

Imię i nazwisko recenzenta:

Warszawa, 15.06.2026r.

**dr hab. inż. Dawid Myszka, prof. PW**

Politechnika Warszawska

Instytut Technik Wytwarzania

ul. Narbutta 85

02-524 Warszawa

## **Recenzja pracy doktorskiej**

**mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego**

### **Tytuł rozprawy:**

***Formation of the structure of a gray cast iron matrix composite reinforced with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles as an advanced material for brake discs***

**Promotor: dr hab. inż. Jarosław Piątkowski, prof. PŚ**

## **1. Podstawa opracowania**

Recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 19 maja 2026r. – sygnatura RDIMa.512.1.2026.RM.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.).

## **2. Charakterystyka i opis rozprawy**

### **2.1. Wprowadzenie**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego pt. „*Formation of the structure of a gray cast iron matrix composite reinforced with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles as an advanced material for brake discs*” obejmuje zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej, odlewnictwa oraz materiałów kompozytowych, koncentrując się na możliwości wytwarzania kompozytów o osnowie żeliwa szarego lokalnie wzmacnianych cząstkami ceramicznymi SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> z przeznaczeniem na tarcze hamulcowe. Tematyka rozprawy wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju materiałów stosowanych w motoryzacji, związane z koniecznością zwiększania trwałości elementów ciernych przy jednoczesnym ograniczaniu emisji pyłów eksploatacyjnych i spełnianiu coraz bardziej restrykcyjnych wymagań środowiskowych.

Rozprawa liczy łącznie 127 stron zasadniczego tekstu i została podzielona na siedem głównych rozdziałów obejmujących przegląd literatury, koncepcję badań, metodykę, badania wstępne, badania zasadnicze, analizę wyników oraz wnioski końcowe. Dodatkowo pracę uzupełniają streszczenie, bibliografia, spis rysunków, spis tabel oraz atlas mikrostruktur. Układ pracy jest logiczny i odpowiada klasycznej strukturze rozprawy eksperymentalnej. Kolejność rozdziałów umożliwia prześledzenie toku rozumowania Autora – od identyfikacji problemu badawczego, poprzez opracowanie programu badań, aż do analizy uzyskanych wyników i sformułowania wniosków.

Celem głównym pracy było opracowanie koncepcji i technologii wytwarzania kompozytowych tarcz hamulcowych na osnowie żeliwa EN-GJL-150 z wykorzystaniem porowatych preform ceramicznych zawierających cząstki SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Autor postawił sobie również ambitny cel naukowy polegający na wyjaśnieniu zjawisk fizykochemicznych zachodzących na granicy faz pomiędzy ciekłym żelivem a materiałem ceramicznym oraz określeniu wpływu tych zjawisk na proces zarodkowania

grafitu i krystalizacji osnowy metalicznej. Szczególne miejsce w pracy zajmuje próba rozwinięcia teorii zarodkowania Riposana poprzez uwzględnienie roli cząstek SiC i  $Al_2O_3$  jako potencjalnych substratów heterogenicznego zarodkowania grafitu.

Istotnym atutem rozprawy jest ściśle powiązanie badań laboratoryjnych z praktyką przemysłową. Znaczna część eksperymentów została przeprowadzona we współpracy z przedsiębiorstwem Brembo Polska Sp. z o.o., a końcowym etapem badań była weryfikacja opracowanej koncepcji w warunkach rzeczywistej produkcji przemysłowej. Takie podejście zwiększa aplikacyjny wymiar pracy i stanowi jej niewątpliwą wartość z punktu widzenia potencjalnych wdrożeń przemysłowych.

Jednocześnie należy zauważyć, że rozprawa ma wyraźnie aplikacyjny charakter, co miejscami odbywa się kosztem pogłębionej analizy naukowej. Dotyczy to zwłaszcza rozdziałów poświęconych przemysłowym aspektom produkcji tarcz hamulcowych oraz działalności przedsiębiorstwa Brembo, które choć dostarczają cennego kontekstu technologicznego, nie zawsze pozostają w bezpośrednim związku z głównym problemem naukowym rozprawy. W rezultacie niektóre fragmenty pracy przyjmują bardziej charakter opracowania technologicznego niż klasycznej rozprawy doktorskiej ukierunkowanej na rozwiązanie fundamentalnego problemu naukowego.

