



Zespół Technologii Powierzchni,
Katedra Zaawansowanych Technologii Materiałowych,
Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

30.03.2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej *Pana Muhammad Jahangir Khan, M.Sc.*
Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials

Otrzymana do recenzji w dniu 19 lutego 2026 r. rozprawa doktorska została wykonana przez Pana Muhammad Jahangir Khan, M.Sc. na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Cyfryzacji Przemysłu Politechniki Śląskiej w Katowicach. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Grzegorz Moskal, prof. PŚ, a promotorką pomocniczą jest dr inż. Marta Mikuśkiewicz. Doktorant postawił sobie za cel pracy zbadanie i wyjaśnienie mechanizmu tzw. *hot corrosion* powłokowych barier cieplnych (TBC): powłok jednofazowych na bazie cyrkonianu neodymu $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ oraz bardziej złożonych powłok kompozytowych typu $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ i $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$, w środowiskach zawierających ciekłe osady solne siarczanów sodu i magnezu oraz tlenku wanadu(V).

Rozprawę można podzielić na kilka części. W części pierwszej – teoretycznej – Doktorant skupił się m.in. na opisanu systemów TBC oraz ich znaczeniu w przemyśle (rozdział 1), strukturze typowego systemu barierowego i stosowanych materiałach (rozdział 2). W podrozdziale 2.4 Doktorant opisał metody nanoszenia powłok TBC, m.in. *Atmospheric Plasma Spraying*, *Electron Beam Physical Vapour Deposition*, *Suspension Plasma Spraying* oraz *Plasma Spray Physical Vapour Deposition*. Następnie przeszedł do opisanu mechanizmów degradacji systemów TBC, w tym problemu zmęczenia termicznego, niedopasowania współczynników rozszerzalności temperaturowej, spiekania i densyfikacji warstwy *topcoat*, utleniania warstwy wiążącej (*bond coat*), zjawisk wysoko- i niskotemperaturowej *hot corrosion*. W podrozdziale 2.6 Doktorant skupił się na opisie zjawisk *hot corrosion* docelowych materiałów wykorzystanych w rozprawie doktorskiej: cyrkonianach metali ziem rzadkich w dwufazowych systemach z dodatkiem YSZ,



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Politechnika Wroclawska

wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



posługując się wynikami badań zmian składu fazowego i struktury powłok oraz ich morfologii. W rozdziale 3 „*Materials and methods*” Doktorant w przystępnej formie graficznej przedstawia przyjętą przez siebie metodykę badawczą (Rys. 3.1), a następnie przechodzi do charakterystyki materiału podłoża oraz materiałów proszkowych wykorzystanych do wytworzenia powłok TBC. Doktorant wykorzystał tutaj adekwatne techniki: mikroskopię SEM, analizę EDS, rentgenowską dyfrakcję proszkową czy dyfrakcję laserową do pomiaru rozkładu wielkości cząstek. W rozdziale 3 nie zabrakło również krótkiego opisu zastosowanych technik badawczych (PSD, XRD, SEM, EDS). Następnie Doktorant szczegółowo opisuje technikę nanoszenia plazmowego, parametry procesu i użytą aparaturę. W podrozdziale 3.3 Doktorant opisuje warunki prowadzenia badań wysokotemperaturowych, tzw. *hot corrosion*.

