



Kraków, dn. 22. 09. 2025

Imię i nazwisko recenzenta:

dr hab. inż. Wojciech Maziarz, prof. instytutu

Dane adresowe:

Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej,

Polskiej Akademii Nauk

ul. Reymonta 25

30-059 Kraków

**Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr inż. Anila Antony'ego Sequeiry,**  
*pt. Thermal properties and thermal residual stresses in graded Al–matrix  
composites reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC particles: Experiments and Numerical  
simulations*

Promotor: **prof. dr hab. inż. Michał Basista**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Witold Węglewski**

**Podstawa opracowania**

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Anila Antony'ego Sequeiry pod tytułem „*Thermal properties and thermal residual stresses in graded Al–matrix composites reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC particles: Experiments and Numerical simulations*”, została wykonana na podstawie pisma RN-D-0002.6.2025 z dnia 4 lipca 2025 oraz uchwały Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN z dnia 27.06.2025. Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.)

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;

2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;

3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

### **Informacja ogólna**

Materiały kompozytowe na osnowie aluminium i jego stopów umacniane cząstkami ceramicznymi stanowią już od paru dekad interesujący przedmiot badawczy szeregu ośrodków naukowych w kraju i na świecie. Główną tego przyczyną jest mnogość ich potencjalnych zastosowań, zarówno jako materiały konstrukcyjne jak i funkcjonalne oraz duża liczba kombinacji materiałowych osnowy, cząstek umacniających jak i technologii wytwarzania. Powoduje to stałe zainteresowanie naukowe tego typu materiałami i niesłabnący potencjał publikacyjny w najlepszych czasopismach z wysokim współczynnikiem oddziaływania. Materiały kompozytowe charakteryzują się na ogół miękką, plastyczną osnową oraz jednorodnie rozmieszczonymi w całej jej objętości twardymi, trudno odkształcalnymi o różnej wielkości cząstkami na ogół faz ceramicznych. Taka budowa materiałów kompozytowych zapewnia najlepszą kombinację właściwości wytrzymałościowych i plastycznych, bardzo często będącą największym wyzwaniem przy projektowaniu materiałów inżynierskich. Co więcej, rozwój technologii wytwarzania a w szczególności metalurgii proszków, pozwala również na wytwarzanie materiałów kompozytowych gradientowych o ściśle zdefiniowanych zewnętrznych warstwach wytworzonych na osnowie pozwalających na stopniową zmianę właściwości całego kompozytu. Tego typu budowa materiału zapewnia bardzo wysokie właściwości funkcjonalne np. odporność na zużycia ścierne często w trudnych warunkach środowiskowych oraz temperatury i zmiennych naprężeń. Klasycznym przykładem zastosowania tego typu kompozytów są tarcze hamulcowe, których warstwa wierzchnia powinna charakteryzować się wysoką odpornością na zużycia ścierne przy wysokiej wytrzymałości właściwej i dobrej przewodności cieplnej całego kompozytu. Ze względu na rosnące zapotrzebowanie przemysłu motoryzacyjnego na rozwiązania proekologiczne, również tarcze hamulcowe podlegają ciągłym modyfikacjom w celu zapewnienia jak najmniejszej ilości zanieczyszczeń emitowanych do środowiska. Wiadomy jest fakt, że każdy proces hamowania pojazdu powoduje powstawanie drobnych cząstek zarówno z tarczy jak i klocków, których praktycznie nie jesteśmy w stanie gromadzić i neutralizować. Biorąc pod uwagę masowość

transportu samochodowego można wyobrazić sobie jak potężne ilości drobnych cząstek powstałych w procesie hamowania zanieczyszczają nasze środowisko naturalne. Dlatego też, opracowanie nowych tarcz hamulcowych charakteryzujących się podwyższonymi właściwościami funkcjonalnymi i dłuższą żywotnością ciągle jest pożądane przez przemysł motoryzacyjny oparty na rozwiązaniach przyjaznych dla środowiska naturalnego. W chwili obecnej nowoczesna inżynieria materiałowa wykorzystuje szereg metod modelowania, symulacji i obliczeń numerycznych zarówno właściwości materiałów jak i procesów wytwarzania. Przy zastosowaniu odpowiednich modeli i zweryfikowanych symulacji komputerowych w dalszych etapach prac badawczych jesteśmy w stanie ograniczyć liczę kosztownych eksperymentów jak również szybko zweryfikować postawione tezy. Dlatego też, coraz częściej wartościowe opracowania nowych materiałów i technologii opierają się w dużej mierze na symulacjach komputerowych i zaawansowanych modelach.

