

Dr hab. inż. Tomasz Mościcki
Instytut Podstawowych Problemów Techniki
Polskiej Akademii Nauk
02-106 Warszawa, ul. Pawińskiego 5B

Warszawa, 07 sierpnia 2023

Recenzja
dorobku naukowego dr inż. Radosława Swadźby
w związku z wszczętym postępowaniem o nadanie stopnia doktora
habilitowanego

Podstawą formalną przygotowania niniejszej recenzji jest uchwała Prezydium Doskonałości Naukowej z dnia 29 czerwca 2023 r. (DRKN.Z2.400.50.2023) oraz pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej – prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej, z dnia 13 lipca 2023r., otrzymane wraz z kompletem dokumentów dotyczących osiągnięć Kandydata w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie: Inżynieria Materiałowa.

Recenzja została opracowana na podstawie złożonej przez Kandydata dokumentacji, zawierającej wnioski o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria materiałowa, autoreferat oraz wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych wraz załącznikami, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny. Dokumenty zostały dostarczone w formie elektronicznej i papierowej.

1. Charakterystyka Kandydata

Obszar zainteresowań naukowych dr inż. Radosława Swadźby to badania warstwy wierzchniej, w tym szczególnie obserwacje i opis własności materiałów zarówno w nano- jak i mikroskali z wykorzystaniem skaningowej oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej. W roku 2016 Pan Radosław Swadźba uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii w Katowicach (Politechnika Śląska). Dysertacja doktorska zatytułowana: „Degradacja powłokowych barier cieplnych na monokrystalicznym żarowytrzymałym stopie niklu w warunkach wysokotemperaturowego utleniania” została wyróżniona, podobnie jak wcześniej (2011) jego rozprawa magisterska. W latach 2012 - 2019 Pan Radosław Swadźba pracował w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Po uzyskaniu stopnia doktora i zatrudnieniu na stanowisku adiunkta sprawował funkcję Zastępcy Kierownika Zakładu Badań Właściwości i Struktury Materiałów. Należy dodać, że na podstawie dorobku naukowego w roku w roku 2017 Habilitant otrzymał Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców na lata 2018-2020. Przez ostatnie cztery lata Habilitant sprawuje funkcję Zastępcy Lidera Grupy Badawczej: Badania Właściwości i Struktury Materiałów w Sieci Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach (aktualnie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny w Gliwicach, Centrum Badań Materiałów). Od roku 2015 Kandydat odbył 9 wizyt studyjnych w znanych ośrodkach naukowo-badawczych w USA, Niemczech oraz Włoszech oraz podnosił swoje kompetencje w ramach szkoleń z

zakresu mikroskopii elektronowej, które następnie zostały udokumentowane certyfikatami. Na uwagę zasługuje również współpraca z jednostkami z obszaru badań nad technologiami dla przemysłu lotniczego zarówno krajowymi jak i zagranicznymi. Wśród nich można wymienić: Pratt and Whitney Rzeszów, AvioAero (General Electric), Bielsko Biała oraz AvioAero, Cameri, DLR German Aerospace Center, czy PBS Velká Bíteš, Czechy.

2. Działalność naukowa

Ocena osiągnięcia naukowego

Dr inż. Radosław Swadźba zatytułował 98-stronicowy Autoreferat przedstawiony w ramach procedury habilitacyjnej jako „Mikrostruktura i utlenianie wysokotemperaturowe powłok i warstw wytwarzanych na wybranych stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych”. Na osiągnięcie habilitacyjne składa się cykl 10 jednotematycznych publikacji, w których udział Pana Radosława Swadźby jest znaczący, ponieważ w ośmiu z nich pierwszym i korespondencyjnym autorem, z czego jeden z artykułów jest pracą samodzielną. Pozostałe dwa artykuły powstały we współpracy z DLR, German Aerospace Center, Institute of Materials Research, Germany, a Habilitant był odpowiedzialny w nich za wykonanie badań STEM i HRTEM, a także identyfikacji fazowej z wykorzystaniem metod SAED, CBED oraz FFT na próbkach poddanych testom utleniania wysokotemperaturowego, co de facto jest tematem rozprawy habilitacyjnej.

Publikacje będące przedmiotem osiągnięcia habilitacyjnego dotyczą kształtowania, charakteryzowania oraz badań właściwości powłok żaroodpornych na stopach stosowanych na krytyczne elementy silników lotniczych i można je umieścić w zakresie badań podstawowych jak i obszarze technologicznym.

W zakresie obszaru poznawczego Kandydat wymienia dwa tematy jego badań. Obok wyjaśnienia mechanizmów degradacji mikrostruktury powłok i międzywarstw na stopach stosowanych w lotnictwie (A5-A10) Habilitant podejmuje się również wyjaśnienie mechanizmów utleniania wysokotemperaturowego.

