



dr hab. inż. Anna Janina Dolata, prof. PŚ
Wydział Inżynierii Materiałowej
i Cyfryzacji Przemysłu
Politechnika Śląska
Katedra Technologii Materiałowych
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice
tel. 32 603 4426

Katowice, 2026-01-24

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Zielińskiej
pt. „Heat resistance of SiC/SiC ceramic composites”

Praca przedstawiona do publicznej dyskusji Radzie Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza

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

Promotor pomocniczy: dr inż. Waldemar Ziaja

Promotor z firmy MTU Aero Engines Polska Sp. z o.o.: dr Aleksandra Kloc

Podstawa opracowania:

Podstawą formalną przygotowania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej jest uchwała o powołaniu na recenzenta przez Radę Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 14 listopada 2025 r, zgodnie z pismem Przewodniczącego RDIM Pana dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz (pismo z dnia 14 listopada 2025 r., nr RM-530-04-01/2025).

I. Krótka ocena problematyki badawczej

Recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Pauliny Zielińskiej została wykonana pod opieką naukową Pana dr hab. inż. Macieja Motyki profesora Politechniki Rzeszowskiej, we współpracy z firmą MTU Aero Engines Polska Sp. z o.o., w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”, którego główną ideą jest współdziałanie świata nauki z przemysłem.

Praca dotyczy istotnych zagadnień związanych z rozwojem lekkich, zaawansowanych materiałów kompozytowych do zastosowań w branży lotniczej. Ten innowacyjny, dynamicznie rozwijający się i jednocześnie strategiczny sektor przemysłu przechodzi obecnie jedną z największych transformacji w swojej historii. Będąc w przełomowym momencie mierzy się z wieloma wyzwaniami, w tym technologicznymi i środowiskowymi. Rosnące wymagania związane z poprawą bezpieczeństwa pasażerów, zrównoważonym rozwojem i ochroną środowiska uzasadniają dążenie do zwiększenia trwałości oraz niezawodności elementów konstrukcji statków powietrznych przy jednoczesnym zmniejszeniu ich masy. Daje to



motywację do poszukiwania nowych lub modyfikacji znanych rozwiązań materiałowych, do których bez wątpienia należą zaawansowane materiały kompozytowe. W grupie tej szczególnie miejsce zajmują kompozyty ceramiczne wykazujące duży potencjał do zastosowań na elementy pracujące w złożonych warunkach obciążeń termicznych, mechanicznych i korozyjnych.

Powyższe aspekty stanowią trzon ocenianej rozprawy. Doktorantka skupiła się na kompleksowej charakterystyce mikrostruktury i ocenie właściwości użytkowych (cieplnych, mechanicznych) komercyjnie wytwarzanego kompozytu ceramicznego (S200H) na osnowie węgla krzemu (SiC) zbrojonego ciągłymi włóknami SiC, w świetle jego zastosowania na elementy silnika lotniczego.

Uważam, że problematyka naukowo-badawcza podjęta w rozprawie doktorskiej przez mgr inż. Paulinę Zielińską jest dobrze ułożona w dyscyplinie „inżynieria materiałowa”, mieści się w jej priorytetowych obszarach. Wybór tematyki rozprawy znajduje uzasadnienie zarówno w świetle aktualnego stanu wiedzy w zakresie zaawansowanych kompozytów ceramicznych, jak i realnej potrzeby wpisującej się w profil działalności partnera przemysłowego.

II. Ocena formalna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter eksperymentalno-badawczy. Została napisana w języku angielskim, którego poprawność nie budzi zastrzeżeń. Opracowanie ma formę zwartą i zawiera łącznie 163 numerowane strony, w tym spis treści, bibliografię oraz streszczenia w języku angielskim i polskim. Przegląd piśmiennictwa został oparty na 113 anglojęzycznych pozycjach, w tym artykułach naukowych i pozycjach książkowych silnie skoncentrowanych na poruszanej w pracy tematyce. Wszystkie odniesienia do literatury dobrano właściwie z merytorycznego punktu widzenia, aczkolwiek udział cytowanych prac z ostatniej dekady mógłby być większy. W pracy zamieszczono łącznie 88 rysunków oraz 16 tabel, wszystkie są dobrej jakości, przejrzyste i czytelne.