*Praca przedstawiona do recenzji dotyczy właśnie wytwarzania i charakterystyki mikrostruktury i właściwości funkcjonalnych kompozytów gradientowych przeznaczonych na innowacyjne tarcze hamulcowe. Głównie nakierowana jest na opis właściwości cieplnych tj. przewodności cieplnej i cieplnych naprężeń szczątkowych powstających w procesie wytwarzania metodą metalurgii proszków oraz właściwości tribologicznych warstwowych kompozytów gradientowych na osnowie ze stopu AlSi12 wzmocnionych cząstkami  $Al_2O_3$  i SiC, łącząc metody eksperymentalne i numeryczne co wpisuje ją w najnowsze trendy inżynierii materiałowej i w pełni uzasadnia podjęcie tego tematu.*

### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest napisana w języku angielskim i posiada układ klasyczny z wyodrębnionymi w pierwszej części streszczeniem w języku angielskim i polskim oraz listą skrótów i symboli. W dalszej części występuje rozdział poświęcony rozważaniom literaturowym, który jest podstawą do określenia motywacji badań, głównych celów i hipotez badawczych. W dalszym etapie przedstawiona jest szczegółowa metodologia badań, po czym następują rozdziały dotyczące wyników badań. W oddzielnych rozdziałach przedstawione są szczegółowe wyniki badań oraz symulacji dla dwóch rodzaju kompozytów, które są porównane w następnym rozdziale. Taka konstrukcja opisu wyników badań jest bardzo czytelna i pozwala na dogłębną analizę wyników dla czytelnika rozprawy. Ostatni rozdział dotyczy podsumowania, wniosków i przypisów literaturowych, jak również przedstawiona jest koncepcja badań na przyszłość. Literatura związana z rozprawą jest bardzo

bogata, zawiera 199 pozycji i dobrana jest prawidłowo w świetle rozważanych problemów. Występują prace nawet z lat 20-tych poprzedniego stulecia jak i najnowsze autorstwa zagranicznych i polskich grup badawczych. Świadczy to o dużym zainteresowaniu Doktoranta podjętą tematyką jak również dogłębnym jej rozpoznaniu, co wpływa na świadome i poprawne planowanie badań. Rozprawa napisana jest bardzo przystępnym językiem angielskim, a zamieszczone rysunki i wykresy są czytelne i dobrej jakości. Ogólnie praca wykonana jest z dużą starannością.

W części literaturowej na początku doktorant przedstawia aktualny stan wiedzy na temat właściwości kompozytów metalowych na osnowie aluminium wzmocnianych najbardziej popularnymi cząstkami  $Al_2O_3$  i SiC, które charakteryzują się dobrą kombinacją właściwości mechanicznych, odporności na zużycia ściernie, doskonałą przewodnością cieplną i niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Właściwości te kwalifikują ich do zastosowań w układach hamowania pojazdów jako tarcze hamulcowe, gdzie występują zmienne warunki pracy w aspekcie naprężeń, tarcia i temperatury. W dalszej części opisuje funkcjonalne kompozyty gradientowe, podstawowe definicje oraz właściwości i metody ich wytwarzania, w szczególności z wykorzystaniem technologii opartej na metalurgii proszków z wykorzystaniem dwóch technik zagęszczania spiekania iskrowego-plazmowego (SPS) i jednoosiowego sprasowania na gorąco (HP), które zostały wybrane do realizacji celów rozprawy. Następnie przechodzi do opisu zagadnień związanych z cieplnymi naprężeniami szczątkowymi występującymi w funkcjonalnych kompozytach gradientowych po procesie ich wytwarzania. Przedstawia klasyfikację naprężeń szczątkowych jako mikro i submikro w zależności w jakiej skali powiększeń rozpatrywana jest mikrostruktura materiału. Mikro naprężenia szczątkowe dotyczą poziomu rozmiarów ziaren i powstają w wyniku niedopasowania stałych sprężystych lub współczynników rozszerzalności cieplnej poszczególnych ziaren w polikryształach lub pomiędzy dwoma różnymi fazami kompozytu. Natomiast naprężenia submikronowe są generowane na poziomie skali atomowej wewnątrz ziaren, np.: pole dokształceń wokół dyslokacji. Dostarcza również informacje na temat nieniszczących metod analizy naprężeń szczątkowych wskazując w Tabeli 1.1 praktyczne dane dla każdej techniki uwzględniając typ materiału, w którym mogą być mierzone, rozdzielczość pomiaru, wielkość penetracji oraz wady i zalety. *Rozważania te pomagają w świadomym doborze techniki badawczej dla wykonania pomiarów i uzyskania miarodajnych wyników.* W następnych dwóch rozdziałach doktorant przedstawia szeroką wiedzę na temat funkcjonalnych kompozytów gradientowych wzmocnianych cząstkami  $Al_2O_3$  i SiC, zestawiając dane literaturowe w Tabeli 1.2 zawierającej najbardziej istotne parametry tych materiałów w aspekcie ich dalszego modyfikowania i