Pewien niedosyt budzi również relacja pomiędzy ambitnie sformułowanym celem poznawczym a zakresem zastosowanych metod badawczych. Autor deklaruje analizę mechanizmów zarodkowania i krystalizacji w obecności cząstek ceramicznych, jednak podstawę wnioskowania stanowią głównie badania ATD, obserwacje mikrostrukturalne oraz analiza właściwości użytkowych kompozytu. Metody te pozwalają na identyfikację skutków zachodzących procesów, jednak jedynie pośrednio umożliwiają weryfikację postulowanych mechanizmów fizykochemicznych.

Pomimo powyższych uwag należy stwierdzić, że rozprawa stanowi obszerne i wartościowe opracowanie problematyki żeliwnych kompozytów wzmacnianych cząstkami ceramicznymi. Autor zgromadził znaczną ilość materiału eksperymentalnego, obejmującego zarówno badania laboratoryjne, jak i przemysłowe, a uzyskane wyniki posiadają istotne znaczenie poznawcze oraz praktyczne. Praca wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju nowoczesnych materiałów dla przemysłu motoryzacyjnego i podejmuje zagadnienie o wysokim potencjale aplikacyjnym.

## **2.2. Dobór i wykorzystanie źródeł literaturowych**

Przegląd literatury przedstawiony w rozprawie mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z odlewnictwem żeliwa, materiałami kompozytowymi, procesami krystalizacji, materiałami ciernymi oraz konstrukcją i eksploatacją tarcz hamulcowych. Autor zgromadził obszerny materiał bibliograficzny obejmujący publikacje naukowe, monografie, normy oraz materiały techniczne związane zarówno z inżynierią materiałową, jak i przemysłem motoryzacyjnym. Świadczy to o dużym nakładzie pracy włożonym w rozpoznanie aktualnego stanu wiedzy oraz dobrej orientacji Doktoranta w problematyce związanej z tematyką rozprawy.

Na pozytywną ocenę zasługuje fakt, że Autor uwzględnił znaczną liczbę publikacji zagranicznych dotyczących kompozytów metalowo - ceramicznych, właściwości tribologicznych materiałów stosowanych na elementy układów hamulcowych oraz mechanizmów krystalizacji żeliwa. Szczególnie wartościowa jest część poświęcona teorii zarodkowania grafitu oraz wpływowi dodatków niemetalicznych na proces tworzenia struktury żeliwa, ponieważ stanowi ona bezpośrednie uzasadnienie podjętego programu badawczego. W sposób uporządkowany przedstawiono również aktualne kierunki rozwoju materiałów przeznaczonych do produkcji tarcz hamulcowych, co pozwala właściwie osadzić problem badawczy w kontekście współczesnych wyzwań technologicznych i środowiskowych.

Jednocześnie należy zauważyć, że część literaturowa pracy jest bardzo rozbudowana i obejmuje również zagadnienia jedynie pośrednio związane z głównym problemem naukowym rozprawy. Dotyczy to zwłaszcza fragmentów poświęconych historii rozwoju odlewnictwa, historii układów hamulcowych

oraz szerokiej charakterystyce działalności przemysłowej przedsiębiorstwa Brembo. Choć informacje te tworzą interesujące tło technologiczne, ich rozbudowany zakres powoduje, że część przeglądowna miejscami przyjmuje charakter opisowy, a proporcje pomiędzy treściami ogólnymi a zagadnieniami bezpośrednio związanymi z formowaniem struktury kompozytu żeliwnego nie zawsze wydają się optymalne.

Pewien niedosyt budzi również stopień krytycznej analizy cytowanych źródeł. Autor bardzo sprawnie przedstawia wyniki badań innych autorów, jednak rzadziej podejmuje próbę ich wzajemnej konfrontacji, wskazania rozbieżności interpretacyjnych czy identyfikacji ograniczeń stosowanych metod badawczych. W wielu przypadkach literatura pełni przede wszystkim funkcję informacyjną, podczas gdy bardziej pogłębiona analiza mogłaby lepiej uzasadnić lukę naukową, którą miała wypełnić realizowana rozprawa.

