

Dr inż. Marek Góral
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Załącznik 2A

Autoreferat
przedstawiający opis osiągnięć naukowych
w języku polskim

Rzeszów 30.01.2019

1. Imię i nazwisko

Marek Góral

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Uzyskany tytuł: magister inżynier – specjalność inżynieria materiałowa – 9 listopad 2001 r.

Politechnika Śląska,

Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii

Uzyskany tytuł: doktor nauk technicznych – specjalność inżynieria materiałowa – 4 grudnia 2007 roku

Politechnika Śląska,

Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii

3. Przebieg pracy zawodowej

2002 – 2007 - student studiów doktoranckich, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii,

2008-2009, starszy referent techniczny, Katedra Nauki o Materiałach, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii

2009- 2010, asystent naukowy w Katedrze Nauki o Materiałach, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii

1 września 2010 r – obecnie – adiunkt w Katedrze Nauki o Materiałach na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

4. Osiągnięcie naukowe stanowiące podstawę ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65, poz. 565 z późn. zm.) – stanowiące podstawę ubiegania się o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego – wskazuję monografię autorską:

Tytuł: „*Mikrostruktura i trwałość powłokowych barier cieplnych wytwarzanych w procesach plazmowych w warunkach obniżonego ciśnienia*”

Autor: Marek Góral

Rok wydania: 2018

Wydawnictwo: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej,

ISBN: 978-83-7934-267-9

Recenzenci Prof. dr hab. inż. Marek Hetmańczyk,

wydawniczy: Prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski

Omówienie celu naukowego monografii i osiągniętych wyników

Ciągłe podnoszenie sprawności, a szczególnie wzrost temperatury wlotowej gazów spalinowych do turbiny TET (*Turbine Entry Temperature*) determinuje rozwój nowoczesnych silników lotniczych, w szczególności nowych materiałów stosowanych w ich konstrukcji. Użycie nowych procesów wytwarzania elementów części gorącej silnika lotniczego z nadstopów niklu (m.in. kierunkowej krystalizacji – monokrystalizacji) i modyfikacja ich składu chemicznego zwiększyły ich żarowytrzymałość. Jednocześnie zmniejszyła się ich odporność na korozję wysokotemperaturową. Stąd konieczność wprowadzania warstw i powłok żaroodpornych stanowiących ochronę podłoża nadstopu niklu. Początkowo stosowano dyfuzyjne warstwy aluminidkowe których głównym składnikiem fazowym mikrostruktury są kryształy fazy β -NiAl. Wytwarzane są m.in. w procesach kontaktowo-gazowym, gazowym bezkontaktowym i chemicznego osadzania z fazy gazowej (CVD, *Chemical Vapour Deposition*). Cechują się szczególnie dobrą odpornością w warunkach wysokotemperaturowego utleniania, w trakcie którego na podłożu fazy NiAl tworzą cienką warstwę tlenków wzrastających cieplnie TGO (*Thermally Grown Oxides*) tlenku Al_2O_3 .

Wprowadzone następnie warstwy ochronne na osnowie wieloskładnikowego stopu MCrAlY mają większą trwałość w warunkach korozji siarkowo-tlenowej (*Hot Corrosion*). Warstwy te wytwarzane są w procesach: fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą łuku elektrycznego Arc-PVD lub wiązki elektronów EB-PVD (*Electron Beam Physical Vapour Deposition*). Mogą być również natryskiwane plazmowo w warunkach ciśnienia atmosferycznego APS (*Atmospheric Plasma Spray*) lub ciśnienia obniżonego LPPS (*Low Pressure Plasma Spray*) oraz natryskiwania naddźwiękowego HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*). Analiza danych literaturowych wskazuje, że międzywarstwy metaliczne cechujące się jednocześnie dobrą odpornością na utlenianie wysokotemperaturowe oraz na korozję siarkowo – tlenową można uzyskać przez połączenie procesów natryskiwania cieplnego międzywarstwy MCrAlY i jej dyfuzyjnego aluminiowania.

Obecnie szczególnie efektywnym sposobem ochrony powierzchni elementów części gorącej turbinowego silnika lotniczego jest zastosowanie powłokowych barier cieplnych TBC (*Thermal Barrier Coatings*). Powłoki TBC złożone są zawsze z co najmniej dwóch warstw – zewnętrznej warstwy ceramicznej – najczęściej tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru YSZ (*Yttria Stabilized Zirconia Oxide*) $ZrO_2 \cdot nY_2O_3$ - i wewnętrznej – międzywarstwy metalicznej typu MCrAlY lub dyfuzyjnej warstwy aluminikowej. Wprowadzenie zewnętrznej warstwy ceramicznej umożliwiło efektywne zwiększenie ochrony podłoża nadstopu niklu przed oddziaływaniem strumienia gorących gazów spalinowych.

W technice lotniczej powłokowe bariery cieplne wytwarzane są przede wszystkim w procesie natryskiwania plazmowego w warunkach ciśnienia atmosferycznego APS. Właściwości użytkowe powłok TBC natryskiwanych w tym procesie ograniczają ich zastosowanie wyłącznie do elementów stacjonarnych m.in. aparatów kierujących oraz komory spalania. Elementy wirujące części gorącej silnika lotniczego m.in. łopatki turbiny 1. i 2. stopnia eksploatowane są natomiast w warunkach złożonych obciążeń cieplno-mechanicznych. Wymaganymi właściwościami użytkowymi w warunkach pracy turbiny cechuje się warstwa tlenku YSZ o budowie kolumnowej wytwarzana w procesie EB-PVD. Proces ten stosowany jest przez czołowe światowe wytwórnie silników lotniczych do ochrony powierzchni tylko krytycznych elementów ze względu na wysokie koszty urządzeń (kilkadziesiąt mln. dolarów). Kosztocłoność technologii EB-PVD determinuje poszukiwanie bardziej ekonomicznych procesów wytwarzania warstw ceramicznych o budowie kolumnowej. Aktualne dane literaturowe wskazują jednoznacznie, że największe zainteresowanie dotyczy procesu fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem za

pomocą palnika plazmowego PS-PVD (*Plasma Spray Physical Vapour Deposition*). Proces ten jest nadal na wczesnym etapie rozwoju.

