

Załącznik nr 3
do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
Autoreferat w języku polskim

1. Imię i Nazwisko

LESZEK ŁATKA

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne - z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

09.2014 r.: kurs Dydaktyka Szkoły Wyższej na Politechnice Wrocławskiej.

11.2012 r.: dr inż. nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn, praca obroniona w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, temat pracy: *„Badania właściwości warstw natryskiwanych plazmowo z zawieszin proszków ceramicznych”*.

Równocześnie stopień doktora nauk technicznych przyznany w ramach umowy co-tutelle przez Uniwersytet Lille 1 (stopień doktora nauk technicznych na terenie Republiki Francuskiej)

04.2008 r.: mgr inż. nauk technicznych, absolwent Indywidualnego Toku Studiów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej (dwie specjalności), tematy prac magisterskich:

„Projekt mikropompy zębatej”

„Możliwości wykorzystania fal ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych punktowo elementów z wybranymi powłokami ochronnymi”

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 10.2013 - obecnie *Miejsce zatrudnienia:* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny
Sposób zatrudnienia: umowa o pracę na czas określony na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego
Zakres pracy: badania naukowe, dydaktyka (różne formy zajęć), prace dyplomowe, organizacja (współpraca przy projektach krajowych, przygotowanie propozycji projektowych, zarządzanie projektami, organizacja konferencji naukowych w Katedrze itp.)
- 10.2012 - 09.2013 *Miejsce zatrudnienia:* Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny
Sposób zatrudnienia: umowa o pracę na czas określony na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego.
Zakres pracy: badania naukowe, dydaktyka (różne formy zajęć), organizacja (współpraca przy projektach krajowych, organizacja konferencji naukowych itp.)

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:

Ceramiczne powłoki natryskiwane plazmowo z zawiesin na przykładzie szkieł bioaktywnych oraz stabilizowanego tlenku cyrkonu w formie monografii oraz cyklu publikacji monotematycznych

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy):

Książka:

1. **Łatka L.**, *Powłoki natryskiwane plazmowo z zawiesin szkieł bioaktywnych oraz stabilizowanego tlenku cyrkonu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019, recenzenci:
dr hab. inż. Jerzy Łabanowski, prof. PG, Politechnika Gdańska
prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski, Politechnika Wrocławska

Publikacje w recenzowanych czasopismach oraz recenzowanych materiałach konferencyjnych:

2. **Łatka L.**, *Thermal barrier coatings manufactured by suspension plasma spraying – a review*, *Advances in Materials Science* 18 (2018) ss. 95-117, LM 11.
3. Sokołowski P., Nylen P., Musalek R., **Łatka L.**, Kozerski S., Dietrich D., Lampke T., Pawłowski L., *The microstructural studies of suspension plasma sprayed zirconia coatings with the use of high-energy plasma torches*, *Surface and Coatings Technology* 318 (2017) ss. 250-261, LF, IF - 02.906 (2017), LM 35.
4. Znamirowski Z., Posadowski W., Pawłowski L., Cattini A., **Łatka L.**, *Electron emission from the zirconium coated suspension plasma sprayed bioglass*, *Surface and Coatings Technology* 268 (2015) ss. 63-69, LF, IF - 02.139 (2015), LM 35.
5. Sokołowski P., **Łatka L.**, Pawłowski L., Ambroziak A., Kozerski S., Nait-Ali B., *Characterization of microstructure and thermal properties of YCSZ coatings obtained by suspension plasma spraying*, *Surface and Coatings Technology* 268 (2015) ss. 147-152, LF, IF - 02.139 (2015), LM 35.
6. **Łatka L.**, Cattini A., Chicot D., Pawłowski L., Kozerski S., Petit F., Denoirjean A., *Mechanical properties of yttria- and ceria- stabilized zirconia coatings obtained by suspension plasma spraying*, *Journal of Thermal Spray Technology* 22 (2013) ss. 125-130, LF, IF - 01.491 (2013), LM 30.
7. Cattini A., **Łatka L.**, Bellucci D., Bolelli G., Sola A., Lusvarghi L., Pawłowski L., Cannillo V., *Suspension plasma sprayed bioactive glass coatings : effects of processing on microstructure, mechanical properties and in-vitro behaviour*, *Surface and Coatings Technology* 220 (2013) ss. 52-59, LF, IF - 02.199 (2013), LM 35.
8. Podlesak H., **Łatka L.**, Dietrich D., Pawłowski L., Wielage B., Lampke T., *Electron microscopy and diffraction studies of suspension-plasma-sprayed ZrO₂ + 8 wt.% Y₂O₃ coatings*, *Surface and Coatings Technology* 220 (2013) ss. 67-73, LF, IF - 02.199 (2013), LM 35.
9. **Łatka L.**, Chicot D., Cattini A., Pawłowski L., Ambroziak A., *Modeling of elastic modulus and hardness determination by indentation of porous yttria stabilized zirconia coatings*, *Surface and Coatings Technology* 220 (2013) ss. 131-139, LF, IF - 02.199 (2013), LM 35.