Dotyczy to zwłaszcza zagadnień związanych z oddziaływaniem cząstek SiC i  $Al_2O_3$  na proces zarodkowania grafitu. Autor przywołuje liczne publikacje dotyczące potencjalnej roli tych cząstek jako substratów heterogenicznego zarodkowania, jednak w ograniczonym stopniu analizuje rozbieżności występujące w literaturze oraz różnice wynikające z odmiennej metodyki badań, rodzaju osnowy metalicznej czy warunków krystalizacji. Szersza analiza tych zagadnień pozwoliłaby wyraźniej określić rzeczywisty stopień nowości podjętego problemu badawczego.

W dalszych częściach rozprawy literatura jest wykorzystywana do interpretacji wyników badań własnych, jednak nie zawsze w stopniu odpowiadającym potencjałowi zgromadzonego materiału bibliograficznego. W szczególności podczas dyskusji wyników dotyczących mikrostruktury kompozytów oraz właściwości tribologicznych można byłoby szerzej odnieść uzyskane rezultaty do wyników prezentowanych przez innych badaczy. Pozwoliłoby to lepiej ocenić znaczenie uzyskanych wyników na tle światowego dorobku naukowego oraz wyraźniej wskazać elementy stanowiące oryginalny wkład Autora.

Należy stwierdzić jednak, że Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością literatury przedmiotu oraz zgromadził obszerny materiał źródłowy dotyczący problematyki objętej rozprawą. Dobór literatury należy ocenić jako właściwy i wystarczający do realizacji postawionych celów badawczych. Pewne zastrzeżenia budzi natomiast nadmierne rozbudowanie części ogólnej oraz stosunkowo ograniczony zakres krytycznej analizy prezentowanych wyników literaturowych. Uwagi te nie obniżają istotnie wartości merytorycznej przeglądu literatury, wskazują jednak obszary, w których jego naukowy charakter mógłby zostać dodatkowo wzmocniony.

### **2.3. Tezy badawcze**

W rozprawie Autor sformułował tezy badawcze związane z możliwością wykorzystania cząstek ceramicznych SiC i  $Al_2O_3$  do kształtowania struktury kompozytu o osnowie żeliwa szarego przeznaczonego na tarcze hamulcowe. Głównym założeniem naukowym pracy było wykazanie, że obecność odpowiednio przygotowanych preform ceramicznych może wpływać na proces krystalizacji żeliwa, modyfikować warunki zarodkowania grafitu oraz prowadzić do uzyskania materiału kompozytowego o korzystniejszych właściwościach użytkowych niż konwencjonalne żeliwo stosowane na tarcze hamulcowe.

Pozytywnie należy ocenić fakt, że postawione tezy pozostają w ścisłym związku z celem rozprawy i zostały konsekwentnie rozwinięte w programie badań. Autor podjął próbę połączenia zagadnień materiałowych związanych z procesami krystalizacji i tworzenia mikrostruktury z wymaganiami eksploatacyjnymi stawianymi współczesnym materiałom ciernym. Dzięki temu tezy mają zarówno wymiar poznawczy, jak i aplikacyjny, co dobrze wpisuje się w charakter współczesnych badań prowadzonych w obszarze inżynierii materiałowej.

Na uwagę zasługuje również próba odniesienia procesu formowania struktury kompozytu do teorii heterogenicznego zarodkowania grafitu, w szczególności do koncepcji rozwijanych przez

Riposana i współpracowników. Autor zakłada, że cząstki SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mogą pełnić funkcję aktywnych substratów zarodkowania, wpływając na przebieg krystalizacji osnowy żeliwnej. Tak sformułowana hipoteza posiada niewątpliwie charakter naukowy i stanowi interesujący punkt wyjścia do dalszych badań eksperymentalnych.

