

POLITECHNIKA GDAŃSKA
BIURO RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

Wpłynęło dnia 16.04.2026
L.dz. 22/2026
Podpis

Gliwice, 15 kwietnia 2026 r.

dr hab. inż. Radostaw Swadźba
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny
ul. K. Miarki 12-14
44-100 Gliwice

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. Omida Ekhlasiogouei
pt. „Electrophoretic deposition of protective coatings for high temperature
applications of steel interconnects”

Niniejsza recenzja została opracowana w oparciu o pismo nr 15/WFTiMS/RDIM/2026 z dnia 04.02.2026 r. Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Gdańskiej, Pani prof. dr hab. inż. Marii Gazda.

Wprowadzenie

Przedstawiona do recenzji praca doktorska składa się z 3 powiązanych tematycznie artykułów naukowych, które tworzą cykl pod tytułem: „Electrophoretic deposition of protective coatings for high temperature applications of steel interconnects”, przedstawiający wyniki badań nad podstawami technologii elektroforetycznego osadzania (EPD, Electrophoretic Deposition) powłok spinelowych $MnCo_2O_4$ (Mn-Co) i $Mn_{1.7}CuFe_{0.3}O_4$ (Mn-Cu-Fe) na interkonektory w stosach ogniów tlenkowych SOC (Solid Oxide Cells).

Doktorant przedstawił autoreferat liczący 102 strony, zawierający 14 rysunków, 3 tabele i 121 odnośników literaturowych oraz załączył oryginały manuskryptów opublikowanych artykułów naukowych, stanowiących cykl. Przedstawił w nim analizę literatury źródłowej, cel pracy, oraz sformułował tezę. Autoreferat zakończył podsumowaniem i wnioskami oraz zaproponował dalsze kierunki badań.

Rozprawę doktorską stanowił zbiór powiązanych tematycznie artykułów naukowych, opublikowanych w latach 2024 - 2025:

1. O. Ekhlasiogouei, F. Smeacetto, S. Molin, *Suspension and process parameters selection for electrophoretic deposition of Mn–Co spinel coating on steel interconnects*, International Journal of Hydrogen Energy Volume 60, 22 March 2024, Pages 1054-1067

2. **O. Ekhlasiogouei**, M. Bik, S. Molin, *Preparation of $MnCo_2O_4$ and $Mn_{1.7}CuFe_{0.3}O_4$ single-layer, and novel $MnCo_2O_4/Mn_{1.7}CuFe_{0.3}O_4$ dual-layer spinel protective coatings on complex-shaped metallic interconnects by EPD method*, International Journal of Hydrogen Energy 83 (2024) 563–576
3. **O. Ekhlasiogouei**, S. Molin, M. Bik, F. Smeacetto, P. Jasinski, *Electrophoretic deposition of novel hybrid $MnCo_2O_4: Mn_{1.7}CuFe_{0.3}O_4$ spinel protective coating on stainless-steel metallic interconnects for SOFCs application*, International Journal of Hydrogen Energy 158 (2025) 150569

W opublikowanych pracach udział Doktoranta obejmował: opracowanie koncepcji oraz metodyki badań, przeprowadzenie badań, analizę wyników, opracowanie danych, przygotowanie manuskryptu, wizualizację i walidację wyników. Udział Doktoranta jako pierwszego i korespondencyjnego autora we wszystkich publikacjach był dominujący.

Praca doktorska została zrealizowana pod opieką promotora dr hab. inż. Sebastiana Molina, prof. PG. Przedstawione publikacje stanowią podsumowanie współpracy Doktoranta z naukowcami z Politechniki Gdańskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz Politechniki w Turynie (Włochy). Załącznikiem do dokumentacji są oświadczenia współautorów o ich merytorycznym wkładzie w powstanie publikacji wchodzących w cykl. Artykuły opublikowane zostały w wysoko punktowanym, prestiżowym czasopiśmie International Journal of Hydrogen Energy (Impact Factor 8.3; 140 punktów MNiSW) oraz stanowią spójną całość i są powiązane tematycznie.