W monografii przedstawiono wyniki własnych badań powłok TBC wytworzonych za pomocą jednego z kilku w świecie półprzemysłowych urządzeń przeznaczonych do prowadzenia procesów LPPS i PS-PVD – LPPS Hybrid firmy Oerlikon-Metco. Determinowało to przeprowadzenie procesów doświadczalnych PS-PVD i ustalenie warunków umożliwiających wytworzenie warstwy o budowie kolumnowej przy uwzględnieniu cech konstrukcyjnych stosowanego urządzenia. Jednocześnie brak w literaturze pełnej charakterystyki powłok TBC wytwarzanych w procesie PS-PVD m.in. w zakresie ich żaroodporności wskazywał również na konieczność jej uzupełnienia.

Na podstawie danych literaturowych i wyników dotychczasowych przeprowadzonych badań własnych sformułowano tezy pracy:

- **Proces PS-PVD realizowany w warunkach obniżonego ciśnienia pozwoli na wytworzenie w powłokowej barierze cieplnej zewnętrznej warstwy ceramicznej tlenku YSZ o budowie kolumnowej.**
- **Dodatkowe aluminowanie międzywarstwy MCrAlY wytworzonej w procesie LPPS zwiększy odporność na utlenianie wysokotemperaturowe powłoki TBC wytworzonej w warunkach obniżonego ciśnienia.**

Dane literaturowe dotyczące procesów natryskiwania plazmowego w warunkach obniżonego ciśnienia międzywarstwy metalicznej MCrAlY i osadzania warstwy ceramicznej w procesie PS-PVD są niepełne. Spowodowało to prowadzenie procesów doświadczalnych w dwóch etapach w których ustalano: w etapie 1. – warunki procesu natryskiwania plazmowego międzywarstwy metalicznej MCrAlY przy obniżonym ciśnieniu (LPPS), a w etapie 2.– warunki procesu PS-PVD umożliwiające wytworzenie warstwy ceramicznej YSZ o budowie kolumnowej. Procesy przeprowadzono za pomocą urządzenia LPPS-Hybrid firmy Oerlikon Metco. Do natryskiwania międzywarstwy metalicznej wybrano stosowany w krajowym przemyśle lotniczym proszek NiCoCrAlY typu AMDRY 365-1, a do osadzania warstwy ceramicznej proszek $ZrO_2 \cdot 7.5\%Y_2O_3$ (YSZ) typu Metco 6700 stosowany w procesie PS-PVD. Przeprowadzono badania morfologii i mikroanalizę składu chemicznego obu proszków oraz dokonano pomiarów właściwości cieplnych.

W doborze warunków natryskiwania w etapie 1 – natryskiwania międzywarstwy metalicznej MCrAlY – przyjęto założenie, że dla spełnienia wymagań technologicznych jej grubość i porowatość powinny wynosić odpowiednio: 100 μm i <1%. Jednocześnie założono w procesie natryskiwania użycie, poza argonem, helu jako dodatkowego gazu

plazmotwórczego. Jako zmienne warunki w procesie natryskiwania przyjęto czas nagrzewania i natryskiwania, natężenie prądu palnika, natężenie przepływu mieszaniny gazów plazmotwórczych Ar/He i natężenie przepływu proszku. Wyniki badań mikroskopowych wykazały, że wytworzona warstwa spełnia przyjęte kryteria dla warunków procesu: natężenia przepływu mieszaniny gazów plazmotwórczych: Ar=85, He=30 dm³/min i natężenia prądu palnika I>1400 A. Stwierdzono, że energia strumienia plazmy dla pozostałych warunków procesu jest niewystarczająca do całkowitego topienia się cząstek metalicznego proszku MCrAlY i skutkuje powstaniem międzywarstwy o dużej porowatości.

Dobre warunki procesów doświadczalnych realizowanych w etapie 2. – osadzania warstwy ceramicznej YSZ w procesie PS-PVD – stanowiły uzupełnienie dostępnych danych literaturowych i przeprowadzonych badań własnych. Jako zmienne warunki procesu PS-PVD przyjęto: ciśnienie w komorze roboczej, natężenie prądu, prędkość obrotową manipulatora, natężenie przepływu proszku oraz skład chemiczny i natężenie przepływu mieszaniny gazów plazmotwórczych. Analiza wyników badań mikroskopowych wytworzonych warstw ceramicznych powłoki TBC wskazuje, że o jej budowie decyduje głównie natężenie przepływu proszku i natężenie prądu palnika. Stwierdzono również wpływ natężenia przepływu i składu chemicznego mieszaniny gazów plazmotwórczych – szczególnie zawartości Ar i He. Na podstawie analizy wyników badań ustalono warunki tworzenia się warstwy ceramicznej tlenku YSZ o budowie kolumnowej. Warstwę o takiej budowie uzyskano dla następujących warunków procesu: natężeniu przepływu proszku od 2 do 10 g/min, natężeniu przepływu mieszaniny gazów plazmotwórczych: Ar=35 dm³/min i He=60 dm³/min, natężeniu prądu palnika min. I= 2200 A i ciśnieniu w komorze roboczej 140÷150 Pa. Przy małym natężeniu przepływu proszku (2 g/min) w procesie nie otrzymano kolumnowych ziaren tlenków YSZ o płaskiej powierzchni. Duża odległość osadzania (1300 mm) w prowadzonych procesach skutkowałą zwiększeniem długości drogi przebywania par tlenku YSZ w strumieniu plazmy i ich wtórnego częściowego skroplenia się. Stwierdzono również, że wprowadzenie dodatkowych gazów plazmotwórczych – H₂ i O₂ nie wpływa na sposób kształtowania mikrostruktury warstwy ceramicznej. Dodatek O₂ do strumienia plazmy przy małym natężeniu przepływu proszku (2 g/min) powoduje łuszczenie się i odpadanie osadzonej warstwy ceramicznej od podłoża.

Dobre warunki wytwarzania metalicznej międzywarstwy MCrAlY i warstwy ceramicznej YSZ stanowiły podstawę opracowanej technologii wytwarzania trójwarstwowej powłokowej bariery cieplnej, w której – zgodnie z przyjętą tezą – wprowadzono dodatkowe aluminiowanie. Warunki procesu niskoaktywnego aluminiowania metodą CVD ustalono na