W artykule zatytułowanym „Analytical STEM investigations of nozzle vane surfaces after turbine engine operation”, Microscopy and Microanalysis 28(3) (2021) 1-10, IF= 4.099 9 (A1), celem było przedstawienie szczegółowej charakterystyki zjawiska zachodzące w warstwach powierzchniowych łopatek pierścieniowych dysz po eksploatacji silnika turbinowego w warunkach rzeczywistych. Habilitant wykazał różnice w mechanizmie wzrostu warstw tlenkowych pomiędzy krytycznymi obszarami łopatek (grzbiet i koryto), związane ze składem chemicznym oraz fazowym tlenków, a także ze zjawiskami zachodzącymi na granicach ziaren α - Al_2O_3 – tj. segregacją Cr, Ni, Ta i Ti. Jego badania z wykorzystaniem wysokorozdzielczej skaningowo-transmisyjnej mikroskopii elektronowej pokazują, że w warstwie wierzchniej tzw. części ciśnieniowej (korycie) łopatek zaawansowanie procesu korozyjnego jest znacznie większe niż w warstwie wierzchniej grzbietu. Ponadto w strefie tej stwierdza obecność takich pierwiastków jak Fe, Mg, Ca, Na oraz P, których nie obserwowano w warstwie wierzchniej grzbietu łopatki. Pierwiastki te występują głównie w obszarach spinelu NiAl_2O_4 o strukturze porowatej, który stanowi zewnętrzną strefę warstwy tlenkowej. Habilitant stwierdza, że grubość strefy spinelu na powierzchni strony ciśnieniowej łopatki świadczy o wydłużeniu etapu przejściowego utleniania, gdyż jest trzykrotnie większa niż po stronie ssącej, gdzie nie stwierdzono obecności Mg, Ca, Na i P. Zasugerował on również, że Fe i Mg zastępują Ni w łusce spinelowej NiAl_2O_4 , a tym samym stabilizują jego wzrost i prowadzą do szybszego utleniania. Ponadto zaobserwował dyfuzję Cr, Ni, Ta i Ti wzdłuż

granic ziaren $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, co najprawdopodobniej było spowodowane lokalnym spadkiem koncentracji Al w warstwie powierzchniowej stopu IN713LC.

W przypadku międzywarstwy NiCoCrAlY z domieszką cyrkonu lub hafnu oraz zewnętrznej powłoki ceramicznej YSZ osadzanych z fazy gazowej odparowanej wiązką elektronów (EB-PVD) na żarowytrzymałym nadstopie niklu CMSX-4 [A2] autor stwierdza wyraźne wydłużenie czasu życia bariery cieplnej z dodatkiem metali ziem rzadkich (RE). Obserwacje STEM przeprowadzone przez dr. inż. Radosława Swadźbę pokazały, że podczas procesu osadzania zewnętrznej powłoki ceramicznej dochodzi do powstania niemal ciągłej warstwy tlenku HfO_2 na granicy z międzywarstwą. Ponadto Habilitant opisał mechanizm powstawania tzw. strefy przejściowej ("mixed zone"), zbudowanej z wydzieleni tetragonalnego tlenku cyrkonu ZrO_2 w osnowie przejściowych odmian tlenku θ - oraz $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Wykazał również, że podczas utleniania wysokotemperaturowego w temperaturze 1100°C następuje odrdzeniowa dyfuzja Hf i Y po granicach ziaren $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ obecnych w warstwie tlenkowej TGO, co obniża szybkość utleniania międzywarstwy, a przez to wpływa na zwiększenie trwałości powłokowej bariery cieplnej podczas cyklicznych zmian temperatury. Wnioskiem ogólnym w.w. badań jest to, że domieszkowanie hafnem wydaje się być skuteczniejsze niż domieszkowanie cyrkonem i działa w szerokim zakresie stężeń domieszek.

Oprócz podłoży odlewanych Habilitant podjął się również charakterystyka mikrostruktury i pozyskanie nowej wiedzy o mechanizmie utleniania wysokotemperaturowego stopu 48-2-2 TiAl otrzymanego metodą druku 3D [A3]. To osiągnięcie ma duże znaczenie w kształtowaniu mikrostruktury stopów oraz w doborze parametrów drukowania dla uzyskania wysokiej odporności na utlenienie, ponieważ obecność pasmowej mikrostruktury wpływa na rozwinięcie powierzchni w wyniku wzmożonego utleniania obszarów pasm lamelarnych w porównaniu z obszarami ziaren równoosiowych. Dr inż. Radosław Swadźba wykazał, że podczas początkowych etapów utleniania w temperaturze 750°C powstaje pasywna warstwa tlenkowa $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, a strefa przypowierzchniowa stopu TiAl zostaje wzbogacona w tlen, natomiast w temperaturze 800°C i powyżej tej temperatury obserwuje się wzrost azotków TiN i Ti_2AlN na granicy rozdziału zgorzeliny $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ z podłożem. Dodatkowo jego obserwacje pozwoliły ustalić, że podczas długotrwałego utleniania w temperaturze 750°C w obszarach ziaren równoosiowych dochodzi do powstania mieszaniny azotków TiN i Ti_2AlN ze stabilną odmianą $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ na granicy rozdziału z podłożem, co ogranicza proces utleniania. W obszarach kolonii lamelarnych o niższym stężeniu Al powstaje jedynie ciągła warstwa azotków TiN i Ti_2AlN , które w wyniku reakcji z tlenem tworzą szybko wzrastające tlenki Ti, np. TiO_2 .