Jednocześnie należy zauważyć, że część tez została sformułowana w sposób stosunkowo szeroki, a ich zakres wykracza poza możliwości jednoznacznej weryfikacji przy użyciu zastosowanych metod badawczych. Dotyczy to zwłaszcza zagadnień związanych z identyfikacją mechanizmów zarodkowania grafitu na powierzchni cząstek ceramicznych. Autor formułuje ambitne założenia dotyczące przebiegu procesów fizykochemicznych zachodzących podczas infiltracji preform przez ciekłe żeliwo, jednak identyfikacja samych mechanizmów tych zjawisk opiera się w dużej mierze na pośrednim wnioskowaniu.

Pewien niedosyt budzi również brak wyraźnego rozdzielenia pomiędzy tezami o charakterze poznawczym a założeniami dotyczącymi efektów użytkowych. W rezultacie część tez odnosi się jednocześnie do procesów tworzenia struktury materiału oraz do poprawy właściwości eksploatacyjnych tarcz hamulcowych. Chociaż oba aspekty są ze sobą ściśle związane, bardziej precyzyjne rozgraniczenie hipotez naukowych od oczekiwanych efektów technologicznych zwiększyłoby przejrzystość koncepcji badawczej i ułatwiłoby ocenę stopnia ich weryfikacji.

W opinii recenzenta największą wartość naukową mają te elementy rozprawy, które dotyczą wpływu cząstek ceramicznych na proces krystalizacji i kształtowania mikrostruktury żeliwa. Natomiast tezy odnoszące się do poprawy właściwości tribologicznych czy możliwości przemysłowego zastosowania opracowanego materiału mają w większym stopniu charakter aplikacyjny i stanowią naturalną konsekwencję realizacji głównego celu badawczego.

Stwierdzam, że tezy badawcze zostały poprawnie powiązane z tematyką rozprawy i stanowią logiczną podstawę przeprowadzonych badań. Ich mocną stroną jest połączenie aspektów poznawczych i użytkowych, natomiast pewne zastrzeżenia budzi stopień precyzji części sformułowań oraz możliwość jednoznacznej weryfikacji niektórych mechanizmów postulowanych przez Autora na podstawie zastosowanego warsztatu badawczego.

## **2.4. Plan badań**

Plan badań przedstawiony w rozprawie został opracowany w sposób logiczny i konsekwentny, a jego struktura jest podporządkowana realizacji głównego celu pracy, jakim było opracowanie kompozytu o osnowie żeliwa szarego wzmocnianego cząstkami ceramicznymi SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przeznaczonego do zastosowań w tarczach hamulcowych. Kolejne etapy badań tworzą spójny ciąg działań obejmujący zarówno projektowanie materiału kompozytowego, analizę procesów jego wytwarzania, jak i ocenę właściwości strukturalnych oraz użytkowych otrzymanych materiałów.

Program badań został podzielony na kilka wzajemnie powiązanych etapów. W pierwszej kolejności Autor przeprowadził analizę właściwości materiałów wyjściowych oraz opracował technologię przygotowania ceramicznych preform zawierających cząstki SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Następnie zrealizowano badania związane z infiltracją preform ciekłym żeliwem oraz oceną wpływu zastosowanych materiałów ceramicznych na proces krystalizacji i tworzenia mikrostruktury kompozytu. Kolejne etapy obejmowały analizę strukturalną, badania właściwości mechanicznych i tribologicznych oraz przemysłową weryfikację opracowanego rozwiązania w warunkach produkcji rzeczywistych tarcz hamulcowych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że plan badań nie ograniczał się wyłącznie do eksperymentów laboratoryjnych, lecz obejmował również etap wdrożeniowej weryfikacji wyników w warunkach przemysłowych. Takie podejście zwiększa wiarygodność uzyskanych rezultatów oraz pozwala na ocenę rzeczywistych możliwości zastosowania opracowanego materiału kompozytowego w praktyce przemysłowej.

Pozytywnie należy również ocenić kompleksowość programu badawczego. Autor uwzględnił zarówno badania materiałowe związane z procesem tworzenia kompozytu, jak i ocenę jego właściwości użytkowych, co pozwoliło na wieloaspektową analizę opracowanego rozwiązania. Dzięki temu możliwe było powiązanie zmian mikrostrukturalnych z właściwościami eksploatacyjnymi materiału, co stanowi jeden z mocniejszych elementów rozprawy.

