

*Prosta*

Koszalin 31.08.2023r

## RECENZJA

wniosku o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego dr. inż. Radosławowi Swadźbie w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria materiałowa na podstawie cyklu 10 publikacji powiązanych tematycznie pod wspólnym tytułem: „Mikrostruktura i utlenianie wysokotemperaturowe powłok i warstw wytwarzanych na wybranych stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych” oraz opinia o dorobku naukowo-badawczym, dydaktycznym i organizacyjnym kandydata.

Podstawa opracowania: uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej nr 56/2023 z dnia 11.07.2023 r., (pismo RDN nr DRKN.Z2.400.50.2023).

### 1. Charakterystyka kandydata

Dr inż. Radosław Swadźba ukończył w 2011r. studia na kierunku inżynieria materiałowa na Politechnice Śląskiej, uzyskując stopień magistra inżyniera. Pracę magisterską pt. „Degradacja w warunkach statycznego i cyklicznego utleniania modyfikowanych, aluminiowych międzywarstw wytwarzanych na żarowytrzymałym stopie monokrystalicznym”, obronioną z wyróżnieniem, wykonał pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Marka Hetmańczyka.

Podczas studiów odbył:

- miesięczną praktykę studencką w firmie Pratt & Whitney Rzeszów S.A, gdzie zapoznał się z zagadnieniami konstruowania oraz technologiami stosowanymi w wytwarzaniu elementów turbinowych silników lotniczych,
- praktykę dyplomową w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach, podczas której realizował badania stopów monokrystalicznych i powłok żaroodpornych z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej SEM,

Uruchomił na Politechnice Śląskiej nową metodykę oceny degradacji oraz rozkładu grubości powłok ochronnych na komponentach silników lotniczych z wykorzystaniem nieniszczącej metody skanowania optycznego 3D (GOM ATOS).

W okresie studiów brał aktywny udział w projektach badawczych, których wyniki prezentował na konferencjach naukowych w kraju i za granicą:

- International Student's Day of Metallurgy (ISDM) w Czechach (2009) i Niemczech (2010),
- International Aerospace Supply Fair (AIRTEC) we Frankfurcie nad Menem w Niemczech (2011),
- International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) w USA (2011).

Wyniki swoich badań opublikował również w czasopiśmie Surface and Coatings Technology oraz materiałach konferencyjnych.

Za bardzo dobre wyniki w nauce i szczególną aktywność naukową uzyskał Nagrodę Rektora Politechniki Śląskiej.

Po studiach, w roku 2012 podjął pracę w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach w Zakładzie Badań Właściwości i Struktury Materiałów, gdzie obejmował kolejno stanowiska specjalisty inżynieryjno-technicznego, badawczo-technicznego i asystenta, a po uzyskaniu stopnia doktora – stanowisko adiunkta.

W zakresie działalności naukowej głównym obszarem badawczym Habilitanta są powłokowe bariery cieplne (Thermal Barrier Coatings - TBC), które umożliwiają funkcjonowanie krytycznych elementów lotniczych silników turbinowych w znacznie wyższej temperaturze niż pozwalają na to stopy monokrystaliczne bez powłok. Genezą podjęcia się tej tematyki była zapoczątkowana już podczas studiów współpraca z prof. Uwe Schulzem z German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR), który od wielu lat jest liderem w Europie w rozwoju technologii Electron Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD), stosowanej do wytwarzania powłok żaroodpornych typu MCrAlY oraz powłokowych barier cieplnych (TBC) z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru – YSZ. Równocześnie prowadził badania we współpracy z dr Thomasem Jungiem z Instytutu Fraunhofer – IST (Institute for Surface Engineering and Thin Films) z Braunschweig (Niemcy) nad wytwarzaniem powłok platynowych i palladowych metodą PVD. Głównymi narzędziami badawczymi Habilitanta była skaningowa mikroskopia elektronowa SEM, dyfrakcja elektronów wtórnie rozproszonych (Electron Backscatter



Diffraction - EBSD), skaningowo-transmisyjna mikroskopia elektronowa STEM. Wspecjalizował się również w preparatyce metodą Focused Ion Beam (FIB).

W szczególności, w ramach wymienionej współpracy uczestniczył w następujących zadaniach badawczych:

- ✓ Przeprowadził badania podstawowe ukierunkowane na zrozumienie procesów utleniania monokrystalicznego stopu żarowytrzymałego, tj.: analizę wzrostu warstw tlenkowych w zakresie temperatury 1050 – 1150°C, charakterystykę przemian fazowych, analizę procesów segregacji pierwiastków w nanoobszarach oraz zachowanie pierwiastków reaktywnych, takich jak Hf, Y i Zr w wysokiej temperaturze w środowisku utleniającym.
- ✓ Określił wpływ składu chemicznego i fazowego warstw pośrednich pomiędzy podłożem, a TBC tzw. międzywarstw na mechanizm wzrostu, mikrostrukturę i skład fazowy warstw tlenkowych powstających podczas testów utleniania wysokotemperaturowego. Badania zogniskował wokół koncepcji wytwarzania międzywarstw aluminiowych modyfikowanych platyną oraz palladem.
- ✓ Badał przemiany fazowe i mikrostrukturalne podczas utleniania wysokotemperaturowego powłok żaroodpornych typu MCrAlY oraz powłokowych barier cieplnych (TBC) z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru – YSZ

Wyniki uzyskane podczas realizacji tego bogatego spektrum zadań badawczych opublikował w 20 współautorskich artykułach m.in. w kilku artykułach w Surface & Coatings Technology oraz podsumował w ramach obronionej z wyróżnieniem pracy doktorskiej pod tytułem „Degradacja powłokowych barier cieplnych na monokrystalicznym żarowytrzymałym stopie niklu w warunkach wysokotemperaturowego utleniania”. Niezależnie, wyniki badań prezentował na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Między innymi w:

- ✓ EFC Workshop: "Beyond Single Oxidants", organizowanej przez Instytut Forschungszentrum z Julich (prof. W. J. Quadackers) oraz Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen - DECHEMA (prof. M. Schutze) we Frankfurcie nad Menem (Niemcy) – 2012,
- ✓ IX Konferencji Naukowej „Inżynieria Powierzchni INPO 2014” w 2014 roku otrzymałem nagrodę za prezentację posterową, w której przedstawiłem wyniki badań realizowanych w ramach j pracy doktorskiej,

