



Rzeszów, 19.04.2026 r.

dr hab. inż. Wojciech Nowak, prof. PRz  
Katedra Nauki o Materiałach  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska  
ul. Żwirki i Wigury 4  
35-959 Rzeszów

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. Muhammada Jahangira KHANA,  
pt.: „Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials”  
- podstawa opracowania recenzji – uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa  
Politechniki Śląskiej z dnia 17.02.2026 r. (pismo z dnia 17.02.2026r.)**

### Ogólna charakterystyka rozprawy

W obecnych czasach turboodrzutowe silniki samolotowe projektuje się w taki sposób aby sprostać wymogom ekonomicznym, jak również ekologicznym (zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych). Głównym nurtem działań w tym kierunku są prace nad zwiększeniem sprawności tychże silników. W oparciu o cykl Carnota najprostszym (pozornie) rozwiązaniem jest zwiększenie temperatury pracy na wlocie turbiny gorącej. Jednakże taki zabieg spowodował, że temperatura pracy silników lotniczych niebezpiecznie zbliżyła się do granicznych wartości temperatury ich stosowania. Stąd zastosowano tzw. powłokowe bariery cieplne (Thermal Barrier Coatings – TBCs) składających się głównie z trzech podstawowych elementów składowych, tj. substratu, którymi najczęściej są nadstopy niklu odpowiedzialne za przenoszenie obciążeń mechanicznych, międzywarstwy żaroodpornej pełniącej funkcję rezerwuaru Al tworzącego ochronną warstwę tlenkową  $Al_2O_3$  oraz Cr celem przeciwdziałania korozji siarkowej oraz powłoki ceramicznej pełniącej funkcję izolatora cieplnego pomiędzy atmosferą spalin w silniku a substratem. Dzięki zastosowaniu systemów TBC możliwym stało się zwiększenie temperatury pracy silników turbinowych. Do wytwarzania powłok ceramicznych w systemach TBC najczęściej stosuje się  $ZrO_2$  stabilizowanych  $Y_2O_3$  w ilości 6-8 % masowych, potocznie zwanym YSZ – Yttria Stabilized Zirconia. Materiał ten posiada doskonałą stabilność oraz właściwości cieplne, jednakże gdy w reakcji z otoczeniem bierze udział czynnik stabilizujący odmianę polimorficzną tetragonalną  $ZrO_2$  tj.  $Y_2O_3$  wtedy w trakcie chłodzenia następuje przemiana polimorficzna z odmiany tetragonalnej w jednoskośną  $ZrO_2$ . Powoduje to zwiększenie

objętości jednostkowej  $ZrO_2$  co prowadzi do dezintegracji zwartych powłok ceramicznych. Dodatkowym niebezpiecznym aspektem w środowisku pracy powłokowych barier cieplnych jest zjawisko spiekania zewnętrznych warstw powłok YSZ. Procesy te niejednokrotnie następują na drodze tzw. korozji siarkowej (z ang. Hot Corrosion), tj. reakcji materiałów stosowanych na elementy gorącej sekcji turbiny gazowej ze związkami siarki. Związki te mogą pochodzić z różnych źródeł, jak np. z zanieczyszczeń paliwa bądź z pyłów wulkanicznych. Ostatnie powodują również przedostawanie się związków magnezu i wanadu do wnętrza silnika i ich czynny udział w reakcjach korozyjnych. W związku z tym obecnie prowadzi się badania nad opracowaniem nowego materiału na powłoki ceramiczne w powłokowych barierach cieplnych charakteryzujących się zwiększoną odpornością na ogólnie pojętą korozję siarkową. Problematyka recenzowanej dysertacji doskonale wpisuje się w ten nurt badań, zatem oceniam ją jako bardzo aktualną oraz warta zgłębiania.

