

Częstochowa, 09.04.2026r.

Prof. dr hab. inż. Agata Dudek
Katedra Inżynierii Materiałowej
Wydział Inżynierii Produkcji
i Technologii Materiałów
Politechnika Częstochowska
42-202 Częstochowa
ul. Armii Krajowej 19

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Muhammada Jahangira Khana

pod tytułem: „Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials”

przygotowanej pod kierunkiem:

dr hab. inż. Grzegorza Moskala, prof. Politechniki Śląskiej

oraz promotora pomocniczego

dr inż. Marty Mikuśkiewicz

Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej zgodnie z uchwałą z dnia 17 lutego 2026 r.

Podstawę prawną stanowi art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (tekst jednolity: Dz.U. z 2024 r., poz. 1571).

Przedstawiona opinia obejmuje trzy zasadnicze elementy:

- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Charakterystyka i opis rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials”, napisana w języku angielskim, liczy 119 stron. Część wstępna została oznaczona numeracją rzymską, natomiast zasadnicza część pracy numeracją arabską. Praca została opracowana w układzie typowym dla prac eksperymentalnych z zakresu inżynierii materiałowej. Struktura rozprawy jest przejrzysta i obejmuje osiem głównych rozdziałów, poprzedzonych częścią wprowadzającą zawierającą m.in. wykaz skrótów, listę sześciu publikacji Doktoranta oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1 „Overview” stanowi wprowadzenie do problematyki powłok barier cieplnych TBC (Thermal Barrier Coatings), ze szczególnym uwzględnieniem ich znaczenia w zastosowaniach wysokotemperaturowych, takich jak turbiny gazowe czy systemy energetyczne. W rozdziale omówiono podstawowe mechanizmy degradacji materiałów oraz rolę powłok ochronnych w ograniczaniu tych zjawisk.

Rozdział 2 „Introduction” ma charakter przeglądu literatury i obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z budową systemów TBC, właściwościami materiałów ceramicznych stosowanych na warstwy wierzchnie, materiałami warstw pośrednich (bond coat) oraz technikami wytwarzania powłok (m.in. APS, EB-PVD, SPS, PS-PVD). Istotną częścią tego rozdziału jest również omówienie mechanizmów degradacji powłok, w tym zmęczenia cieplnego oraz korozji wysokotemperaturowej, a także przegląd badań dotyczących układów kompozytowych na bazie cyrkonianów ziem rzadkich.

Rozdział 3 „Materials and Methods” zawiera szczegółowy opis materiałów wykorzystanych w badaniach oraz zastosowanych metod eksperymentalnych. W rozdziale tym przedstawiono sposób przygotowania powłok, parametry procesu natryskiwania plazmowego (APS), warunki prowadzenia testów korozyjnych oraz metody charakteryzacji materiałów, takie jak dyfrakcja rentgenowska (XRD), skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) oraz analiza składu chemicznego metodą EDS. Rozdział ten stanowi podstawę do interpretacji wyników przedstawionych w dalszej części pracy.

Rozdział 4 „Thesis and Objectives of the Work” poświęcony jest sformułowaniu celu pracy oraz założeń badawczych. Wskazano na potrzebę poprawy odporności korozyjnej powłok TBC poprzez zastosowanie układów kompozytowych opartych na $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ oraz $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ z dodatkiem YSZ.

Zasadniczą część rozprawy stanowią rozdziały 5–7, w których zaprezentowano wyniki badań własnych: Rozdział 5 „Effect of Molten Sulfate and Vanadate Salts on the Hot Corrosion Behaviour of Single-Layered $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ Thermal Barrier Coatings” dotyczy powłok jednofazowych $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ i ich zachowania w środowiskach Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{MgSO}_4$ oraz $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{V}_2\text{O}_5$.