Jednocześnie należy zauważyć, że plan badań został w znacznym stopniu podporządkowany realizacji celu aplikacyjnego, jakim było opracowanie materiału do produkcji tarcz hamulcowych. W rezultacie część eksperymentów koncentruje się na ocenie efektów końcowych procesu, podczas gdy mniejszy nacisk położono na bezpośrednie badanie mechanizmów fizykochemicznych odpowiedzialnych za oddziaływanie cząstek ceramicznych z ciekłym żeliwem. Dotyczy to zwłaszcza zagadnień związanych z heterogenicznym zarodkowaniem grafitu oraz procesami zachodzącymi na granicy faz metal - ceramika, które stanowią jeden z głównych elementów poznawczych rozprawy.

W opinii recenzenta pewne rozszerzenie programu badawczego o metody umożliwiające bardziej bezpośrednią identyfikację mechanizmów międzyfazowych mogłoby istotnie wzmocnić naukowy charakter pracy. Nie zmienia to jednak faktu, że przedstawiony plan badań jest dobrze przemyślany, spójny i pozwala na realizację zasadniczych celów rozprawy. Charakteryzuje się on logiczną strukturą, dużą kompleksowością oraz wyraźnym powiązaniem z problemem badawczym. Pewne zastrzeżenia dotyczą przede wszystkim relacji pomiędzy ambitnie sformułowanymi celami poznawczymi a zakresem badań umożliwiającymi ich bezpośrednią weryfikację, jednak uwagi te nie podważają poprawności przyjętej koncepcji badawczej.

## **2.5. Zastosowana metodyka badań**

Metodyka badań zastosowana w recenzowanej rozprawie charakteryzuje się dużą kompleksowością i obejmuje szeroki zakres metod eksperymentalnych wykorzystywanych w inżynierii materiałowej, odlewnictwie oraz badaniach materiałów kompozytowych. Autor zaplanował i przeprowadził badania umożliwiające ocenę zarówno procesu wytwarzania kompozytu żeliwnego wzmacnianego cząstkami ceramicznymi, jak również jego struktury oraz właściwości użytkowych. Przyjęta metodyka jest spójna z celem rozprawy i pozwala na wieloaspektową analizę opracowanego materiału.

W ramach programu badawczego wykorzystano między innymi analizę termiczno - derywacyjną (ATD), badania metalograficzne z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej i skaningowej (SEM), mikroanalizę składu chemicznego metodą EDS, pomiary twardości, badania tribologiczne oraz ocenę właściwości użytkowych gotowych tarcz hamulcowych. Uzupełnieniem badań laboratoryjnych była przemysłowa weryfikacja opracowanej technologii w warunkach produkcyjnych. Tak szeroki zakres zastosowanych metod należy uznać za jedną z mocnych stron rozprawy, ponieważ umożliwił analizę badanego materiału na różnych poziomach organizacji strukturalnej.

Na szczególne podkreślenie zasługuje połączenie klasycznych metod stosowanych w badaniach żeliwa z badaniami tribologicznymi oraz analizą funkcjonalną gotowego wyrobu. Dzięki temu Autor nie ograniczył się wyłącznie do charakterystyki materiałowej, lecz podjął próbę powiązania obserwowanych zmian mikrostrukturalnych z rzeczywistymi właściwościami eksploatacyjnymi kompozytu. Takie podejście zwiększa wartość aplikacyjną rozprawy i dobrze odpowiada współczesnym trendom badań prowadzonych w inżynierii materiałowej.

Pozytywnie należy również ocenić wykorzystanie analizy ATD do oceny przebiegu krystalizacji żeliwa w obecności cząstek ceramicznych. Metoda ta dostarczyła cennych informacji dotyczących zmian parametrów krystalizacji oraz pozwoliła na sformułowanie hipotez dotyczących wpływu SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na proces zarodkowania grafitu. W połączeniu z badaniami mikrostrukturalnymi stworzyło to podstawę do interpretacji obserwowanych zmian strukturalnych.