- ✓ w latach 2011, 2012, 2013 i 2014 w referatach wygłoszonych na międzynarodowej konferencji International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) w San Diego (USA); w roku 2015 na zaproszenie organizatorów tej konferencji (Invited talk),
- ✓ seminarium na wydziale „High Temperature and Functional Coatings” w German Aerospace Center (DLR) w Kolonii, na zaproszenie prof. Uwe Schulza.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w 2016 roku awansował na stanowisko adiunkta oraz zastępcy Kierownika Zakładu Badań Właściwości i Struktury Materiałów w Instytucie Metalurgii Żelaza. W swojej działalności naukowej w dalszym ciągu kontynuował współpracę z partnerami z firm lotniczych oraz z zagranicznymi instytutami naukowymi, w której ważną rolę odgrywały badania podstawowe dotyczące kształtowania mikrostruktury powłok żaroodpornych na stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych.

W ramach tej współpracy uczestniczył w kilku projektach badawczych:

- “INNOGEAR - Advanced techniques for making aeroengine gear” we współpracy z Politechniką Śląską i firmą Hispano-Suiza (Safran Group, Francja). W wyniku realizacji tego projektu 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”.
- TiAlMET - “Surface modification of  $\gamma$ -TiAl alloys and its influence on mechanical properties and phenomena under high temperature conditions”, 2018-2021, we współpracy z German Aerospace Center (DLR) z Kolonii oraz Karlsruhe Institute of Technology (KIT) w ramach Międzynarodowego Programu Beethoven II z Narodowego Centrum Nauki (NCN). W projekcie tym Habilitant pełnił rolę kierownika. W ramach projektu prowadził badania nad zjawiskami zachodzącymi podczas utleniania wysokotemperaturowego stopu TiAl z powłokami ochronnymi – aluminiakowymi modyfikowanymi krzemem, otrzymywanymi metodą *pack cementation*. Wykorzystując zbudowaną przez siebie aparaturę do wytwarzania powłok metodą CHC-PVD, opracował podstawy technologii nowego rodzaju powłok zawierających Ti, Al, Cr, Y i Si, charakteryzujących się zwiększoną plastycznością i mniejszym wpływem na właściwości mechaniczne stopów TiAl w porównaniu do dyfuzyjnych powłok SiAl, a jednocześnie zapewniających doskonałą odporność na cykliczne i izotermiczne utlenianie w temperaturze 900°C. **Powłoki te zostały**



zastosowane jako międzywarstwy pod powłokowe bariery cieplne TBC, których celem jest obniżenie temperatury powierzchni stopu dzięki bardzo niskiemu przewodnictwu cieplnemu zewnętrznej powłoki ceramicznej zbudowanej z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru (YSZ). W ramach projektu powstało 9 artykułów naukowych, opublikowanych między innymi w czasopiśmie Corrosion Science, Applied Surface Science, Intermetallics oraz Metals i Coatings, z czego w 4 Habilitant jest głównym autorem korespondencyjnym. Wyniki projektu przedstawiał również m.in. w referacie podczas konferencji XVII International Conference on Electron Microscopy w 2020 roku, a także w referatach **na zaproszenie** organizatorów podczas konferencji TMS 2020 Annual Meeting & Exhibition w San Diego (USA), oraz Lehigh University w Bethlehem (USA). W roku 2021 **otrzymał nagrodę za najlepszą merytorycznie prezentację posterową na konferencji Intermetallics 2021 w Bad Staffelstein (Niemcy)**, podczas której przedstawił mechanizm degradacji warstw TiAlCrYSi w powłokowych barierach cieplnych TBC na stopach TiAl. W 2022 roku wyniki projektu zaprezentował w referacie na konferencji Forum of Technology (ForumT) w Nicei (Francja) oraz na zaproszenie podczas seminarium w German Aerospace Center (DLR) w Kolonii (Niemcy).

- ✓ COOPERNIK - „Zaawansowany zespół turbiny niskiego ciśnienia o podwyższonej sprawności” we współpracy z firmą AvioAero w Bielsku-Białej, należąca do General Electric Aviation oraz Politechniką Śląską, w ramach programu INNOLOT z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. W ramach projektu opracował podstawy technologii wytwarzania powłok aluminiowych modyfikowanych krzemem (SiAl) metodą pack cementation dla stopów na bazie faz międzymetalicznych TiAl wytwarzanych metodą druku 3D – Electron Beam Melting (EBM). Wyniki badań prezentował podczas wizyty w firmie General Electric w Evendale (Cincinnati, USA) na zaproszenie dr B. Nagaraja oraz w referatach na konferencjach międzynarodowych International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) w 2019 roku w San Diego (USA) oraz „Turbine Forum 2018: Advanced Coatings and Materials for Turbine Components” w Nicei (Francja) w 2018 roku.

Ponadto, w 2022 roku z zagranicznymi partnerami - MINES ParisTech (Francja) i Fraunhofer IWS (Niemcy) oraz partnerami krajowymi – Politechniką Śląską i firmą AvioAero (GE) przygotował wniosek o finansowanie projektu badawczego w ramach programu M-Era.NET 2022 (NCBiR), dotyczący opracowania powłokowych barier cieplnych (TBC) i

międzywarstw dla żarowytrzymałych monokrystalicznych nadstopów niklu na łopatki turbin silników lotniczych do pracy przy podwyższonej zawartości pary wodnej w atmosferze. Wniosek został rekomendowany do finansowania, a jego rozpoczęcie planowane jest na październik 2023 roku. Habilitant jest koordynatorem projektu a Łukasiewicz – GIT jest liderem konsorcjum.

Na podstawie dotychczasowego dorobku naukowego Habilitant:

- został ujęty w oficjalnym podziękowaniu (Acknowledgements) w publikacji wydanej z okazji 50-lecia czasopisma Oxidation of Metals (Springer), której autorem jest dr James Smialek z NASA Glenn Research Center, USA (J. Smialek, *Alumina Scale Adhesion Mechanisms – A Retrospective Assessment*, Special Issue: Celebrating 50 Years of Oxidation of Metals, 1969-2019, 2021),
- otrzymał Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców na lata 2018-2020,

W roku 2021 wykonane przez Habilitanta zdjęcie mikrostruktury tlenku niklu powstałego na monokrystalicznym nadstopie niklu René N5 podczas utleniania wysokotemperaturowego zostało wybrane przez komisję na okładkę specjalnego wydania czasopisma Nature Index poświęconego inżynierii materiałowej i będącego dodatkiem do czasopisma Nature (IF = 42.778 za rok 2019).