Rozdział 6 „Complex sulphate vanadate salt induced hot corrosion of $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ composite thermal barrier coating system” obejmuje analizę kompozytowego systemu $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ w analogicznych warunkach korozyjnych.

Rozdział 7 „Hot Corrosion Behavior of $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ Thermal Barrier Coatings in Sulfate and Vanadate Environments” poświęcony jest drugiemu układowi kompozytowemu, opartemu na $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$.

Każdy z tych rozdziałów ma podobną strukturę, obejmującą wprowadzenie, opis wyników badań (w tym analiz XRD oraz SEM/EDS), a także ich interpretację w kontekście procesów degradacji materiału.

Rozdział 8 „Conclusion and future work” zawiera podsumowanie uzyskanych wyników oraz wskazanie potencjalnych kierunków dalszych badań.

Analizując strukturę rozprawy należy stwierdzić, że jest ona logiczna i zgodna z przyjętymi standardami dla prac doktorskich w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Jednocześnie zauważalne jest, że rozdziały 5–7 mają w dużej mierze charakter autonomicznych opracowań, zbliżonych do układu publikacyjnego, co w efekcie sprawia wrażenie zbioru powiązanych tematycznie opracowań badań.

Uzasadnienie wyboru tematu oraz jego aktualność

Podjęta przez Doktoranta tematyka wpisuje się w aktualny i intensywnie rozwijany obszar badań z zakresu inżynierii materiałowej, dotyczący trwałości materiałów pracujących w warunkach wysokotemperaturowych oraz w środowiskach agresywnych chemicznie. Problem degradacji materiałów konstrukcyjnych, w szczególności stopów niklu stosowanych w turbinach gazowych, instalacjach energetycznych czy systemach lotniczych, stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej inżynierii.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają powłoki barier cieplnych (TBC), które pełnią funkcję ochronną, ograniczając zarówno oddziaływanie temperatury, jak i czynników korozyjnych.

W literaturze przedmiotu od wielu lat dominującym materiałem stosowanym w warstwach ceramicznych jest tlenek cyrkonu stabilizowany itrem (YSZ), jednak jego ograniczenia, zwłaszcza w temperaturach przekraczających 1200°C oraz w obecności agresywnych związków, takich jak siarczany czy wanadany, są dobrze udokumentowane. W związku z tym poszukiwane są nowe materiały o wyższej stabilności fazowej oraz lepszej odporności na degradację chemiczną.

Rozprawa koncentruje się na materiałach z grupy cyrkonianów i cerianów ziem rzadkich, w szczególności $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ oraz $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$, a także ich układach kompozytowych z dodatkiem YSZ. Wybór tych materiałów należy uznać za uzasadniony, gdyż związki o strukturze pirochlorowej są obecnie intensywnie badane jako potencjalne alternatywy dla

klasycznych systemów TBC, ze względu na ich korzystne właściwości termiczne oraz odporność na wysokie temperatury. Jednocześnie ich zachowanie w warunkach korozji wysokotemperaturowej, zwłaszcza w obecności stopionych soli siarczanowych oraz związków wanadu, pozostaje zagadnieniem wymagającym dalszych badań.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant nie ogranicza się do analizy pojedynczego materiału, lecz podejmuje próbę porównania kilku systemów powłokowych, w tym zarówno układów jednofazowych ($\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$), jak i kompozytowych ($\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ oraz $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$). Takie podejście pozwala na szerszą ocenę wpływu składu materiałowego na odporność korozyjną oraz umożliwia identyfikację potencjalnych kierunków optymalizacji systemów TBC.

Aktualność podjętej tematyki wynika również z rosnących wymagań przemysłowych związanych z podnoszeniem sprawności urządzeń energetycznych oraz ograniczaniem emisji. Dążenie do pracy w wyższych temperaturach wiąże się bezpośrednio z koniecznością stosowania bardziej zaawansowanych materiałów ochronnych, odpornych nie tylko na utlenianie, lecz także na złożone procesy korozji wysokotemperaturowej, w tym tzw. hot corrosion typu I i II. W tym kontekście badania nad wpływem środowisk zawierających Na_2SO_4 , MgSO_4 oraz V_2O_5 mają istotne znaczenie praktyczne.

