

Warszawa, 27 stycznia 2026 r.

Prof. dr hab. inż. Dariusz Oleszak

Wydział Inżynierii Materiałowej

Politechnika Warszawska

ul. Wołoska 141

02-507 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Pauliny Zielińskiej

Heat resistance of SiC/SiC ceramic composites

Promotor: dr hab. inż. Maciej Motyka, prof. PRz

Promotor pomocniczy: dr inż. Waldemar Ziaja

Opiekun z ramienia MTU Aero Engines Polska: dr inż. Aleksandra Kloc

Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza na podstawie pisma RM-530-04-03/2025 z dnia 14.11.2025 r.

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy główne elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska Pani mgr. inż. Pauliny Zielińskiej, napisana pod opieką dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz, dotyczy analizy właściwości cieplnych i mechanicznych kompozytu S200H o osnowie ceramicznej SiC wzmacnianego włóknami SiC, w

aspekcie jego zastosowania w branży lotniczej. Doktorat realizowany był w ramach czwartej edycji programu „Doktorat wdrożeniowy”, we współpracy z firmą MTU Aero Engines Polska, w celu wsparcia implementacji technologii zaawansowanych materiałów kompozytowych do produkcji komponentów silników lotniczych. W wyniku przeprowadzonych badań Autorka dokonała oceny właściwości użytkowych kompozytów SiC/SiC w warunkach złożonego obciążenia cieplnego, mechanicznego i chemicznego, typowych dla eksploatacji w lotnictwie.

Praca, napisana w języku angielskim, ma układ klasyczny i składa się z siedmiu rozdziałów, przedstawiających analizę literaturową, cel i zakres pracy oraz hipotezy badawcze, metodykę badań i uzyskane wyniki, wraz z dyskusją i wnioskami. Całość kończy bibliografia oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca wydana jest w formie monografii, liczy 163 strony. Autorka odnosi się do 113 pozycji literaturowych. Odwołania obejmują głównie najnowsze prace z czasopism naukowych. Spis cytowanej literatury jest sporządzony niezwykle starannie.

2. Tematyka, cel i zakres rozprawy

Tematyka rozprawy wpisuje się w zagadnienia wykorzystania kompozytów o osnowie ceramicznej wzmocnionych ceramicznym włóknem ciągłym jako materiałów strukturalnych do zastosowania w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury. Odpowiedni dobór materiału osnowy i fazy umacniającej, a także uzyskanie odpowiedniej mikrostruktury może pozwolić na znaczący wzrost odporności na pękanie takich kompozytów. W porównaniu z nadstopami, omawiane kompozyty wykazują lepsze właściwości wytrzymałościowe, trwałość w wysokich temperaturach i mniejszą gęstość. Szczególnie kompozyty typu SiC/SiC wzmocnione polikrystalicznym włóknem ciągłym o średnicy rzędu 10-15 mikrometrów wydają się być potencjalnymi kandydatami do zastosowań w branży lotniczej. W obecnych zastosowaniach w lotnictwie wojskowym i cywilnym temperatura pracy takich materiałów osiąga 1250°C. Stąd wiele wysiłków badawczych w kierunku jej zwiększenia nawet do 1600°C. Dlatego też wybór tematyki rozprawy uznać więc należy za niezwykle istotny zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

Cel i zakres rozprawy zdefiniowane zostały na podstawie analizy celów i potrzeb MTU Aero Engines Polska. Doktorantka tworząc koncepcję pracy skoncentrowała się na wątku opracowania kryteriów oceny mikrostruktury i narzędzi analitycznych, które mogłyby być zaimplementowane w procesach kontroli jakości i certyfikacji w środowisku przemysłowym. Ogólnym celem rozprawy była identyfikacja kluczowych

mechanizmów degradacji struktury w warunkach wysokiej temperatury i obciążeń mechanicznych, co pozwoli na ocenę przydatności badanego kompozytu do pracy w rzeczywistym środowisku silnika. Istotne tu są szczególnie metody analizy porowatości i pęknięć oraz wysokotemperaturowego pełzania.

