

Imię i nazwisko recenzenta:

Warszawa, 10 września 2025 r.

**Prof. dr hab. inż. Dariusz Oleszak**

Dane adresowe:

Wydział Inżynierii Materiałowej

Politechnika Warszawska

ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

**Recenzja pracy doktorskiej**  
**mgr inż. Anil Antony Sequeira**

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**

przygotowanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Michała Basisty

**Podstawa opracowania**

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. 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.

**Ogólna charakterystyka pracy**

Praca doktorska Pana mgr. inż. Anila Antony Sequeira, napisana pod opieką prof. dr hab. inż. Michała Basisty, dotyczy wytwarzania metodami metalurgii proszków oraz badania struktury i wybranych właściwości mechanicznych i termicznych kompozytów o osnowie aluminiowej wzmacnianych cząstkami ceramicznymi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

i SiC na zastosowania jako materiały konstrukcyjne do tarcz hamulcowych. Autor opracował optymalizacje parametrów mieszania proszków i ich spiekania, przeprowadził badania mikrostruktury, przewodności cieplnej i naprężeń resztkowych w badanych materiałach oraz ich odporności na ścieranie. Dodatkowo, w odniesieniu do przewodnictwa cieplnego i naprężeń resztkowych, przeprowadzono symulacje numeryczne.

Praca, napisana w języku angielskim, ma układ klasyczny i składa się z ośmiu rozdziałów, przedstawiających analizę literaturową, cel, tezę i zakres pracy, metodykę badań i wyniki, wraz z dyskusją i wnioskami, a także proponowane dalsze badania w omawianej tematyce. Praca wydana jest w formie monografii, liczy 138 stron wraz z bibliografią. Autor odnosi się do 199 pozycji literaturowych. Odwołania obejmują głównie najnowsze prace z czasopism naukowych. Spis cytowanej literatury jest sporządzony niezwykle starannie. Przegląd literatury świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w tematyce badań.

### **Tematyka, cel i zakres rozprawy**

Tematyka rozprawy wpisuje się w zagadnienia wykorzystania materiałów innych niż tradycyjne żeliwo do produkcji tarcz hamulcowych w samochodach, co jest związane nie tylko zmniejszeniem masy, ale także potrzebą zachowania całego zestawu odpowiednich właściwości w trudnych warunkach pracy materiału, takich jak wzrost temperatury, szoki cieplne czy też środowisko korozyjne.

Z tego punktu widzenia obiecującymi materiałami są kompozyty o osnowie metalicznej wzmocnione cząstkami ceramicznymi. Istnieje mnóstwo danych literaturowych dotyczących kompozytów o osnowie Cu, Ni, Mg czy Fe wzmocnianych tlenkami, węglnikami i borkami metali, wytwarzanymi przy pomocy różnych technik. Ale właśnie kompozyty z osnową aluminiową albo na bazie stopu aluminium umacniane fazą ceramiczną są szczególnie interesujące ze względu na małą gęstość, plastyczność, odporność korozyjną, wytrzymałość właściwą czy też odporność na ścieranie. Jednakże częstą wadą tych materiałów jest ich mała przewodność cieplna, różnice we współczynniku rozszerzalności cieplnej fazy metalicznej i ceramicznej, a w konsekwencji naprężenia resztkowe mogące prowadzić do pęknięcia materiału.

Jako próbę pokonania tych problemów Doktorant w swojej pracy zaproponował wytworzenie i przebadanie materiałów gradientowych, ze zmieniającą się zawartością ceramiki w warstwach oraz dla porównania materiałów

niegradientowych. Ponadto Autor wybrał metalurgię proszków jako technikę wytwarzania, musiał więc się zmierzyć z zagadnieniami wpływu wielkości cząstek ceramicznych, ich rozmieszczenia, porowatości spieków oraz zjawisk na granicy rozdziału faz na końcowy efekt. Wybór tematyki rozprawy uznać należy za trafny i istotny, także z aplikacyjnego punktu widzenia.