Ocena merytoryczna pracy

Doktorant we wstępie oraz opracowaniu literatury scharakteryzował stałotlenkowe ogniwa paliwowe typu *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC). System ten wykorzystuje ceramiczny elektrolit, taki jak tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru lub domieszkowane perowskity, i pracuje w temperaturze od 600 do 1000 °C. Doktorant scharakteryzował materiały stosowane na poszczególne komponenty ogniwa, w tym elektrolity, anody i katody, a także mechanizm działania ogniw SOFC, konieczność stosowania interkonektorów oraz wymagane właściwości tych elementów.

Przedstawił także wyzwania materiałowe związane z interkonektorami:

- Nierdzewne stale ferrytyczne wykazują dwa główne ograniczenia: szybki wzrost warstwy Cr_2O_3 w podwyższonej temperaturze, co prowadzi do wzrostu oporu elektrycznego w czasie, oraz parowanie i migrację związków chromu (VI) z interkonektorów do katody, co znacząco pogarsza parametry pracy ogniwa.
- Przewodność elektryczna nierdzewnych stali ferrytycznych jest związana z rozwojem warstwy tlenkowej. Ponieważ opór właściwy interkonektora zależy od grubości i

rezystywności tej warstwy, jego zmiany w czasie powinny odpowiadać kinetyce wzrostu warstwy tlenkowej.

Na podstawie analizy literatury Doktorant sformułował problem badawczy stwierdzając, że stosach tlenkowych ogniw paliwowych (SOCs, ang. Solid Oxide Cells) interkonektor odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu połączeń elektrycznych pomiędzy poszczególnymi ogniwami oraz wspomaganiu dystrybucji reagentów gazowych. Ze względu na wysoką temperaturę pracy, interkonektory wykonane ze stali nierdzewnej napotykają na szereg problemów, takich jak intensywne utlenianie, obniżona przewodność elektryczna oraz zwiększona dyfuzja chromu, prowadząca do powstawania zwartej warstwy tlenku chromu. W celu rozwiązania tych problemów konieczne jest zastosowanie ceramicznych powłok ochronnych na interkonektorach, które ograniczają szybkość utleniania oraz hamują migrację i parowanie chromu z interkonektorów do elektrod. Ponadto ceramiczne powłoki ochronne odgrywają istotną rolę w zmniejszeniu degradacji oraz zwiększeniu trwałości SOC w przypadku ich zastosowania na stali nierdzewnej. Powłoki ochronne powinny charakteryzować się wysoką przewodnością elektryczną, niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej oraz zdolnością do blokowania dyfuzji tlenu i chromu. Aby zahamować tworzenie warstwy Cr_2O_3 , należy ograniczyć dyfuzję chromu na zewnątrz oraz dyfuzję jonów tlenu do wnętrza, które stanowią siły napędowe procesu utleniania chromu. Ponadto materiał powłoki powinien charakteryzować się wysoką przewodnością elektryczną, tak aby nie ograniczać przepływu prądu z interkonektora do obwodu zewnętrznego.

Doktorant wskazał, że kompozytowe powłoki spinelowe skutecznie ograniczają parowanie Cr_2O_3 z powierzchni zgorzeliny oraz wykazują współczynnik rozszerzalności cieplnej zbliżony do stali. Tlenkowe powłoki spinelowe typu Mn-Co są szeroko stosowane ze względu na ich jednorodność oraz wysoką odporność na utlenianie. Jednak przewodność elektryczna większości powłok spinelowych wymaga dalszej poprawy.

W pracy zastosowano metodę osadzania elektroforetycznego EPD do nanoszenia materiałów spinelowych MnCo_2O_4 (Mn-Co) oraz $\text{Mn}_{1.7}\text{CuFe}_{0.3}\text{O}_4$ (Mn-Cu-Fe) na interkonektory wykonane ze stali nierdzewnej. Celem było zbadanie przewodności elektrycznej, dyfuzji chromu oraz właściwości otrzymanych powłok, w tym ich jednorodności i podatności na spękania.