Jednocześnie należy zauważyć, że zastosowana metodyka pozwala przede wszystkim na ocenę skutków procesów zachodzących podczas tworzenia kompozytu, natomiast w mniejszym stopniu umożliwia ich bezpośrednią identyfikację na poziomie mechanizmów fizykochemicznych. Dotyczy to zwłaszcza jednego z głównych założeń rozprawy, odnoszącego się do roli cząstek SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> jako potencjalnych substratów heterogenicznego zarodkowania grafitu. Otrzymane wyniki stanowią wartościową podstawę do formułowania hipotez dotyczących przebiegu tych procesów, jednak zastosowane metody badawcze nie zawsze pozwalają na ich jednoznaczne potwierdzenie.

Pewien niedosyt budzi również ograniczone wykorzystanie metod ilościowej analizy mikrostruktury. W pracy przedstawiono bogaty materiał mikroskopowy, jednak jego potencjał mógł zostać szerzej wykorzystany do ilościowej oceny wpływu cząstek ceramicznych na parametry struktury żeliwa. Rozszerzenie badań o bardziej zaawansowane techniki charakteryzacji międzyfazowej mogłoby dostarczyć dodatkowych argumentów wspierających proponowaną interpretację mechanizmów tworzenia kompozytu.

W kontekście ambitnie sformułowanych celów poznawczych można również wskazać, że zastosowana metodyka koncentruje się przede wszystkim na analizie stanu końcowego materiału po procesie infiltracji. Mniejszy nacisk położono natomiast na bezpośrednie badanie zjawisk zachodzących podczas samego procesu oddziaływania ciekłego metalu z preformą ceramiczną. Z tego względu część wniosków dotyczących mechanizmów międzyfazowych opiera się na interpretacji pośrednich przesłanek eksperymentalnych.

## 2.6. Dyskusja wyników

Dyskusja wyników stanowi jeden z mocniejszych elementów recenzowanej rozprawy. Autor zgromadził obszerny materiał eksperymentalny obejmujący analizę procesów krystalizacji, badania mikrostrukturalne, ocenę właściwości mechanicznych i tribologicznych oraz przemysłową weryfikację opracowanego materiału kompozytowego. Przedstawione wyniki zostały uporządkowane w sposób logiczny i konsekwentny, a ich interpretacja jest na ogół spójna z przyjętymi założeniami badawczymi.

Na pozytywną ocenę zasługuje próba powiązania wyników analizy termiczno - derywacyjnej z obserwacjami mikrostrukturalnymi oraz właściwościami użytkowymi otrzymanych kompozytów. Autor wykazał, że obecność cząstek SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wpływa na przebieg krystalizacji żeliwa, a uzyskane wyniki wykorzystał do sformułowania hipotez dotyczących ich potencjalnej roli w procesie heterogenicznego zarodkowania grafitu. Szczególnie wartościowe jest podejście polegające na łączeniu informacji uzyskiwanych na różnych etapach badań i próba interpretacji ich w ramach jednej koncepcji mechanizmu tworzenia struktury kompozytu.

Mocną stroną dyskusji jest również umiejętne powiązanie zmian mikrostrukturalnych z właściwościami eksploatacyjnymi materiału. Autor wykazuje zależności pomiędzy obecnością stref kompozytowych, zmianami morfologii grafitu oraz poprawą odporności na zużycie ściernie, co pozwala lepiej zrozumieć praktyczne konsekwencje zastosowania ceramicznych preform wzmacniających. Szczególnie istotne znaczenie ma tutaj połączenie badań materiałowych z oceną właściwości tribologicznych, co zwiększa wartość aplikacyjną przedstawionych wyników.

Pozytywnie należy ocenić również fakt, że Autor nie ograniczył się wyłącznie do badań laboratoryjnych, lecz podjął próbę przemysłowej weryfikacji opracowanego rozwiązania. Dzięki temu dyskusja wyników obejmuje nie tylko aspekty strukturalne i materiałowe, ale również zagadnienia związane z możliwością implementacji opracowanej technologii w praktyce przemysłowej.