ulepszania w kierunku konkretnych zastosowań. Ostatni rozdział części literaturowej dotyczy modelowania funkcjonalnych kompozytów gradientowych w kontekście ich efektywnych właściwości cieplnych tj. przewodności i rozszerzalności cieplnej oraz związanymi z nimi naprężeniami szczątkowymi. Spośród wielu opracowanych jak dotychczas modeli, ze względu na złożoną mikrostrukturę, zanieczyszczenia i porowatość występującą w funkcjonalnych kompozytach gradientowych wytwarzanych drogą metalurgii proszków najbardziej odpowiednim wydaje się model trójwymiarowy elementów skończonych przewodności cieplnej i naprężeń cieplnych szczątkowych na podstawie obrazów uzyskanych metodą mikrotomografii rentgenowskiej (mikro–XCT) rzeczywistych mikrostruktur materiałów, który w konsekwencji został zastosowany w rozprawie. *Podsumowując powyższe chciałbym podkreślić, że cały przegląd literatury jest napisany bardzo fachowo i w przystępny sposób, porusza najważniejsze zagadnienia związane z gradientowymi materiałami kompozytowymi, ich wytwarzaniem i modelowaniem w aspekcie właściwości cieplnych i naprężeń szczątkowych zapewniających najlepsze właściwości funkcjonalne. Świadczy to o posiadaniu przez doktoranta wiedzy teoretycznej z zakresu inżynierii materiałowej na bardzo wysokim poziomie w kontekście projektowania, wytwarzania oraz modelowania funkcjonalnych kompozytach gradientowych na osnowie aluminium.*

Rozważania w części teoretycznej oraz analiza potrzeb przemysłu motoryzacyjnego pozwoliły Doktorantowi na określenie motywacji podjętych badań, głównych i szczegółowych celów oraz hipotez badawczych. Wszystkie te składniki rozprawy są prawidłowe, logicznie zaplanowane i dobrze zdefiniowane, w bardzo dobry sposób łączą prace eksperymentalne z modelowaniem. Poza tym cele można uznać za bardzo ambitne w szczególności, że osiągnięcie ich może prowadzić w przyszłości do konkretnego zastosowania jakim jest wytwarzanie innowacyjnych tarcz hamulcowych. Postawione cztery hipotezy badawcze są prawidłowe w świetle przedstawionych rozważań literaturowych i dotyczą szczegółowych zagadnień z zakresu inżynierii materiałowej typu wpływu metody wytwarzania, granic ziaren, granic rozdziału faz na przewodność i rozszerzalność cieplną oraz możliwości zastosowania modelowania w przewidywaniu poziomu naprężeń szczątkowych w funkcjonalnych kompozytach gradientowych. *Dlatego też, przedstawione cele i hipotezy uznaję za ambitne, nowatorskie i oryginalne w aspekcie wyników prezentowanych w literaturze i trendów związanych z projektowaniem, wytwarzaniem i modelowaniem materiałów kompozytowych.*