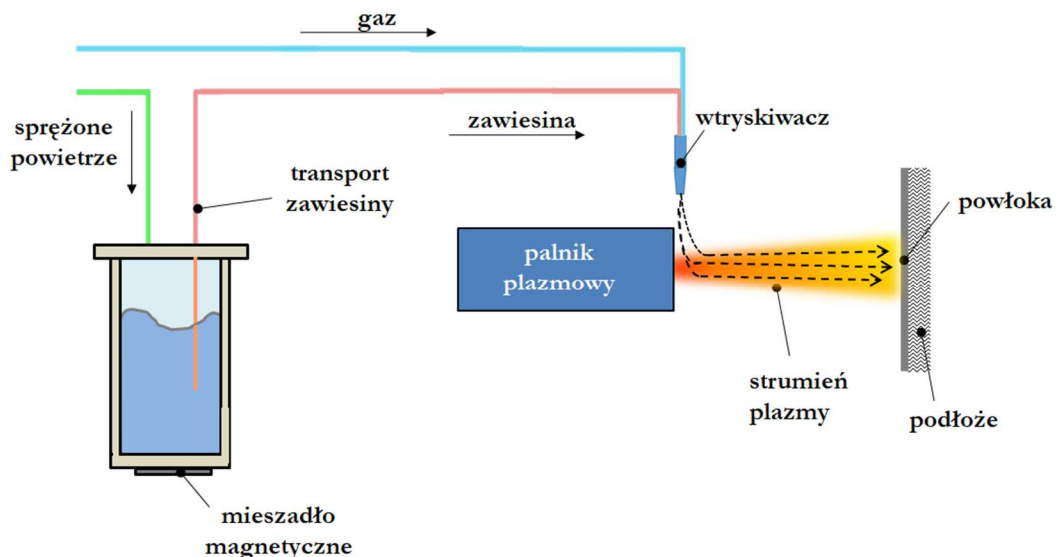
c) omówienie celu naukowego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Prezentowany cykl publikacji powiązanych tematycznie wraz z monografią dotyczą wytwarzania oraz badań powłok ceramicznych natryskiwanych plazmowo z zawiesin i stanowią mój dorobek w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Problematyka badawcza

Zagadnienie wytwarzania powłok nowoczesną metodą, jaką jest natryskiwanie plazmowe z zawiesin, SPS (ang. suspension plasma spraying) jest jeszcze stosunkowo niezbyt dobrze poznane, pomimo licznych badań, zarówno eksperymentalnych jak i numerycznych. Jej podstawową zaletą jest możliwość nanoszenia powłok o bardzo drobnej strukturze, co istotnie wpływa na poprawę właściwości użytkowych. Schemat procesu natryskiwania plazmowego z zawiesin wraz z mechanicznym wstrzeliwaniem materiału dodatkowego przedstawiono na rysunku 1. Z drugiej strony metoda SPS nadal jest w fazie rozwojowej, choć już widoczne są potencjalne obszary jej zastosowań:

- powłokowe bariery cieplne,
- stałotlenkowe ogniwa paliwowe,
- powłoki biozgodne,
- powłoki odporne na zużycie,
- powierzchnie fotokatalityczne.



Rys. 1. Schemat wstrzeliwania mechanicznego zawiesiny z wykorzystaniem zbiorników ciśnieniowych

Należy podkreślić, że jednym z największych atutów metody SPS jest możliwość kontroli struktury powstającej powłoki przez dobór parametrów procesu. Jednak problemem jest selekcja właściwych parametrów (obecnie znanych jest

ponad 20), jak również obecność zupełnie innych zjawisk, niż w konwencjonalnych technologiach natryskiwania cieplnego.