Na stronie 42 zostaje sformułowana teza pracy oraz wyznaczone są poszczególne zadania badawcze. Doktorant stwierdza, że systemy barierowe z kompozytową dwufazową warstwą izolującą zbudowaną z $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ oraz $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ wykażą lepszą odporność na *hot corrosion* w porównaniu do jednofazowych systemów TBC. Ma to wynikać z większej zdolności takich kompozytów do kompensowania naprężeń, a przez to większej odporności na pękanie powłok. Kolejne rozdziały 5, 6 i 7 są zatem zbiorem wyników badań, które ostatecznie mają służyć wykazaniu słuszności przyjętej tezy badawczej. Rozdział 8 zawiera wnioski końcowe łączące w całość spostrzeżenia z poszczególnych etapów realizacji pracy. Wszystkie rozdziały zawierają odnośniki do łącznie 171 pozycji literaturowych, wśród których dominują artykuły nie starsze niż z ostatnich dwóch dekad, a wiele z nich to publikacje z kilku ostatnich lat. Świadczy to o solidnym rozeznaniu literaturowym problemu badawczego z jednej strony, a z drugiej strony – uwzględnieniu najnowszych osiągnięć w obszarze wytwarzania i degradacji systemów TBC. Doktorant w swojej rozprawie wykazał sześć pozycji literaturowych, które są efektem realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej. W dwóch artykułach (poz. 1 i poz. 2, str. iii) oraz w rozdziałach dwóch monografii (poz. 3 i poz. 4, str. iii) Doktorant jest pierwszym autorem i autorem do korespondencji. W artykule pod poz. 5 (str. iii) Doktorant jest jednym ze współautorów – jest to artykuł o charakterze przeglądowym. Ostatni rekord (poz. 6, str. iii) to abstrakt w księdze abstraktów powiązanej ze studencką konferencją naukową. Wszystkie materiały są spójne z tematyką niniejszej rozprawy doktorskiej, a wyniki zawarte co najmniej w poz. 1,2,5 zostały wykorzystane w rozprawie.

Niezależnie od pozytywnej opinii o recenzowanej pracy, w rozprawie tej można doszukać się jednak pewnych niejasności i drobnych błędów. Te bardziej istotne, merytoryczne, powinny zostać przez Doktoranta szczegółowo wyjaśnione.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaq.org

Politechnika Wroclawska

wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Natomiast uwagi drobne, edycyjne, stylistyczne, jedynie przytaczam i nie oczekuję szczegółowych odpowiedzi.

Uwagi natury ogólnej:

1. Zastosowanie odrębnych spisów literatury dla każdego z głównych rozdziałów nie jest często spotykane i wprowadza tutaj pewien brak spójności i ciągłości toku myślowego.
2. Rozpoczynanie każdego z rozdz. 5, 6 i 7 osobnymi abstraktami oraz wprowadzeniami niepotrzebnie komplikuje strukturę pracy, a miejscami prowadzi wręcz do powielenia informacji podanych w rozdziale 2.
3. Stosowanie aż czterech spisów literatury również utrudnia poruszanie się po rozprawie doktorskiej.
4. Doktorant w swoich badaniach materiałowych zastosował, zresztą słusznie, techniki: XRD, SEM, EDS. Wszystkie wnioski dotyczące mechanizmu korozji, powstawania specyficznych produktów degradacji powłok TBC, Doktorant oparł przede wszystkim na wynikach analiz dyfrakcyjnych składu fazowego. Doktorant operował zatem fazami dobrze wykrystalizowanymi, które udało mu się zidentyfikować. Pojawia się zatem pytanie czy Doktorant w jakikolwiek inny sposób (poza techniką półilościową EDS) weryfikował skład chemiczny (objętościowo lub powierzchniowo) materiałów po testach *hot corrosion*, np. na przekrojach poprzecznych? W mojej ocenie brakuje takich analiz, a wniosłyby one zapewne dużo do obecnej interpretacji.

Uwagi szczegółowe:

1. Dotyczy całej pracy. Niemalże na każdej stronie zauważyłem tzw. literówki, nagminnie wręcz występujące błędy w braku indeksów dolnych we wzorach sumarycznych związków chemicznych lub indeksów górnych w symbolach jonów, zwłaszcza na stronach: 20, 27, 28, 30-32, 36, 44, 49, 55, 60-63, 80-82 i 85. Warto byłoby w przyszłości poświęcić więcej uwagi na ich wyeliminowanie.
2. Rysunek 2.5 (str. 22) i rysunek 2.7 (str. 25) są słabo czytelne, co wynika zapewne z ich niskiej rozdzielczości.
3. Na rysunku 2.6 (str. 23) podano punkty 1-16 (czerwoną czcionką), ale w tekście brakuje odniesień do nich i wytłumaczenia co one oznaczają.
4. Pojawiają się liczne błędy w numeracji podrozdziałów i rysunków, np. „2.5.2 *Hot Corrosion Behaviour of ...*” na str. 24 – powinno być: “2.6.2 *Hot corrosion...*”, “2.6 Summary” na str. 27 – powinno być “2.7 Summary”,