W zakresie działalności dydaktycznej, Habilitant:

- W roku 2018 odbył semestralny staż dydaktyczny na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach, w ramach którego prowadził wykłady, zajęcia laboratoryjne oraz projektowe z przedmiotu „Szybkie prototypowanie” na specjalności Technologie Materiałów w zakresie skanowania optycznego i druku 3D,
- Pełni funkcję promotora pomocniczego w dwóch przewodach doktorskich,
- Wielokrotnie sprawował funkcję opiekuna stażystów.

**Przedstawiona skrótowo, ogólna charakterystyka działalności dr. inż. Radosława Swadźby, adiunkta w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach wskazuje na systematyczny, jednoznacznie ukierunkowany rozwój Jego bardzo aktywnej działalności naukowej. Wysoko należy ocenić wyróżniającą współpracę z firmami z branży lotniczej oraz z międzynarodowymi instytucjami naukowymi.**



## 2. Ocena całokształtu dorobku naukowego

Obszar badawczy Habilitanta zogniskowany jest wokół ściśle określonych zastosowań związanych z rozwojem nowoczesnych silników lotniczych, którego naturalny kierunek dotyczący wzrostu ich wydajności musi jednocześnie uwzględniać coraz bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące ograniczenia emisji gazów, takich jak CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz emisji hałasu. Jednym z podstawowych warunków spełnienia tych oczekiwań jest podwyższanie temperatury gazów na wlocie do turbiny, który wymaga zastosowania nowoczesnych materiałów o zwiększonej trwałości w warunkach korozji wysokotemperaturowej. W zakresie tego obszaru badawczego Habilitant wyróżnił swoje osiągnięcie naukowe, które zatytułował: **„Mikrostruktura i utlenianie wysokotemperaturowe powłok i warstw wytwarzanych na wybranych stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych”**. Egzemplifikacją tego osiągnięcia jest cykl 10 powiązanych tematycznie artykułów naukowych. Są to artykuły opublikowane w czasopiśmie o stosunkowo wysokim wskaźniku oddziaływania (Impact Factor). Sumaryczna wartość tego wskaźnika wynosi **60.487**. Wśród nich jest 1 autorski artykuł Habilitanta oraz w 8 artykułach dr inż. Radosław Swadźba jest pierwszym współautorem.

W tym cyklu artykułów, dotyczącym kształtowania, charakteryzowania oraz badań właściwości powłok żaroodpornych na stopach stosowanych na krytyczne elementy silników lotniczych, Habilitant wyróżnia dwa główne nuty, tj.: poznawczy oraz technologiczny. W szczególności, w obszarze poznawczym najważniejszymi osiągnięciami było wyjaśnianie mechanizmów:

- utleniania wysokotemperaturowego oraz
- degradacji mikrostruktury.

W zakresie osiągnięć technologicznych najważniejszymi osiągnięciami było opracowanie podstaw technologii wytwarzania:

- dyfuzyjnych żaroodpornych powłok aluminiowych, modyfikowanych krzemem (SiAl) metodą pack cementation dla stopów na bazie faz międzymetalicznych TiAl,
- opracowanie podstaw technologii wytwarzania międzywarstw TiAlCrYSi dla powłokowych barier cieplnych TBC na stopach TiAl z wykorzystaniem prototypowej konstrukcji – Closed Hollow Cathode Physical Vapor Deposition (CHC-PVD),

- opracowanie podstaw technologii kształtowania mikrostruktury nowego typu dwustrefowych powłok żaroodpornych na stopie niobu C-103, stosowanego na elementy dyszy wylotowych w silnikach lotniczych.

Niezbędnym warunkiem uzyskania wymienionych osiągnięć poznawczych oraz technologicznych było opanowanie przez Habilitanta licznego spektrum nowoczesnych, zaawansowanych metod badawczych materiałów z zakresu inżynierii materiałowej, tj.:

- ✓ skaningowej mikroskopii elektronowej SEM,
- ✓ wysokorozdzielczej skaningowo transmisyjnej mikroskopii elektronowej S/TEM,
- ✓ badanie składu chemicznego przy użyciu technik WDS ((ang. Wavelength Dispersive Spectrometry) i EELS (ang. Electron Energy Loss Spectroscopy),
- ✓ dyfrakcji elektronów wtórnie rozproszonych EBSD (ang. Electron Backscatter Diffraction).

Wyspecjalizował się również w preparatyce metodą Focused Ion Beam (FIB).

W przemyśle lotniczym, głównie w silnikach, od dziesięcioleci stosowane są nadstopy niklu, których technologia podlega ciągłej ewolucji w celu podwyższania odporności na coraz wyższą temperaturę. W wyniku tych działań, temperatura pracy łopatek turbiny wysokiego ciśnienia (High Pressure Turbine - HPT) osiąga 1150°C, czyli około 200°C poniżej temperatury topnienia, co stanowi granicę dla nadstopów na bazie niklu. Równocześnie, podniesienie temperatury pracy nadstopów niklu przyspiesza degradację powierzchni łopatek na skutek utleniania oraz korozji wysokotemperaturowej, powodując znaczne pogarszanie ich właściwości mechanicznych. Równoległe z rozwojem materiałów na łopatki turbiny wysokiego ciśnienia pracujące w wysokiej temperaturze, poszukuje się stopów stanowiących alternatywę dla nadstopów niklu pod względem masy do zastosowania w turbinie niskiego ciśnienia (Low Pressure Turbine – LPT). Jednym z tego rodzaju materiałów są **stopy na bazie faz międzymetalicznych TiAl**. Oferują one równowagę właściwości ze względu na ich niską gęstość (~3.9–4.2 g/cm<sup>3</sup>), dobrą wytrzymałość na pełzanie i odporność na utlenianie oraz posiadają wysoką temperaturę topnienia. Kamieniem milowym w tym zakresie było rozpoczęcie produkcji łopatek turbiny niskiego ciśnienia ze stopów TiAl z wykorzystaniem technologii przyrostowych – druku 3D, przez firmę General Electric. Jednakże, głównym wyzwaniem w rozwoju i zastosowaniu stopów TiAl jest ich niska odporność na utlenianie w powietrzu w temperaturze powyżej 750°C. Na powierzchni tych stopów tworzy się zgorzelina składająca się z mieszaniny tlenków  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i TiO<sub>2</sub>, która jest mniej ochronna niż zgorzelina  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tworząca się w samym tlenie. Dlatego też, wykorzystanie stopów TiAl do



produkcji łopatek kolejnych stopni turbiny niskiego ciśnienia, pracujących w temperaturze powyżej 750°C, wymaga opracowania powłok chroniących przed utlenianiem oraz zapewniających izolację termiczną.