W kolejnej pracy Kandydat kontynuuje badania nad stopem 48-2-2 TiAl [A4]. W tym przypadku jego badania nad wpływem cyklicznego obciążenia cieplnego pokazują, że zastosowanie stosunkowo krótkiego czasu (2 godziny) utleniania wstępnego w temperaturze 900°C w tlenie lub jego mieszaninie z argonem pozwala na wytworzenie przyczepnej i ciągłej zgorzeliny, zbudowanej z $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, która zapewnia skuteczną ochronę przez ok. 300 godzin utleniania w temperaturze 900°C . W porównaniu z utlenianiem w powietrzu, proces wstępnego utleniania w czystym tlenie lub jego mieszaninie z argonem umożliwia efektywną eliminację azotu z atmosfery w początkowych fazach narastania warstwy tlenkowej.

Kolejnym etapem badań Habilitanta było określenie wpływu zawartości krzemu w procesie osadzania metodą kontaktowo-gazową (pack cementation) na odporność na utlenianie wysokotemperaturowe powłok aluminidkowych na stopach TiAl [A5- A9]. Motywacją tu również był brak danych na temat wpływu Si na wzrost warstwy tlenkowej oraz na zjawisk zachodzących między nią a podłożem.

Przeprowadzone przez Habilitanta badania w pracy A5 dotyczyły obserwacji mikrostrukturalnej powłoki aluminidkowej modyfikowanej krzemem na podłożu ze stopu γ -TiAl oraz wzrostu zgorzeliny tlenkowej podczas długotrwałego utleniania w wysokiej temperaturze. Analizowana powłoka składała się głównie z fazy TiAl_3 oraz bardzo cienkiej strefy TiAl_2 . Na podstawie przeprowadzonych badań Kandydat wykazał, że podczas osadzania powłoki aluminidkowej krzem wiąże Ti i Nb w postaci nanometrycznych krzemków, głównie Ti_5Si_3 , zarówno w fazie TiAl_3 , jak i TiAl_2 . Z powłoką z glinuki modyfikowanego Si, γ -TiAl jest w stanie tworzyć ciągłą zgorzelinę tlenkową, która charakteryzuje się obecnością zewnętrznej równoosiowej i wewnętrznej strefy kolumnowej tlenku aluminium α rosnącej w wyniku dyfuzji tlenu do wewnątrz, co jest typowe dla stopów tworzących tlenek aluminium, takich jak nadstopy na bazie niklu. Szczegółowa charakterystyka STEM ujawniła tworzenie się drobnych wytrąceń TiAl_2O_5 na granicy międzyfazowej zgorzeliny gazowej, podczas gdy po 3000 h utleniania w temperaturze 950 °C na granicy faz powłoka-zgorzelina Kandydat nie wykrył azotków tytanu.

Na podstawie wyników uzyskanych w publikacji (A5) Habilitant zaproponował powłoki o niskiej (low-Si) oraz wysokiej (high-Si) zawartości krzemu, które zostały poddane porównawczym badaniom, gdzie materiałem referencyjnym były powłoki aluminidkowe otrzymane w procesie bez wykorzystania krzemu, jako modyfikatora. Pokrycia osadzano na stopie TNB-V5 na bazie TiAl. Wyniki otrzymane przez dr inż. Swadźbę pokazują, że zastosowanie proszku CODEP bez dodatku krzemu powoduje małą aktywność Al podczas procesu osadzania, co skutkuje małą grubością powłoki. Zastosowanie Si w procesie osadzania powłok powoduje znaczny wzrost grubości powłok do 36 μm (8 μm bez Si), co w efekcie prowadzi do bardzo niskiego przyrostu masy w temperaturze 850°C. W niniejszej pracy Habilitant pokazuje istotne różnice w interfejsach metal-zgorzelina oraz mikrostrukturze zgorzelin tlenkowych powstających na tych powłokach w zależności od dodanej ilości Si. Podczas gdy powłoki niezawierające Si tworzyły grube i nieochronne mieszane zgorzeliny tlenku tytanu i tlenku aluminium, w przypadku powłok modyfikowanych Si (4 μm dla powłoki o wysokiej zawartości Si i 1 μm dla powłoki SiAl o niskiej zawartości Si) obserwowano powstawanie ciągłych i bardzo cienkich zgorzelin α - Al_2O_3 z niewielką ilością θ - Al_2O_3 . Podczas utleniania wysokotemperaturowego Habilitant zaobserwował segregację krzemu na granicy rozdziału powłoki z warstwą tlenkową w postaci wydzieleni o rozmiarach przekraczających nawet 1 μm . Dodatkowo dr inż. Swadźba stwierdził, że podczas utleniania wysokotemperaturowego powłok aluminidkowych modyfikowanych krzemem następuje wzrost warstwy tlenkowej złożonej z α - Al_2O_3 oraz przemiana fazy TiAl_3 w TiAl_2 i wydzielanie nadmiarowego tytanu. Zaobserwowany rozrost krzemków tytanu Ti_5Si_3 sugeruje, że tytan jest wiązany przez krzem, co hamuje proces jego utleniania. Obydwie powłoki SiAl zapewniły ochronę przed utlenianiem stopu TNB, bez znacznej degradacji powłok i wpływu na materiał podłoża, do ponad 3000 h w temperaturze 850°C, czyli w zakresie temperatur pracy łopatek niskociśnieniowych turbin silników odrzutowych.