Następny, bardzo rozbudowany rozdział rozprawy stanowi metodologia prowadzonych prac. Rozdział ten napisany jest bardzo starannie i zawiera szczegółowe informacje na temat koncepcji prowadzenia badań, użytych materiałów wyjściowych, zastosowanych technik

wytwarzania i technik badawczych. W zakresie badań charakterystyki mikrostruktury zasługuje na wyróżnienie metoda X-ray micro-computed tomography (micro-XCT), pozwalająca na obrazowanie przestrzenne mikrostruktury kompozytów w wysokiej rozdzielczości, które następnie można wykorzystać do weryfikacji modeli numerycznych i symulacji przewodności i rozszerzalności cieplnej oraz naprężeń szczątkowych indukowanych cieplnie. *Tego typu podejście do realizacji postawionych celów uznaję, że duże osiągnięcie doktoranta i jest wyróżniające się na tle innych tego typu prac.* Wszystkie pozostałe eksperymenty typu pomiar naprężeń szczątkowych metodą dyfrakcji neutronów, przewodności cieplnej metodą Parkera, współczynnika rozszerzalności cieplnej metodą dylatometryczną oraz odporności na zużycie ścierne zostały prawidłowo dobrane, szczegółowo opisane z uwzględnieniem geometrii próbek i analizy błędów pomiarowych. Ostatnim zagadnieniem opisanym w metodologii prac jest podrozdział dotyczący modelowania numerycznego i symulacji. Również w tym miejscu Doktorant wykazał się bardzo dobrą wiedzą i starannością opisu, w sposób bardzo przystępny dla czytelnika przedstawił wszystkie relatywnie skomplikowane aspekty budowania modelu oraz jego testowania i weryfikacji. *Jak już wspomniałem wcześniej cały rozdział 3 jest bardzo logiczny i przejrzysty, może stanowić przykład dla innych autorów.*

Wyniki badań i ich dyskusja zostały przedstawione w czterech rozdziałach oddzielnie dla kompozytów AlSi12/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i AlSi12/SiC i ich odmian gradientowych oraz w dwóch pozostałych dotyczących testów na zużycie ścierne i porównaniu obydwu kompozytów w aspekcie przyszłych zastosowań jako materiał na tarcze hamulcowe. *W tym miejscu chciałbym zauważyć, że nazwa rozdziału 6 zamieszczona w spisie treści (CHAPTER 6 RESULTS for AlSi12/SiC COMPOSITES and FGMs) nie odpowiada tej zamieszczonej w tekście (WEAR TEST RESULTS).* W pierwszym etapie badań przeprowadzono pomiar gęstości i porowatości kompozytów gradientowych o zwartości 10, 20 i 30 %obj. cząstek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i SiC wytworzonych dwoma technologiami zagęszczania SPS i HP. W przypadku kompozytów z dodatkami Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dla obydwu technologii uzyskano bardzo wysoki stopień zagęszczania sięgający 99 % gęstości teoretycznej i praktycznie nie zależy on od ilości cząstek, podczas gdy w przypadku cząstek SiC uzyskane wyniki potwierdziły, że większe zagęszczenie uzyskuje się w przypadku procesu HP niż SPS, odpowiednio około 98 i 95% oraz również wraz ze wzrostem udziału objętościowego cząstek praktycznie nie zmienia się stopień zagęszczenia kompozytów. Analiza mikrostruktury kompozytów z wykorzystaniem SEM, XRD i TEM wykazała, że kompozyty gradientowe posiadają płynną zmianę zawartości cząstek na przekroju i równomierne ich rozmieszczenie w każdej warstwie oraz występuje bardzo dobre połączenie pomiędzy cząstką a matrycą. *Uzyskanie tego typu mikrostruktury było planowane ze względu na korzystny rozkład szczątkowych naprężeń cieplnych wraz ze zmianą przewodności i współczynnika rozszerzalności cieplnej. Uznaję to za bardzo duże osiągnięcie w recenzowanej*