Doktorant scharakteryzował metodę osadzania elektroforetycznego EPD, wskazując, że jest ona bardzo efektywna w otrzymywaniu jednorodnych i ciągłych powłok spinelowych na metalicznych interkonektorach. Do zalet tej techniki zaliczył jej prostotę, niski koszt, dużą szybkość osadzania, możliwość prowadzenia procesu w niskiej temperaturze, uzyskiwanie jednorodnej mikrostruktury, przydatność do podłoży o złożonych kształtach oraz łatwą

kontrolę grubości powłoki. Jednocześnie wskazał na jej ograniczenia, takie jak trudności w otrzymywaniu cienkich powłok oraz potrzebę starannej optymalizacji wielu parametrów procesu. Podkreślił również, że powłoki spinelowe otrzymywane metodą EPD charakteryzują się jednorodnością nawet na metalicznych interkonektorach o złożonej geometrii. **Na podstawie przedstawionego opracowania literatury stwierdzam, że Doktorant wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną w zakresie ogniw paliwowych SOFC, materiałów stosowanych na powłoki ochronne oraz metod ich wytwarzania. Dobrze scharakteryzował problem oraz w sposób przekonujący uzasadnił celowość podjęcia tematu.**

Jako cel pracy Doktorant przedstawił opracowanie parametrów osadzania jedno- i dwuwarstwowych oraz hybrydowych powłok spinelowych na złożonej geometrii interkonektorów ze stali nierdzewnej z wykorzystaniem metody osadzania elektroforetycznego (EPD).

Na podstawie szczegółowego rozpoznania problemu doktorant dwie tezy:

1. Metoda osadzania elektroforetycznego (EPD) może być efektywnie wykorzystana do sekwencyjnego wytwarzania wysokiej jakości powłok dwuwarstwowych o dobrze zdefiniowanych granicach międzywarstwowych.
2. Metoda osadzania elektroforetycznego umożliwia jednoczesne osadzanie różnych materiałów spinelowych, co pozwala na kształtowanie ich połączonych właściwości strukturalnych i funkcjonalnych.

W pierwszym artykule wykazano przydatność metody EPD do nanoszenia powłok spinelowych Mn-Co na stali Crofer 22 APU oraz podkreślono kluczową rolę doboru rozpuszczalnika i parametrów procesu w kształtowaniu jakości oraz właściwości otrzymanych powłok. Badania obejmowały analizę objętości składników zawiesin w funkcji rodzaju rozpuszczalnika (etanol oraz mieszanina H₂O:etanol), rozkładu wielkości cząstek, potencjału zeta w odniesieniu do szybkości osadzania oraz przewodności zawiesiny. Przeprowadzono również obserwacje SEM powierzchni powłok po 2 godzinach utleniania w temperaturze 800 °C, które wykazały tendencję do powstawania spękań przy wyższych stężeniach jodu. Oceniono również jednorodność powłok w zależności od przyłożonego napięcia oraz czasu osadzania. Najbardziej obiecujące wyniki pod względem jednorodności powłoki uzyskano przy parametrach procesu EPD, takich jak napięcie 30 V oraz czas 20 s. Grubość powłoki wynosiła ok. 7,4 μm, natomiast chropowatość powierzchni ok. 0,75 μm. Uzyskanie jednorodnej i ciągłej powłoki było możliwe przy zastosowaniu czystego etanolu jako rozpuszczalnika.

W drugim artykule przedstawiono wyniki badań osadzania jednowarstwowych powłok MnCo_2O_4 , $\text{Mn}_{1.7}\text{CuFe}_{0.3}\text{O}_4$ oraz dwuwarstwowych powłok $\text{MnCo}_2\text{O}_4/\text{Mn}_{1.7}\text{CuFe}_{0.3}\text{O}_4$ na interkonektorze o złożonym kształcie wykonanym z materiału Crofer 22 APU z zastosowaniem metody osadzania elektroforetycznego EPD. Praca obejmowała zaawansowane badania dotyczące eksperymentów spiekania w atmosferach utleniającej i redukującej, badania jednorodności powłok na złożonych kształtach, mikrostruktury powierzchniowej, pomiary grubości, wpływu kształtu cząstek na zachowanie podczas spiekania, badania składu chemicznego oraz badania składu fazowego. W artykule zawarto model ilustrujący dyfuzję pierwiastków w spiekanej dwuwarstwowej powłoce Mn-Co/Mn-Cu-Fe w warunkach utleniania, redukcji oraz w następującym po nich wtórnym utlenianiu, co stanowi moim zdaniem wartościowy materiał dydaktyczny.