Inną alternatywą dotyczącą nadstopów niklu są stopy na bazie metali trudnotopliwych, takich jak molibden (Mo), które mogą pracować do temperatury około 1300°C oraz niobu (Nb), które z kolei mogą być stosowane na elementy bez chłodzenia do temperatury około 1200°C. Wada stopów na bazie metali trudnotopliwych jest ich niska odporność na utlenianie wysokotemperaturowe, co prowadzi do gwałtownego ubytku masy i spadku właściwości mechanicznych. Z tego też powodu zabezpieczenie powierzchni łopatek turbin poprzez opracowywanie nowych rodzajów powłok ochronnych jest nieodzownym problemem przy projektowaniu niezawodnych silników lotniczych i turbin stacjonarnych.

I te zagadnienia badawcze, dotyczące powłok i warstw żaroodpornych stosowanych na żarowytrzymałych nadstopach niklu, stopach na bazie faz międzymetalicznych  $\gamma$ -TiAl oraz stopie niobu C103 stanowią główny nurt pracy habilitacyjnej dr. inż. Radosława Swadźby. W szczególności jednym z najważniejszych zagadnień naukowych, stanowiących tematykę badań Habilitanta, było kształtowanie mikrostruktury powłokowych barier cieplnych (*Thermal Barrier Coatings - TBC*), w tym wyjaśnienie mechanizmów ich degradacji w warunkach cyklicznych zmian temperatury.

Powłokowe bariery cieplne stanowią złożony układ, w skład którego wchodzi zewnętrzna powłoka ceramiczna, międzywarstwa oraz żarowytrzymałe podłoże. Zasadniczym problemem związanym z trwałością powłok jest przyczepność zewnętrznej powłoki ceramicznej do międzywarstwy w warunkach utleniania i cyklicznie zmieniającej się temperatury, która związana jest ze wzrostem warstwy tlenkowej (*Thermally Grown Oxide - TGO*) pomiędzy nimi. Zapewnienie dobrego połączenia pomiędzy tymi warstwami decyduje o trwałości powłokowych barier cieplnych i stanowi tematykę wielu prac związanym z rozwojem nowoczesnych pokryć ochronnych dla komponentów turbin silników lotniczych. W tą tematykę wpisuje się działalność naukowa Habilitanta, a w szczególności wyjaśnianie mechanizmów ich degradacji, głównie poprzez analizę zmian mikrostrukturalnych w warunkach eksploatacji, wykorzystując do tego celu szerokie spektrum nowoczesnych metod badawczych inżynierii materiałowej. Na szczególne podkreślenie w tym obszarze badawczym zasługuje współpraca Habilitanta z prof. Uwe Schulzem z German Aerospace Center (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR*) z Kolonii (Niemcy), gdzie wykonano testy osadzania międzywarstw oraz zewnętrznej powłoki ceramicznej YSZ metodą EB-PVD na żarowytrzymałym nadstopie niklu CMSX-4. Habilitant z kolei, realizował badania nad



zjawiskami towarzyszącymi degradacji powłok z międzywarstwami NiCoCrAlY modyfikowanymi Hf i Zr. Przeprowadzone badania pozwoliły na potwierdzenie postulowanej tezy, że modyfikacja międzywarstw NiCoCrAlY pierwiastkami reaktywnymi (Hf, Zr) umożliwia zwiększenie trwałości powłokowych barier cieplnych na żarowytrzymałych nadstopach niklu. Wyniki tych badań zostały przedstawione w współautorskiej publikacji: A. Ebach-Stahl, U. Schulz, **R. Swadźba**, A. U. Munawar, Lifetime improvement of EB-PVD 7YSZ TBCs by doping of Hf or Zr in NiCoCrAlY bond coats, Corrosion Science Volume 181 (2021) 109205 (140 punktów MEiN, Impact Factor 7.72).

Kolejnym, ważnym zagadnieniem badawczym, zasługującym na podkreślenie w bogatym życiorysie naukowym Habilitanta jest rozwój technologii powłok żaroodpornych na lekkich stopach na bazie faz międzymetalicznych TiAl, wytwarzanych metodą tradycyjną oraz metodą druku 3D, stosowanych na elementy turbin silników lotniczych. Badania prowadził w ramach jednego z zadań projektu COOPERNIK (program INNOLOT) we współpracy z firmą AvioAero (General Electric), a następnie w ramach kierowanego przez Niego projektu międzynarodowego z Narodowego Centrum Nauki (program Beethoven II) we współpracy z German Aerospace Center (DLR) oraz Karlsruhe Institute of Technology (KIT) z Niemiec w latach 2018 – 2021. Tematyka projektu o akronimie TiAlMET – “Surface modification of TiAl alloys and its influence on mechanical properties and phenomena under high temperature conditions” dotyczyła modyfikacji powierzchni stopów TiAl oraz jej wpływu na właściwości mechaniczne i zjawiska zachodzące w wysokiej temperaturze.

Zasadniczym problemem w odniesieniu do stopów TiAl jest ich niewystarczająca odporność na korozję wysokotemperaturową, której mechanizm w przypadku stopów wytwarzanych metodą druku 3D nie jest dostatecznie poznany. To zagadnienie badawcze stanowiło motywację do podjęcia przez Habilitanta badań we współpracy z firmą AvioAero (General Electric Aviation Business) z Polski i Włoch nad krótko- i długotrwałym utlenianiem wysokotemperaturowym stopu  $\gamma$ -TiAl wytwarzanego metodą druku 3D, z wykorzystaniem technologii EBM (Elektron Beam Melting).