pracy, jak również świadczy to o prawidłowo zaplanowanych eksperymentach oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta. W przypadku kompozytów z dodatkiem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  przeprowadzono dodatkowo analizę granicy rozdziału pomiędzy ziarnami aluminium i krzemu z wykorzystaniem SEM przy wysokich powiększeniach. Doktorant stwierdził, że występują wyraźne, ciągłe granice pomiędzy tymi cząstkami przedstawiając mikrostrukturę SEM i mapy rozkładu pierwiastków (Fig. 4.3). *Moim zdaniem przy tym powiększeni i jakości przygotowania preparatu trudno jest jednoznacznie wyrażać się o jakości granic rozdziału pomiędzy aluminium i krzemem. Myślę, że bardziej zaawansowane techniki badawcze typu TEM, STEM i HRTEM należy zastosować to rozwiązania tego problemu. Proszę o komentarz a tej sprawie.* Również dogłębna analiza mikrostrukturalna kompozytów umacnianych cząstkami SiC wykazała na możliwość tworzenie się tlenków  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i węglików  $\text{Al}_4\text{C}_3$  (rentgenogram Fig. 5.5). *Obecność tlenku została potwierdzona badaniami TEM, jednakże Doktorant nie pokusił się na potwierdzenie występowania węglika  $\text{Al}_4\text{C}_3$ . Wiadomym jest, że węgiel ten jest silnie higroskopijny i należy unikać go w mikrostrukturze kompozytów ze względu na silne obniżenie właściwości mechanicznych. Proszę om komentarz w tej sprawie, czy węgiel ten faktycznie występował i czy stwierdzono obniżenie właściwości.*

W dalszym etapie zostały przeprowadzone badania przewodności cieplnej kompozytów. Wykonano bardzo szeroki zakres eksperymentów zarówno dla czystej osnowy stopu AlSi12 po procesach SPS i HP oraz różnych wariantów kompozytów bez i z gradientem zawartości cząstek. *Uznaję, że badania te zostały przeprowadzone na bardzo wysokim poziomie naukowym i są dużym osiągnięciem Doktoranta.* Głównym wnioskiem z tych badań było, że przewodność cieplna kompozytów z dodatkiem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  maleje wraz ze wzrostem objętości cząstek, trend ten jest spójny dla całego zakresu temperatur oraz niższe wielkości przewodności cieplnej uzyskano po procesie SPS niż HP głównie ze względu na niższą przewodność cieplną osnowy AlSi12 i większą porowatość po procesie SPS. W przypadku kompozytów z dodatkiem SiC stwierdzono obniżenie przewodności cieplnej wraz ze wzrostem udziału objętościowego cząstek, co było wynikiem niezgodnym z przewidywaniami i regułą mieszania. Obniżenie występowało zarówno w próbkach po SPS jak i po HP w całym zakresie temperatur przeprowadzonych testów. Powodem tego spadku była porowatość oraz tworzenie cienkiej warstwy tlenku aluminium na granicach ziaren osnowy aluminium oraz na powierzchni cząstek SiC. Pomiary przewodności cieplnej zostały porównane z analityczną oceną opartą na szeregu modelach. Najbardziej istotnym okazał się wynik porównania z modelem opartym na mikrostrukturze obserwowanej techniką micro-XCT i metodzie elementów skończonych będący przedmiotem rozprawy i opracowanym przez Doktoranta. Bardzo dobrą zgodność

eksperymentalnej efektywnej przewodności cieplnej z modelem uzyskano dla kompozytów z dodatkiem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jak również dla SiC, jednakże w tym drugim przypadku po uwzględnienie rezystancji cieplnej interfejsu tworzonego z niekorzystnym tlenkiem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tworzącym się w tych kompozytach. *Wyniki te świadczą o zaawansowanym sposobie modelowania i umiejętności reagowania na wyniki silnie odbiegające od eksperymentalnych, potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta oraz że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.*

Następnym zagadnieniem poruszonym w rozdziałach dotyczących wyników badań było określenie cieplnych naprężeń szczątkowych wynikających z technologii wytwarzania kompozytów. *Eksperymentalnie poziom i znak tych naprężeń zostały wyznaczone na podstawie dyfrakcji neutronów, jednakże Doktorant nie załączył ani jednego przykładu zarejestrowanych dyfraktogramów, co uważam za ujemną stronę pracy, gdyż analiza kształtu oraz pozycji pików dyfrakcyjnych jest kluczowa w tych badaniach.* Pomiary naprężeń szczątkowych wykazały, że wraz ze wzrostem udziału objętościowego cząstek  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i SiC poziom naprężeń rozciągających wzrasta w matrycy kompozytu przy równoczesnym wzroście naprężeń ściskających w cząstkach. Średnie cieplne naprężenie szczątkowe w kompozytach bez gradientu cząstek wzmacniających są wyższe niż w gradientowych dla obu typu kompozytów. Istotnym spostrzeżeniem z tych badań było, że rozciągające naprężenia szczątkowe w osnowie kompozytu z dodatkami  $\text{Al}_2\text{O}_3$  rosną liniowo wraz ze wzrostem udziału objętościowego cząstek, podczas gdy w kompozytach z dodatkiem SiC ta zależność nie jest liniowa. Podobnie jak w przypadku przewodności cieplnej również wielkości eksperymentalnych szczątkowych naprężeń cieplnych bardzo dobrze korelowały z tymi uzyskanymi z modelowania metodą micro-XCT i elementów skończonych, co potwierdza o poprawności założeń modelowania.