podstawie wcześniejszych badań własnych: czas – 4 h, temperatura – 1040°C, natężenie przepływu H₂ – 10.5 dm³/min i HCl – 0.4 dm³/min, ciśnienie w retorcie – 15 kPa. Jako warstwę odniesienia przyjęto dwuwarstwową powłokę TBC, w której aluminiowania nie wprowadzono. Na tym etapie badań uwzględniono wpływ materiału podłoża – nadstopu niklu, i jego stanu (przerabiane plastycznie, odlewane w procesie konwencjonalnym lub krystalizacji kierunkowej – monokrystalizacji) na proces tworzenia się i wzrostu kryształów składników fazowych tworzących mikrostrukturę dwu i trójwarstwowej powłoki TBC. Powłoki TBC wytworzono na podłożu nadstopów Rene 80, Inconel 617 i nadstopu monokrystalicznego CMSX-4. Na podstawie badań mikroskopowych i mikroanalizy składu chemicznego nie stwierdzono wpływu materiału podłoża na konstytuowanie się i budowę powłokowych barier cieplnych. Ustalono natomiast, że aluminiowanie wytworzonej międzywarstwy metalicznej MCrAlY na podłożu monokrystalicznego stopu CMSX-4 spowodowało utworzenie strefy SRZ (ang. *Second Reaction Zone*). Co istotne, w międzywarstwie MCrAlY wytworzonej na podłożu nadstopu CMSX-4, której nie poddano aluminiowaniu nie stwierdzono występowania strefy SRZ. Oceny wpływu materiału podłoża i jego stanu na degradację opracowanej powłoki TBC dokonano na podstawie badań mikroskopowych po próbie utleniania izotermicznego w 1100°C w czasie 1000h. Ustalono, że niezależnie od rodzaju materiału podłoża, powstająca w trakcie próby utleniania trójwarstwowej powłoki TBC warstwa tlenków TGO jest dwukrotnie cieńsza od powstającej w konwencjonalnej dwuwarstwowej powłoce TBC i składa się prawdopodobnie wyłącznie z tlenku Al₂O₃. Wskazuje to na większą trwałość trójwarstwowej powłoki TBC, niezależnie od wybranego materiału podłoża. Dlatego w dalszych badaniach ograniczono materiał podłoża do odlewniczego nadstopu niklu MAR M247, stosowanego przede wszystkim na elementy części gorącej silników lotniczych.

Na podstawie badań mikroskopowych i mikroanalizy składu chemicznego międzywarstwy metalicznej MCrAlY dwuwarstwowej powłoki TBC wytworzonej na tym podłożu ustalono, że jej głównymi składnikami fazowymi mikrostruktury są: roztwór stały γ -Ni i faza β -NiAl. W obszarze granicznym międzywarstwy MCrAlY i ceramicznej YSZ stwierdzono zwiększone stężenie tlenu i aluminium – możliwość powstania warstwy tlenków TGO. Wykazano, że zewnętrzna warstwa ceramiczna ma budowę kolumnową, a jej głównym składnikiem fazowym jest tlenek ZrO₂ w postaci odmian polimorficznych T i M.

Podstawą do opracowania schematu budowy trójwarstwowej powłoki TBC w szczególności – jej międzywarstwy metalicznej były wyniki badań mikroskopowych

i mikroanaliza składu chemicznego. Stwierdzono, że w międzywarstwie metalicznej można wyodrębnić 3 charakterystyczne strefy:

- *zewnętrzną* – dodatkową strefą dyfuzyjną zawierającą ok. 35÷40 % at. Al, złożoną głównie z kryształów faz: β -NiAl i w obszarze granicznym z warstwą ceramiczną - γ' -Ni₃Al,
- *środkową* – cechującą się zawartością Al – ok. 30÷35% at. i Cr - ok. 12 % at. i dużą porowatością spowodowaną efektem Kirkendalla (m.in. na skutek dordzeniowej dyfuzji aluminium i odrdzeniowej dyfuzji składników stopu MCrAlY w trakcie aluminiowania wytworzonej międzywarstwy metalicznej);
- *wewnętrzną* o małej porowatości i mniejszej zawartości Al złożoną z ziaren równoosiowych.

Na podstawie badań z zastosowaniem metod transmisyjnej mikroskopii elektronowej wytworzonych powłok TBC potwierdzono utworzenie się pomiędzy warstwą ceramiczną YSZ i międzywarstwą metaliczną warstwy tlenków TGO złożonej z odmiany polimorficznej tlenku θ -Al₂O₃ już w trakcie osadzania zewnętrznej warstwy ceramicznej w procesie PS-PVD. Analiza rozmieszczenia O i Al na przekroju powierzchni trójwarstwowej powłoki TBC wskazuje, że cienka warstewka tlenku Al₂O₃ może tworzyć się również wzdłuż granicy strefy zewnętrznej złożonej z kryształów fazy β -NiAl i jej strefy środkowej. Analiza składu fazowego pozwoliła stwierdzić natomiast występowanie w mikrostrukturze zewnętrznej warstwy ceramicznej dwóch odmian polimorficznych tlenku ZrO₂: T (struktura tetragonalna) oraz M (struktura jednoskośna).

Wyniki badań mikroskopowych oraz analizy składu chemicznego i fazowego stanowiły podstawę do ustalenia głównych stadiów procesu tworzenia się trójwarstwowej powłokowej bariery cieplnej.

– stadium 1. – międzywarstwa metaliczna złożona z wieloskładnikowego stopu MCrAlY tworzy się na podłożu nadstopu niklu przez osadzanie stopionych w strumieniu plazmy jego cząstek proszku w warunkach obniżonego ciśnienia (proces LPPS). Powstaje ciągła i jednorodna warstwa o grubości 80 μ m i małej porowatości <1%.

– stadium 2.– w strefie zewnętrznej na podłożu międzywarstwy MCrAlY w wyniku dyfuzyjnego niskoaktywnego aluminiowania międzywarstwy metalicznej metodą CVD tworzą się kryształy fazy β -NiAl, jednocześnie poniżej tej strefy międzywarstwy pojawiają się liczne pory (skutek efektu Kirkendalla),

– stadium 3. – zewnętrzna warstwa ceramiczna o budowie kolumnowej YSZ jest osadzana w procesie PS-PVD na podłożu aluminikowej strefy dyfuzyjnej międzywarstwy metalicznej

– kryształów fazy β -NiAl. Jednocześnie powstaje cienka warstwa tlenków TGO złożona z tlenku Al_2O_3

Badania mikroskopowe po próbie utleniania cyklicznego (35 cykli/ 23h, temperatura próby 1100°C) były podstawą oceny trwałości zarówno dwu- jak i opracowanej trójwarstwowej powłokowej bariery cieplnej. W konwencjonalnej dwuwarstwowej powłoce TBC w trakcie próby utleniania cyklicznego tworzy się nieciągła i rozwarstwiona warstwa tlenków TGO o grubości $>30\ \mu\text{m}$. Jednocześnie w jej międzywarstwie metalicznej obserwuje się produkty utleniania wewnętrznego. Stwierdzono na podstawie badań mikroskopowych, że jej głównym składnikiem jest tlenek α - Al_2O_3 . Występują w niej również kryształy granatu itrowo-aluminiowego (YAG).