Aby zrealizować cele rozprawy, Autorka szczegółowo sformułowała jej zakres:

- analiza literaturowego stanu zagadnienia w kontekście właściwości mechanicznych kompozytu, szczególnie w podwyższonej temperaturze,
- szczegółowa charakteryzacja komercyjnego kompozytu S200H w celu uzyskania jakościowego i ilościowego opisu mikrostruktury i stworzenie katalogu istotnych parametrów mikrostruktury wpływających na zachowanie się materiału w podwyższonej temperaturze,
- opracowanie powtarzalnych i zautomatyzowanych metod opisu porowatości i pęknięć z wykorzystaniem technik analizy obrazu,
- przeprowadzenie prób wysokotemperaturowego pełzania w celu oceny właściwości mechanicznych w warunkach pracy,
- analiza próbek po testach mechanicznych w celu oceny przełomów i wpływu temperatury i obciążeń mechanicznych na procesy degradacji i zniszczenia mikrostruktury,
- ocena wpływu samej obróbki cieplnej (bez obciążeń mechanicznych) na zmiany mikrostrukturalne,
- kompleksowy opis zmian mikrostrukturalnych w kompozycie pod wpływem temperatury i naprężeń, istotny z punktu widzenia kontroli jakości i certyfikacji materiału,
- ocena przydatności badanego kompozytu do wykorzystania w komponentach silników wytwarzanych w MTU.

W oparciu o dane literaturowe oraz przedstawione cele, Doktorantka postawiła następujące hipotezy badawcze:

- odporność mechaniczna i cieplna kompozytu SiC/SiC jest zdeterminowana głównie przez właściwości włókien SiC,
- osnova kompozytu w postaci SiC ma znaczący udział w ogólnej wytrzymałości kompozytu, zapewniając odpowiednią strukturę i odporność na utlenianie i propagację pęknięć,
- temperatura jest dominującym czynnikiem prowadzącym do degradacji strukturalnej kompozytów SiC/SiC,
- naprężenia mechaniczne są krytycznym czynnikiem wpływającym na zniszczenie mikrostruktury kompozytu.

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

3. Ocena merytoryczna pracy

Część literaturowa

Rozprawę otwiera trzydziestostronicowa część literaturowa, w której Autorka przedstawia definicje kompozytów ceramicznych, klasyfikuje te materiały ze względu na materiał osnowy i wzmocnienie, opisuje rolę jaką spełnia osnowa i włókno. W kolejnych rozdziałach przedstawione są typowe wady kompozytów CMC. Przedstawiona jest charakterystyka komercyjnych włókien SiC funkcjonujących pod różnymi nazwami handlowymi, lecz ze względu na swoje zróżnicowane właściwości przynależące do pierwszej, drugiej lub trzeciej generacji wyrobów. Szczególną uwagę Doktorantka poświęca zagadnieniom związanym z degradacją materiału wskutek wysokiej temperatury, zjawiskom utleniania i pełzania wysokotemperaturowego.

W następnych rozdziałach opisane są szczegółowo metody wytwarzania kompozytów SiC/SiC. Doktorantka zwraca uwagę na role pokryć na włóknach, zapewniających ich dobrą eksploatację i chroniących przed utlenianiem.

W części literaturowej najwięcej uwagi Autorka poświęca najważniejszym zagadnieniom będącym przedmiotem rozprawy – pełzaniu i zmianom mikrostrukturalnym spowodowanych pełzaniem.

Doktorantka niezwykle starannie przeanalizowała aspekty teoretyczne związane z identyfikacją kluczowych mechanizmów degradacji mikrostruktury w warunkach obciążeń mechanicznych i cieplnych. Wymienione zagadnienia stanowią integralną część obszaru badawczego inżynierii materiałowej. **Stwierdzić zatem można, iż przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**

Część eksperymentalna

Część eksperymentalną podzielona jest na dwa zasadnicze obszary badawcze. Pierwszy obejmuje szczegółową charakterystykę badanego komercyjnego kompozytu S200H, natomiast druga – opis mikrostruktury i właściwości po procesie utleniania oraz wyniki testów pełzania. Autorka przedstawia metody i techniki eksperymentalne

wykorzystane w badaniach: mikroskopia świetlna i skaningowa mikroskopia elektronowa (tu Autorka zwraca uwagę na szczegóły związane z odpowiednim wycinaniem próbek), analiza termiczna, dyfrakcja rentgenowska, pomiary gęstości metodą Archimedesesa, obróbka cieplna (wysokotemperaturowe długotrwałe wygrzewania odtwarzające typowe warunki pracy komponentów silnika) i wreszcie bardzo istotne testy pełzania. Podrozdział ten zamyka czytelnie przedstawiony w postaci graficznej plan badań.