W świetle powyższego, wybór tematu rozprawy należy uznać za trafny i dobrze uzasadniony zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i aplikacyjnego. Zakres pracy odpowiada aktualnym trendom badawczym w dziedzinie materiałów wysokotemperaturowych. Zwraca uwagę fakt, że mimo właściwego doboru tematyki, w pracy w mniejszym stopniu wyeksponowano jednoznacznie zdefiniowaną lukę badawczą, co nieco osłabia wyrazistość naukowego uzasadnienia podjętych badań.

Przegląd literatury i jego ocena

Przegląd literatury został przedstawiony w rozdziale 2 zatytułowanym „Introduction” i stanowi rozbudowaną część pracy, obejmującą podstawowe zagadnienia związane z budową, właściwościami oraz mechanizmami degradacji powłok barier cieplnych (TBC). Na końcu rozdziału zamieszczono spis literatury obejmujący 63 pozycje literaturowe, co wskazuje na szeroki zakres wykorzystanych źródeł i stanowi podstawę przedstawionej analizy. W rozdziale omówiono zarówno ogólną charakterystykę systemów TBC, jak i szczegółowe aspekty dotyczące materiałów stosowanych na warstwy ceramiczne oraz pośrednie, a także technik ich wytwarzania.

W części wprowadzającej przedstawiono budowę systemów powłokowych, wskazując, że system TBC składa się z metalicznego podłoża, warstwy pośredniej (bond coat), warstwy tlenkowej (TGO) oraz ceramicznej warstwy wierzchniej. Następnie omówiono właściwości materiałów stosowanych w warstwach ceramicznych, podkreślając, że stabilizowany itrem

tlenek cyrkonu (YSZ) stanowi materiał odniesienia dla powłok TBC ze względu na niską przewodność cieplną, stabilność fazową oraz wysoką temperaturę topnienia.

Istotną część przeglądu stanowi omówienie alternatywnych materiałów, w szczególności cyrkonianów ziem rzadkich ($RE_2Zr_2O_7$), które rozpatrywane są jako potencjalne zamienniki klasycznych systemów YSZ. Wskazano, że materiały te są analizowane ze względu na lepszą stabilność w wysokich temperaturach oraz korzystniejsze właściwości termiczne. W dalszej części rozdziału przedstawiono również różne techniki wytwarzania powłok, takie jak natryskiwanie plazmowe (APS), EB-PVD, SPS czy PS-PVD.

Znaczącą część rozdziału poświęcono mechanizmom degradacji powłok, w tym korozji wysokotemperaturowej. Zwrócono uwagę, że środowiska zawierające agresywne związki chemiczne prowadzą do przyspieszonego niszczenia materiałów, wskazując m.in., że oddziaływanie stopionych soli prowadzi do degradacji powłok poprzez reakcje chemiczne oraz destabilizację warstw ochronnych. W tym kontekście omówiono również wcześniejsze badania dotyczące układów kompozytowych, takich jak $La_2Zr_2O_7 + 8YSZ$ czy $Sm_2Zr_2O_7 + 8YSZ$.

Zakres przedstawionego przeglądu literatury należy uznać za szeroki i obejmujący najważniejsze zagadnienia związane z tematyką rozprawy. Doktorant wykazuje znajomość podstawowych mechanizmów fizykochemicznych oraz aktualnych kierunków badań w obszarze materiałów TBC.

Przegląd ten ma jednak w dużej mierze charakter opisowy. Przywoływane informacje są prezentowane głównie w formie zestawienia danych literaturowych, bez wyraźnego ich uporządkowania pod kątem problemu badawczego podejmowanego w pracy.