Podstawą opracowania planu badawczego przyjętego w pracy była analiza dostępnych danych literaturowych dotyczących powłokowych barier cieplnych do zastosowań w warunkach wysokiej temperatury i silnie korozyjnej atmosfery. W swojej dysertacji Autor opisał ideę i znaczenie powłokowych barier cieplnych, następnie scharakteryzował elementy składowe systemów TBC oraz po krótko przedstawił metody ich wytwarzania. Kolejno wprowadził czytelnika w zagadnienia mechanizmów niszczenia powłokowych barier cieplnych spowodowanych obciążeniami cieplnymi, różnicami we współczynnikach liniowej rozszerzalności cieplnej poszczególnych składowych systemów TBC kończąc na specyficznym mechanizmie niszczenia powłokowych barier cieplnych, mianowicie na skutek korozji siarkowej. Następnie przedstawił stan zagadnienia na temat korozji siarkowej powłokowych barier cieplnych zawierających dwufazowe powłoki ceramiczne oparte o cyrkoniany pierwiastków ziem rzadkich, ze szczególnym uwzględnieniem  $La_2Zr_2O_7+8YSZ$ ,  $Gd_2Zr_2O_7+8YSZ$  oraz  $Sm_2Zr_2O_7+8YSZ$ . W dalszej części Doktorant podsumował dotychczasowe dane literaturowe w zakresie tematyki badawczej niniejszej pracy doktorskiej oraz wskazał istotne luki w wiedzy na temat odporności badanych już kompozytowych powłok ceramicznych z systemów TBC na korozję siarkową, mianowicie brak systematycznych badań na temat odporności na korozję siarkową w różnych konfiguracjach depozytów, co wskazał jako cel pracy. Sformułowana teza badawcza zakłada, że układy  $Nd_2Zr_2O_7$ ,  $Nd_2Zr_2O_7 + 8YSZ$  oraz  $Nd_2Ce_2O_7 + 8YSZ$  mogą wykazywać wyższą trwałość w warunkach korozji wysokotemperaturowej niż tradycyjne systemy jednofazowe, co wiąże się z ich zdolnością do efektywniejszej relaksacji naprężeń oraz ograniczania propagacji mikropęknięć. Kluczową rolę odgrywają tu złożone mechanizmy degradacji, prowadzące m.in. do powstawania faz niestechiometrycznych i drobnych pustek w mikrostrukturze.

W celu weryfikacji tej hipotezy zaplanowano badania obejmujące testy korozyjne w środowiskach stopionych soli, analizę składu fazowego oraz ocenę mikrostruktury powłok. Oczekiwany rezultat jest identyfikacja czynników wpływających na trwałość TBC, określenie zmian strukturalnych i fazowych zachodzących w trakcie eksploatacji oraz wyjaśnienie



mechanizmów degradacji i korozji. W założeniu Doktoranta uzyskane wyniki mają przyczynić się do rozwoju bardziej odpornych systemów powłokowych oraz pogłębienia wiedzy na temat wysokotemperaturowej korozji materiałów opartych na związkach metali ziem rzadkich.

Główną oś części eksperymentalnej pracy stanowiły badania odporności na korozję siarkową powłokowych barier cieplnych zawierających  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$  oraz  $\text{NdCe}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$  w warunkach wysokiej temperatury oraz w obecności depozytów soli siarczanowych o różnym składzie chemicznym. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie odporności na korozję siarkową badanych kompozytów ceramicznych oraz ich klasyfikację. Stwierdzono, że wszystkie badane powłoki ceramiczne wykazywały najlepszą odporność na korozję siarkową w kontakcie z  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Wprowadzenie dodatkowej soli  $\text{MgSO}_4$  powodowało pogorszenie tejże odporności, natomiast dla mieszaniny  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  i  $\text{V}_2\text{O}_5$  odnotowano znacznie większą degradację badanych powłok ceramicznych.

Pragnę nadmienić, że powyższe wnioski sformułowano na podstawie analizy wyników badań obejmujących dyfrakcję promieni rentgenowskich (XRD) oraz skaningową mikroskopię elektronową obejmującą obrazowanie w trybie elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) oraz spektroskopii dyfrakcji elektronów (EDS), czyli metod ograniczonych w liczbie, niemniej jednak wystarczających do poparcia wysnutych wniosków.