Wymieniony zestaw metod i technik badawczych uznać należy za prawidłowo dobrany, pozwalający na wszechstronną charakteryzację struktury i wybranych właściwości kompozytu, istotnych z punktu widzenia celów rozprawy.

W poszczególnych rozdziałach rozprawy Doktorantka przedstawia i analizuje, także w kontekście danych literaturowych, uzyskane wyniki, poczynając od pomiarów gęstości i porowatości. Zmierzona gęstość była nieznacznie większa ($2,45 \text{ gcm}^{-3}$) niż deklarowana przez producenta ($2,30 \text{ gcm}^{-3}$), jednak nie podał on w charakterystyce wyrobu metody pomiaru. Natomiast uzyskane wartości porowatości otwartej w przedziale 3,74 – 4,74 % były zgodne z danymi producenta (poniżej 5 %).

Obserwacje powierzchni próbek przy użyciu mikroskopu stereoskopowego ujawniły nierówną ich powierzchnię, zróżnicowanie odcieni, defekty powierzchniowe i zmiany w składzie osnowy. Ujawniono niejednorodny rozkład włókien i porowatość powierzchniową. Obserwacje przeprowadzone przy pomocy SEM pozwoliły na precyzyjne określenie wad i cech mikrostruktury, takich jak makropory, mikropory, delaminacja, popękane włókna, pęknięcia z procesu wytwarzania (pyroliza, zaleczone podczas infiltracji), kieszenie w osnowie (obszary zubożone we włókna), potwierdzono też 8-warstwową budowę materiału.

W dalszej części pracy Doktorantka szczegółowo omawia wyniki badań porowatości, wprowadzając własną klasyfikację wielkości porów: makropory powyżej 100 mikrometrów, mezopory w przedziale 10-100 mikrometrów, mikropory 0.1 – 10 mikrometrów i nanopory poniżej 0.1 mikrometra (100 nanometrów). Podkreślona tu zostaje rola porów, które mogą mieć kluczowy wpływ na takie właściwości jak wytrzymałość, twardość, odporność zmęczeniową, powstawanie pęknięć czy też proces utleniania w określonych warunkach eksploatacji. Doktorantka w swojej pracy analizowała rozmiar, kształt i umiejscowienie porów w materiale. Posłużono się średnicą Fereta, z wykorzystaniem oprogramowania Image IMS, badając pory większe niż 20 mikrometrów, mające największy wpływ na właściwości badanego kompozytu. W obszarze mezoporowatości stwierdzono najczęstsze występowanie porów o rozmiarach z przedziału 20-40 mikrometrów, natomiast dla makroporowatości był to przedział 100-200 mikrometrów.

Analizie poddano także kształt porów, posługując się współczynnikiem kształtu (wartość 1 oznacza pory kuliste). Najczęściej obserwowano pory o współczynniku 0.4, co oznacza ich wydłużenie (elipsoidalność).

Kolejnym badaniem przez Autorkę elementem mikrostruktury była grubość warstwy BN na włóknie, zapewniającej dobre przenoszenie obciążeń między włóknem a osnową, odchyłanie rozchodzących się mikropęknięć osnowy, absorpcję naprężeń wynikających z różnic we współczynniku rozszerzalności cieplnej komponentów, a także spełniającą rolę bariery dyfuzyjnej w aspekcie utleniania wysokotemperaturowego. Dla wszystkich zbadanych próbek grubość powłoki BN wynosiła od 193 do 258 nanometrów.

Ostatnim elementem mikrostruktury analizowanym z wykorzystaniem metod mikroskopowych były zamknięte mikropęknięcia, czy raczej pustki-nieciągłości osnowy, powstałe w procesie wytwórczym. Jednocześnie nie stwierdzono występowania zjawisk debondingu, wzdłużnych lub poprzecznych pęknięć czy też degradacji interfejsu.