Zauważalny jest również brak jednoznacznego wskazania luki badawczej, która stanowiłaby bezpośrednie uzasadnienie dla wyboru konkretnych materiałów analizowanych w pracy, tj. $Nd_2Zr_2O_7$ oraz $Nd_2Ce_2O_7$. W efekcie powiązanie pomiędzy przeglądem literatury a częścią eksperymentalną nie jest w pełni wyraźne.

Dodatkowo w tekście występują powtórzenia ogólnych informacji dotyczących znaczenia powłok TBC oraz ich zastosowań, co nieco obniża zwięzłość tej części pracy.

Przegląd literatury stanowi solidne wprowadzenie do tematyki rozprawy, jednak jego wartość naukowa mogłaby zostać podniesiona poprzez bardziej krytyczne ujęcie omawianych zagadnień oraz wyraźniejsze wskazanie problemu badawczego, który Doktorant podejmuje w dalszej części pracy.

Metodyka badań własnych

Metodyka badań została przedstawiona w rozdziale 3 zatytułowanym „Materials and Methods” i obejmuje zarówno przygotowanie materiałów powłokowych, jak i opis zastosowanych metod badawczych służących ich charakterystyce oraz ocenie odporności korozyjnej.

W pracy wskazano, że badane systemy powłokowe zostały wytworzone z wykorzystaniem technologii natryskiwania plazmowego (APS), która należy do standardowych i szeroko stosowanych metod wytwarzania powłok TBC. W rozprawie przedstawiono schemat postępowania badawczego oraz podstawowe parametry procesu, co umożliwi ogólną ocenę zastosowanej technologii.

W rozdziale tym opisano również skład chemiczny materiału podłoża (stop IN-625), a także właściwości proszków wykorzystywanych do wytwarzania powłok, w tym $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ oraz 8YSZ. Przedstawiono również analizę rozkładu wielkości cząstek proszków, wskazując, że zastosowano metody pozwalające na kontrolę parametrów wejściowych procesu natryskiwania.

Istotnym elementem metodyki jest opis testów korozji wysokotemperaturowej. Badania prowadzono w środowiskach zawierających Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$ oraz $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$, co, jak wskazuje Doktorant, odpowiada warunkom pracy materiałów w rzeczywistych zastosowaniach przemysłowych. Parametry testów, takie jak temperatura oraz czas ekspozycji, zostały określone i zestawione w pracy, co pozwala na ocenę przyjętych warunków badawczych.

W zakresie charakterystyki materiałów zastosowano standardowe i właściwe dla tego typu badań techniki analityczne, w tym dyfrakcję rentgenowską (XRD) do analizy fazowej oraz skaningową mikroskopię elektronową (SEM) wraz z analizą EDS do oceny mikrostruktury i składu chemicznego powłok. Zastosowany zestaw metod badawczych należy uznać za adekwatny do postawionych celów pracy.

Metodyka badań została przedstawiona w sposób uporządkowany i czytelny, a zakres zastosowanych technik badawczych odpowiada standardom przyjętym w badaniach materiałów powłokowych typu TBC. Dobór metod należy uznać za właściwy i umożliwiający realizację założonych celów pracy.

Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że opis metodyki ma w dużej mierze charakter ogólny i w niektórych miejscach brakuje bardziej szczegółowych informacji dotyczących parametrów procesowych, w szczególności warunków natryskiwania oraz powtarzalności prowadzonych eksperymentów. W pracy nie przedstawiono również szerszej analizy niepewności pomiarowych ani informacji dotyczących liczby powtórzeń badań, co mogłoby zwiększyć wiarygodność uzyskanych wyników.

Przyjęta metodyka badań jest poprawna i odpowiada standardom stosowanym w inżynierii materiałowej, jednak jej opis mógłby zostać uzupełniony o bardziej szczegółowe informacje dotyczące warunków prowadzenia eksperymentów oraz ich powtarzalności.