**Habilitant wykazał, że ze względu na zastosowaną metodę wytwarzania stopu, skutkującą tworzeniem się mikrostruktury pasmowej – odmiennej niż ma to miejsce w stopie odlewanym, kinetyka utleniania zależna jest od temperatury, tj. w temperaturze 750<sup>0</sup>C kinetyka przebiega zgodnie z prawem logarytmicznym, natomiast w temperaturze 800 i 850<sup>0</sup>C zgodnie z prawem parabolicznym.**



Wyniki uzyskane w toku realizacji projektów przedstawione zostały w 7-miu publikacjach, z czego w 6-ciu Habilitant jest pierwszym współautorem. 5 z tych artykułów zostało opublikowanych w czasopiśmie *Corrosion Science* o współczynniku oddziaływania  $IF=7,72$ , 1 w *Intermetallics* o  $IF=3,42$ , 1 w *Surface and Coatings Technology* o  $IF=3,784$  oraz 1 w *Applied Surface Science* o  $IF= 7.392$ . Niezależnie wyniki prezentował na konferencjach: International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) w 2019r. w San Diego (USA), MTS Conference – Materials Technologies in Silesia w 2019r. oraz na zaproszenie (invited talk) organizatorów konferencji TMS 2020 Annual Meeting & Exhibition, Symposium: Environmental Degradation of Additively Manufactured Alloys w 2020r. w San Diego (USA).

Kolejnym wątkiem w pracy badawczej Habilitanta było włączenie się w nurt badań dotyczących opracowania powłok ochronnych dla stopów TiAl, a w szczególności powłok aluminidkowych modyfikowanych Si – SiAl. Badania te prowadził we współpracy z German Aerospace Center (DLR) z Kolonii i Karlsruhe Institute of Technology (KIT) z Niemiec, w ramach wspomnianego już projektu TiAlMET oraz projektu „COOPERNIK” we współpracy z Politechniką Śląską i firmą AvioAero. Opracowanie podstaw technologii powłok SiAl, charakteryzujących się odpornością na długotrwałe utlenianie wysokotemperaturowe, przeprowadził na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej wspólnie z zespołem Uczelni. Zastosowanie powłoki SiAl opracowanej przez Habilitanta umożliwiło całkowite wyeliminowanie powstawania szkodliwych tlenków Ti. **W szczególności, na podstawie badań wykazał**, że modyfikacja krzemem proszków wykorzystywanych w procesie aluminowania metodą kontaktowo-gazową (pack cementation) umożliwia uzyskanie powłok aluminidkowych na stopach TiAl o doskonałej odporności na długotrwałe utlenianie wysokotemperaturowe. Wyniki tych badań przedstawił w publikacji: 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  $\gamma$ -TiAl alloy during long-term oxidation at 950°C*, *Intermetallics* 87 (2017) 81-89 (100 punktów MEiN, Impact Factor 3.42), a także w referatach na konferencjach: X Konferencji Naukowej “Inżynieria Powierzchni – INPO 2017” w 2017r. w Wiśle (Polska), Turbine Forum 2018 “Advanced Coatings and Materials for Turbine Components” w 2018r. w Nicei (Francja), High Temperature Corrosion – Mitigation in Energy Sectors Conference NACE w 2018r. w Krakowie oraz International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) w 2019r. w San Diego (USA). Niezależnie, opracowanie podstaw technologii powłok SiAl oraz oddziaływania tych powłok na właściwości stopów TiAl prezentował w postaci referatów na zaproszenie



organizatorów konferencji (invited talk) TMS 2020 Annual Meeting & Exhibition, Symposium: Environmental Degradation of Additively Manufactured Alloys w 2020r. w San Diego (USA) oraz podczas seminarium na Uniwersytecie Lehigh (Materials Science & Engineering Department) w Bethlehem (USA).

**Ważnym rezultatem tych prac jest zastosowanie opracowanej technologii powłok przez firmę AvioAero na łopatkach turbiny niskiego ciśnienia wytwarzanych metodą przyrostową (druk 3D, Additive Manufacturing - Electron Beam Melting) ze stopu TiAl.**

Kontynuując tematykę warstw żaroodpornych na stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych we współpracy z wymienionymi partnerami, wziął znaczący udział w zaprojektowaniu i zbudowaniu prototypowej aparatury do wytwarzania powłok ochronnych z wykorzystaniem metody Closed Hollow Cathode - Physical Vapor Deposition (CHC-PVD) – fizycznego osadzania z fazy gazowej z zamkniętą katodą. Następnie, **postawił tezę, że możliwe jest wytwarzanie powłok, z wykorzystaniem opracowanej metody, o składzie chemicznym z układu Ti-Al-Cr z dodatkiem krzemu i itru, które zwiększą odporność na utlenianie stopów TiAl.** W ramach projektu TiAlMET przyjął odmienne podejście względem dotychczas stosowanych, ponieważ powłoka została osadzona metodą CHC-PVD przy użyciu targetu zawierającego wszystkie pierwiastki (tzw. „compound target”), które miały wchodzić w skład projektowanej powłoki. Wykazał, że po osadzeniu powłoka zawiera wszystkie pierwiastki obecne w źródle (targecie), równomiernie rozmieszczone na jej przekroju, bez widocznej segregacji oraz charakteryzuje się ponad pięciokrotne obniżenie przyrostu masy. **Jako demonstrator technologii powłok TiAlCrYSi metodą CHC-PVD pokrył fragment łopatki turbiny niskiego ciśnienia (LPT) wykonanej ze stopu 48-2-2 TiAl metodą druku 3D (Electron Beam Melting) .** Uzyskane wyniki zaprezentował podczas referatów na konferencjach: *XVII International Conference on Electron Microscopy* (online) w 2020r., *MTS Material Technologies in Silesia* w 2022r. w Wiśle oraz *Turbine Forum (ForumT) 2022: Advanced Coatings and Materials for Turbine Components* w 2022r. w Nicei (Francja).