Charakterystykę komercyjnego kompozytu S200H dopełniają wyniki rentgenowskich badań dyfrakcyjnych, rozkładu pierwiastków określonego techniką EDS oraz analiza termiczna. Badania rentgenowskie ujawniły występowanie dwóch faz: SiC oraz Si₃N₄. Brak linii dyfrakcyjnych od BN Autorka tłumaczy możliwym małym stopniem jego krystaliczności, a brak linii od osnowy SiNC - możliwym amorficznym charakterem tej fazy. Analiza składu chemicznego ujawniła obecność Si, C, O i N w badanym materiale. Jednocześnie Doktorantka zaznaczyła, że technika ta nie pozwala na precyzyjne ilościowe określenie składu chemicznego. Z kolei analiza krzywych kalorymetrycznych pozwoliła Autorce na zidentyfikowanie licznych efektów cieplnych i przypisanie ich różnym zjawiskom i przemianom zachodzącym podczas nagrzewania kompozytu.

W drugiej części eksperymentalnej, kluczowej z punktu widzenia rozprawy, Doktorantka zawarła wyniki badań kompozytu po procesie utleniającej obróbki cieplnej – wygrzewaniu w 980, 1100 i 1300°C przez 20, 40, 80 i 100 godzin. Badania XRD ujawniły obecność, obok linii od SiC i Si₃N₄, pików od SiO₂, co może świadczyć o powstającej warstwie tlenkowej, szczególnie ujawniającej się przy wyższych temperaturach wygrzewania i dłuższych czasach. Bazując na pomiarach zmian masy próbek, Autorka przeanalizowała kinetykę procesu utleniania i obliczyła energię aktywacji tego procesu, wynoszącą 107 kJ/mol, co jest zgodne z dostępnymi danymi literaturowymi. Przyjęto do obliczeń model zakładający paraboliczny wzrost warstwy kontrolowany dyfuzyjnie, pomimo wątpliwości zasygnalizowanych przez Autorkę w tekście rozprawy.

Obserwowany ubytek masy próbek po wygrzewaniu Doktorantka tłumaczy zjawiskiem tzw. aktywnego utleniania prowadzącego do powstania związków lotnych (SiO , CO), szczególnie w wyższych temperaturach, co prowadzi do zmniejszenia masy próbek. Dodatkowo towarzyszy temu wzrost porowatości sprzyjający dyfuzji tlenu poprzez pęknięcia i pustki w osnowie (drogi ułatwionej dyfuzji). Jednocześnie zachodzi utlenianie pasywne, skutkujące powstaniem warstwy SiO_2 . Na kilkudziesięciu stronach Autorka szczegółowo opisuje procesy degradacji kompozytu w badanych warunkach temperaturowo-czasowych, w oparciu o obserwacje SEM i wyniki EDS. Na podstawie tych badań wyciągnięte zostały interesujące wnioski odnośnie postępującej degradacji materiału kompozytowego, czego ukoronowaniem jest zaproponowany schemat tego procesu (rys. 63).

Kolejna eksperymentalna część rozprawy przedstawia wyniki prób pełzania i analizę fraktograficzną wraz z obserwacjami SEM. Badania przeprowadzono w temperaturach 980°C i 1100°C przy naprężeniach 100 i 200 MPa. Omawiając wyniki tych prób Autorka zaznacza, że w odniesieniu do kompozytów o osnowie ceramicznej, gdzie dominują takie mechanizmy degradacji jak utlenianie i mikropęknięcia, interpretacja wyników jest inna niż w przypadku klasycznego pełzania stopów metalicznych. Niemniej jednak wykazano, że przy obciążeniu 100 MPa zaobserwowane odkształcenie nie zależało od temperatury i wynosiło ok. 0.1%, natomiast dla próbek badanych w 1100°C było większe. Dla obu temperatur badania obciążenie 100 MPa skutkowało czasem 200 godzin do zniszczenia, natomiast przy 200 MPa – 33 do 106 godzin dla temperatury 980°C i poniżej jednej godziny w temperaturze 1100°C . W próbkach po próbie pełzania, niezależnie od temperatury badania i zadanych obciążeń, wykazano liczne pęknięcia osnowy, głównie wzdłuż włókien, przy jednoczesnym zachowaniu warstwy BN w przypadku niższej temperatury i jej postępującej degradacji w wyższej temperaturze (1100°C).