Cel pracy i założenia badawcze

Cel oraz zakres rozprawy zostały przedstawione w rozdziale 4 zatytułowanym „Thesis and Objectives of the Work”. Wskazano, że przedmiotem badań jest analiza odporności na korozję wysokotemperaturową wybranych systemów powłokowych typu TBC, w szczególności opartych na materiałach takich jak $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ oraz $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$.

Z treści pracy wynika, że zasadniczym kierunkiem badań jest określenie wpływu środowisk korozyjnych na trwałość powłok. Jak wskazano w części opisowej pracy, celem jest m.in. zrozumienie mechanizmów degradacji, zmian mikrostrukturalnych oraz wpływu składu fazowego na trwałość systemów TBC. W innym miejscu Doktorant podkreśla potrzebę zwiększenia ogólnej trwałości systemów TBC poprzez zastosowanie układów kompozytowych, co stanowi jedno z głównych założeń prowadzonych badań.

Zakres badań obejmuje analizę zachowania powłok w środowiskach zawierających agresywne czynniki chemiczne, takie jak Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$ oraz $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$, co zostało również wyraźnie wskazane w streszczeniu pracy, gdzie Doktorant stwierdza, że praca poświęcona jest zagadnieniu odporności na korozję wysokotemperaturową w środowiskach zawierających ciekłe sole siarczanowe sodu i magnezu oraz pięciotlenek wanadu.

Analiza przedstawionych w pracy informacji wskazuje, że cel pracy ma charakter poznawczo-eksperymentalny i koncentruje się na identyfikacji zależności pomiędzy strukturą materiału a jego odpornością na korozję wysokotemperaturową. Warto zwrócić uwagę, że cele te zostały przedstawione w sposób opisowy i rozproszony w różnych częściach pracy.

Doktorant nie formułuje jednoznacznej hipotezy badawczej ani nie wskazuje wprost weryfikowalnych założeń, które byłyby konsekwentnie analizowane w kolejnych rozdziałach. Należy przy tym podkreślić, że obowiązujące przepisy nie wymagają formalnego sformułowania tezy badawczej w rozprawie doktorskiej, jednak jej jednoznaczne określenie znacząco ułatwia ocenę spójności pracy oraz stopnia realizacji przyjętych założeń.

Z analizy treści rozprawy wynika, że jednym z głównych założeń pracy jest poprawa odporności korozyjnej powłok poprzez zastosowanie układów kompozytowych, w szczególności zawierających fazę YSZ. Wskazuje na to m.in. fragment, w którym

Doktorant podkreśla, że wprowadzenie układów kompozytowych było ukierunkowane na zwiększenie trwałości powłok w warunkach oddziaływania agresywnych środowisk korozyjnych. Założenie to nie zostało jednak przedstawione w sposób jednoznaczny.

Cel pracy jest zgodny z podjętą tematyką i posiada uzasadnienie naukowe, jednak jego sformułowanie mogłoby być bardziej precyzyjne, w szczególności poprzez wyraźniejsze określenie założeń badawczych oraz ich jednoznaczne powiązanie z zakresem przeprowadzonych badań.