Jedną z kluczowych kwestii jest właściwe przygotowanie materiału powłokowego, którym są rozdrobnione cząstki proszku (o wymiarach nawet nanometrycznych), które są zawieszone w fazie ciekłej. Istotne jest znalezienie właściwych proporcji wagowych, ale również dobór odpowiedniego rozpuszczalnika, jak również środków powierzchniowo czynnych, które poprawią stabilność takiego układu koloidalnego. Wpływają one również na lepkość dynamiczną, która następnie określa łatwość transportu zawiesiny do palnika plazmowego. Nie bez znaczenia jest również sterowanie wartością pH i przewodnictwem cieplnym zawiesiny. Schemat kolejnych etapów przygotowania zawiesiny pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Etapy przygotowania zawiesiny

Ponadto zupełnie nową kwestią jest wstrzeliwanie takiej postaci materiału do strumienia plazmy, które wymaga innych od konwencjonalnych rozwiązań technologicznych. Nie bez znaczenia są również wzajemne oddziaływania pomiędzy cząstkami zawiesiny (a później samego proszku) a strumieniem plazmy. Większość zachodzących tam zjawisk nie ma swoich odpowiedników w natryskiwaniu proszkowym. Należy podkreślić, że istotną rolę pełni również palnik plazmowy. Obecnie w metodzie SPS stosuje się palniki, które są używane w procesie konwencjonalnym (proszkowym). Doniesienia literaturowe oraz badania własne potwierdzają wyraźny wpływ rodzaju palnika na tworzącą się powłokę (jej budowę oraz właściwości).

Jednak sednem naukowym był brak mechanizmów opisujących sposób powstawania powłok o konkretnej budowie. Najlepiej opisanym rodzajem struk-

tury była budowa kolumnowa powłok. Jest to związane z dużymi nakładami badawczymi na powłokowe bariery cieplne, w których ten typ struktury wykazuje wiele zalet. Jednak w przypadku innych zastosowań budowa powłoki często powinna być inna i zrozumienie w jaki sposób ona powstaje w metodzie SPS będzie z pewnością korzystne dla szybszego wprowadzenia tej technologii do przemysłu.

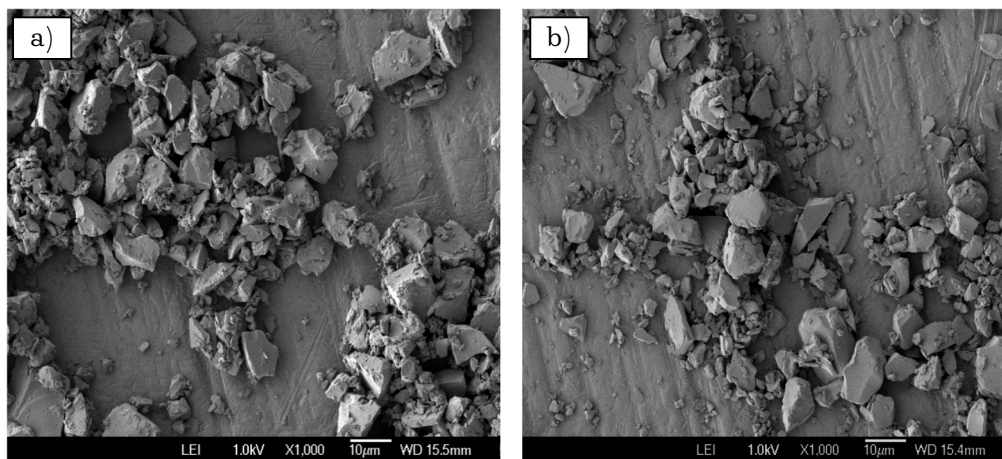
Cel naukowy

Celem naukowym badań było wytworzenie powłok, które charakteryzują się różnorodną budową (m.in. kolumnową, gęstą, dwustrefową) oraz podjęcie próby opisu formowania się takich struktur. Wyjaśnienie mechanizmów powstawania różnych struktur zakłada konieczność kompleksowego podejścia do tego zagadnienia.