Cel i zakres rozprawy zdeterminowane zostały na podstawie starannej analizy literaturowej. Doktorant tworząc koncepcję pracy skoncentrował się na wątku zaprojektowania struktury gradientowej kompozytów na osnowie Al do konstrukcji tarcz hamulcowych w aspekcie zmniejszenia naprężeń resztkowych i skutecznego rozpraszania ciepła generowanego podczas hamowania, a cele rozprawy sformułował następująco:

- wytworzenie kompozytów gradientowych typu  $AlSi12/Al_2O_3$  i  $AlSi12/SiC$  o dużej gęstości, stosując metody metalurgii proszków,
- eksperymentalny pomiar przewodności cieplnej, naprężeń resztkowych i odporności na zużycie kompozytów wytworzonych metodami prasowania na gorąco (HP) i spiekania iskrowego (SPS),
- analiza wpływu metody konsolidacji na mikrostrukturę i badane właściwości uzyskanych materiałów,
- przeprowadzenie symulacji numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych i siatek zbudowanych na bazie obrazów z mikrotomografii komputerowej.

W oparciu o dane literaturowe oraz przedstawione cele, Doktorant postawił następujące hipotezy badawcze:

- średnie naprężenia resztkowe w fazie metalicznej i ceramicznej w spiekanych kompozytach  $AlSi12/Al_2O_3$  i  $AlSi12/SiC$  są niższe niż w kompozytach niegradientowych,
- wielkość ziarna osnowy metalicznej może wpływać na przewodność cieplną wytworzonych kompozytów,
- powstawanie dodatkowych faz na granicy rozdziału metal-ceramika podczas spiekania może wpływać na przewodność cieplną wytworzonych materiałów,
- zastosowanie metody elementów skończonych bazującej na mikrotomografii komputerowej pozwala na przewidywanie przewodności cieplnej i naprężeń resztkowych w gradientowych kompozytach typu  $AlSi12/Al_2O_3$  i  $AlSi12/SiC$ .

W świetle powyższych faktów przyjętą przez Doktoranta koncepcję badań i ich zakres, a także sformułowane cele i postawione tezy uznać należy za nowatorskie i jak najbardziej uzasadnione, wpisujące się w tematykę współczesnej inżynierii materiałowej.

**Stwierdzić zatem można, iż przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**

### **Ocena merytoryczna pracy**

Rozprawę otwiera stosunkowo krótka, ale dobrze napisana część literaturowa, w której Autor opisuje problematykę kompozytów o osnowie aluminiowej wzmocnianych fazą ceramiczną, z najczęściej stosowanymi  $Al_2O_3$  i SiC. Opisuje metody wytwarzania takich kompozytów, ze szczególnym uwzględnieniem materiałów gradientowych, przedstawia stawiane im wymagania odnośnie właściwości użytkowych. Następnie przechodzi do istotnych, relacjonowanych w literaturze, zagadnień naprężeń resztkowych, przedstawiając metody ich pomiaru oraz wady i zalety tych metod. W ten sposób Autor dochodzi do kluczowego przeglądu literaturowego kompozytów zawierających  $Al_2O_3$  i SiC, wytworzonych różnymi technikami metalurgii proszków. Podaje tu szczegółowy opis uzyskanych przez różnych badaczy mikrostruktur i właściwości kompozytów, także w aspekcie aplikacyjnym. Ostatnia część przeglądu literaturowego poświęcona jest opisowi modeli numerycznych do obliczeń współczynnika rozszerzalności cieplnej. Część literaturowa rozprawy napisana jest w sposób poprawny i nie budzi zastrzeżeń.