Wykazano również, że w mikrostrukturze trójwarstwowej powłoki TBC, po próbie utleniania cyklicznego powstaje warstwa tlenków TGO o mniejszej grubości ok. $20\ \mu\text{m}$ i zwartej budowie – brak rozwarstwienia. Nie obserwowano również występowania produktów utleniania wewnętrznego. Świadczy to o jej większej trwałości w warunkach próby. Głównym składnikiem fazowym mikrostruktury powstałej warstwy TGO jest odmiana polimorficzna tlenku α - Al_2O_3 . Stwierdzono również że głównymi składnikami fazowymi międzywarstwy metalicznej po próbie utleniania cyklicznego są kryształy fazy γ -Ni i γ' -Ni₃Al.

Analiza uzyskanych wyników badań mikroskopowych trójwarstwowej powłoki TBC po próbie utleniania izotermicznego w 1100°C w czasie 1000h wskazują na jej większą trwałość. Obserwowana większa degradacja dwuwarstwowej powłoki TBC wynikała z powstania warstwy tlenków TGO o większej grubości złożonej nie tylko z tlenku Al_2O_3 , ale również prawdopodobnie innych tlenków i spineli składników podłoża m.in. Cr, Co. Jednocześnie stwierdzono, że produkty utleniania występują na większej głębokości międzywarstwy dodatkowo silnie zubożonej w aluminium. Na podstawie mikroanalizy składu chemicznego warstwy tlenków TGO powstałej w trójwarstwowej powłoce TBC przypuszczać można, że jest ona złożona prawie wyłącznie z tlenku Al_2O_3 . Poniżej warstwy tlenków TGO powstały kryształy faz NiAl i Ni₃Al, stwarzających warunki termodynamiczne dla dalszego tworzenia się tlenku Al_2O_3 .

Stwierdzono, że wprowadzenie dodatkowej warstwy złożonej z kryształów fazy NiAl skutkuje powstaniem w trakcie utleniania cenniejszej, zwartej warstwy TGO złożonej głównie z tlenku Al_2O_3 i hamującej degradację powłoki TBC. Powstająca warstwa tlenków TGO stanowi dobrą ochronę trójwarstwowej powłoki TBC w warunkach utleniania wysokotemperaturowego.

W podsumowaniu wyników badań przedstawionych w monografii stwierdzono, że zastosowanie procesów plazmowych w warunkach obniżonego ciśnienia pozwala na wytworzenie powłokowych barier cieplnych o większej trwałości w warunkach utleniania wysokotemperaturowego.

Opracowaną technologię trójwarstwowych powłok TBC charakteryzują dwa procesy jej wytwarzania przy obniżonym ciśnieniu – konwencjonalne natryskiwanie plazmowe – LPPS oraz nowy proces – osadzanie z fazy gazowej – PS-PVD. Dobór warunków procesów, na podstawie analizy uzyskanych wyników badań, umożliwił wytworzenie międzywarstwy metalicznej MCrAlY praktycznie pozbawionej tlenków i małej porowatości. Jednocześnie obniżenie ciśnienia w procesie PS-PVD stanowiło jeden z głównych czynników determinujących kształtowanie budowy kolumnowej zewnętrznej warstwy ceramicznej YSZ powłokowej bariery cieplnej.

Wprowadzenie do badań metod transmisyjnej mikroskopii elektronowej umożliwiło identyfikację składników fazowych mikrostruktury w poszczególnych warstwach wytworzonych powłok TBC i stanowiło uzupełnienie dostępnych danych literaturowych. Wykazano występowanie odmian polimorficznych tlenku ZrO_2 - T i M w zewnętrznej warstwie ceramicznej. W mikrostrukturze międzywarstwy metalicznej dwuwarstwowej powłoki TBC stwierdzono obecność kryształów faz β -NiAl i γ -Ni, a w międzywarstwie trójwarstwowej powłoki TBC – faz β -NiAl i γ' -Ni₃Al. Ustalono również że tworzenie się warstwy tlenków TGO złożonej z tlenku Al_2O_3 rozpoczyna się już w trakcie procesu PS-PVD – osadzania warstwy ceramicznej.

Wykazano, że wprowadzenie dodatkowego aluminiowania międzywarstwy metalicznej skutkuje powstaniem warstwy złożonej z kryształów fazy β -NiAl w trójwarstwowej powłoce TBC. W trakcie próby utleniania cyklicznego i izotermicznego na powierzchni międzywarstwy metalicznej powstawała cienka, zwarta o dobrej przyczepności warstwa tlenków TGO złożona ze stabilnej odmiany polimorficznej tlenku α - Al_2O_3 . Analiza uzyskanych wyników wskazuje wyraźny wpływ warstwy złożonej z fazy β -NiAl na zwiększenie trwałości powłok TBC z międzywarstwą metaliczną MCrAlY. Mniejsza odporność na utlenianie konwencjonalnej dwuwarstwowej powłoki TBC spowodowana jest m.in. obecnością produktów utleniania wewnętrznego, rozwarstwieniem warstwy tlenków TGO zawierającej prawdopodobnie – poza tlenkiem Al_2O_3 także m.in. tlenki i spinele Cr i Co.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

5.1. Działalność naukowo-badawcza prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

Jednolite studia magisterskie na kierunku Inżynieria Materiałowa ukończyłem w 2001 r. na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej. W 2002 r. rozpocząłem studia doktoranckie. Moje zainteresowania naukowe dotyczyły głównie procesów wytwarzania dyfuzyjnych warstw aluminidkowych oraz poprawy ich trwałości w warunkach utleniania wysokotemperaturowego. Istotnym aspektem prowadzonych badań było ich praktycznie zastosowanie w technice lotniczej. Było to skutkiem realizacji wspólnych projektów celowych z firmą WSK PZL Rzeszów – czołowego producenta silników lotniczych w Polsce. Zagadnienia podejmowane w realizowanych projektach, w których byłem wykonawcą, obejmowały m.in. wdrożenie do produkcji aluminowania gazowego jako zamiennika metody kontaktowo-gazowej, wytwarzania warstw aluminidkowych modyfikowanych platyną oraz procesów regeneracji elementów silników lotniczych z warstwami aluminidkowymi i powłokami TBC. Równocześnie uczestniczyłem w badaniach naukowych dotyczących warstw aluminidkowych modyfikowanych Hf wytwarzanych w procesie PVD.