Przeprowadzono badania, które uwzględniały wpływ wielkości cząstek oraz składu chemicznego proszku, właściwości przygotowanych zawiesin, sposobu przygotowania podłoża oraz parametrów natryskiwania na mikrostrukturę i topografię powłok. Wykonano również pomiary i badania podstawowych właściwości użytkowych, dokonano korelacji ich wartości z zastosowanymi parametrami i podjęto próbę wyjaśnienia mechanizmów formowania się różnych struktur. Należy podkreślić, że powyższe badania przeprowadzono dla dwóch rodzajów materiałów powłokowych, jakim były szkła bioaktywne i stabilizowany tlenek cyrkonu. Ich wybór był podyktowany znacznymi różnicami pomiędzy nimi jeżeli chodzi o budowę chemiczną, zagadnienia związane z przygotowaniem zawiesin oraz różnymi potencjalnymi zastosowaniami (medycyna i przemysł lotniczy i/lub energetyczny).

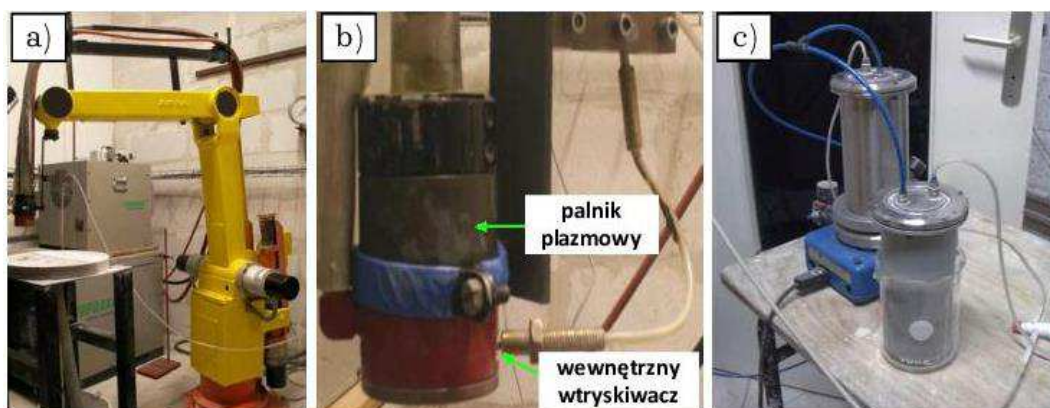
Osiągnięte wyniki – powłoki ze szkła bioaktywnych

Proszki szkła bioaktywnych (w pracy stosowano oznaczenia materiałów: BG oraz BGCa) wymagały wcześniejszego rozdrobnienia, które wykonano w młynie kulowym. Wynika to z konieczności stosowania mniejszych cząstek proszku, niż w przypadku metody konwencjonalnej. Widok proszków po mieleniu pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Widok proszku po mieleniu: (a) BG ($d_{50} = 5,5 \mu\text{m}$), (b) BGCa ($d_{50} = 4,9 \mu\text{m}$)

Powłoki z zawieszin proszków szkieł bioaktywnych zostały natryskane na stanowisku wyposażonym w palnik plazmowy SG-100 (Praxair). Widok stanowiska pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Stanowisko do natryskiwania powłok ze szkieł bioaktywnych:
(a) palnik SG100 zamontowany na robocie ABB, (b) promieniowy wtryskiwacz umieszczony wewnątrz anody, (c) zbiornik z zawiesziną (na mieszadle)