Istotnym elementem rozprawy jest rozdział poświęcony mikrostrukturalnej analizie porównawczej próbek po procesach utleniania i próbach pełzania. Wykazała ona podobne cechy mikrostruktury w obu przypadkach – mikropęknięcia o zbliżonych rozmiarach, stabilność powłok ochronnych na włóknach, porównywalną porowatość. Jednocześnie porównanie próbek utlenianych przez 100 h w temperaturze 1100°C i poddanych próbie pełzania w 1100°C przez 200 h przy obciążeniu 150 MPa wykazało, że próbki poddane utlenianiu wykazywały znacznie wyższy stopień degradacji mikrostrukturalnej, a spowodowane to może być różnicami w wymiarach próbek i samą ich preparatyką.

Ostatnim eksperymentem przeprowadzonym przez Doktorantkę było poddanie kompozytów testom w warunkach pracy silnika lotniczego, tj. połączonemu działaniu

temperatury, ciśnienia, agresywnych chemicznie, sprzyjających korozji produktów gazowych (CO_2 , H_2O , NO_x , SO_x , O_2) oraz zanieczyszczeń. Badania te przyniosły istotne informacje, z których wynika, że stopień degradacji kompozytu był większy na powierzchni próbki. Dotyczy to głównie osnowy ulegającej utlenieniu i powstawaniu warstwy SiO_2 . Gdy blisko powierzchni znajdowały się włókna SiC , utlenienie było ograniczone jedynie do cienkiej warstwy, wskutek bariery dyfuzyjnej w postaci pokrycia włókien $\text{BN/Si}_3\text{N}_4$. Jednocześnie stwierdzono, że wspomniane pokrycie włókien ulegało częściowej degradacji, utlenieniu i oderwaniu pod wpływem temperatury, agresywnego korozyjnego środowiska i naprężeń mechanicznych.

Reasumując, przeprowadzając zaplanowane eksperymenty Doktorantka szczegółowo opisała wyniki badań, uwzględniając mikrostrukturę kompozytu, wpływ temperatury i obciążeń mechanicznych na mechanizmy degradacji materiału.

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 Doktorantkę.

4. Największe osiągnięcia rozprawy

W toku realizacji bardzo obszernego programu badań Autorka uzyskała szereg interesujących wyników, a za najważniejsze osiągnięcia rozprawy doktorskiej recenzent uważa:

1. Przeprowadzenie kompleksowej, wszechstronnej i dogłębnej analizy jakościowej i ilościowej wyjściowej mikrostruktury komercyjnego kompozytu S200H z osnową SiC wzmocnionego włóknami SiC z pokryciem $\text{BN/Si}_3\text{N}_4$
2. Wykonanie kompleksowych badań degradacji badanego materiału kompozytowego, co pozwoliło określić czynniki wpływające na ten proces, w tym zidentyfikowanie temperatury jako czynnika dominującego, obok naprężeń mechanicznych wpływających głównie na degradację pokrycia włókien.
3. Udowodnienie, że pomimo postępującego procesu zaawansowanego utleniania w wysokiej temperaturze, włókna SiC zachowują swoją strukturalną integralność, pozwalającą na ich wysokotemperaturowe zastosowania.
4. Opracowanie procedur badawczych w odniesieniu do nowego dla firmy MTU materiału przeznaczonego do zastosowań w przemyśle lotniczym.