Część eksperymentalną otwiera charakterystyka proszków użytych w badaniach, opis procesów przygotowania mieszanek proszkowych do wytworzenia kompozytów i opis procesu spiekania metodą HP i SPS. Następny rozdział to bardzo rozbudowana i dobrze napisana charakterystyka zastosowanych metod i technik badawczych:

- pomiar gęstości (metoda Archimedes),
- badania mikrostruktury (SEM, mikrotomografia komputerowa),
- pomiar dyfuzyjności cieplnej (metoda laserowa) do obliczeń przewodnictwa cieplnego,

- badania dylatometryczne do wyznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej,
- pomiar naprężeń resztkowych (dyfraktometria neutronowa),
- ocena właściwości tribologicznych kompozytów.

Dodatkowo Doktorant przeprowadził symulacje numeryczne przewodności cieplnej i naprężeń resztkowych.

Wymieniony zestaw metod i technik badawczych uważać należy za prawidłowo dobrany, pozwalający na wszechstronną charakteryzację struktury i właściwości badanych materiałów.

Podstawowe wyniki zebrane są w dwóch kolejnych rozdziałach, poświęconych kompozytom z tlenkiem glinu i węglikiem krzemu. Struktura tych rozdziałów jest jednakowa. Opis i analiza wyników, także w kontekście danych literaturowych, zaczyna się od pomiarów gęstości i porowatości spieków, następnie przedstawione są wyniki obserwacji mikroskopowych w odniesieniu do opisu mikrostruktury. Kolejna część dotyczy obliczeń przewodności cieplnej kompozytów z wykorzystaniem wyników pomiaru dyfuzyjności cieplnej i ciepła właściwego. Uzyskane wyniki odniesione są do różnych modeli analitycznych (np. Mori-Tanaka, Reuss) i obliczeń numerycznych (metoda elementów skończonych) na bazie wyników z mikrotomografii komputerowej. Wyniki symulacji numerycznych przewodności cieplnej wykazały bardzo dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Jako ostatnie przedstawiono wyniki pomiarów naprężeń resztkowych, także skonfrontowane z obliczeniami.

Konstrukcja kolejnego rozdziału, poświęconego kompozytom zawierającym SiC, jest analogiczna, z tym, że w odniesieniu do tych kompozytów zamieszczono dodatkowo wyniki rentgenowskich badań dyfrakcyjnych dla wybranego składu oraz obserwacje TEM, potwierdzające tworzenie się warstwy  $Al_2O_3$  na granicy rozdziału faz metal-ceramika. Następny rozdział pracy poświęcony jest wynikom testów tribologicznych i opisowi mechanizmów abrazji i delaminacji oraz wielkości obserwowanego zużycia. Część eksperymentalną rozprawy wieńczy rozdział, w którym Autor zebrał, podsumował i porównał wyniki badań uzyskane dla obu grup kompozytów i obu technik spiekania. Pracę zamyka podsumowanie, wnioski i proponowane kierunki dalszych badań w omawianej tematyce.

**Zaplanowanie i przeprowadzenie wielu eksperymentów z wykorzystaniem różnorodnych i komplementarnych technik i metod badawczych oraz późniejsza analiza uzyskanych wyników świadczą o tym,**

**że recenzowana rozprawa doktorska bez wątpliwości wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.**

W toku realizacji bardzo obszernego programu badań Autor uzyskał szereg interesujących wyników, a za najważniejsze i najciekawsze osiągnięcia rozprawy doktorskiej recenzent uważa:

1. wykazanie, że optymalizacja procesu wytwarzania kompozytów zarówno niegradientowych i gradientowych jest niezwykle istotna z punktu widzenia jakości uzyskanych materiałów (pory, makropęknięcia, rozmieszczenie cząstek ceramicznych, granica rozdziału faz),
2. pokazanie, że metoda konsolidacji proszków (HP vs SPS) ma bardzo duże znaczenie, wpływając na gęstość/porowatość spieków, co przekłada się na późniejsze właściwości nie tylko mechaniczne, ale też cieplne,
3. wykazanie, że wielkość ziarna osnowy metalicznej istotnie wpływa na przewodność cieplną kompozytu,
4. pokazanie, że aspekt tworzenia się dodatkowych faz na granicy rozdziału metal/ceramika powinien być brany pod uwagę przy projektowaniu i wytwarzaniu kompozytów.