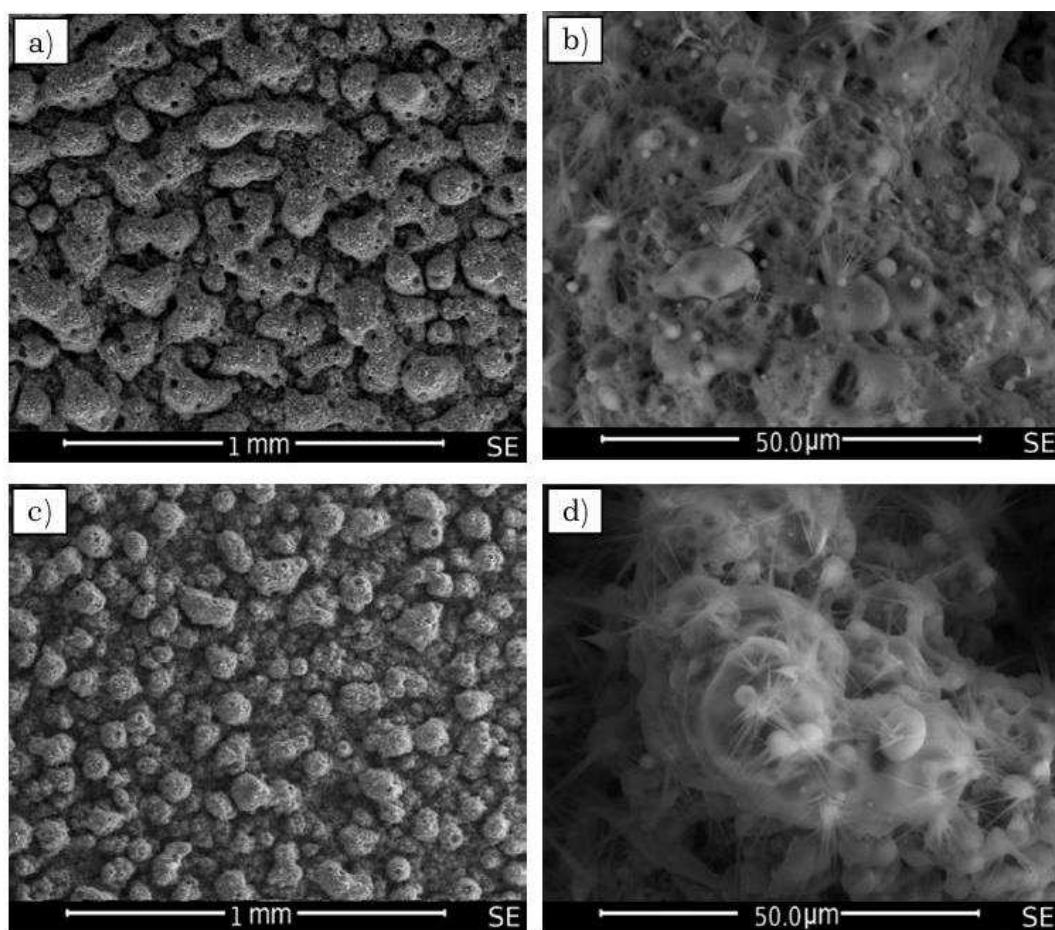
Dobór ostatecznych parametrów procesu poprzedziły badania wstępne w szerokim zakresie zmienności takich nastaw jak: moc elektryczna, natężenie przepływu wtórnego gazu plazmotwórczego, odległość natryskiwania, prędkość przesuwu palnika, wewnętrzna średnica wtryskiwacza oraz natężenie przepływu zawiesziny. Podłożem podczas wstępnych testów była krążki ze stali chromowo-niklowej o strukturze austenitycznej (X2CrNiMo17-12-2). Natomiast po doborze ostatecznych parametrów zmieniono podłoża na krążki ze stopu tytanu Ti6Al4V.

Uzyskane w wyniku powyższej selekcji powłoki zostały następnie poddane badaniom mikrostruktury i topografii, przeprowadzono analizy fazowe a także określono podstawowe właściwości mechaniczne (pryczepność, twardość, moduł sprężystości podłużnej).

Jednak najbardziej istotną częścią tych badań były eksperymenty *in vitro*, które przeprowadzono w symulowanym płynie ustrojowym. Określono wpływ czasu zanurzenia na zmiany struktury powłok.

Obserwacje topografii powierzchni powłok ze szkieł bioaktywnych (rys. 5) ujawniają sploty o wielkości od kilku do nawet kilkuset mikrometrów. Pomiedzy poszczególnymi powłokami można zauważyć tendencję do zmniejszania się kropeł wraz ze wzrastającą odległością natryskiwania. Moc elektryczna ma istotnie mniejsze znaczenie. Obserwacje prowadzone przy powiększeniu 5000x ujawniły obecność nieprzetopionych kulistych cząstek wyjściowego materiału, a pomiędzy nimi można dostrzec charakterystyczną strukturę igielkową. Ponadto w przypadku odległości natryskiwania wynoszącej 70 mm powłoki mają tendencję do pseudokolumnowego wzrostu. Cechą szczególną wszystkich powłok była bardzo chropowata powierzchnia. Specyficzną cechą powłok szkieł bioaktywnych jest również to, że w strefie spieczonych aglomeratów niektóre obszary uległy częściowej krystalizacji, co można zauważyć po charakterystycznym wzroście mi-

krometrycznych struktur igielkowych. Ten typ struktury jest powiązany ze wzrostem CaSiO_3 (wallstonit).