Uzupełnieniem informacji na temat wpływu krzemu na odporność na utlenianie wysokotemperaturowe powłok aluminidkowych na stopach TiAl jest praca A7. Celem przedstawionych tu badań było wyjaśnienie wpływu międzywarstwy Ti_5Si_3 na odporność na utlenianie wysokotemperaturowe powłok Al-Ti. Podczas cyklicznego utleniania w temperaturze 900°C przez 1000 jedno-godzinnych cykli system powłokowy z międzywarstwą Ti_5Si_3 utrzymywał bogate w Al fazy TiAl_3 i TiAl_2 w warstwie wierzchniej Al-Ti około 5–10 razy dłużej w porównaniu z powłoką bez pośredniej warstwy barierowej. Wyniki obserwacji Habilitanta udowodniły, że krzem w powłokach SiAl wiąże tytan i niob ze stopu podłoża, w postaci krzemków Ti_5Si_3 na granicy rozdziału z warstwą tlenkową. Kandydat udowodnił ponadto, że powstające krzemki zawierają także Al, co umożliwia stabilizację powstającej warstwy tlenkowej zbudowanej z najbardziej pożądanej odmiany tlenku aluminium – α - Al_2O_3 .

Publikacje A5, A6 i A7 są dodatkowo ważne ze względu na to, że Habilitant wyjaśnienia w nich mechanizmy degradacji mikrostruktury powłok SiAl na stopach TiAl.

Kolejne dwie prace dotyczą międzywarstw TiAlCrYSi otrzymanych metodą CHC-PVD w powłokowych barierach cieplnych TBC na stopie TiAl [A8, A9].

W pracy A8 Kandydat pokazał, że w stanie po osadzeniu uzyskana powłoka charakteryzuje się kolumnową mikrostrukturą zawierającą zarówno obszary amorficzne, jak i krystaliczne. Podczas początkowych etapów utleniania wysokotemperaturowego w temperaturze 850°C nastąpiła krystalizacja powłoki polegająca na częściowym przekształceniu teksturowanej fazy $TiCr_2$ w fazę γ -TiAl. W ciągu 288 h utleniania w temperaturze 850 °C powłoka wykazywała znacznie mniejszy przyrost masy w porównaniu z gołym stopem γ -TiAl. W pracy tej Habilitant wnioskuje, że odporność powłoki na utlenianie w wysokiej temperaturze wynikała z tworzenia się bardzo cienkiej zgorzeliny tlenkowej złożonej z ok. 60 nm tytanu, 90 nm równoosiowego $(Al,Cr)_2O_3$ i 70 nm słupkowego Al_2O_3 . Ponadto jako pierwszy stwierdza, że itr segreguje do granic ziaren α - Al_2O_3 , co jest częściej obserwowane w przypadku nadstopów na bazie niklu. Wyniki zaawansowanych badań mikrostrukturalnych metodą STEM, zaprezentowane w pracy A8 potwierdzają tezę Kandydata mówiącą, że Cr promuje tworzenie się tlenku glinu podczas początkowych etapów utleniania powłok typu Ti-Al-Cr prawdopodobnie przez zarodkowanie tlenków chromu lub tlenku glinu domieszkowanego Cr.