W podsumowaniu tej części recenzji mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr. Muhammada Jahangira KHANA zawiera wartościowe wyniki o charakterze poznawczym, które mogą w przyszłości przyczynić się do rozwoju i wdrożenia materiałów kompozytowych jako materiały na powłoki ceramiczne stosowane w powłokowych barierach cieplnych charakteryzujących się zwiększoną odpornością na korozję siarkową.

### Szczegółowa charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. Muhammada Jahangira KHANA pt. „*Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials*” dotyczy kompleksowych badań nowatorskich materiałów ceramicznych opartych na układzie jednofazowym  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  oraz układach kompozytowych opartych na  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$  oraz  $\text{NdCe}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$  w warunkach korozji siarkowej w temperaturze  $920^\circ\text{C}$  w czasie do 224 godzin w kontakcie z depozytami:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$  (50%-50%) oraz  $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{V}_2\text{O}_5$  (50%-50%). Wnioskować można, że praca doktorska powstała w oparciu o zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie 6 artykułów naukowych wskazanych na stronie iii. Niemniej jednak Autor opatrzył ją obszernym opracowaniem własnym (106 stron), w którym przedstawił: przegląd literatury w obszarze tematyki pracy, zakres, metodykę i wybrane wyniki badań oraz systematyczny opis uzyskanych wyników badań w warunkach korozji siarkowej dla różnego składu chemicznego depozytu dla trzech różnych powłok ceramicznych, mianowicie:  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$  oraz  $\text{NdCe}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$ . Opracowanie to wieńczą wnioski



oraz zarys dalszych prac w tematyce podejmowanej w niniejszej pracy doktorskiej. W mojej ocenie, ta część rozprawy wyczerpująco charakteryzuje podjętą problematykę, na tle której Autor odpowiednio umotywowował zakres swoich badań. Co więcej, umiejętnie przedstawił i omówił wyniki badań opublikowane w załączonym cyklu artykułów naukowych, dowodząc ich spójności tematycznej.

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. Muhammada Jahangira KHANA podzielono na 8 rozdziałów, pomijając streszczenia i wykazy skrótów stosowanych w pracy oraz pozycje literaturowe (ilość pozycji jest jednak trudna do zdefiniowania ze względu na powtórzenia niektórych z nich). W części tej ujęto 38 rysunków i 4 tabele.

W rozdziale I: Wprowadzenie, Autor przybliżył ideę i znaczenie stosowanych powłokowych barier cieplnych, rodzajów materiałów w nich stosowanych oraz zarysował problem korozji siarkowej.

Rozdział II zawiera przegląd literatury, obejmujący krótkie omówienie powłok TBC, ich zastosowań, stosowanych w nich nowoczesnych materiałów, metod ich wytwarzania oraz mechanizmów prowadzących do ich degradacji.

Rozdział III: Materiały i metody. W tej części przedstawiono wykorzystane materiały oraz procedury badawcze zastosowane do analizy właściwości, budowy oraz procesów degradacyjnych powłokowych barier cieplnych.

Rozdział IV: Teza i cele pracy prezentuje główne założenia badawcze oraz cele pracy, wskazując na istniejące braki w wiedzy dotyczącej dwufazowych kompozytowych powłok TBC. Sformułowano tutaj hipotezę o podwyższonej odporności na korozję siarkową układów  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$  oraz  $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ . Opisano również plan badań korozyjnych i analiz fazowych, a także określono kluczowe cele związane z oceną trwałości, zmian mikrostruktury i mechanizmów degradacji.

Rozdział V: Wpływ stopionych soli siarczanowych i wanadanowych na korozję wysokotemperaturową jednolitych powłok  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ . Rozdział ten omawia przemiany fazowe, zmiany mikrostruktury oraz opis procesów degradacyjnych zachodzących w obecności depozytów soli siarczanowych  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$  i  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ . Przedstawiono reakcje prowadzące do destabilizacji powłoki oraz zidentyfikowano produkty korozji, a także przeanalizowano mechanizmy pogarszające jej właściwości w agresywnym środowisku soli siarczanowych.