Wyniki badań i ich interpretacja

Wyniki badań własnych zostały przedstawione w rozdziałach 5–7, które stanowią zasadniczą część rozprawy. Doktorant analizuje w nich zachowanie trzech systemów powłokowych: jednofazowego $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ oraz kompozytowych $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ i $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$, eksponowanych w środowiskach zawierających Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgSO}_4$ oraz $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie powłok jednofazowych $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$. Doktorant przedstawia wyniki badań fazowych oraz mikrostrukturalnych, wskazując, że w środowisku czystego Na_2SO_4 powłoki wykazują stosunkowo dobrą odporność korozyjną. Jednocześnie zauważa, że wprowadzenie dodatkowych składników, takich jak MgSO_4 oraz V_2O_5 , prowadzi do wyraźnego pogorszenia właściwości powłok. W szczególności obecność V_2O_5 skutkuje intensyfikacją procesów degradacyjnych, co Doktorant wiąże z tworzeniem się wanadanów neodymu oraz destabilizacją struktury materiału. W efekcie obserwuje się pękanie powłoki oraz jej delaminację.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań dla kompozytowego systemu $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$. Doktorant wskazuje, że zastosowanie układu kompozytowego prowadzi do poprawy trwałości powłok w porównaniu z materiałem jednofazowym. W szczególności zauważono brak zjawiska odwarstwiania powłoki w analizowanych warunkach. Jednocześnie stwierdzono zachodzenie przemian fazowych, polegających na przejściu struktury pirochlorowej w strukturę typu fluorytu o zmodyfikowanym składzie chemicznym. Zjawiska te zostały powiązane z oddziaływaniem środowiska korozyjnego oraz migracją składników chemicznych w obrębie powłoki.

Rozdział 7 dotyczy drugiego układu kompozytowego, $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$. W tym przypadku Doktorant wskazuje na wyższą stabilność fazową materiału oraz mniejszą podatność na degradację w porównaniu z wcześniej analizowanymi systemami. Obserwowane zmiany strukturalne mają łagodniejszy charakter i obejmują przede wszystkim tworzenie produktów reakcji, takich jak oksysianeczany neodymu. W pracy podkreślono, że materiał ten nie ulega istotnym przemianom strukturalnym prowadzącym do utraty integralności powłoki.

Przedstawione wyniki badań zostały udokumentowane z wykorzystaniem analiz XRD oraz SEM/EDS, co pozwala na ocenę zarówno zmian fazowych, jak i mikrostrukturalnych. Uzyskane rezultaty są spójne i logicznie powiązane z warunkami prowadzonych badań. Doktorant w sposób konsekwentny porównuje zachowanie poszczególnych systemów powłokowych, co umożliwia wskazanie różnic w ich odporności korozyjnej.

Należy jednak zauważyć, że interpretacja wyników ma w wielu miejscach charakter opisowy. Doktorant koncentruje się przede wszystkim na przedstawieniu obserwowanych zmian, takich jak tworzenie nowych faz czy degradacja mikrostruktury, natomiast w mniejszym stopniu rozwija pogłębioną analizę mechanizmów odpowiedzialnych za te zjawiska. W szczególności brakuje szerszego odniesienia do modeli fizykochemicznych oraz bardziej szczegółowego porównania uzyskanych wyników z danymi literaturowymi.

Zauważalne jest również, że poszczególne rozdziały mają podobną strukturę i w pewnym stopniu powielają schemat prezentacji wyników, co może sugerować ich niezależny charakter, zbliżony do układu publikacyjnego (abstract, introduction, results and discussion, conclusion, references). W konsekwencji ograniczona jest integracja wyników w postaci jednej, spójnej analizy obejmującej wszystkie badane systemy materiałowe.

Niezależnie od wskazanych uwag, należy podkreślić, że uzyskane wyniki mają wartość poznawczą i pozwalają na ocenę wpływu składu materiałowego na odporność korozyjną powłok TBC. Szczególnie istotne jest wskazanie korzystnego wpływu układów kompozytowych, w tym systemu $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$, który wykazuje najwyższą stabilność w analizowanych warunkach.

Uwagi dyskusyjne

Analizowana rozprawa doktorska stanowi opracowanie o istotnym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym, jednak w jej treści można wskazać kilka zagadnień, wymagających doprecyzowania.

W pierwszej kolejności warto odnieść się do sposobu sformułowania założeń pracy. Cel rozprawy został określony poprawnie i pozostaje zgodny z podjętą tematyką, jednak ma on charakter dość ogólny. Bardziej jednoznaczne wskazanie założeń badawczych oraz ich wyraźne powiązanie z zakresem prowadzonych badań mogłoby dodatkowo zwiększyć przejrzystość i spójność pracy.