W pracy A9 dr inż. Radosław Swadźba stawia tezę, że możliwe jest zastosowanie powłok TiAlCrYSi wytwarzanych metodą CHC-PVD (opracowanej w A8) jako międzywarstw dla powłokowych barier cieplnych na stopie TiAl 48-2-2. Celem naukowym pracy jest tu poznanie zjawisk zachodzących na granicy rozdziału powłokowych barier cieplnych TBC z międzywarstwą i stopem TiAl. W pracy tej Habilitant wykazał, że zastosowanie wstępnego utleniania międzywarstwy TiAlCrYSi w temperaturze 900°C przez 2 godziny w czystym tlenie prowadzi do powstania przylegającego tlenku TGO o grubości około 600 nm. Szczegółowe badania STEM w wysokiej rozdzielczości ujawniły, że uzyskane TGO składa się z zewnętrznej ciągłej strefy zawierającej Al_2O_3 domieszkowanego chromem z nanometrycznymi ziarnami tlenków TiO_2 , Y_2O_3 i $Y_3Al_5O_{12}$. Ponadto stwierdził, że wewnętrzna strefa TGO na styku zgorzelina-metal zawiera ziarna α - Al_2O_3 bez Cr. Uzyskane wyniki wskazują, że korzystny wpływ chromu na wydzielanie się tlenku aluminium i jest związane z tworzeniem się jego przejściowych odmian polimorficznych podczas początkowych etapów utleniania. Podczas testu cyklicznego utleniania w temperaturze 900°C w cyklach 1-godzinnych powłoka wykazywała przyrost masy około 0,42 mg/cm², co było związane z tworzeniem się ciągłego TGO złożonego głównie z α - Al_2O_3 . Wysokorozdzielcze badania STEM-EDS ujawniły obecność itru wzdłuż granic ziaren α - Al_2O_3 . Poza tym, za pomocą obrazowania HRTEM Habilitant udowadnia, że ziarna te nie zawierają żadnych drugorzędowych tlenków, co sugeruje, że wykryty itr jest obecny w postaci atomowej lub jonowej.

Ostatni artykuł cyklu to praca jednoautorska [A10]. Manuskrypt zatytułowany: "High temperature oxidation behavior of C103 alloy with boronized and siliconized coatings during 1000 h at 1100°C in air" został opublikowany w czasopiśmie Surface and Coatings Technology 370 (2019), które według mojej opinii aktualnie jest jednym z wiodących w dziedzinie pokryć. Tematyka pracy to powłoki żaroodporne do zastosowań na metalach i stopach wysokotopliwych, m.in. na niobie i jego stopie C103. Przebieg utleniania zbadano metodami SEM i STEM, a próbki z granicy metal-pokrycie przygotowano metodą zogniskowanej wiązki jonów (FIB). Habilitant pokazuje tu, że podczas utleniania powłok $NbSi_2/NbB_2$ powstają tlenki Nb_2O_5 , NbO_2 oraz amorficzny tlenek Si-B-O, stanowiące mieszaninę produktów korozji występujących na granicy powstałych warstw Nb_5Si_2B - NbB_2 – $NbSi_2$. W oparciu o te wyniki Autor sformułował wniosek, że międzywarstwa NbB_2 stanowić może skuteczną barierę chroniącą niob i jego stopy przed wysokotemperaturowym utlenianiem. Ponadto w pracy tej Kandydat

przedstawia pogląd na mechanizm degradacji mikrostruktury powłok NbSi₂/NbB₂ podczas wysokotemperaturowego utleniania w czasie 1000 godzin w temperaturze 1100°C. Wykazuje, że w wyniku procesów dyfuzji i przemian fazowych NbSi₂ oraz NbB₂, na granicy rozdziału zewnętrznej powłoki krzemowanej i wewnętrznej powłoki borowanej, powstaje strefa przejściowa złożona z m.in. fazy Nb₅Si₂B, promującej powstanie szkła borokrzemowego. Wyniki te wskazują na synergizm oddziaływania zewnętrznej powłoki krzemowanej NbSi₂ z wewnętrzną powłoką NbB₂. Habilitant pokazuje także, że ciągła warstwa NbB₂ hamuje propagację pęknięć od powierzchni, tym samym chroniąc stop C103 przed atmosferą utleniającą.

Podsumowując, przedstawiony w ramach osiągnięcia habilitacyjnego wkład dr inż. Radosława Swadźby w rozwój wiedzy o kształtowaniu, charakteryzowaniu oraz badaniach właściwości powłok żaroodpornych na stopach stosowanych na krytyczne elementy silników lotniczych polega przede wszystkim na wyjaśnieniu mechanizmów utleniania wysokotemperaturowego, a także zdefiniowaniu zjawisk podczas degradacji mikrostruktury podczas obciążeń cieplnych także w środowisku reaktywnym. Zaawansowane badania dotyczyły zarówno powłoki ochronnej, rodzaju i techniki przygotowania podłoża jak i międzywarstwy w tym układzie. Realizacja prac badawczych wymagała opracowania metodyki oraz przeprowadzenia przez Habilitanta zaawansowanych badań materiałów z użyciem metod mikroskopii elektronowej (SEM, STEM, HRTEM, EBSD) i związanych z nimi przygotowania cienkich folii (FIB) i pomiaru składu chemicznego (EDX, WDS i EELS).

Kandydat podjął się także oceny wpływu krzemu w.w. układach, co jest zdecydowanie elementem nowatorskim w tej grupie technik nanoszenia powłok, a także materiałów.