W czasie studiów doktoranckich w obszarze moich zainteresowań badawczych znalazły się metody zwiększania trwałości stopów tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej γ -TiAl w warunkach utleniania wysokotemperaturowego. Nawiązanie współpracy z firmą Mitsubishi Heavy Industries umożliwiła rozpoczęcie badań nad opracowaniem procesu aluminowania zawiesinowego stopu Ti46Al7Nb stosowanego w przemyśle motoryzacyjnym. Wyniki badań prowadzonych w tym zakresie były podstawą do przygotowania mojej rozprawy doktorskiej pt. „Oddziaływanie krzemu na strukturę i właściwości dyfuzyjnych warstw aluminidkowych uzyskanych metodą zawiesinową na stopie Ti46Al7Nb”. Stopień naukowy doktora nauk technicznych w specjalności inżynieria materiałowa uzyskałem w roku 2007.

5.2 Działalność naukowo-badawcza prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych skoncentrowałem się na 3 głównych zagadnieniach naukowo-badawczych:

1. Dyfuzyjnych warstw aluminidkowych zwiększających żaroodporność stopów tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej γ -TiAl.
2. Modyfikacji dyfuzyjnych warstw aluminidkowych stosowanych do ochrony podłoża nadstopów niklu.
3. Zastosowania procesów natryskiwania plazmowego APS i PS-PVD do wytwarzania powłokowych barier cieplnych zwiększających żaroodporność podłoża nadstopów niklu.

Kontynuowałem badania związane z opracowaniem procesów aluminiowania stopów na osnowie fazy międzymetalicznej γ -TiAl. Dotyczyły one charakterystyki min. opracowanej metody zawiesinowej – publikacja: Goral M., Swadzba L., Moskal G., Hetmanczyk M., Tetsui T., *Si-modified aluminate coatings deposited on Ti46Al7Nb alloy by slurry method*, *Intermetallics* 17 (2009) 11, 965-967. Prowadziłem badania nad procesem aluminiowania metodą gazową bezkontaktową (*Gas Phase Aluminumizing*). Ustaliłem wpływ składu chemicznego podłoża na mikrostrukturę warstwy aluminidkowej. Na podłożu stopu Ti46Al7Nb utworzyła się warstwa aluminidkowa złożona ze stref kryształów faz TiAl₃/TiAl₂/TiAl, natomiast na podłożu stopu Ti48Al2CrNb – nie stwierdzono występowania strefy złożonej z fazy TiAl₃. Wyniki te przedstawiłem w publikacji: Goral M., Moskal G., Swadzba L., *Gas phase aluminumizing of TiAl intermetallics*, *Intermetallics*, 17 (2009) 8, 669-671. Dalsze prace dotyczyły możliwości praktycznego zastosowania opracowanej technologii do wytworzenia warstwy aluminidkowej na modelowych łopatkach oraz oceny ich wpływu na żaroodporność. Współpracowałem w tym zakresie z firmą ALD Vacuum Technologies, która dostarczyła próbki materiału podłoża i wykonała modelowe łopatki. Ustalono, że na podłożu łopatek wykonanych ze stopu Ti45Al5Nb powstała warstwa ochronna złożona ze stref kryształów faz TiAl₃/TiAl₂/TiAl. Badania mikroskopowe łopatki poddanej aluminiowaniu po próbie utleniania izotermicznego w temperaturze 950°C wykazały powstanie na jej powierzchni cienkiej warstewki tlenku Al₂O₃ zwiększającej żaroodporność. Wyniki prac przedstawiłem w artykule: Goral M., Swadzba L., Moskal G., Jarczyk G., Aguilar J.: *Diffusion aluminate coatings for TiAl intermetallic turbine blades*, *Intermetallics* 19 (2011) 5, 744-747. Wyniki przedstawione w publikacji stanowiły podstawę realizacji projektu badawczego w ramach projektu Iuventus Plus nr 0154/IP2/2011/71

pt. *"Wpływ parametrów procesu aluminiowania z fazy gazowej na mikrostrukturę i właściwości warstw żaroodpornych wytwarzanych na podłożu stopów tytanu na osnowie fazy międzymetalicznej γ -TiAl"*, którego byłem kierownikiem. Badania, które wykonywałem w ramach tego projektu dotyczyły rozwoju procesu aluminiowania metodą gazową. Skoncentrowałem się w nich na doborze aktywatora halogenkowego decydującego o kinetyce wzrostu warstwy, a wyniki opublikowałem m.in. w artykule: Dychton K., Przeliorz R., Goral M., Sieniawski J.: *Thermal Analysis of halide activator used in aluminizing of TiAl intermetallics*, Key Engineering Materials, 592-593 (2014), 473-476. Jednocześnie dokonałem analizy porównawczej składu fazowego oraz morfologii mikrostruktury warstw aluminidkowych wytworzonych innymi metodami m.in. kontaktowo-gazową. W prowadzonych badaniach po raz pierwszy na podłożu stopu na osnowie fazy międzymetalicznej TiAl uzyskałem warstwę aluminidkową metodą CVD.

Drugi obszar prac naukowo-badawczych, które prowadziłem obejmował zagadnienie warstw aluminidkowych wytwarzanych metodą CVD. Początkowo realizowałem badania nad ustaleniem wpływu warunków procesu na kinetykę wzrostu warstwy aluminidkowej. Jednocześnie prowadziłem prace dotyczące modyfikacji warstw aluminidkowych dodatkiem cyrkonu i ich zastosowaniem do ochrony powierzchni łopatek turbiny 1-go stopnia turbiny silnika lotniczego. Ustaliłem warunki procesu cyrkono-aluminiowania metodą CVD łopatek turbiny silnika lotniczego PZL-10W - publikacja: Goral M., Pytel M., Filip R., Sieniawski J., *„The influence of turbine blade geometry and process parameters on the structure of Zr modified aluminide coatings deposited by CVD method on the ZS6K nickel superalloy”*, Solid State Phenomena, 197 (2013), 58-63. Realizowałem procesy doświadczalne wieloetapowego aluminiowania i cyrkono-aluminiowania na podłożu nadstopu MAR M200. Tematyka prowadzonych badań dotyczyła również zagadnienia kinetyki przemian fazowych zachodzących w trakcie wyżarzania warstw aluminidkowych w tym modyfikowanych Zr. Prace te realizowałem m.in. w ramach zadania ZB-10 projektu kluczowego PK AERO Nr POIG.0101.02-00-015/08, *„Nowoczesne technologie materiałowe. stosowane w przemyśle lotniczym”*; Uzyskane wyniki były podstawą do ukierunkowania moich badań na jednoczesną modyfikację warstw aluminidkowych dwoma pierwiastkami m.in. palladem i cyrkonem. Opracowaną warstwę aluminidkową modyfikowaną Pd i Zr zastosowano jako międzywarstwę w powłokowej barierze cieplnej w której zewnętrzną warstwę ceramiczną wytworzono w procesie PS-PVD. Wyniki badań stały się podstawą pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Pytla, w której pełniłem funkcję promotora pomocniczego. Wyniki badań były

również podstawą uzyskania patentu krajowego nr 230311 pt. „Modyfikowana warstwa aluminiowa” w roku 2018.