W odniesieniu do przeglądu literatury należy podkreślić, że obejmuje on szeroki zakres zagadnień związanych z tematyką powłok TBC. Jednocześnie w niektórych fragmentach można odnieść wrażenie, że ma on charakter przede wszystkim opisowy. Uzupełnienie tej

części o bardziej wyraźne wskazanie luk badawczych oraz ich powiązanie z dalszą częścią pracy mogłoby wzmocnić jej wymiar analityczny.

Część eksperymentalna została opracowana poprawnie, a zastosowane metody badawcze odpowiadają standardom przyjętym w inżynierii materiałowej. Opis metodyki jest czytelny, jednak w wybranych miejscach mógłby zostać uzupełniony o bardziej szczegółowe informacje dotyczące parametrów procesowych oraz organizacji badań, w szczególności w zakresie ich powtarzalności.

W zakresie prezentacji wyników należy podkreślić ich spójność oraz logiczne powiązanie z zakresem prowadzonych badań. Jednocześnie interpretacja uzyskanych rezultatów ma w wielu miejscach charakter opisowy. Szersze rozwinięcie analizy mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zjawiska, a także bardziej rozbudowane odniesienie do danych literaturowych, mogłoby dodatkowo wzmocnić wartość naukową tej części pracy.

Zauważalną cechą rozprawy jest struktura rozdziałów 5–7, które mają w dużym stopniu autonomiczny charakter. Z jednej strony świadczy to o możliwości prezentacji wyników w formie publikacyjnej, z drugiej jednak nieco ogranicza spójność całej pracy jako jednolitego opracowania.

W pracy występują również drobne uchybienia redakcyjne, takie jak niespójności w numeracji podrozdziałów czy powtórzenia niektórych informacji. Mają one jednak charakter techniczny i nie wpływają zasadniczo na odbiór merytoryczny rozprawy.

Uwagi te mają charakter uzupełniający i nie wpływają na ogólną ocenę rozprawy, która stanowi rzetelne opracowanie eksperymentalne oraz wnosi istotne informacje dotyczące zachowania powłok TBC w warunkach korozji wysokotemperaturowej.

Pytania do dyskusji

1. W pracy wykazano zróżnicowaną odporność korozyjną badanych systemów powłokowych, w szczególności korzystne właściwości układów kompozytowych zawierających YSZ. W związku z tym proszę o wyjaśnienie, jakie mechanizmy, zdaniem Doktoranta, w największym stopniu odpowiadają za poprawę trwałości tych układów w porównaniu z powłokami jednofazowymi.
2. Wyniki badań wskazują na istotny wpływ obecności V_2O_5 na intensyfikację procesów degradacyjnych. Jakie czynniki decydują o szczególnie agresywnym charakterze tego środowiska oraz w jaki sposób oddziałuje ono na stabilność fazową analizowanych materiałów.
3. W pracy zaobserwowano przemiany fazowe polegające na przejściu struktury pirochlorowej w strukturę typu fluorytu. Proszę o odniesienie się do znaczenia tych

przemian z punktu widzenia właściwości użytkowych powłok, w szczególności ich trwałości w warunkach eksploatacyjnych.

4. Badania przeprowadzono w określonych warunkach laboratoryjnych. W jakim stopniu uzyskane wyniki mogą zostać odniesione do rzeczywistych warunków pracy elementów w turbinach lub instalacjach energetycznych.

5. W pracy zastosowano technikę natryskiwania plazmowego (APS) do wytwarzania powłok. Czy zdaniem Doktoranta zastosowanie innych metod, takich jak EB-PVD lub SPS, mogłoby istotnie wpłynąć na odporność korozyjną analizowanych systemów.