Rozdział VI dotyczy badań nad złożoną korozją wysokotemperaturową indukowaną przez sole siarczanowe i wanadany w kompozytowym układzie  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ . Opisano zachowanie korozyjne powłok w stanie początkowym oraz ich skład fazowy i zmiany mikrostruktury zachodzących podczas reakcji w środowiskach stopionych soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$  i  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ . Przedstawiono mechanizmy degradacji, tworzenie niestechiometrycznych faz o strukturze fluorytu oraz wpływ soli zawierających wanad na stabilność badanych powłok ceramicznych. Dodatkowo omówiono rozwój produktów korozji, mikropełnięć i pustek, wskazując na mechanizmy uszkodzeń systemu kompozytowego.



Rozdział VII opisuje zachowanie korozyjne kompozytowej powłoki  $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$  w środowiskach stopionych soli  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$  i  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$ . Przedstawiono stabilność fazową, reakcje zachodzące na powierzchni oraz degradację mikrostruktury w temperaturze  $920^\circ\text{C}$ , potwierdzoną wynikami analiz XRD, SEM i EDS. Omówiono również powstawanie produktów korozji, zachowanie dwufazowej ceramiki  $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$  oraz różnice w oddziaływaniu nań siarczanów sodu, magnezu i wanadanów.

Rozdział VIII zawiera wnioski końcowe oraz propozycje dalszych kierunków badań.

Praca stanowi oryginalne podejście chociażby ze względu na fakt, iż rozdziały V, VI i VII opatrzone są osobnymi abstraktami, przeglądami literaturowymi oraz zestawieniami odnośników literaturowych, co niewątpliwie wykazuje cechy pozytywne jak również niestety i negatywne, o czym później.

W podsumowaniu szczegółowej charakterystyki rozprawy mogę stwierdzić, że przyjęty przez Doktoranta zakres badań i jego realizacja pozwoliły na osiągnięcie celu sformułowanego w rozdziale IV. Nakład pracy Autora w przygotowanie rozprawy przyniósł bardzo dobry efekt w postaci zwartej monografii, pomimo przyjętej formy zbioru wybranych artykułów naukowych. Należy podkreślić, że mgr Muhammad Jahangir KHAN jest pierwszym autorem w 4 z 6 wykazanych publikacji.

Sposób prowadzenia dyskusji wyników w tekście rozprawy dowodzi o dobrym zrozumieniu podejmowanych zagadnień. Pomimo tego Autor nie ustrzegł się jednak błędów opracowując swoją dysertację. Część z nich pozwolę sobie przytoczyć i poprosić Doktoranta o komentarz:

1. Na stronie 4. Doktorant stwierdził, że: „The TBCs eliminate or lower the operating temperature of the underlying metallic component by providing a thermal insulation layer between the hot gas stream and the metal”. Chciałem dopytać Doktoranta co miał na myśli pisząc, że zastosowanie powłokowych barier cieplnych „wyeliminuje temperaturę”?
2. Na stronie 16. Doktorant zapisał reakcję chemiczną nr (4) jak następuje:  
$$\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{Al} \quad (4)$$

Uprzejmie proszę o szczegółowe przedyskutowanie czy przytoczona reakcja chemiczna jest w ogóle możliwa pod względem termodynamicznym? W dyskusji proszę uwzględnić energie tworzenia poszczególnych tlenków jak również ich ciśnienia dysocjacyjne (diagram Ellinghama-Richardsona) oraz powinowactwo obydwu wspomnianych w reakcji pierwiastków do tlenu.

3. Strona 16: Doktorant stwierdził, że: „The selection of coating–substrate systems with minimal aluminium activity differences, combined with the use of reactive element doping (Hf, Y, Zr), can suppress both oxidation and interdiffusion, thereby extending the coating lifetime under severe cyclic conditions [46-47].”. W nowoczesnych nadstopach niklu, zwykle stosowanych jako materiał podłoża w powłokowych barierach cieplnych stężenie Al nie przekracza 6 % masowych. W powłokach żaroodpornych typu MCrAlY jego stężenie mieści się w zakresie 8-12 % masowych, podczas gdy w warstwach aluminiowych stężenia Al wynosi 30% masowych. Proszę zatem o skomentowanie stwierdzenia pod kątem powyższych informacji.