Ostatni podrozdział wyników badań właściwości cieplnych projektowanych kompozytów dotyczy analizy współczynnika rozszerzalności cieplnej wykonanej dla kompozytów AlSi12/SiC metodą dylatometryczną. Przeprowadzono badania dla kompozytów bez warstw gradientowych oraz z warstwami w kierunku podłużnym i poprzecznym zagęszczanych poprzez SPS i HP. Stwierdzono, że współczynnik rozszerzalności cieplnej zarówno w kierunku prostopadłym (poprzecznym) jak i równoległym (podłużnym) do kierunku zagęszczania maleje wraz ze wzrostem udziału objętościowego cząstek. W kompozytach gradientowych trójwarstwowych widoczny był zdecydowanie mniejszy współczynnik w kierunku podłużnym niż poprzecznym. *Moim zdaniem rozdział ten został opracowany z mniejszą starannością niż pozostałe, chociaż wyniki są interesujące. Można w nim spotkać zdania typu „They show that the CTE of the ungraded composites decreases as the volume*

*fraction of the metal matrix (AlSi12) gradually decreases due to the increasing ceramic content”, które dla mnie wydają się nielogiczne. Ponadto, nie znalazłem informacji dlaczego nie przeprowadzono badań współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytów wzmacnianych cząstkami  $Al_2O_3$ . Proszę o komentarz w tej sprawie.*

Ostatni rozdział badawczy dotyczy wyników i dyskusji właściwości odporności na zużycie ścierne. Badania wykonano dla kompozytów AlSi12+30% $Al_2O_3$  i AlSi12+30%SiC bez warstw gradientowych, które uznano za najbardziej reprezentatywne jako badania wstępne ze względu na największą zawartość ceramiki w warstwie zewnętrznej stykającej się z klockami hamulcowymi. Uzyskane wartości zużycia porównano z kompozytami o wyższej zawartości ceramiki, AlSi12+40% $Al_2O_3$  i AlSi12+40%SiC, a także z żeliwem szarym ze standardowej tarczy hamulcowej Brembo stosowanej w samochodach seryjnych. Wyniki badań są uzupełnione wyczerpującą dyskusją zawierającą aspekty mechanizmu zużycia ściernego i delaminacyjnego oraz szczegółową analizą mikrostrukturalną miejsc po testach ścierania. Pierwsze wyniki wykazały, że najlepszą odporność na zużycie ścierne posiadają kompozyty z udziałem objętościowym cząstek 30% obj. Jest ona niższa niż w przypadku żeliwa szarego, jednakże dalsze prace w kierunku obniżenia porowatości oraz zalety kompozytów typu niska masa i dobre właściwości cieplne wciąż dają duże szanse na ich zastosowanie.

Następny rozdział dotyczy porównania kompozytów AlSi12/ $Al_2O_3$  i AlSi12/SiC jako potencjalnych materiałów na tarcze hamulcowe. W sposób zwięzły Doktorant zestawiał wszystkie wcześniej prezentowane wyniki dotyczące gęstości, przewodności cieplnej i szczytkowych naprężeń cieplnych, często w postaci tabeli i wykresów. Przedstawił również bardzo ważne wyniki właściwości mechanicznych badanych kompozytów (Tabela 7.1), które są nieodłączne w projektowaniu materiałów. Zestawienie wykazało, że trudno jest jednoznacznie wskazać, które kompozyty stanowią lepszą alternatywę do żeliwa szarego. Niewielką przewagę wykazują prasowane na gorąco gradientowe kompozyty AlSi12/ $Al_2O_3$  ze względu na niższy współczynnik szczytkowych naprężeń cieplnych i nieco wyższą przewodność cieplną przy gęstości porównywalnej do kompozytów AlSi12/SiC.