Prowadziłem także badania dotyczące zastosowania procesów natryskiwania plazmowego APS i LPPS, a także procesu osadzania z fazy gazowej PS-PVD do wytwarzania powłokowych barier cieplnych. Początkowo, we współpracy z PZL-WSK Rzeszów SA (obecnie Pratt Whitney Rzeszów) opracowałem warunki wytwarzania międzywarstwy metalicznej MCrAlY w procesie natryskiwania plazmowego APS, a następnie jej aluminiowania metodą gazową. W badaniach tych wykazałem możliwość uzyskania warstwy złożonej z kryształów fazy NiAl i wytworzeniu na jej podłożu warstwy ceramicznej YSZ w procesie APS – publikacja: Goral M., Dudek S., Filip R., Sieniawski J., „*Microstructure of Thermal Barrier Coatings (TBC's) obtained by using plasma spraying and VPA methods*”, Materials Science Forum, 706-709 (2012), 2412-2417. Dalsze moje prace dotyczyły rozwoju procesów plazmowych w warunkach obniżonego ciśnienia. Ze względu na brak dostępnych danych literaturowych oraz wyposażenie w unikatowe urządzenie LPPS-Hybrid prowadziłem badania eksperymentalne w celu ustalenia wpływu warunków natryskiwania plazmowego w procesie LPPS na grubość i porowatość międzywarstwy metalicznej NiCoCrAlY. W realizowanych procesach natryskiwania po raz pierwszy wprowadziłem hel jako dodatkowy gaz plazmotwórczy zamiast powszechnie stosowanego wodoru. Jednocześnie realizowałem procesy doświadczalne mające na celu ustalenie wpływu warunków procesu osadzania tlenku YSZ w procesie PS-PVD na mikrostrukturę warstwy ceramicznej. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na ustalenie wstępnego zakresu wartości parametrów procesu PS-PVD (natężenie prądu palnika, skład i natężenie przepływu mieszaniny gazów plazmotwórczych, natężenia przepływu proszku oraz ciśnienia w komorze roboczej) pozwalający na uzyskanie warstwy ceramicznej tlenku YSZ o budowie kolumnowej – publikacja: Goral M., Kotowski S., Sieniawski J.,: *The technology of plasma spray physical vapour deposition*, High Temperature Materials and Processes, 32 (2013)1, 33-39. Na podstawie analizy wyników badań opracowałem koncepcję powłokowej bariery cieplnej o budowie trójwarstwowej, w której międzywarstwa metaliczna NiCoCrAlY była natryskiwana w warunkach obniżonego ciśnienia – proces LPPS, a następnie poddawana dodatkowemu aluminiowaniu. Przyjęto założenie, że jej zewnętrzna warstwa ceramiczna złożona z tlenku YSZ o budowie kolumnowej będzie osadzona w procesie PS-PVD. Koncepcję tą zweryfikowałem w zrealizowanym projekcie badawczym finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki pt., *"Wpływ czynników technologicznych i mikrostruktury na właściwości wielowarstwowych powłokowych barier cieplnych wytwarzanych metodą*

natryskiwania plazmowego pod obniżonym ciśnieniem LPPS Thin Film", którego byłem kierownikiem. Zgodnie z przyjętym założeniem wytworzono powłoki TBC o budowie trójwarstwowej i dwuwarstwowej – w której nie wprowadzono dodatkowego aluminium. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań wykazałem, że dodatkowe aluminiowanie skutkuje powstaniem dodatkowej warstwy o dużej zawartości Al – złożonej z kryształów fazy NiAl. Na podstawie wyników badań mikroskopowych trójwarstwowej powłoki TBC, po próbie utleniania izotermicznego ustaliłem, że wytworzona warstwa NiAl zwiększa jej żaroodporność. Wynika ona z tworzenia na powierzchni kryształów fazy NiAl w trakcie utleniania wysokotemperaturowego cienkiej warstwy tlenków TGO złożonej z tlenku Al_2O_3 . Dwuwarstwowa powłoka TBC cechowała się gorszą żaroodpornością – stwierdzono obecność produktów utleniania wewnętrznego w międzywarstwie i rozwarstwienie warstwy tlenków TGO o większej grubości. Jednocześnie obserwowano występowanie efektu Kirkendalla w międzywarstwie trójwarstwowej powłoki TBC – występowanie porów, które zanikały następnie w trakcie utleniania. Powłoki TBC wytwarzano na podłożu 3 gatunków nadstopów niklu o różnej mikrostrukturze i stanie: Inconel 625 – przerabiany plastycznie, Rene 80 – odlewany konwencjonalnie, CMSX-4 – monokrystaliczny. Na podstawie wyników badań ustaliłem, że rodzaj materiału podłoża – nadstopu niklu nie wpływa na proces tworzenia się mikrostrukturę powłokowych barier cieplnych ani na ich degradację w warunkach utleniania izotermicznego.

Kolejny etap moich badań dotyczył określenia zjawisk zachodzących w trakcie konstituowania się warstwy ceramicznej o budowie kolumnowej w procesie PS-PVD. Badania realizowałem w projekcie realizowanym w ramach programu SONATA pt. „*Charakterystyka zjawisk zachodzących w procesie natryskiwania plazmowego w warunkach odparowania cząstek proszku oraz ich wpływ na mikrostrukturę warstwy ceramicznej powłokowej bariery cieplnej*” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki, którego byłem kierownikiem. W celu pełniejszej charakterystyki zjawisk zachodzących w trakcie procesu PS-PVD opracowano metodykę analizy składu chemicznego mieszaniny gazów na przekroju strumienia plazmy z zastosowaniem metody optycznej spektroskopii emisyjnej OES (*Optical Emission Spectroscopy*). Jednocześnie w szerszym zakresie zrealizowałem procesy doświadczalne i ustaliłem graniczne warunki procesu PS-PVD determinujące wytworzenie warstwy ceramicznej o budowie kolumnowej w procesie PS-PVD – publikacja . Rezultaty badań przedstawiłem w artykule: Goral M., Kotowski S., Nowotnik, A., Pytel M., Drajewicz M., Sieniawski, J., „*PS-PVD deposition of thermal barrier coatings*”, *Surface and Coatings Technology*, 237 (2013), 51-55 i prezentowałem na międzynarodowej konferencji