4. Strona 34: W tabeli 3.1 Podano skład chemiczny materiału podłoża, czyli nadstopu niklu IN 625. Nie podano jednak informacji jakiego typu jest podany skład: nominalny czy też zmierzony? Nie podano zakresu stężenia, zatem wnioskować można, że skład chemiczny jest składem zmierzonym. Proszę zatem o podanie za pomocą jakich metod analitycznych określono skład chemiczny oraz niepewność ich pomiaru.
5. Strona 34: Wspomniano rodzaj materiału stosowanego na międzywarstwę, tj. NiCrAlY, jednak nie określono jej dokładnego składu chemicznego. Równocześnie nie zamieszczono żadnej informacji na temat metody wytwarzania międzywarstwy. Proszę o komentarz.
6. Strona 37: w opisie metodyki wytwarzania materiałów do badań Doktorant zadeklarował, że powłokowe bariery cieplne do testów korozji siarkowej zostały wykonane na podłożu nadstopu niklu IN 625 o kształtach prostopadłościanu o wymiarach 40x20x2 mm. Tymczasem w tabeli 3.2 zadeklarowano „Rotation [RPM]” w wielkości 120. Jaki był cel stosowania obrotów substratu podczas procesu natryskiwania cieplnego powłokowych barier cieplnych na próbki prostopadłościenne? Jak ten zabieg wpływał na rozkład grubości warstw wytworzonych powłokowych barier cieplnych?
7. Strona 40: Doktorant opisując analizę rozkładu wielkości cząstek proszku stwierdził, że: „Each sample was measured 100 times to enhance accuracy and reproducibility, and the procedure was repeated three times in each powder batch.”. Czy rzeczywiście liczba 100 powtórzeń była konieczna? Jaki był powód 100 powtórzeń analizy rozkładu cząstek na tej samej próbce proszku? Jak długo trwał jeden pomiar na próbce proszku?
8. Strony 49. i 50.: Doktorant opisując stan powłoki ceramicznej po próbie korozji siarkowej stwierdził, że: „Low magnification 5.3 (a, b) surface morphology shows that there is severe degradation with a porous and cracking structure with granular and globular corrosion deposits that occupy significant parts of the coating.”. Pęknięcia powłoki ceramicznej były widoczne już w stanie “as-sprayed”. Czy zaobserwowany efekt był rzeczywiście skutkiem korozji siarkowej? Proszę o komentarz.
9. Strona 68.: Doktorant w równaniach (3) oraz (4) jako jednostkę entalpii podał [KJmol<sup>-1</sup>]. K jest jednostką temperatury (Kelwin). Zapewne tutaj Doktorant chciał przedstawić multiplikację kilo, zatem „kJ”.
10. Rozdział 6: W tym rozdziale Doktorant popełnił pomyłkę w numeracji rysunków, mianowicie w opisach rysunków dwukrotnie zastosował nr 6.2, co skutkowało tym, że numeracja kolejnych rysunków była „cofnięta” o 1, tj. rysunek, który miał mieć nr 6.4 miał w jego opisie nr 6.3, rys 6.5 miał 6.4 itd. Ponadto, w tekście pozostała poprawna numeracja. Doprowadziło to do sytuacji, że w tekście na końcu rozdziału odniesiono się do rysunku 6.10, który według opisów nie istniał. Taki stan wprowadza czytelnika w konsternację.
11. Rysunki 6.6 i 6.7 (według błędnej numeracji w dysertacji): przedstawiono mapy rozkładu pierwiastków, jednak nie pokazano zdjęć SEM/BSE obszarów, z których wykonano mapy, zatem utrudniona jest interpretacja poprawności wniosku Doktoranta.