Podsumowując, przeprowadzając zaplanowane badania Autorka określiła mikrostrukturalne kryteria ewaluacyjne w aspekcie degradacji cieplnej i mechanicznej nowego typu materiału kompozytowego do zastosowań w przemyśle lotniczym. **Można więc z pełnym przekonaniem stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.**

5. Zagadnienia dyskusyjne, komentarze recenzenta oraz pytania do Doktorantki

Na podstawie przedstawionej do oceny pracy, nasuwają się recenzentowi następujące pytania bądź komentarze skierowane do Doktorantki:

1. W opisie wyników dyfrakcyjnych badań rentgenowskich (XRD) niezrozumiałe są stwierdzenia dotyczące niewykrycia obecności azotu i boru – czy miałyby być w postaci pierwiastkowej? Brak linii dyfrakcyjnych od osnowy SiNC (może być przynajmniej częściowo amorficzna – str. 72) nie jest tak jednoznaczny (niekoniecznie jest amorficzna), ponieważ faza ta daje linie dyfrakcyjne praktycznie w tych samych pozycjach kątowych co SiC, szkoda że Doktorantka nie podała numerów kart z bazy ICDD, którymi się posługiwała.
2. Obliczenia ciepła właściwego przeprowadzać można według dwóch procedur. Pierwsza wymaga precyzyjnej kalibracji urządzenia z wykorzystaniem wzorca w postaci szafiru i zarejestrowania krzywej bazowej. Natomiast drugi sposób, mówiąc w uproszczeniu, bazuje na podzieleniu zarejestrowanych wartości przepływu ciepła przez szybkość nagrzewania. Która z procedur została zastosowana (patrząc na charakter krzywej recenzent ma swoje typy)?
3. Zaznaczone na krzywej zmiany ciepła właściwego w funkcji temperatury (to już nie jest krzywa DSC, jak w podpisie) wartości temperatur odpowiadają po prostu kolejnym zmianom przebiegu krzywej, a nie są temperaturami pików („the first three peaks, occuring at 148.5, 191.3 and 287°C....”). Tylko wartość 191.3°C odpowiada temperaturze pików, natomiast dwie pozostałe wartości to temperatury początku i końca przemiany (egzotermicznej przy założeniu egzo down – czego nie zaznaczono na rysunku). Analogicznie z egzotermicznym efektem z $T_p = 402.5^\circ\text{C}$.
4. Jak pobierano próbki do badań kalorymetrycznych i czy były one reprezentatywne, biorąc pod uwagę ich małą masę (kilkadziesiąt miligramów) i ile przebiegów kalorymetrycznych wykonano?
5. Czy zdaniem Doktorantki z punktu widzenia celów rozprawy nie lepiej byłoby pokazać krzywą kalorymetryczną w układzie przepływ ciepła - temperatura i na podstawie entalpii poszczególnych przemian (pole powierzchni pików) i temperatur

ich występowania wnioskować o zachodzących przemianach fazowych, zamiast prezentować zmiany C_p , które po pierwsze są bardzo małe, a po drugie - nie wnoszą istotnych informacji?

6. Strona edytorska rozprawy i uwagi językowe

Recenzowana rozprawa Pani mgr inż. Pauliny Zielińskiej liczy 163 strony, zamieszczono w niej 16 tabel i 88 rysunków, z czego 84 ilustruje wyniki badań przeprowadzonych przez Autorkę. Praca została zredagowana i napisana bardzo starannie, poprawnym językiem z punktu widzenia dyscypliny inżynierii materiałowej. Zaprezentowane wykresy są czytelne, a materiał ilustracyjny – dobrej jakości. Doktorantka odnosi się w pracy do 113 dobrze dobranych odnośników literaturowych. Zauważone przez recenzenta pojedyncze błędy edytorskie są naprawdę nieliczne, nie warte nawet wzmiankowania i tym bardziej nie wpływają na wysoką ocenę pracy.

7. Wniosek końcowy

W podsumowaniu mojej oceny stwierdzam, że Pani mgr inż. Paulina Zielińska otrzymała w swojej pracy oryginalne wyniki badań, dowiodła umiejętności stosowania różnych technik badawczych, wykazała się umiejętnością planowania eksperymentu oraz analizy uzyskanych wyników. Zastosowany przez Doktorantkę zestaw technik i narzędzi badawczych pozwolił w pełni scharakteryzować badane materiały i zrealizować cel pracy. Uważam, że recenzowana rozprawa zawiera nowe, wartościowe i oryginalne rezultaty, istotnie poszerzające wiedzę naukową w zakresie możliwości zastosowania kompozytów SiC/SiC w przemyśle lotniczym. 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 komponenty silników.

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.


.....
(podpis recenzenta)