„Figure 6.2” na str. 69 – powinno być „Figure 6.3”, „Figure 6.3” na str. 70 – powinno być „Figure 6.4”, „Figure 6.4” na str. 71 – powinno być „Figure 6.5”, „Figure 6.5” na str. 73 – powinno być „Figure 6.6”, „Figure 6.6” na str. 74 – powinno być „Figure 6.7”, „Figure 6.7” na str. 75 – powinno być „Figure 6.8”, „Figure 6.8” na str. 76 – powinno być „Figure 6.9”, „Figure 6.9” na str. 77 – powinno być „Figure 6.10”.

5. Tabela 3.1 (str. 34). Podany skład jest składem nominalnym czy wynikiem konkretnego pomiaru? Brakuje pełnego objaśnienia.
6. Stosowanie różnych separatorów dziesiętnych, np. przecinek zamiast kropki w Tabeli 3.2 (str. 37).
7. Str. 46, zdanie: „*Conversely, the type II type I regime prevails at higher temperatures*” nieprecyzyjnie wskazuje, o który reżim chodzi.
8. Dyfraktogram na rysunku 5.1 wskazuje chyba jednak na obecność niewielkich ilości ZrO_2 (co najmniej trzy piki nie zostały zindeksowane) natomiast w tekście na str. 47 napisano, że analiza XRD potwierdza obecność czystego $Nd_2Zr_2O_7$.
9. Wiele równań reakcji nie zostało zbilansowanych lub błędnie zapisano substraty: reakcja 6 (str. 76) – cyrkon niezbilansowany, reakcja 7 (str. 76) – cyrkon i tlen niezbilansowane, równanie 3 (str. 98) wanad i cer niezbilansowane, równanie 8 (str. 49) – brakuje współczynników stechiometrycznych, równania 9 i 10 (str. 52) – błędnie zbilansowane oraz substrat (cyrkonian) ma inny wzór sumaryczny niż wynika to z rodzaju badanej powłoki TBC. Wątpliwość budzą reakcje 11 i 12 (str. 52 i 53) – czy faza NaO_2 rzeczywiście tutaj występuje? Jest możliwa, dyfraktogram na Fig. 5.4 (str. 53) ją wprawdzie wykazuje, ale w bazie ICDD nie ma karty oznaczonej tym symbolem.
10. W przypadku większości dyfraktogramów zaprezentowanych w rozprawie brakuje jednostek na osi X (*2 theta*). Dotyczy to zwłaszcza: Fig. 5.6 (str. 56), Fig. 5.4 (str. 53), Fig. 6.1 (str. 66), Fig. 2.7 (str. 25), Fig. 3.2 (str. 35), Fig. 5.1 (str. 48), Fig. 5.2 (str. 49), Fig. 6.2 (str. 69), Fig. 6.5 (str. 73), Fig. 6.8 (str. 76), Fig. 7.1 (str. 86), Fig. 7.3 (str. 88), Fig. 7.6 (str. 94) czy Fig. 7.9 (str. 99).
11. Rysunki Fig. 7.5 (str. 92) i Fig. 7.8 (str. 97) prezentują bardzo ciekawe zmiany w strukturze powłok TBC wywołane wymuszoną *hot corrosion*. Niestety brakuje na tych rysunkach opisów, które pomogłyby ocenić rozkład pierwiastków i lepiej zrozumieć strukturę warstwową całego układu (szkoda, że Doktorant nie zrobił tutaj mappingu EDS – wypolerowany przekrój poprzeczny jest wręcz predysponowany do tego). Opis tego układu warstwowego wprawdzie znajduje się stronę wcześniej, ale zdjęcia SEM



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.lep-qaq.org

Politechnika Wroclawska
wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



zostały pozostawione same sobie. A szkoda, bo graficzna prezentacja tych wniosków podniosłaby jakość i czytelność prezentowanych wyników badań.