Ponadto, osiągnięcia habilitacyjne związane jest także z opracowaniem podstaw technologii, wśród których Kandydat wymienia :

- wytwarzanie dyfuzyjnych żaroodpornych powłok aluminidkowych modyfikowanych krzemem (SiAl) metodą pack cementation dla stopów na bazie faz międzymetalicznych TiAl.
- wytwarzanie międzywarstw TiAlCrYSi dla powłokowych barier cieplnych TBC na stopach TiAl z wykorzystaniem prototypowej konstrukcji – Closed Hollow Cathode Physical Vapor Deposition (CHC-PVD).
- kształtowanie mikrostruktury nowego typu dwustrefowych powłok żaroodpornych na stopie niobu C-103, stosowanego na elementy dyszy wylotowych w silnikach lotniczych.

Należy podkreślić, że **wszystkie artykuły naukowe należące do cyklu są powiązane tematycznie i** zostały opublikowane w uznanych czasopismach naukowych takich jak: *Corrosion Science* x5 (Q1, IF= 8.3); *Applied Surface Science* (Q1, IF=6.7); *Surface and Coatings Technology* x2 (Q1, IF=5.4); *Intermetallics* (Q1, IF=4.4) i *Microscopy and Microanalysis* (IF=4.1). Najlepiej cytowana praca cyklu Kandydata to **R. Swadźba, L. Swadźba, B. Mendala, B. Witala, J. Tracz, K. Marugi, Ł. Pyclik, Characterization of Si-aluminide coating and oxide scale microstructure formed on γ-TiAl alloy during long-term oxidation at 950°C, Intermetallics 87 (2017) 81-89** (41 cytowań), a do jednoautorskiego artykułu [A10] odwołano się dwunastokrotnie. Świadczy to o wysokim zainteresowaniu tematyką badań Habilitanta.

Jedyną uwagą dotyczącą Autoreferatu jest mało aktualna lista referencji. Należało by przypuszczać, że w dziedzinie powłok żaroodpornych na stopach stosowanych na krytyczne elementy silników lotniczych rozwój badań jest bardzo dynamiczny i należy się spodziewać corocznie wielu publikacji na ten temat. Habilitant jednakże ogranicza się przede wszystkim do publikacji, które ukazały się przed

rokiem 2020. Z 119 referencji tylko 3 z nich opublikowano w roku 2020 i później. Może to wywoływać mylne spostrzeżenia, że prowadzone przez Habilitanta badania są mało nowatorskie, lub zainteresowanie tym tematem jest aktualnie niskie. Ciężko też odnieść przedstawione przez Habilitanta wyniki do aktualnie prowadzonych na świecie badań w danej tematyce. Według mnie jest to jedynie niedopatrzenie autora autoreferatu i nie wpływa negatywnie na ocenę działalności naukowej Habilitanta. Tezę tą popiera dynamicznie wzrastająca ilość cytowań Habilitanta oraz rekomendowany do finansowania w roku 2023 projekt M-Era.NET 2022 (NCBiR), w którym kontynuowana będzie tematyka badań przedstawiona w jednotematycznym cyklu publikacji.

Ocena istotnej aktywności naukowej Habilitanta

Na dorobek naukowy Habilitanta składają się prace opublikowane przed i po doktoracie. Tych pierwszych (artykułów z listy Journal Citation Reports opublikowanych do roku 2016 włącznie) jest 11, tych drugich jest prawie trzykrotnie więcej (19 publikacji w czasopismach z listy JCR w latach 2016-2022 oprócz cyklu habilitacyjnego). Z porównania tego wynika, że dorobek naukowy Kandydata po doktoracie został w znacznym stopniu powiększony.