6. W kontekście uzyskanych wyników proszę o wskazanie, który z analizowanych systemów powłokowych ma, zdaniem Doktoranta, największy potencjał aplikacyjny oraz jakie dalsze badania byłyby konieczne przed jego wdrożeniem w warunkach przemysłowych.

Ocena końcowa rozprawy oraz wniosek

Ocena rozprawy w zakresie spełnienia wymagań ustawowych

Ocena wiedzy teoretycznej Doktoranta

Przedłożona rozprawa doktorska wskazuje, że Doktorant posiada ugruntowaną i szeroką wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa, w szczególności w obszarze materiałów wysokotemperaturowych oraz powłok barier cieplnych typu TBC. Znajduje to odzwierciedlenie zarówno w przedstawionym przeglądzie literatury, jak i w sposobie interpretacji wyników badań eksperymentalnych. Doktorant wykazuje znajomość zagadnień związanych z budową i funkcjonowaniem systemów powłokowych, mechanizmami degradacji w warunkach korozji wysokotemperaturowej oraz właściwościami materiałów ceramicznych, w tym materiałów z grupy cyrkonianów i cerianów ziem rzadkich.

Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Zakres przeprowadzonych badań oraz sposób ich realizacji wskazują, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia pracy badawczej. Dotyczy to zarówno etapu przygotowania materiałów powłokowych, doboru metod badawczych, jak i analizy uzyskanych wyników. Doktorant wykazał się umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych z wykorzystaniem nowoczesnych technik analitycznych, takich jak XRD, SEM oraz EDS, a także zdolnością do interpretacji obserwowanych zjawisk w kontekście procesów zachodzących w materiałach w warunkach oddziaływania agresywnych środowisk wysokotemperaturowych.

Na podkreślenie zasługuje również fakt powiązania wyników badań z publikacjami naukowymi, co świadczy o aktywności badawczej oraz zdolności do prezentacji wyników w środowisku naukowym.

Ocena oryginalności i wartości naukowej pracy

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne opracowanie problemu naukowego z zakresu odporności na korozję wysokotemperaturową powłok typu TBC. W szczególności dotyczy ona analizy właściwości układów opartych na $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ oraz $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$, w tym systemów kompozytowych z dodatkiem YSZ, eksponowanych w środowiskach zawierających stopione sole siarczanowe oraz związki wanadu.

Oryginalność pracy przejawia się przede wszystkim w porównawczej analizie kilku systemów materiałowych oraz w identyfikacji mechanizmów ich degradacji w złożonych warunkach korozyjnych. Uzyskane wyniki wnoszą istotne informacje, przyczyniając się do lepszego zrozumienia zachowania materiałów powłokowych w warunkach wysokotemperaturowych, a także potencjalne znaczenie aplikacyjne w kontekście projektowania bardziej trwałych systemów TBC.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr Muhammada Jahangira Khana pt. „Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials”, opracowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Grzegorza Moskała, prof. Politechniki Śląskiej oraz promotora pomocniczego dr inż. Marty Mikuśkiewicz, stanowi wartościowe opracowanie naukowe z zakresu inżynierii materiałowej.

Praca podejmuje aktualne i istotne zagadnienie związane z odpornością powłok barier cieplnych na korozję wysokotemperaturową, uwzględniając zarówno aspekty materiałowe, jak i technologiczne. Przedstawione badania zostały zaplanowane i przeprowadzone w sposób poprawny, a uzyskane wyniki zostały poddane logicznej analizie i interpretacji.

Rozprawa potwierdza, że Doktorant posiada odpowiednią wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa, umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz zdolność rozwiązywania problemów badawczych o charakterze eksperymentalnym.

Biorąc pod uwagę zakres przeprowadzonych badań, ich poprawność metodologiczną, wartość merytoryczną uzyskanych wyników oraz ich znaczenie poznawcze i aplikacyjne, 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.)**.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Podpisała: prof. dr hab. inż. Agata Dudek