12. Rysunki 7.5 i 7.8: Opis rysunków brzmiał: „Cross-sectional SEM and EDS analysis of the..”. O ile zdjęcia mikrostruktur wykonanych metodą SEM/BSE są pokazane na rysunkach o tyle nie ma ani jednego wyniku SEM/EDS.
13. Według danych z Tabeli 3.3 testom zostały poddane 3 rodzaje systemów TBC w jednakowej temperaturze 920°C, dla trzech takich samych kompozycji depozytów: Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+MgSO<sub>4</sub> (50/50) i Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (50/50), jednak dla różnych czasów. Co było powodem zróżnicowania czasu eskpozycji? Czy czas 224 h jest miarodajny pod względem czasu stosowania systemów TBC w rzeczywistych realiach? Proszę o komentarz.
14. Jako metodę wytwarzania międzywarstwy przyjęto metodę APS. Na wskazanych zdjęciach SEM po procesie korozji jak np. 6.4 a lub b widoczne jest zjawisko odseparowania poszczególnych cząstek natryskiwanych. Proszę o umotywowanie doboru procesu wytwarzania międzywarstwy. Czy doktorant nie obawiał się zjawiska znanego w literaturze jako „separated cell effect”? I czy efekt ten miał potencjalny wpływ na dobór czasu próby korozji siarkowej?
15. W całej części eksperymentalnej Doktorant wskazywał na fakt tworzenia się odmiany jednoskośnej tlenku ZrO<sub>2</sub>, jednak oprócz wyników XRD Doktorant nie wykazał żadnego innego wyniku potwierdzającego obecności tejże fazy. Czy Doktorant potrafi wskazać metodę lub metody określania/identyfikacji ilościowej/jakościowej odmiany jednoskośnej fazy ZrO<sub>2</sub>?
16. Wspomniane wcześniej zastosowanie osobnych abstraktów, wstępów i odnośników literaturowych w rozdziałach V, Vi i VII niewątpliwie wykazywało cechy pozytywne, ponieważ wprowadzało czytelnika w zagadnienia omawiane w poszczególnych rozdziałach, powodowało jednak również powtarzanie się treści po części przedstawianych już na wcześniejszych etapach pracy jak również powtarzanie części pozycji literaturowych co utrudniało ocenę pracy doktorskiej pod kątem edytorskim.

Ponadto Doktorant nie ustrzegł się błędów edytorskich. Najbardziej rażące z nich, to niestosowanie indeksów dolnych we wzorach chemicznych przytoczonych w całej pracy. Zaistniały fakt można złożyć na karb ostatecznego formatowania tekstu, gdyby nie fakt, że w obrębie jednej strony w niektórych fragmentach wzory chemiczne zapisane są poprawnie, a w kolejnych liniijkach już nie. Fakt ten sugerować może pospieszną i niechlujną redakcję pracy doktorskiej.

Niemniej jednak, w mojej ocenie, zauważone uchybienia nie obniżają w stopniu znaczącym poziomu naukowego niniejszej dysertacji.

### **Ocena końcowa**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Muhammada Jahangira KHANA, niewątpliwie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jego podstawą są dobrze zaplanowane i systematycznie realizowane prace badawcze. Autor zdefiniował cel badawczy, który w mojej ocenie



został osiągnięty – wykazano, że materiały kompozytowe oparte o  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$  oraz  $\text{NdCe}_2\text{O}_7+8\text{YSZ}$  wykazały zwiększoną oraz zróżnicowaną odporność na korozję siarkową w zastosowanych warunkach.

Rozprawa została przygotowana w sposób uporządkowany i przemyślany, co ułatwia ocenę przedstawionego dorobku naukowego. Jest ona oparta o cykl powiązanych tematycznie sześciu publikacji, które tworzą spójną całość i świadczą o konsekwentnej realizacji przyjętego przez Doktoranta programu badawczego. Zaprezentowane wyniki cechują się istotną wartością poznawczą.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska pt. „Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials”, pomimo zgłoszonych uwag, spełnia na poziomie dostatecznym wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.). W konsekwencji wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr. Muhammada Jahangira Khana do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Podpisał: dr hab. inż. Wojciech Nowak, prof. PRz