Poza dorobkiem naukowym przedstawionym w ramach osiągnięcia habilitacyjnego Kandydat prowadził badania i opublikował ich wyniki dotyczące innych materiałów na powłoki ochronne, metody ich wytwarzania oraz mechanizmy zniszczenia. Prace te prowadzone były zwykle we współpracy z przemysłem, a także w ramach międzynarodowych projektów badawczych. Wśród partnerów przemysłowych można wymienić: Pratt & Whitney Rzeszów S.A, General Electric (Avio Polska), Pratt & Whitney Rzeszów S.A, Hispano Suiza oraz PBS Velka Bites (Czechy), z którymi Habilitant realizował badania nad nowoczesnymi materiałami oraz powłokami ochronnymi stosowanymi na elementy silników lotniczych wykonane z monokrystalicznych stopów niklu, niobu i jego stopów oraz TiAl z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej oraz badań właściwości mechanicznych w wysokiej temperaturze. Oprócz badań materiałów Kandydat poznał różne zagadnienia związane z metodami wytwarzania takie jak natryskiwanie cieplne, aluminiowanie i borowanie dyfuzyjne, czy utlenianie wysokotemperaturowe. W ramach współpracy z Institute for Energy and Climate Research, Forschungszentrum z Julich w Niemczech na podstawie przeprowadzonych przeze dr inż. Swadźbę badań STEM możliwe było wyjaśnienie mechanizmu powstawania ochronnej warstwy tlenkowej, a także degradacji powłok na stopach żarowytrzymałych stosowanych na łopatki turbin silników lotniczych wykonanych ze stopów monokrystalicznych, m.in. nadstopu niklu stosowanego w najnowszych silnikach lotniczych - René N5. W przypadku współpracy międzynarodowej z German Aerospace Center (DLR) i Fraunhofer-IST Kandydat pracował nad wytwarzaniem powłok platynowych i palladowych metodą PVD. W ramach realizacji projektu COOPERNIK i we współpracy z Politechniką Śląską oraz Instytutem Fraunhofer IST (Institute for Surface Engineering and Thin Films) z Braunschweig w Niemczech Kandydat skonstruował oraz zbudował prototypowe stanowisko do wytwarzania powłok ochronnych z wykorzystaniem innowacyjnej dla tych zastosowań metody fizycznego osadzania z wykorzystaniem zamkniętej katody - Closed Hollow Cathode Physical Vapor Deposition (CHC-PVD). W wyniku realizacji projektu "INNOGEAR - Advanced techniques for making aeroengine gear" we współpracy z Politechniką Śląską i firmą Hispano-Suiza (Safran Group, Francja) w roku 2016 Habilitant został współtwórcą patentu Europejskiego opisującego technologię wytwarzania powłok ognioochronnych dla obudów przekładni lotniczych wykonanych ze stopów aluminium „SNMO11922 - AGB case with improved fireproof resistance by using protective coatings”. Po uzyskaniu doktoratu dr inż. Swadźba wspólnie z niemieckimi partnerami z German Aerospace Center (DLR) z Kolonii oraz Karlsruhe Institute of Technology (KIT) uzyskał finansowanie badań w ramach Międzynarodowego

Programu Beethoven II z Narodowego Centrum Nauki (NCN) na współpracę polsko-niemiecką, którego był kierownikiem (2018-2022). W 2023 roku Kandydat wraz z zagranicznymi partnerami - MINES ParisTech (Francja) oraz Fraunhofer IWS (Niemcy), a także z partnerami krajowymi – Politechniką Śląską i firmą AvioAero (GE), uzyskał zgodę na finansowanie projektu badawczego w ramach programu M-Era.NET 2022 (NCBiR), gdzie będzie pełnił rolę koordynatora projektu a Łukasiewicz – GIT będzie liderem konsorcjum.

Od roku 2019 dr inż. Swadźba należy do Polskiego Towarzystwa Mikroskopii Elektronowej (PTMI), a także do dwóch międzynarodowych towarzystw naukowych związanych z mikroskopią elektronową: European Microscopy Society (EMS) oraz International Federation of Societies for Electron Microscopy (IFSM). W 2020 roku przystąpił ponadto do międzynarodowego towarzystwa The Minerals, Metals & Materials Society (TMS).

Dr inż. Swadźba brał udział w wielu konferencjach międzynarodowych, gdzie również miał wykłady na zaproszenie np. w 2015 International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) w San Diego (USA), oraz otrzymywał wyróżnienia i nagrody np. w roku 2021 za najlepszą merytorycznie prezentację plakatu na konferencji Intermetallics 2021 w Bad Staffelstein (Niemcy).

Wysoki poziom badań Kandydata potwierdzają liczne nagrody i wyróżnienia np. Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców (2018-2020), a jego bardzo wysokie umiejętności w zakresie mikroskopii elektronowej zostały potwierdzone umieszczeniem zdjęcia mikrostruktury wykonanego z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) na okładce czasopisma Nature Index: Materials Science 2021 - dodatku do czasopisma Nature (Impact Factor 42.778 za rok 2019) poświęconemu inżynierii materiałowej.

Dr inż. R. Swadźba wykonał 61 recenzji dla czasopism z wydawnictw Elsevier (39), Cambridge (6), MDPI (3), The American Society of Mechanical Engineers - ASME (2), American Society for Testing and Materials - ASTM (4), ASM International - Materials Information Society (1), Wiley (1), gdzie na szczególną uwagę zasługują recenzje w jednych z lepszych czasopism w dziedzinie tj.: Surface and Coatings Technology, Elsevier, 100 punktów MEiN, Impact Factor 4.865 (22 recenzje), Corrosion Science, Elsevier – 140 punktów MEiN, Impact Factor 7.720, (15 recenzji) czy Acta Materialia, Elsevier – 200 punktów MEiN, Impact Factor 9.209, (2 recenzje).

W przypadku działalności dydaktycznej Habilitant ma mniejsze osiągnięcia, jednakże jest to uzasadnione tym, że Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnictwo i Hutnictwo nie prowadzi wykładów dla studentów. Jednakże Kandydat ma udokumentowaną opiekę nad stażystami z Uniwersytetu Śląskiego (01.01.2015-31.03.2015), Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych (16.04.2018-18.01.2019), Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN (10.08.2020 – 31.03.2021) i Politechniki Śląskiej (08.11-17.12.2021 i 04.07.2022-04.01.2023). Pełniąc rolę opiekuna stażystów dr inż. Radosław Swadźba prowadził zajęcia teoretyczne, a także praktyczne obejmujące zaawansowane metody badań materiałów w laboratorium Grupy Badawczej BL: Badania Własności i Struktury Materiałów.