Jednocześnie należy zauważyć, że część rozważań dotyczących mechanizmów krystalizacji i zarodkowania grafitu opiera się na interpretacji pośrednich przesłanek eksperymentalnych. Autor formułuje interesujące hipotezy dotyczące aktywności zarodkotwórczej cząstek SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, jednak przedstawione wyniki nie zawsze pozwalają na ich jednoznaczną weryfikację. W wielu przypadkach obserwowane zmiany parametrów krystalizacji oraz mikrostruktury mogą stanowić argument

wspierający proponowaną interpretację, jednak nie przesądzają jednoznacznie o przebiegu postulowanych mechanizmów fizykochemicznych.

Pewien niedosyt budzi również ograniczony zakres ilościowej analizy zależności pomiędzy parametrami mikrostruktury a właściwościami użytkowymi kompozytów. Autor przedstawia liczne obserwacje jakościowe oraz bogaty materiał mikroskopowy, jednak bardziej rozbudowana analiza ilościowa mogłaby wzmocnić argumentację dotyczącą wpływu poszczególnych składników kompozytu na uzyskane właściwości eksploatacyjne.

W niektórych fragmentach dyskusji widoczna jest także przewaga interpretacji ukierunkowanej na potwierdzenie przyjętej koncepcji badawczej nad próbą rozważenia alternatywnych wyjaśnień obserwowanych zjawisk. Dotyczy to przede wszystkim zagadnień związanych z rolą cząstek ceramicznych w procesie zarodkowania grafitu. Szersze odniesienie do innych możliwych mechanizmów oddziaływania faz ceramicznych na proces krystalizacji mogłoby dodatkowo zwiększyć wartość naukową prowadzonych rozważań.

Podsumowując stwierdzam, że Autor wykazał umiejętność interpretacji złożonych zależności materiałowych oraz powiązania wyników uzyskanych różnymi metodami badawczymi. Przedstawione rozważania mają charakter dojrzały i dobrze uzasadniony eksperymentalnie. Pewne ograniczenia wynikają przede wszystkim z trudności związanych z bezpośrednią identyfikacją mechanizmów fizykochemicznych zachodzących podczas tworzenia kompozytu, co powoduje, że część proponowanych interpretacji ma charakter hipotez wymagających dalszej weryfikacji. Nie zmienia to jednak faktu, że dyskusja stanowi wartościowy element rozprawy i dobrze wykorzystuje zgromadzony materiał badawczy.

## **2.7. Prezentacja wyników – jakość tabel, wykresów i grafiki**

Prezentację wyników badań należy ocenić pozytywnie. Tabele, wykresy oraz materiał ilustracyjny zostały przygotowane starannie i w większości przypadków cechują się dobrą czytelnością oraz poprawnością edytorską. Szczególnie wartościowy jest bogaty materiał mikrostrukturalny dokumentujący przebieg procesów zachodzących w kompozytach żeliwno - ceramicznych.

Wykresy i zestawienia tabelaryczne są zasadniczo przejrzyste i umożliwiają prawidłową interpretację wyników. Pewien niedosyt może budzić ograniczony zakres ilościowej analizy części prezentowanych obserwacji mikrostrukturalnych, które w wielu przypadkach pełnią głównie funkcję ilustracyjną. Nie wpływa to jednak istotnie na ogólną ocenę sposobu prezentacji wyników.

Całość opracowania charakteryzuje się dobrą kulturą edytorską i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

## **2.8. Uwagi krytyczne do dyskusji**

Przedstawiona w rozprawie dyskusja wyników została opracowana starannie i opiera się na obszernym materiale eksperymentalnym. Autor wykazał się umiejętnością interpretacji uzyskanych rezultatów oraz powiązania ich z problematyką kształtowania struktury kompozytów żeliwno - ceramicznych przeznaczonych do zastosowań w układach hamulcowych. Niemniej jednak w kilku obszarach dostrzegam pewien niedosyt interpretacyjny, wynikający przede wszystkim z ambitnie sformułowanych celów poznawczych rozprawy. Spodziewałbym się zatem odpowiedzi na poniższe uwagi.