Zasadnicza część rozprawy zawiera 7 głównych rozdziałów. Pierwsze 4 to odpowiednio „wprowadzenie” (rozdział 1, str. 3), „motywacja” (rozdział 2, str. 5-6), „przegląd literatury” (rozdział 3, str. 7-36) oraz „założone cele, zakres i hipotezy badawcze” (rozdział 4, str. 37-38). Rozdział 5, pt. „badania eksperymentalne” został podzielony na 3 podrozdziały, zawierające opisy materiału, metodologii i planu badań (str. 39-48). Obszerny rozdział 6, zatytułowany „rezultaty i dyskusja”, został podzielony na 5 podrozdziałów (str. 49-152). Tę część pracy kończy „podsumowanie” (rozdział 7, str. 153-154).

W mojej ocenie układ pracy jest poprawny. Między rozdziałami zachowano bardzo dobre proporcje, ich kolejność jest właściwa, a przekazywane treści logiczne i powiązane ze sobą.



Zamieszczone poniżej uwagi i komentarze dotyczące głównie części redakcyjnej pracy nie wpływają na mój bardzo pozytywny odbiór całej rozprawy doktorskiej.

1. Błędy edycyjne związane z numeracją stron:
 - a) w rozprawie znajdują się 2 numerowane puste strony (odpowiednio str. 2 i 4), co prawdopodobnie jest wynikiem błędnego ustawienia formatowania dokumentu dla druku dwustronnego;
 - b) standardowo numery stron nadawane są od pierwszej strony, ale do „stopki” winny być wprowadzane dopiero po spisie treści, korzystnie z wyrównaniem do środka strony lub jej prawego marginesu.
2. W podpisach pod 2 rysunkami zamieszczonymi w części przeglądowej nie umieszczono odnośników do źródła, tj. „Figure 1” (str. 7) oraz „Figure 2” (str. 9).
3. W pracy naukowej korzystne jest chronologiczne odwoływanie się do cytowanych rysunków, które powinny być umieszczane możliwie jak najbliżej pierwszego odwołania w tekście, zazwyczaj bezpośrednio pod akapitem, w którym po raz pierwszy o nich wspomniano – uwaga dotyczy np. rys. 3 (str. 15).
4. Jeśli rysunek nie mieści się w całości na stronie po akapicie, należy go przenieść na początek następnej strony, zachowując ciągłość wątku – uwaga dotyczy np. rys. 16 (str. 60) i rys. 37 (str. 84).
5. Czasami korzystnym rozwiązaniem jest podział rysunków na odrębne pozycje, tak aby ich opis znalazł się bezpośrednio pod zamieszczonym rysunkiem – uwaga dotyczy np. rys. 41 (str. 92-93), rys. 48 (103-104), czy też rys. 49 (str. 104-105).
6. Tytuł 7 rozdziału, zgodnie z jego treścią powinien brzmieć: „Podsumowanie i wnioski”.

III. Ocena merytoryczna rozprawy

Mgr inż. Paulina Zielińska swoją dysertację rozpoczęła syntetycznym wprowadzeniem (rozdział 1, str. 3) oraz przedstawieniem motywacji (rozdział 2, str. 5-6) uzasadniając wybór tematu pracy i potrzebę podjęcia badań w zakresie oceny zmian zachodzących w mikrostrukturze kompozytu SiC/SiC pod wpływem złożonych obciążeń termicznych i mechanicznych, które występują w silnikach lotniczych. W przeglądzie literatury (rozdział 3, str. 7-36), Doktorantka omówiła podstawowe grupy kompozytów ceramicznych wskazując na ich potencjał dla wysokotemperaturowych aplikacji. Szczegółowo scharakteryzowała procesy wytwarzania, mikrostrukturę i właściwości włókien otrzymywanych na bazie węgla krzemu (SiC), z uwzględnieniem podziału na włókna pierwszej, drugiej i trzeciej generacji. Opisała główne sposoby wytwarzania kompozytów w układzie SiC/SiC (m.in. „Chemical Vapor Infiltration – CVI”, „Polymer infiltration and pyrolysis – PIP”), przedstawiła ich zalety i wady wskazując, że w produkcji zwłaszcza wysoko obciążonych elementów silników lotniczych stosowane są metody hybrydowe (CVI-PIP lub CVI-MI). Następnie, po krótkim przedstawieniu istotnych aspektów związanych z doбором powłok międzyfazowych, kluczowych dla zapewnienia wytrzymałości i trwałości materiału