Reasumując, dobierając odpowiednio mieszanki proszkowe i metody konsolidacji, Doktorant wytworzył gradientowe i niegradientowe kompozyty na osnowie stopu AlSi12 zawierającego  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i SiC, charakteryzujące się zoptymalizowaną mikrostrukturą, właściwościami cieplnymi i mechanicznymi, stwarzając tym samym możliwości aplikacyjne. **Można więc z pełnym przekonaniem stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.**

Na podstawie przedstawionej do oceny pracy, nasuwają się recenzentowi następujące pytania do Doktoranta:

1. Dlaczego w metodzie HP zastosowano tak długie czasy spiekania (180 minut) w porównaniu z metoda SPS (10 minut), podczas gdy stosowane ciśnienia nie różnią się aż tak bardzo (HP - 30 MPa, SPS - 40 MPa)?

2. Czy tak duże różnice w zastosowanym czasie spiekania miały wpływ na wielkość ziarna metalicznej osnowy (przy podobnej np. w przypadku SiC temperaturze procesu: HP 560°C, SPS 547°C) ?
3. Co może być źródłem tworzenia się w kompozycie AlSi12+30%SiC sugerowanej przez Autora fazy  $Al_4C_3$ ?
4. Dlaczego przewodność cieplna kompozytów 3-warstwowych AlSi12- $Al_2O_3$  wytworzonych metodą SPS jest wyraźnie mniejsza niż w przypadku zastosowania techniki HP, podczas gdy w przypadku kompozytów z SiC obie metody dają bardzo podobną przewodność cieplną tych kompozytów?

### **Strona edytorska rozprawy i uwagi językowe**

Recenzowana rozprawa Pana mgr inż. Anil Antony Sequeira liczy 138 stron, zamieszczono w niej 18 tabel i 89 rysunków, z czego 57 ilustruje wyniki badań przeprowadzonych przez Autora. Praca została zredagowana i napisana bardzo starannie, poprawnym językiem z punktu widzenia dyscypliny inżynierii materiałowej. Zaprezentowane wykresy są czytelne, a materiał ilustracyjny – dobrej jakości. Doktorant odnosi się w pracy aż do 199 dobrze dobranych odnośników literaturowych. Zauważone przez recenzenta błędy edytorskie czy niedociągnięcia są naprawdę nieliczne: w spisie treści tytuł rozdziału 6 brzmi identycznie jak rozdziału 5, w metodyce nie opisano dwóch technik badawczych zastosowanych w pracy (dyfrakcja rentgenowska, transmisyjna mikroskopia elektronowa), należało podać obowiązujące wg normy aktualne oznaczenie stopu AlSi12 – jest to stop 4047A (seria 4xxx, siluminy). Niedociągnięcia te w żaden sposób nie wpływają na wysoką ocenę pracy.

### **Wniosek końcowy**

W podsumowaniu mojej oceny stwierdzam, że Pan mgr inż. Anil Antony Sequeira otrzymał w swojej pracy oryginalne wyniki badań, dowiódł umiejętności stosowania różnych technik badawczych, wykazał się umiejętnością planowania eksperymentu oraz analizy uzyskanych wyników. Zastosowany przez Doktoranta zestaw technik i narzędzi badawczych pozwolił w pełni scharakteryzować wytworzone materiały i zrealizować cel pracy. Uważam, że recenzowana rozprawa zawiera nowe, wartościowe i oryginalne rezultaty, istotnie poszerzające wiedzę naukową w zakresie możliwości opracowania nowej generacji kompozytów

gradientowych na osnowie Al wzmacnianych  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lub SiC. Praca jest kompleksowa i wieloaspektowa, a uzyskane wyniki pozwalają na prognozowanie dalszego rozwoju tak projektowanych i wytwarzanych materiałów, także w aspekcie aplikacyjnym przedstawionych w pracy rozwiązań materiałowych na elementy tarcz hamulcowych.

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

  
.....  
(podpis recenzenta)