozszerzalności cieplnej, co świadczy o głębokim zrozumieniu fizyki zjawisk.

Wyniki badań twardości i zużycia tribologicznego są przedstawione jasno, z odpowiednią interpretacją. Choć nie stwierdzono istotnej korelacji między twardością a zawartością włókien, wyraźnie zaznaczono poprawę odporności na zużycie wraz ze wzrostem udziału zbrojenia. Z kolei analiza współczynnika tarcia została przeprowadzona szczegółowo, choć nie wykazano dużych różnic między próbkami – co również zostało rzeczowo wyjaśnione.

Proces projektowania oraz wytwarzania elementu z kompozytu metalowo-ceramicznego o złożonej geometrii został bardzo dobrze udokumentowany i szczegółowo opisany. Autor wykazuje wysoki poziom kompetencji technicznej, łącząc wiedzę z zakresu materiałoznawstwa, inżynierii mechanicznej oraz technologii wytwarzania. Wybór próbki badawczej – wałka z rowkiem wpustowym i kołami zębatymi – jest trafny i dobrze uzasadniony, ponieważ pozwala realnie ocenić możliwości zastosowania opracowanego materiału w warunkach przemysłowych.

Szczególne uznanie budzi przemysłana integracja technologii CAD oraz druku 3D w procesie formowania zbrojenia ceramicznego. Wskazuje to na nowoczesne podejście badawcze i zrozumienie aktualnych trendów w inżynierii mechanicznej. Opis procesu nasycania ciekłym stopem aluminium oraz wnioski z analizy metalograficznej są rzeczowe i poparte obserwacjami, które mają bezpośrednie znaczenie dla oceny jakości uzyskanego materiału kompozytowego.

Analiza toczenia wykończeniowego uwzględnia dobór materiałów narzędziowych oraz ich wpływ na jakość obróbki i zużycie narzędzi. Szczególną zaletą pracy jest systematyczne podejście badawcze – od prób wstępnych z różnymi narzędziami, przez szczegółowe porównanie narzędzi z CBN i PCD, aż po analizę SEM i EDS potwierdzającą występowanie określonych mechanizmów zużycia. Argumentacja dotycząca wyboru materiału z 3,66% zawartością włókien

glinokrzemianowych wydaje się uzasadniona na podstawie wcześniejszych wyników badań materiałowych.

Analizy parametrów skrawania (siły skrawania, zużycie narzędzi, parametry chropowatości) zostały przeprowadzone kompleksowo, a wyniki logicznie powiązano z mechanizmami fizycznymi zachodzącymi podczas obróbki. Doktorant przeprowadził bardzo rzetelną i wieloaspektową analizę trwałości narzędzi skrawających wykonanych z polikrystalicznego diamentu (PCD) w kontekście obróbki kompozytu metalowo-ceramicznego. Szczególnie cenne są spostrzeżenia dotyczące granicznych wartości zużycia ostrza ($VB_c \approx 0,17\text{--}0,18\text{ mm}$), po przekroczeniu których następuje zauważalny wzrost sił skrawania oraz pogorszenie jakości powierzchni. Analiza parametrów chropowatości R_a i R_z w funkcji zużycia ostrza jest spójna z obserwacjami mikroskopowymi, co świadczy o kompleksowym podejściu do tematu.

Również trafne jest powiązanie wyników sił skrawania z czasem eksploatacji narzędzia oraz identyfikacja mechanizmów zużycia (ściernego, adhezyjnego, dyfuzyjnego), co znacząco wzbogaca analizę. Wysoka jakość wnioskowania opiera się na empirycznych danych i dobrze dobranych kryteriach oceny (np. $VB_c = 0,3\text{ mm}$), co sprawia, że badania te mogą stanowić wartościowy wkład do wiedzy inżynierskiej w zakresie technologii obróbki trudnoskrawalnych materiałów.

Podsumowując, na podstawie analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej, na szczególne uznanie zasługuje:

- ✓ interdyscyplinarność – praca łączy zagadnienia z zakresu odlewnictwa, inżynierii produkcji oraz technologii obróbki skrawaniem, co świadczy o szerokim podejściu badawczym,
- ✓ zaprojektowanie i wykonanie innowacyjnej wielostopniowej matrycy do prasowania kształtek ceramicznych umożliwiającej precyzyjne zagęszczenie umocnienia i późniejszą infiltrację,
- ✓ kompleksowa charakterystyka materiału – przeprowadzono zarówno:
 - badania wytrzymałościowe i tribologiczne,
 - jak i badania technologiczne (skrawalność, trwałość narzędzi, struktura powierzchni),
- ✓ porównanie różnych materiałów narzędziowych – analiza efektywności narzędzi z ceramiki, CBN i PCD zwiększa użyteczność wyników w kontekście doboru narzędzi.