kompozytowego, szczegółowo omówiła procesy degradacji i niszczenia mikrostruktury kompozytów SiC/SiC oraz ich wpływ na stabilność właściwości materiału poddanego działaniu wysokiej temperatury. Uważam, że zamieszczony w opracowaniu przegląd literatury bardzo dobrze wprowadza czytelnika w jego główną problematykę badawczą. Uzasadnia także przyjęte cele i zakres pracy oraz sformułowane hipotezy badawcze (rozdział 4, str. 37-38).

Zarówno **główny cel rozprawy** „kompleksowe zbadanie odporności mechanicznej i termicznej kompozytu SiC/SiC (S200H), ze szczególnym uwzględnieniem jego potencjalnego zastosowania w elementach silników lotniczych produkowanych przez MTU Aero Engines Polska”, jak i **cel aplikacyjny** „opracowanie zestawu kryteriów oceny mikrostrukturalnej oraz narzędzi analitycznych, które mogą być wdrożone w procesach kontroli jakości i certyfikacji w środowisku przemysłowym” są klarowne i adekwatne do wymogów stawianych rozprawom wdrożeniowym. Dla ukierunkowania prac eksperymentalnych i analitycznych, Doktorantka sformułowała 4 weryfikowalne **hipotezy badawcze** zakładając, że: „odporność mechaniczna i termiczna kompozytu SiC/SiC zależy przede wszystkim od właściwości włókien SiC”, „osnowa SiC znacząco przyczynia się do ogólnej trwałości kompozytu, zapewniając wsparcie strukturalne oraz odporność na utlenianie i propagację pęknięć”, „temperatura jest dominującym czynnikiem powodującym degradację mikrostruktury kompozytów SiC/SiC”, a „naprężenia mechaniczne są kluczowym czynnikiem wpływającym na uszkodzenia mikrostrukturalne kompozytów SiC/SiC”. Autorka określiła ponadto 9 dodatkowych celów („following objectives (...) were formulated”) o charakterze konkretnych zadań stanowiących „mapę drogową” prowadzącą do osiągnięcia celu głównego.

Wysoko oceniam opracowany przez Doktorantkę schemat prac badawczych (rozdział 5, str. 39-48), przedstawiający etapy zaplanowanych badań (rys. 9, str. 52), a zwłaszcza ich konsekwentną realizację. Zgodnie z przyjętą metodyką, mgr inż. Paulina Zielińska wykonała szereg badań analitycznych i eksperymentalnych, których wyniki wraz z obszerną dyskusją przedstawiła w rozdziale 6, kluczowym dla wartości merytorycznej pracy (str. 49-152). W pierwszym etapie badań skupiła się na szczegółowej charakterystyce kompozytu SiC/SiC w stanie wyjściowym, w tym jakościowym i ilościowym opisie jego mikrostruktury. Zidentyfikowała defekty występujące w materiale, dokonała klasyfikacji i kwantyfikacji porowatości. Na podstawie wnikliwych badań strukturalnych oraz analizy kinetyki procesu utleniania zrealizowanych na etapie drugim, zaproponowała modele mechanizmów degradacji zachodzących w materiale kompozytowym wraz ze wzrostem temperatury (rys. 63). Równie ważne są wyniki uzyskane w testach pełzania oraz opis i charakterystyka powierzchni przełomów, które pozwoliły na identyfikację zmian zachodzących w mikrostrukturze badanych próbek przy jednoczesnym obciążeniu mechanicznym i termicznym. Dużym atutem jest także ostatni etap badań zrealizowany w środowisku symulującym warunki pracy silnika lotniczego. Stanowi on dopełnienie kompleksowo prowadzonych prac w kierunku oceny możliwości aplikacji kompozytów SiC/SiC w warunkach złożonego obciążenia cieplnego, mechanicznego i korozyjnego.