ICMCTF (The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films (ICMCTF), San Diego, USA w roku 2013. Innym zagadnieniem badawczym które podjąłem w tym projekcie było ustalenie wpływu dodatkowych gazów plazmotwórczych – tlenu, wodoru i azotu na morfologię mikrostruktury warstwy ceramicznej. Stwierdzono, że dodatek H_2 i O_2 nie wpływa w istotny sposób na morfologię warstwy ceramicznej. Wprowadzenie natomiast N_2 do strumienia plazmy złożonego z argonu uniemożliwia uzyskanie warstwy ceramicznej o budowie kolumnowej. Poza aspektami naukowymi celem programu SONATA było stworzenie zespołu realizującego badania nie tylko w ramach projektu ale również po jego zakończeniu. Cel ten osiągnąłem, a w dalszej perspektywie zainteresowania badawcze utworzonego zespołu badawczego objęły inne procesy natryskiwania cieplnego m.in. plazmowego APS i naddźwiękowego – HVOF.

Rezultaty projektów naukowych oraz utworzenie zespołu badawczego było przesłanką do kontynuowania badań w kierunku ich praktycznego zastosowania w przemyśle lotniczym. Cel ten realizowałem wraz z zespołem badawczym w zadaniu badawczym (WP9) pt. „*Rozwój nowych żaroodpornych powłok ochronnych elementów turbiny*” prowadzonego w ramach projektu INNOLOT/I/7/NCBR/2013 „*Zaawansowane techniki wytwarzania zespołu turbiny napędowej*”. Badania dotyczyły dwóch zasadniczych zagadnień: technologii nowych modyfikowanych warstw aluminidkowych dla łopatek 1-go stopnia turbiny i powłokowych barier cieplnych dla aparatów kierujących turbiny sprężarki o budowie kolumnowej. Badania nad warstwami aluminidkowymi obejmowały m.in. wykonanie analizy porównawczej morfologii ich mikrostruktury, składu chemicznego oraz ocenę żaroodporności warstwy aluminidkowych wytworzonych w procesach z użyciem różnych metod m.in. zawiesinowej, kontaktowo-gazowej, gazowej bezkontaktowej i CVD. Jednocześnie analizę porównawczą właściwości użytkowych warstw aluminidkowych rozszerzono o warstwy chromowe oraz aluminidkowe modyfikowane m.in. krzemem i cyrkonem. Ustalono, na ich podstawie, że najlepszą żaroodpornością cechują się warstwy modyfikowane Zr wytworzone metodą CVD. Stąd dalsze prace miały na celu opracowanie warstw aluminidkowych modyfikowanych innymi pierwiastkami, a docelowo – wykonanie próby wytwarzania w warunkach półprzemysłowych co zrealizowano na powierzchni łopatek turbiny silnika PZL-10W. Podstawą do wykonania procesów wytwarzania nowych powłok TBC dla aparatów kierujących silnika lotniczego była opracowana wcześniej koncepcja trójwarstwowych powłokowych barier cieplnych. Międzywarstwę metaliczną NiCoCrAlY tej powłoki natryskiwano plazmowo w warunkach obniżonego ciśnienia (LPPS), a następnie aluminiowano metodą CVD. Warstwę ceramiczną o budowie kolumnowej osadzono

natomiast w procesie PS-PVD. Po badaniach mikroskopowych, analizie składu chemicznego i fazowego powłok TBC przeprowadzono próby utleniania cyklicznego i izotermicznego. Na podstawie analizy wyników badań opracowałem technologię trójwarstwowych powłokowych barier cieplnych, które następnie wytworzono na pojedynczych łopatkach kierujących. Ostatecznie powłokę TBC wytworzono w warunkach półprzemysłowych na powierzchni roboczej łopatek integralnego aparatu kierującego. Dużym osiągnięciem było wytworzenie po raz pierwszy warstwy ceramicznej o budowie kolumnowej na powierzchni dużego elementu – aparatu kierującego silnika PZL-10 W stanowiącego demonstrator technologii.

Obecnie prowadzone przeze mnie prace badawcze dotyczą nowych zastosowań procesu PS-PVD. We współpracy z Uniwersytetem Śląskim realizuję badania nad wytwarzaniem warstw ceramicznych na powierzchni stopów tytanu stosowanych m.in. na implanty. We współpracy z Instytutem Fraunhofera biorę udział w opracowaniu technologii warstw ceramicznych monokrzemianu iterbu natryskiwanych na podłożu kompozytów ceramicznych w procesie LPPS i APS. Badania te miały na celu opracowanie nowych materiałów i powłok dla kolejnej generacji silników lotniczych.

Szersze możliwości zespołu badawczego w zakresie natryskiwania plazmowego i naddźwiękowego są przesłanką do opracowywania m.in. nowych technologii wytwarzania warstw ceramicznych w procesach natryskiwania plazmowego zawiesin SPS (Suspension Plasma Spray) i po raz pierwszy w świecie – proszków o rozmiarach submikrometrycznych ziarn tj. $<1\mu\text{m}$. We współpracy z Pratt Whitney Rzeszów brałem udział we wdrożeniu procesu natryskiwania plazmowego APS za pomocą nowej generacji palnika plazmowego typu Triplex Pro 200. Prowadziłem także badania dotyczące natryskiwania drobnoziarnistych proszków metaloceramicznych za pomocą palnika plazmowego A60 oraz charakterystyki ich mikrostruktury i właściwości użytkowych.

Wyniki pracy naukowo-badawczej przedstawiłem w 126 publikacjach naukowych z tego 70 artykułów po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. W wykazie Journal of Citation Reports of Thomson Reuters zamieszczono 9 których jestem współautorem. Pozostałe artykuły opublikowałem w czasopiśmie krajowych i zagranicznych Liczba cytowań publikacji wg bazy Web of Science wynosi 120 (bez autocytowań). Współczynnik Hirscha wg bazy Web of Science $h=5$.