Realizacja prac naukowych, zwłaszcza z tak wysoko notowanymi Instytutami jak German Aerospace Center oraz Karlsruhe Institute of Technology, czy Politechniką Śląską, gdzie Habilitant odbył półroczny staż dydaktyczny, jak i partnerami przemysłowymi w kraju AvioAero Polska (General Electric - staż przemysłowy, kwiecień 2017 – październik 2017) i zagranicy (PBS Velka Bites, Czechy) **potwierdza istotną aktywność naukową albo artystyczną, którą Kandydat realizował w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

Dane naukometryczne Habilitanta są bardzo dobre i spełniają wymagania stawiane zwyczajowo Kandydatom do stopnia doktora habilitowanego. Według danych podanych przez Kandydata w marcu

2023, indeks Hirscha jego publikacji wynosił 13, a prace te były cytowane 387 razy (318 razy bez autocytowań). W ciągu ostatnich kilku miesięcy IH Kandydata wzrósł do 14 (Web of Science, dostęp w dniu 26.07.2023). W przedstawionym załączniku 6 siedemnaście prac miało 10 i więcej cytowań. Największą liczbę cytowań (36) posiada praca zatytułowana „Characterization of Si-aluminide coating and oxide scale microstructure formed on gamma-TiAl alloy during long-term oxidation at 950 degrees C” opublikowana w 2017 roku w *Intrmetallics*, w której jest Habilitant jest współautorem, a która powstała w wyniku badań prowadzonych we współpracy z Politechniką Śląską oraz firmą AvioAero (GE).

Wkład osiągnięć Habilitanta w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa.

Pan Radosław Swadźba w pełni zrealizował postawiony cel, to znaczy w ramach osiągnięcia habilitacyjnego wyjaśnił szereg zjawisk zachodzących podczas wytwarzania oraz degradacji stopów i powłok w podwyższonej temperaturze, a także opracował podstawy technologii kształtowania mikrostruktury powłok żaroodpornych metodą kontaktowo-gazową (pack cementation) i fizycznego osadzania z fazy gazowej z wykorzystaniem zamkniętej katody - CHC-PVD (Closed Hollow Cathode – Physical Vapor Deposition). Pomimo, że praca skupia się przede wszystkim na zagadnieniu powłok i warstw żaroodpornych stosowanych na żarowytrzymałych nadstopach niklu, stopach na bazie faz międzymetalicznych γ -TiAl oraz stopie niobu C103, to opisane tu zjawiska stanowią istotny wkład zarówno w inżynierię powierzchni ze szczególnym uwzględnieniem pokryć, a także rozwój wiedzy w zakresie korozji stopów w wysokich temperaturach. Opisy mechanizmów degradacji jak i materiałów o ulepszonych właściwościach (domieszkowanie krzemem) wymagało od Habilitanta opracowania zaawansowanej metodyki badawczej z wykorzystaniem wysokorozdzielczej skaningowej i skaningowo transmisyjnej mikroskopii elektronowej (SEM i STEM) oraz metody Focused Ion Beam (FIB), co również wpływa na rozwój metod badawczych w inżynierii materiałowej. Należy tu podkreślić, że szereg zaproponowanych tematów z zakresu badań podstawowych znalazło odzwierciedlenie w opracowanych przez Kandydata technologiach, a następnie będzie użytych przez konstruktorów w aspekcie projektowania łopatek turbin oraz doboru materiału i powłok ochronnych. Dlatego trzeba ocenić bardzo pozytywnie **istotny wkład Habilitanta w rozwój inżynierii powierzchni w ramach dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa.**

3. Wniosek końcowy

Na podstawie oceny dorobku naukowego Pana dr inż. Radosława Swadźby oraz osiągnięcia naukowego uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora obejmującego cykl 10 artykułów zatytułowanego „Mikrostruktura i utlenianie wysokotemperaturowe powłok i warstw wytwarzanych na wybranych stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych”, stwierdzam, że jest On doświadczonym i samodzielnym badaczem, który chętnie podejmuje nowe wyzwania.

Dotychczasowe osiągnięcia naukowe Pana dr inż. Radosława Swadźby w pełni spełniają wymagania stawiane Kandydatom ubiegającym się o stopień naukowy doktora habilitowanego. Habilitant bez wątplenia posiada kwalifikacje do prowadzenia samodzielnej pracy naukowo-badawczej.

Przedstawiony przez Kandydata dorobek naukowy stanowi materiał upoważniający mnie, zgodnie z art. 219 ust. 1 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), do **jednoznacznego poparcia nadania doktorowi inż. Radosławowi Swadźbie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**