Następnym tematem badawczym Habilitanta w ramach projektu TiAlMET była analiza możliwości zastosowanie powłok TiAlCrYSi wytwarzanych metodą CHC-PVD jako międzywarstw dla powłokowych barier cieplnych na stopie TiAl 48-2-2. W tej koncepcji, po osadzeniu międzywarstwy oraz po procesie utleniania wstępnego na powierzchni próbek wytworzono zewnętrzną powłokę ceramiczną z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru (YSZ) metodą EB-PVD w German Aerospace Center (DLR) - partnera w projekcie TiAlMET. Wytworzona powłokowa bariera cieplna TBC na stopie TiAl z międzywarstwą



TiAlCrYSi została poddana testowi cyklicznego utleniania, podczas których nie zaobserwowano odwarstwienia zewnętrznej powłoki ceramicznej, co świadczy o doskonałym połączeniu z międzywarstwą. Wyniki te zostały zaprezentowane w publikacji: **R. Swadźba, P-P. Bauer, High Resolution STEM Investigations of TGO formed in TBCs on  $\gamma$ -TiAl with CHC-PVD TiAlCrYSi Bond Coatings, Corrosion Science 200 (2022) 110225 (140 punktów MEiN, Impact Factor 7.72)** oraz w wygłoszonych przez Habilitanta referatach na konferencjach: *Turbine Forum (ForumT) 2022: Advanced Coatings and materials for Turbine Components* w 2022r. w Nicei (Francja) i *MTS Material Technologies in Silesia* w 2022r. w Wiśle, a także podczas sesji posterowej na konferencji *Intermetallics 2021* w Bad Staffelstein (Niemcy), gdzie otrzymał dyplom za najlepszą prezentację posterową.

Powiązany tematycznie kolejnym obszarem należącym do zainteresowań naukowych Habilitanta, są powłoki żaroodporne do zastosowań na metalach i stopach wysokotopliwych, m.in. na niobie i jego stopie C103. Wysoka temperatura topnienia oraz wysokie właściwości mechaniczne przy masie właściwej zbliżonej do masy właściwej stopów niklu decyduje o zainteresowaniu tymi stopami w kierunku zastosowań w silnikach lotniczych i raketowych. **Na podstawie danych literaturowych oraz wstępnych badań Habilitant postawił tezę, że możliwe jest zwiększenie odporności na utlenianie wysokotemperaturowe stopu niobu C103 poprzez zastosowanie dwuwarstwowej powłoki wytworzonej w procesie borowania dyfuzyjnego, a następnie krzemowania dyfuzyjnego w celu otrzymania powłoki na bazie krzemków i borków Nb, które charakteryzują się bardzo wysoką temperaturą topnienia (nawet  $>3000^{\circ}\text{C}$ ).** Do wytworzenia powłoki Habilitant zaproponował wykorzystanie metody kontaktowo-gazowej *pack cementation*, w której pokrywany materiał jest w bezpośrednim kontakcie z mieszaniną proszków, zawierającą materiał powłokotwórczy, tj. B4C w przypadku borowania oraz Si w przypadku krzemowania, a także aktywatory halogenkowe. Testy technologiczne wykonano zgodnie z koncepcją Habilitanta na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazał, że możliwe jest wytworzenie powłoki zawierającej zarówno Si jak i B, które w wysokiej temperaturze mogą prowadzić do utworzenia strefy zawierającej związki borokrzemianowe i co najważniejsze powłoki wykazują bardzo dobrą odporność na utlenianie wysokotemperaturowe.

Innym interesującym tematem w pracy badawczej Habilitanta było podjęcie się analiz warstwy wierzchniej łopatek turbin silników lotniczych po eksploatacji. Celem naukowym badań było poznanie zjawisk zachodzących w warstwie wierzchniej łopatek aparatu kierującego silnika lotniczego podczas eksploatacji w warunkach zmiennej temperatury,



ciśnienia, a także w obecności produktów spalania paliwa lotniczego.. Wykorzystał do tego celu metodę skaningowo transmisyjnej mikroskopii elektronowej (STEM). Badania te zrealizował we współpracy z partnerem przemysłowym z Czech – PBS Velka Bites, a ich wyniki przedstawiono w publikacji: *R. Swadźba, B. Mendala, O. Dvořáček, Analytical STEM investigations of nozzle vane surfaces after turbine engine operation, Microscopy and Microanalysis 28 (3) (2021) 1-10 (70 punktów MEiN, Impact Factor 4.099)*. Łopatkę kierującą silnika lotniczego poza komorą spalania stanowią jedną z najbardziej obciążonych mechanicznie i termicznie części silników lotniczych. Poddane analizie łopatkę wykonaną z żarowytrzymałego nadstopu niklu IN713LC. **Habilitant postawił tezę, że mechanizmy degradacji warstwy wierzchniej łopatek zależą od ich usytuowania względem strumienia gazów wylotowych z komory spalania.** Dlatego też badaniom poddał naprzeciwległe powierzchnie łopatek aparatu kierującego, tzn. na powierzchnię grzbietu oraz koryta. Na podstawie przeprowadzonych badań metodą STEM wykazał, że w obszarze koryta łopatkę po eksploatacji silnika lotniczego występują zasadnicze różnice w mikrostrukturze, składzie fazowym oraz chemicznym warstwy tlenkowej i osadów, w porównaniu do grzbietu łopatkę. Uzyskane wyniki dostarczają cennych informacji, niezbędnych w projektowaniu powłok ochronnych dla elementów silników lotniczych.

**Podsumowując, jest to bogaty, różnorodny dorobek naukowy, na podstawie którego można wnioskować z całym przekonaniem, że dr inż. Radosław Swadźba jest dobrze przygotowany do realizacji samodzielnej pracy naukowej. Kierowanie natomiast samodzielnie projektami badawczymi oraz pakietami zadań w projektach, daje gwarancję sprawnego kierowania zespołami badawczymi.**

### **3. Ocena dorobku organizacyjnego i dydaktycznego.**

W zakresie dorobku organizacyjnego dra inż. Radosława Swadźby można wyróżnić następujące działania:

- Pełni funkcję zastępcy Kierownika Zakładu Badań Właściwości i Struktury Materiałów Instytutu Metalurgii Żelaza,
- W roku 2018 kierował przedsięwzięciem technicznym pt. „Dostawa i instalacja wysokorozdzielczego mikroskopu skaningowego elektronowego (SEM) wyposażonego w emiter Schottky’ego FEG oraz detektory analityczne EDS i EBSD.”. W ramach przedsięwzięcia przeprowadził rozeznanie najnowszych trendów na rynku



skaningowych mikroskopów elektronowych oraz metod analitycznych EDS i EBSD oraz odbył wiele wizyt w centrach demonstracyjnych w Polsce, Niemczech, Holandii i Czechach. Nadzorował prace budowlane związane z przystosowaniem pomieszczenia laboratoryjnego do wymagań nowego mikroskopu elektronowego, a następnie jego dostawę i instalację, a także realizację szkoleń dla pracowników Zakładu.