12. Rysunek 5.3 (str. 51). Mapping tak mocno rozwiniętej powierzchni niewiele tutaj wnosi – nie widać różnic w rozmieszczeniu pierwiastków.
13. Rys. 6.1 (str. 66). Nie wszystkie piki na dyfraktogramie są przypisane, co wskazuje na obecność również innych niż oczekiwane związków.
14. Pozycja literaturowa [35] na str. 81 ma powieloną zawartość.

Pozostałych, drobnych błędów celowo nie przytaczam w tej recenzji ponieważ ich wpływ na jakość i poziom naukowy pracy jest niewielki.

Wnioski końcowe

Podsumowując merytoryczną stronę przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej stwierdzam, że zawiera ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorant wykazał, że odporność systemu TBC na bazie $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ na korozję w środowisku ciekłych osadów Na_2SO_4 jest satysfakcjonująca pod warunkiem, że w układzie nie ma MgSO_4 ani V_2O_5 . Dodanie MgSO_4 skutkuje powstaniem niskotopliwej eutektyki, a V_2O_5 reaguje z $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ z wytworzeniem wanadanów neodymu. Oba zjawiska są niekorzystne i przyczyniają się do niszczenia korozyjnego powłoki TBC. Zaproponowany przez Doktoranta system kompozytowy $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7 + 8\text{YSZ}$ wykazał lepszą przyczepność do podłoża w trakcie testów. W środowisku ciekłych osadów, samego Na_2SO_4 oraz Na_2SO_4 z dodatkiem MgSO_4 , następowało zjawisko dekompozycji fazy pirochlorowej $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ do niestechiometrycznych faz fluorytowych. Wprowadzenie V_2O_5 do środowiska korozyjnego spowodowało tworzenie się wanadanu neodymu oraz wanadanu itru i ZrO_2 o strukturze jednoskośnej. System kompozytowy TBC na bazie $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ charakteryzował się stabilnością fazową. Doktorant nie zaobserwował dekompozycji sieci fluorytu $\text{Nd}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ do form niestechiometrycznych. O zachodzących procesach korozyjnych świadczyła jednak obecność oksysiarczanów neodymu. W obecności V_2O_5 w środowisku korozyjnym, powstają produkty reakcji w postaci wanadanów neodymu oraz zubożone w tlenek neodymu cerany o stechiometrii zbliżonej do $\text{Nd}_{0,4}\text{Ce}_{0,6}\text{O}_{1,8}$.

Rozprawa Pana *Muhammad Jahangir Khan, M.Sc.* stanowi zatem pracę eksperymentalną łączącą w sobie zagadnienia z zakresu projektowania materiałów, badań struktury materiałów i przemian fazowych i zmian w budowie systemów TBC wywołanych korozją wysokotemperaturową. Doktorant w swoich badaniach wykorzystał poprawnie podstawowe techniki badawcze i wykazał słuszność przyjętej metodyki badawczej. Wyniki prac zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR. Doktorant w sposób oryginalny zrealizował cele badawcze:



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Politechnika Wroclawska

wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 00001614
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



zweryfikował postawioną tezę i osiągnął cel pracy. Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska Pana Muhammad Jahangir Khan, M.Sc. pt. „*Hot corrosion behaviour of a new type of thermal barrier coating materials*” spełnia wymagania stawiane pracy doktorskiej, które są opisane w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20.07.2018 r. (j.t. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) Art. 187. Tym samym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana Muhammad Jahangir Khan, M.Sc. do kolejnych etapów postępowania doktorskiego i do publicznej obrony pracy doktorskiej.

dr hab. inż. Juliusz Winiarski, prof. uczelni



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Politechnika Wroclawska
wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434