Ostatni rozdział rozprawy dotyczy podsumowania, wniosków oraz propozycji badań na przyszłość w celu dalszej poprawy właściwości funkcjonalnych badanych kompozytów gradientowych. Wszystkie wnioski są prawidłowe i zgodne z wcześniej przedstawionymi wynikami i ich dyskusją. Wskazują na osiągnięcie zakładanych celów głównych i szczegółowych oraz udowodnienie postawionych hipotez badawczych. Przyszłe badania głównie powinny być ukierunkowane na wyjaśnienie zjawisk zachodzących na granicach rozdziału poszczególnych faz, które silnie mogą wpływać na właściwości cieplne kompozytów

typu przewodność cieplna, współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz szcążkowe naprężenie cieplne, z czym w pełni zgadzam się z Doktorantem.

Po kompleksowej analizie pracy doktorskiej, stwierdzam, że praktycznie nie zawiera większych błędów lub niejasności merytorycznych. Wszystkie moje wątpliwości przedstawiłem w tekście powyżej oraz zestawiam poniżej w języku angielskim w formie uwag i pytań do Doktoranta.

1. *The name of chapter 6 in the Table of contents (CHAPTER 6 RESULTS for AlSi12/SiC COMPOSITES and FGMs) does not correspond to the one in the text (WEAR TEST RESULTS).*

2. *Table 7.2. Which data in the table relate to the AlSi12/SiC composite ?*

3. *Fig. 4.3. In my opinion, with the presented magnification and quality of the sample preparation, it's difficult to clearly comment on the quality of the interface between aluminum and silicon. I believe that more advanced research techniques, such as TEM, STEM, and HRTEM, should be used to address this issue. Please comment on this matter.*

4. *Fig. 5.5. X-Ray diffraction analysis revealed presence of  $Al_2O_3$  and  $Al_4C_3$ . The presence of the oxide was confirmed by TEM studies, but the PhD student did not attempt to confirm the presence of  $Al_4C_3$  carbide. It is known that this carbide is highly hygroscopic and should be avoided in the microstructure of composites due to the significant reduction in mechanical properties. Please comment on this matter, whether this carbide was actually present and whether a reduction in properties was observed.*

5. *Experimentally, the level and sign of residual stresses were determined based on neutron diffraction, however, the PhD student did not attach a single example of the recorded diffraction patterns, which I consider a negative side of the work, because the analysis of the shape and position of diffraction peaks is crucial in this research. Please comment on this matter.*

6. *Page 103, last paragraph. This sentence seems illogical „They show that the CTE of the ungraded composites decreases as the volume fraction of the metal matrix (AlSi12) gradually decreases due to the increasing ceramic content”. Furthermore, I haven't found any information to why thermal expansion coefficient studies haven't been conducted on composites reinforced with  $Al_2O_3$  particles. Please comment on this matter.*

Przedstawione powyżej uwagi nie wpływają na pozytywną oceną recenzowanego doktoratu. Co więcej, praca zawiera wiele cennych oryginalnych opracowań, związanych z połączenia projektowania, wytwarzania, analizy mikrostruktury i właściwości fizycznych oraz modelowania funkcjonalnych materiałów kompozytowych. Wiele zawartych w pracy opracowań, a w szczególności połączenie metody mikrostrukturalnej (mikrotomografii rentgenowskiej, micro-XCT) i elementów skończonych do modelowania zjawisk cieplnych jest moim zdaniem na bardzo wysokim poziomie naukowym, wykraczającym poza ramy

standardowych prac doktorskich. Ponadto w pracy zastosowano szerokie spektrum technik badawczych, uzyskując miarodajne wyniki i przeprowadzając wyczerpującą na wysokim poziomie dyskusję wyników. Wszystkie te czynniki stanowią, że moim zdaniem praca nadaje do wyróżnienia o co wnioskuję poniżej.

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki określonej 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. Ponad to, ze względu na wysoki poziom wybranych zagadnień zawartych w pracy, opisanych powyżej, wnioskuję o jej wyróżnienie.



Dr hab. inż. Wojciech Maziarz, prof. instytutu