- W roku 2018 zainicjował i pełnił nadzór formalny nad wprowadzeniem Łukasiewicz – Instytutu Metalurgii Żelaza, jako pierwszego z Sieci Badawczej Łukasiewicz, do międzynarodowej sieci badawczej AvioAero (GE) „European Technologies Development Clusters”, zrzeszającej ponad 25 jednostek z Polski, Czech, Włoch i Niemiec.
- Od momentu powstania Sieci Badawczej Łukasiewicz i włączenia do niej Instytutu Metalurgii Żelaza był przedstawicielem IMŻ w Grupie Badawczej Wytwarzanie, a od 1 kwietnia 2020 roku w Grupie Badawczej Inteligentna Mobilność. Do Jego obowiązków należy udział w panelach projektowych wewnętrznych (PPW) oraz zewnętrznych (PPZ), których celem jest przedstawienie odpowiedzi na „Wyzwania” zgłoszone przez jednostki z otoczenia gospodarczego i naukowego.
- Bierze udział w ocenie merytorycznej wniosków o finansowanie badań oraz inwestycji w ramach dotacji celowych Sieci Badawczej Łukasiewicz.
- W roku 2020 był gospodarzem wyzwania Sieci Badawczej Łukasiewicz pt. „TANGO”, dotyczącego przygotowania wniosków o finansowanie badań podstawowych do Narodowego Centrum Nauki (NCN).
- W roku 2021 został włączony do grupy roboczej w ramach Traktatu Północnoatlantyckiego - NATO (North Atlantic Treaty Organization) o nazwie „ET 215: Thermal and Environmental Barrier Coatings for Military Aircraft Engines” Grupa robocza skupia około 20 osób z jednostek badawczych z 6 państw: German Aerospace Center (DLR), National Research Council (NRC) z Kanady, US Department of Defense i US Air Force z USA, oraz Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska i Politechnika Rzeszowska, a także Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza z Polski, reprezentowany przez Habilitanta.
- W toku realizacji projektu TiAlMET finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki dwukrotnie zorganizował seminaria w Instytucie Metalurgii Żelaza, których

uczestniczyli niemieccy partnerzy z German Aerospace Center (DLR) i Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

- W roku 2019 we współpracy z dr Young-Won Kim z USA, dyrektorem firmy Gamteck LLC i specjalistą w dziedzinie stopów TiAl, zorganizował seminarium na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, związane z aktualnymi trendami w dziedzinie stopów na bazie faz międzymetalicznych, a także perspektywami ich rozwoju.

Dr inż. Radosław Swadźba należy do:

- ✓ Polskiego Towarzystwa Mikroskopii Elektronowej (PTMI),
- ✓ European Microscopy Society (EMS),
- ✓ International Federation of Societies for Electron Microscopy (IFSM),
- ✓ Międzynarodowego towarzystwa The Minerals, Metals & Materials Society (TMS).

#### **W zakresie działalności dydaktycznej:**

- W 2018r. odbył semestralny staż dydaktyczny na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach. W ramach stażu przygotował i przeprowadził wykłady, zajęcia laboratoryjne oraz projektowe z przedmiotu „Szybkie prototypowanie” na specjalności technologie materiałów w zakresie skanowania optycznego i druku 3D.
- Pełnił rolę opiekuna stażystów w Instytucie Metalurgii Żelaza z jednostek badawczych: Uniwersytetu Śląskiego z Katowic (styczeń – marzec 2015), Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych z Warszawy (ITWL, kwiecień 2018 - styczeń 2019), Instytutu Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Polskiej Akademii Nauk z Krakowa (IMIM PAN, sierpień 2020 – marzec 2021) oraz Politechniki Śląskiej (listopad 2021 – grudzień 2021 i lipiec 2022 – styczeń 2023).
- Jako opiekun stażystów prowadził szkolenia z zakresu zaawansowanych metod badań mikrostrukturalnych.
- Przeprowadził szkolenia z wykorzystania zaawansowanych metod badań materiałów dla firmy AvioAero (General Electric) z Bielska-Białej w grudniu 2019 roku.
- Jest promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich.

**Reasumując, działalność organizacyjną oraz dydaktyczną dr inż. Radosława Swadźby uważam jako znaczącą.**



### 3. Podsumowanie

W zakresie działalności naukowej głównym obszarem badawczym Habilitanta są powłokowe bariery cieplne (Thermal Barrier Coatings - TBC), które umożliwiają funkcjonowanie krytycznych elementów lotniczych silników turbinowych w znacznie wyższej temperaturze niż pozwalają na to stopy monokrystaliczne bez powłok. W tym obszarze badawczym Habilitant wyróżnił swoje osiągnięcie naukowe, które zatytułował: „**Mikrostruktura i utlenianie wysokotemperaturowe powłok i warstw wytwarzanych na wybranych stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych**”. Egzemplifikacją tego osiągnięcia jest cykl 10 powiązanych tematycznie artykułów naukowych, wśród nich 1 autorski. Są to artykuły opublikowane w czasopiśmie o stosunkowo wysokim wskaźniku oddziaływania (Impact Factor). Sumaryczna wartość tego wskaźnika wynosi **60.487**. Należy podkreślić, że w 8 artykułach dr inż. Radosław Swadźba jest pierwszym współautorem.

W szczególności, badania zogniskował na kształtowaniu mikrostruktury powłokowych barier cieplnych (*Thermal Barrier Coatings - TBC*) oraz wyjaśnienie mechanizmów ich degradacji w warunkach cyklicznych zmian temperatury, stosowanych na żarowytrzymałych nadstopach niklu, stopach na bazie faz międzymetalicznych  $\gamma$ -TiAl oraz stopie niobu C103.