6. Informacje o działalności dydaktycznej

Od roku 2010 po objęciu stanowiska adiunkta w Katedrze Nauki o Materiałach prowadzę wykłady, ćwiczenia oraz laboratoria dla studentów studiów stacjonarnych i niestacjonarnych Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa. Na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn prowadziłem wykłady i laboratoria z przedmiotu *Materiały konstrukcyjne i podstawy obróbki cieplnej* oraz laboratoria z przedmiotu *Zaawansowane materiały inżynierskie*. Na kierunku Mechatronika oraz Transport prowadziłem laboratoria z przedmiotu *Nauka o Materiałach*. Na kierunku Inżynieria Materiałowa prowadziłem w ramach przedmiotu *Technologie procesów materiałowych* zajęcia laboratoryjne i wykłady z zakresu: *Obróbka cieplna i cieplno-chemiczna* oraz *Topienie i krystalizacja*. Jednocześnie prowadzę wykłady i laboratoria z przedmiotu *Wytwarzanie warstw żaroodpornych i żarowytrzymałych, Zaawansowane procesy wytwarzania warstw wierzchnich*, a także *Metody badań materiałów i warstw wierzchnich*

Pod moim kierunkiem zostały zrealizowane 23 prace inżynierskie i 10 magisterskich. Jestem również członkiem Komisji Egzaminu Dyplomowego Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa na Kierunku Inżynieria Materiałowa.

Byłem promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr inż. Macieja Pytla „*Wpływ warstwy tlenku Al_2O_3 wytworzonej na podłożu międzywarstwy aluminikowej na właściwości powłokowych barier cieplnych stosowanych na elementy silników lotniczych*” która została obroniona w roku 2015.

7. Informacje o działalności organizacyjnej

W ramach działalności organizacyjnej brałem udział w pracach związanych z realizacją rozbudowy Uczelnianym Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego LBMPL. Koordynowałem instalację urządzeń do natryskiwania plazmowego w warunkach obniżonego ciśnienia LPPS-Hybrid, a także systemów do natryskiwania cieplnego APS i HVOF. Ponadto ukończyłem szkolenie w zakresie obsługi urządzenia LPPS-Hybrid w Szwajcarii w roku 2010. Obecnie koordynuję i planuję prace serwisowe oraz zakupy części eksploatacyjnych do tych urządzeń zapewniających ich pełną sprawność.

W roku 2011 organizowałem Studenckie Koło Inżynierii Materiałowej „AMSA”. Do roku 2017 byłem jednym z opiekunów tego koła.

Od roku akademickiego 2017/2018 objąłem funkcje opiekuna i kierownika praktyk studenckich na kierunku inżynieria materiałowa.

Nawiązałem również współpracę z firmami zrzeszonymi w stowarzyszeniu Stowarzyszenie Grupy Przedsiębiorców Przemysłu Lotniczego „Dolina Lotnicza. Odbyłem 3-miesięczny staż w firmie Vac Aero Polska (obecnie MB Aerospace) w ramach programu Nauka-Staż-Gospodarka.

8. Współpraca międzynarodowa

Współpracowałem z organizacją IASTE w zakresie staży dla studentów realizowanych na Politechnice Rzeszowskiej. Jednocześnie w ramach programu Erasmus w roku 2015 odbyłem wyjazd do Uniwersytetu w Aveiro gdzie przeprowadziłem wykłady dotyczące procesów natryskiwania cieplnego i inżynierii powierzchni. W ramach współpracy z tą uczelnią powstała publikacja: Szymański K., Góral M., Kubaszek T., Monteiro P.C., *Microstructure of TBC Coatings Deposited by HVAF and PS-PVD Methods*, *Solid State Phenomena*, 227 (2015), 373-376.

Jestem recenzentem publikacji w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym w tym z bazy m.in. Journal of Citation Reports of Thomson Reuters m.in. *Surface and Coatings Technology*, *MRS Advances*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, *Vacuum*, *Journal of the European Ceramic Society*.

9. Tabelaiczne zestawienie dorobku

Wyszczególnienie	Liczba		
	Przed doktorem	Po doktoracie	Suma
Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych zawartych w bazie Journal Citation Reports z IF	0	9	9
Autorstwo lub współautorstwo w pozostałych czasopismach krajowych i zagranicznych	15	60	75
Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w materiałach konferencyjnych	33	0	33
Autorstwo lub współautorstwo w rozdziałach monografii	0	8	8
Autorstwo lub współautorstwo monografii	0	1	1
Patenty	0	1	1
Podsumowanie: publikacje, monografie, materiały konferencyjne i patenty	56	71	127
Podsumowanie – liczba pkt MNiSW z r. wyd.	66	506	572
Udział w konferencjach naukowych			
Referaty wygłoszone na konferencjach	15	7	22
Komunikaty przedstawione na konferencjach - postery	9	18	27
Podsumowanie konferencje	24	25	49
Udział w realizacji projektów naukowo-badawczych			
Kierownik projektów/zadań	0	4	4
Projekty KBN/MNiSW/NCN/NCBR	9	8	17
Projekty UE-Cornet	0	1	4
Projekty/ekspertyzy dla przemysłu	1	3	4
Podsumowanie – liczba projektów	1	19	25
Recenzje			
Recenzowanie projektów badawczych	0	1	1
Recenzje artykułów publikowanych w czasopismach naukowych	0	19	19
Podsumowanie recenzje	0	20	20
Wskaźniki oceny dorobku naukowego			
Baza	Web of Science		Scopus
Indeks Hirscha*	5		6
Liczba cytowań*	120		184
Liczba artykułów	23		45

*bez autocytowań habilitanta

10. Informacja o wypełnieniu kryterium oceny przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora habilitowanego

Kryterium	Wypełnienie kryterium	Liczba
Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports	Tak	9
Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	Tak	2
Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe	Tak	1
Monografie lub rozdziały w monografiach	Tak	9
Publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych i krajowych oraz materiałach konferencyjnych	Tak	108
Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych	Tak	4
Sumaryczny Impact Factor wg listy Journal Citation Reports (JCR)	12.408	
Liczba cytowań publikacji wg bazy Web of Science (WoS)	120	
Indeks Hirscha wg bazy Web of Science	5	
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	Tak	25
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną	Tak	2
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	Tak	22
Uczestnictwo w programach europejskich oraz innych programach międzynarodowych i krajowych	Tak	1
Aktywny udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	Tak	27
Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	Tak	1
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	Tak	1
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	Tak	2
Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami	Tak	1
Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	Tak	4
Opieka naukowa nad studentami (promotorstwo prac magisterskich, inżynierskich, projektów inżynierskich)	Tak	33
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	Tak	1
Staż w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	Tak	1
Wykonane ekspertyzy na zamówienie	Tak	3
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	Tak	1
Recenzowanie projektów międzynarodowych i krajowych	Tak	1
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	Tak	19