- ✓ przeprowadzenie gruntownej analizy parametrów skrawania w kontekście obróbki kompozytów, z naciskiem na powiązanie tych parametrów z wartościami chropowatości powierzchni obrabianego materiału oraz stopniem zużycia narzędzi skrawających,

Należy podkreślić, że wymienione osiągnięcia naukowe są wynikiem trafnie dobranej ścieżki badawczej, wnikliwych obserwacji i pomiarów. Doktorant wykonał kompleksowe badania właściwości mechanicznych, obserwacje mikroskopowe struktur i powierzchni narzędzi skrawających. Użycie tych wszystkich narzędzi jest dowodem bogatego warsztatu badawczego jaki zdobył Doktorant, a umiejętność dogłębnej analizy otrzymanych wyników badań świadczy o jego dużej wiedzy i dojrzałości naukowej.

Zapoznając się z przedłożoną pracą, która jest bardzo wartościowym studium nad fundamentalnymi zjawiskami towarzyszącymi procesom nasycania ciekłym metalem ceramiki oraz obróbki skrawaniem, zauważyłem pewne zagadnienia, które moim zdaniem wymagają wyjaśnienia lub doprecyzowania. Pytania te nie podważają merytorycznej wartości pracy, mam nadzieję przysłużą się dalszemu pogłębianiu prowadzonych analiz, a zostały sformułowane następująco:

- ✓ Proszę o próbę interpretacji zjawiska, w którym zawartość włókien glinokrzemianowych w fazie wzmacniającej wynosząca 3,66% poprawia wytrzymałość na rozciąganie, podczas gdy przy wyższej zawartości włókien obserwuje się jej osłabienie.
- ✓ Autor zaznacza, że materiał kompozytowy charakteryzuje się około trzykrotnie wyższą twardością w porównaniu do osnowy. Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie, na czym polega ten proces umocnienia i jakie czynniki mają na niego wpływ.
- ✓ Czy przeprowadzono badania mikroskopowe warstwy wierzchniej materiału po testach ścierania? Jaki jest wpływ włókien glinokrzemianowych na mechanizm zużycia ściernego materiału kompozytowego? Ponadto, proszę o dokładniejsze wyjaśnienie, jak należy rozumieć mechanizm korozyjny, o którym wspomniano na stronie 84 pracy.
- ✓ W jaki sposób prasowano kształtkę w matrycy? Czy kontrolowano stopień zagęszczenia umocnienia w różnych miejscach kształtki, zwłaszcza na krawędziach i w części zębatki?
- ✓ Autor pracy zaznacza, że różnica pomiędzy wymiarami uzyskanymi w druku 3D a założonymi wynika z konfiguracji drukarki. Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie, dlaczego

obserwuje się zmniejszenie wymiarów formy 3D na średnicy, a jednocześnie zwiększenie na wysokości?

- ✓ Szkoda, że nie wykonano badań porównawczych, w tym obróbki odlewu nieumocnionego. Czy w przyszłości planowane są takie badania, które pozwoliłyby na pełniejsze porównanie wyników uzyskanych w pracy?

5. Wniosek końcowy

W oparciu o analizę przedłożonej rozprawy doktorskiej należy stwierdzić, że Pan mgr. inż. Michał Szymański po przedstawieniu zakresu i celu pracy konsekwentnie realizował przyjęty program prac technologicznych i materiałowych. Posługując się zaawansowanym aparatem badawczym przeprowadził obszerny i złożony cykl analiz zarówno procesu wytwarzania jak i materiałów kompozytowych. Doktorant osiągnął postawione cele pracy, stawiając zrozumiałe i jednoznaczne wnioski. Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt. „Wytwarzanie i obróbka metalowych kompozytów hybrydowych z nasycanym zbrojeniem” spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz.U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.). Praca stanowi nowatorskie rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza gruntowną wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie badań właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych i obróbki skrawaniem. Wnioskuje zatem o dopuszczenie Pana mgr inż. Michała Szymańskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej.

Krzysztof Naplocha

Kierownik
Katedry Inżynierii Elementów Lekkich,
Odlewnictwa i Automatyki

prof. dr hab. inż. Krzysztof Naplocha
(1)