W zakresie tego obszaru badawczego należy podkreślić następujące osiągnięcia Habilitanta:

1. Udowodnił postulowaną przez siebie tezę, że modyfikacja międzywarstw NiCoCrAlY pierwiastkami reaktywnymi (Hf, Zr) umożliwia zwiększenie trwałości powłokowych barier cieplnych na żarowytrzymałych nadstopach niklu.
2. Wykazał, że w wyniku wytworzenia stopu TiAl metodą druku 3D, powodującego powstanie struktury pasmowej – odmiennej niż ma to miejsce w stopie odlewanym, kinetyka utleniania zależna jest od temperatury, tj. w temperaturze 750<sup>0</sup>C kinetyka przebiega zgodnie z prawem logarytmicznym, natomiast w temperaturze 800 i 850<sup>0</sup>C zgodnie z prawem parabolicznym.
3. Udowodnił, że w wyniku wstępnego utleniania (pre-oxidation) w czystym tlenie lub jego mieszaninie z argonem uzyskuje się zwiększenie odporności na cykliczne utlenianie stopów TiAl w temperaturze 900<sup>0</sup>C.
4. Wykazał, że modyfikacja krzemem proszków wykorzystywanych w procesie aluminiowania metodą kontaktowo-gazową (pack cementation) umożliwia uzyskanie

powłok aluminiowych na stopach TiAl o doskonałej odporności na długotrwałe utlenianie wysokotemperaturowe.

5. Opracował podstawy technologii powłok SiAl oraz oddziaływania tych powłok na właściwości stopów TiAl
6. Brał aktywny udział w zaprojektowaniu i zbudowaniu prototypowej aparatury do wytwarzania powłok ochronnych z wykorzystaniem metody Closed Hollow Cathode - Physical Vapor Deposition (CHC-PVD)
7. Wykazał, że możliwe jest wytwarzanie powłok, z wykorzystaniem opracowanej metody Closed Hollow Cathode - Physical Vapor Deposition (CHC-PVD), o składzie chemicznym z układu Ti-Al-Cr z dodatkiem krzemu i itru, które zwiększają odporność na utlenianie stopów TiAl.
8. Jako demonstrator technologii powłok TiAlCrYSi metodą CHC-PVD osadził ją na fragmencie łopatkę turbiny niskiego ciśnienia (LPT) wykonanej ze stopu 48-2-2 TiAl metodą druku 3D (Electron Beam Melting)
9. Wykazał, że możliwe jest zwiększenie odporności na utlenianie wysokotemperaturowe stopu niobu C103 poprzez zastosowanie dwuwarstwowej powłoki wytworzonej w procesie borowania dyfuzyjnego, a następnie krzemowania dyfuzyjnego w celu otrzymania powłoki na bazie krzemków i borków Nb, które charakteryzują się bardzo wysoką temperaturą topnienia (nawet >3000°C).
10. Udowodnił, że mechanizmy degradacji warstwy wierzchniej łopatek zależą od ich usytuowania względem strumienia gazów wylotowych z komory spalania. Uzyskane wyniki dostarczają cennych informacji, niezbędnych w projektowaniu powłok ochronnych dla elementów silników lotniczych.

Wymienione ważniejsze osiągnięcia dr inż. Radosław Swadźba uzyskał między innymi w wyniku współpracy z następującymi jednostkami naukowymi:

- Karlsruhe Institute of Technology (KIT) z Niemiec,
- Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films (Fraunhofer – IST) z Braunschweig (Niemcy),
- Wydziałem Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej w Katowicach,
- German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR) z Kolonii (Niemcy)
- MINES ParisTech (Francja).



oraz następującymi jednostkami przemysłowymi:

- AvioAero (General Electric),
- PBS Velka Bites (Czechy),

Niezależnie, niezbędnym warunkiem uzyskania wymienionych osiągnięć poznawczych oraz technologicznych było opanowanie przez Habilitanta licznego spektrum nowoczesnych, zaawansowanych metod badawczych materiałów z zakresu inżynierii materiałowej, tj.:

- ✓ skaningowej mikroskopii elektronowej SEM,
- ✓ wysokorozdzielczej skaningowo transmisyjnej mikroskopii elektronowej S/TEM,
- ✓ badanie składu chemicznego przy użyciu technik WDS ((ang. Wavelength Dispersive Spectrometry) i EELS (ang. Electron Energy Loss Spectroscopy),
- ✓ dyfrakcji elektronów wtórnie rozproszonych EBSD (ang. Electron Backscatter Diffraction ).

Wyspecjalizował się również w preparatyce metodą Focused Ion Beam (FIB).

Wyniki swoich prac badawczych prezentował między innymi na konferencjach:

- EFC Workshop: "Beyond Single Oxidants", organizowanej przez Instytut Forschungszentrum z Julich we Frankfurcie nad Menem (Niemcy),
- International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF) w San Diego (USA);
- XVII International Conference on Electron Microscopy organizowanej przez Politechnikę Śląską
- Annual Meeting & Exhibition w San Diego (USA),
- Intermetallics 2021 w Bad Staffelstein (Niemcy).

Brał udział w następujących projektach naukowo-badawczych:

- "INNOGEAR – główny wykonawca,
- COPERNIK (program INNOLOT) – główny wykonawca,
- Beethoven II finansowanego z Narodowego Centrum Nauki (NCN) oraz z Niemieckiego Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - kierownik.

**Zaprezentowane powyżej fakty, dotyczące osiągnięć naukowo-badawczych, udziału w projektach badawczych, licznych wystąpieniach na uznanych konferencjach międzynarodowych, bogatej współpracy z międzynarodowymi i krajowymi instytucjami**

naukowymi oraz jednostkami przemysłowymi, pozwalają mi stwierdzić, że zarówno dorobek naukowy jak i aktywność w prezentowaniu wyników badań dr. inż. Radosława Swadźby, zasługuje na wyróżnienie.

#### 4. Wniosek końcowy

Na podstawie analizy dokumentów przedstawionych w postępowaniu habilitacyjnym stwierdzam, że **dr inż. Radosław Swadźba** znacząco powiększył swój dorobek po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Udowodnił, że potrafi organizować działalność naukowo-badawczą na wysokim poziomie. Jego osiągnięciem naukowym jest cykl 10 publikacji powiązanych tematycznie pod wspólnym tytułem: „**Mikrostruktura i utlenianie wysokotemperaturowe powłok i warstw wytwarzanych na wybranych stopach stosowanych na elementy turbin silników lotniczych**”. Wyniki badań zaprezentowane w tych publikacjach są dowodem, że **dr inż. Radosław Swadźba** wniósł istotny wkład w rozwój dyscypliny *inżynieria materiałowa*.