Ze względu na właściwości badanych materiałów powłokowych zaprojektowano układ dwuwarstwowy, w którym powłoka $\text{Mn}_{1.7}\text{CuFe}_{0.3}\text{O}_4$ o wyższej przewodności elektrycznej została osadzona na powłoce MnCo_2O_4 , zapewniającej wyższą odporność na utlenianie. W rezultacie pełni ona funkcję warstwy wewnętrznej, skutecznie ograniczając migrację i parowanie chromu z interkonektorów do elektrod.

W publikacji przedstawiono wyniki opisujące wyzwania związane z powstawaniem pęknięć w powłokach otrzymywanych przy nieodpowiednich parametrach procesu, takich jak napięcie i czas osadzania. Stanowi to cenny materiał dla innych badaczy skupiających się na doborze parametrów osadzania powłok tlenkowych metodą EPD.

Na podstawie przeprowadzonych badań i eksperymentów uzyskano jednorodne i pozbawione pęknięć powłoki osadzone na interkonektorach o złożonych kształtach. Dobrano parametry zagęszczania układu dwuwarstwowego i wykazano, że najlepsze wyniki uzyskuje się w warunkach redukujących i utleniających, zapewniając najwyższą ochronę przed dyfuzją Cr.

Trzeci artykuł z cyklu stanowi kontynuację badań z poprzednich publikacji. Skupia się na możliwości osadzania hybrydowych powłok na bazie spineli $\text{MnCo}_2\text{O}_4 / \text{Mn}_{1.7}\text{CuFe}_{0.3}\text{O}_4$ w różnych proporcjach na interkonektorach w celu uzyskania powłoki jednorodnej, ciągłej, gładkiej i pozbawionej pęknięć. Głównym celem było zwiększenie przewodnictwa elektrycznego oraz ograniczenie migracji i parowania chromu. Badania obejmowały charakterystykę wpływu stężenia jodu na potencjał zeta, przewodnictwo zawiesiny, rozmiary cząstek oraz wydajność osadzania. Wykazano, że zagęszczenie powłok hybrydowych w warunkach redukujących (1000 °C przez 2 h w H_2), a następnie poddanych wtórnemu utlenianiu (900 °C przez 2 h w powietrzu), jest większe niż w przypadku powłok spiekanych wyłącznie w warunkach utleniających (900 °C przez 4 h w powietrzu). Ujawniono, że hybrydowe powłoki spinelowe charakteryzują się wysokim przewodnictwem elektrycznym

oraz zwiększoną spiekalnością w porównaniu do materiału spinelu Mn–Co, a także niższą dyfuzyjnością chromu w porównaniu do spinelu Mn–Cu–Fe. W związku z tym hybrydowy układ spinelowy Mn–Co:Mn–Cu–Fe (3:1 oraz 1:1 % wag.) został zaproponowany jako powłoka ochronna dla stali nierdzewnych.

Przedstawiony zakres badań, wykorzystane metody badawcze, a także analiza wyników jednoznacznie wskazują, że Doktorant potrafi poprawnie planować badania. Z przekonaniem stwierdzam, że uzyskane wyniki potwierdzają umiejętność stawiania oraz rozwiązywania problemów badawczych.

W toku analizy treści rozprawy pojawiły się następujące pytania:

Jaki byłby wpływ pary wodnej na mechanizmy degradacji zaproponowanych powłok podczas długotrwałej eksploatacji? Czy opracowana technologia może zostać skalowana do osadzania w warunkach rzeczywistych? Jakie dalsze badania są wymagane, aby to osiągnąć?

Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa Doktorska Pana mgr. Omida Ekhlasiogouei stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego a Doktorant wykazuje się wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa i cechuje go umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Są zatem spełnione wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 r., dlatego z przekonaniem **wniosuję o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.**

Mając na uwadze wartościowe wyniki uzyskane podczas realizacji pracy doktorskiej, a także ich opublikowanie w renomowanym czasopiśmie naukowym, wniosuję o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr. Omida Ekhlasiogouei. Pracę cechuje poznawczy charakter oraz elementy, które mogą być wykorzystane w projektowaniu procesów technologicznych. Opanowane przez Doktoranta metody badawcze cechuje pewna uniwersalność, a otrzymane wyniki, poparte wnikliwą analizą i dyskusją, pozwoliły na pozyskanie nowej wiedzy oraz wnoszą wkład w rozwój inżynierii materiałowej.

Podpis jest prawidłowy

Dokument podpisany przez Radosław Piotr Swadźba
Data: 2026.04.15 14:47:32 CEST