1. Jednym z głównych osiągnięć naukowych rozprawy ma być wykazanie wpływu cząstek ceramicznych na proces heterogenicznego zarodkowania grafitu. Autor przedstawia szereg przesłanek eksperymentalnych wskazujących na istnienie takiego oddziaływania, jednak dyskusja koncentruje się głównie na analizie skutków obserwowanych zmian strukturalnych. W mniejszym stopniu wyjaśniono natomiast mechanizmy fizykochemiczne odpowiedzialne za aktywność

zarodkotwórczą analizowanych cząstek. Które zatem wyniki eksperymentalne przedstawione w rozprawie stanowią, zdaniem Autora, najmocniejszy dowód na bezpośredni udział cząstek SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> w procesie zarodkowania grafitu, a nie jedynie na ich pośredni wpływ na warunki krystalizacji?

2. W pracy wykazano odmienny wpływ obu rodzajów cząstek ceramicznych na kształtowanie struktury kompozytu. Dyskusja koncentruje się przede wszystkim na prezentacji zaobserwowanych efektów, natomiast w ograniczonym stopniu odnosi się do przyczyn tych różnic. Jakie właściwości fizyczne lub chemiczne cząstek SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Autor uważa za kluczowe dla obserwowanych różnic w przebiegu krystalizacji oraz tworzeniu mikrostruktury kompozytu?
3. W rozprawie wielokrotnie podkreślana jest rola zjawisk zachodzących na granicy faz pomiędzy ciekłym żelazem a preformą ceramiczną. Jednocześnie zastosowane metody badawcze pozwalają przede wszystkim na ocenę końcowego stanu materiału po zakończeniu procesu infiltracji. Jakie dodatkowe metody badawcze mogłyby umożliwić bardziej bezpośrednią identyfikację procesów zachodzących na granicy faz metal - ceramika podczas infiltracji preform przez ciekłe żelazo?
4. Autor wykazał poprawę właściwości tribologicznych kompozytów zawierających fazę ceramiczną, jednak zależności pomiędzy konkretnymi cechami mikrostruktury a obserwowaną odpornością na zużycie nie zostały w pełni ilościowo opisane. Który parametr mikrostrukturalny uważa Autor za najważniejszy czynnik odpowiedzialny za poprawę odporności na zużycie ścierne i w jaki sposób można byłoby tę zależność ilościowo zweryfikować?
5. W wielu miejscach rozprawy uzyskane wyniki są porównywane z danymi literaturowymi, jednak porównania te mają najczęściej charakter jakościowy. Szersza analiza podobieństw i różnic pomiędzy wynikami własnymi a rezultatami publikowanymi przez innych autorów mogłaby wyraźniej wskazać rzeczywisty wkład naukowy rozprawy. Który z uzyskanych wyników uważa Autor za najbardziej nowatorski na tle światowej literatury dotyczącej kompozytów żeliwnych wzmacnianych cząstkami ceramicznymi i jakie argumenty przemawiają za jego oryginalnością?

Przedstawione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie podważają wartości naukowej rozprawy. Wynikają one przede wszystkim z wysokiego potencjału poznawczego zgromadzonego materiału badawczego oraz z faktu, że część sformułowanych przez Autora interpretacji zasługuje na dalsze rozwinięcie i pogłębienie podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

### **3. Wniosek końcowy**

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Wojciechowskiego stanowi wartościowe opracowanie naukowo - badawcze dotyczące kształtowania struktury kompozytów o osnowie żeliwa szarego wzmacnianych cząstkami SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przeznaczonych do zastosowań w tarczach hamulcowych. Autor wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną z zakresu inżynierii materiałowej, odlewnictwa i materiałów kompozytowych, a także umiejętnością samodzielnego planowania i realizacji złożonych badań eksperymentalnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowość przeprowadzonych badań oraz skuteczne połączenie aspektów poznawczych z praktyczną weryfikacją przemysłową opracowanego rozwiązania. Pomimo przedstawionych w recenzji uwag krytycznych, dotyczących głównie stopnia bezpośredniej weryfikacji postulowanych mechanizmów zarodkowania oraz zakresu pogłębionej analizy niektórych wyników, rozprawa wnosi istotny wkład do wiedzy dotyczącej kompozytów żeliwno - ceramicznych oraz możliwości ich wykorzystania w elementach układów hamulcowych.

**Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**



Podpisał: dr hab. inż. Dawid Myszka, prof. PW  
(podpis recenzenta)