W rozdziale 7 (str. 153-154) Autorka rozprawy dokonała syntetycznego podsumowania oraz sformułowała 13 wniosków końcowych. Ich struktura jest spójna również w kontekście przyjętych hipotez badawczych.

Uważam, że zestaw użytych metod i technik badawczych w odniesieniu do celów rozprawy jest poprawny. Na szczególną uwagę zasługują staranność prowadzonych przez Doktorantkę pomiarów i konsekwencja w ich realizacji. Praca jest spójna, a przedstawiony materiał badawczo-eksperymentalny stanowi ciąg przyczynowo skutkowy prowadzący do osiągnięcia przyjętych celów. Mgr inż. Paulina Zielińska wykazała się umiejętnością planowania badań oraz interpretacji uzyskanych rezultatów, które w mojej opinii są interesujące i wartościowe zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i aplikacyjnego.

Do najważniejszych osiągnięć Autorki recenzowanej rozprawy doktorskiej zaliczam:

- 1) dokonanie kompleksowej charakterystyki mikrostruktury kompozytu SiC/SiC oraz szczegółowej analizy mechanizmów degradacji zachodzących w materiale pod wpływem synergicznie działających obciążeń cieplnych i mechanicznych, w oparciu o zaawansowane metody i techniki badawcze;
- 2) identyfikację krytycznych cech mikrostruktury badanych kompozytów i opracowanie kryteriów ich oceny oraz narzędzi analitycznych istotnych z punktu widzenia procesów kontroli jakości i certyfikacji materiałów dedykowanych do pracy w złożonych warunkach obciążeń, które występują w silniku lotniczym.

Pytania i zagadnienia do dyskusji w czasie obrony.

1. Dlaczego dla przeprowadzonych cykli obciążeń cieplnych, które miały zamodelować pracę elementów silnika lotniczego, stosowane są wymiennie pojęcia „*heat treatment*”, „*oxidation*”, a czasami „*annealing*”.
2. W jakim stopniu analizowane obszary przełomów są reprezentatywne dla całej powierzchni badanych próbek (rozdział 6.3, str. 130-131)?
3. Czy może Pani wskazać jaka jest akceptowalna wartość porowatości materiałów dopuszczonych do zastosowań w konstrukcji silników lotniczych?
4. Czy na podstawie przeprowadzonych badań może Pani wytypować kluczowy parametr materiałowy, decydujący o ewentualnym dopuszczeniu lub odrzuceniu elementu kompozytowego w procedurze kontroli jakości?
5. Czy na obecnym etapie badań jest Pani w stanie wskazać jakie elementy silnika lotniczego mogą być wytwarzane z kompozytów SiC/SiC?

Pytania dyskusyjne mają charakter uzupełniający, nie wpływają na moją wysoką ocenę końcową recenzowanej rozprawy doktorskiej, w której zawarto wiele cennych informacji i wartościowych wyników.



IV. Podsumowanie i wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Zielińskiej wnosi oryginalny wkład w zrozumienie mechanizmów degradacji mikrostruktury ceramicznych kompozytów SiC/SiC, co ma istotne znaczenie dla dalszego rozwoju tych materiałów oraz poszerzenia zakresu ich zastosowań, nie tylko w przemyśle lotniczym.** Autorka pracy wykazała, że posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

We wnioskach końcowych **stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Zielińskiej pt.: „Heat resistance of SiC/SiC ceramic composites” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.** Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę kompleksowo zrealizowany zakres badań, wysoki poziom merytoryczny przedstawionych analiz, poprawność zastosowanej metodyki badawczej oraz wartość aplikacyjną rozprawy doktorskiej **wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o jej wyróżnienie.**