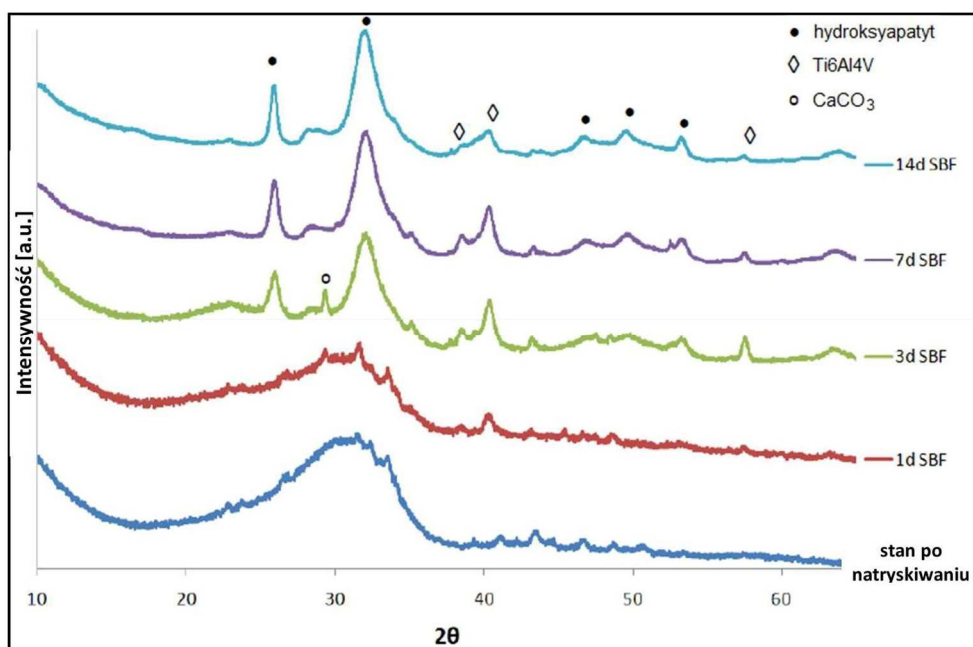
Rys. 5. Topografia powierzchni próbek: BG1 - a), b) oraz BG5 - c), d)

Analiza fazowa natryskiwanych powłok BG i BGCa potwierdziła, że są one zbudowane w znacznej mierze z fazy szklistej. Wynika to z wysokiej temperatury krystalizacji tego rodzaju szkielek bioaktywnych. Jednak ze względu na temperaturę występującą w strumieniu plazmy w powłokach zaszła częściowa krystalizacja. Jej wynikiem było powstanie drugorzędnych faz na bazie krzemianów (CaSiO_3 oraz Ca_2SiO_4) o budowie iglastych struktur. Powłoki BGCa1 i BGCa2 wykazują większą ilość faz krystalicznych (Ca_2SiO_4 oraz $\text{Na}_2\text{CaSi}_3\text{O}_8$) niż pozostałe. Może to wynikać z większej temperatury cząstek padających na podłoże, ponieważ były one natryskiwane z najkrótszej odległości, 50 mm. Powoduje to wydłużenie czasu stygnięcia splotów, co sprzyja krystalizacji podczas krzepnięcia. Zwiększona ilość fazy CaSiO_3 jest charakterystyczna dla szkielek bogatych w CaO. Należy jednak dodać, że jest to również materiał bioaktywny, który pomaga w dobrym wiązaniu się powłoki z kością.

Badania *in vitro* przeprowadzono w następujący sposób. Próbkę została zanurzona w symulowanym płynie ustrojowym. Był on zmieniany na nowy co 2 dni, co miało być odpowiednikiem dynamicznych warunków panujących w żywym organizmie. Temperatura układu wynosiła ok. 37°C a próbki były zanurzone na

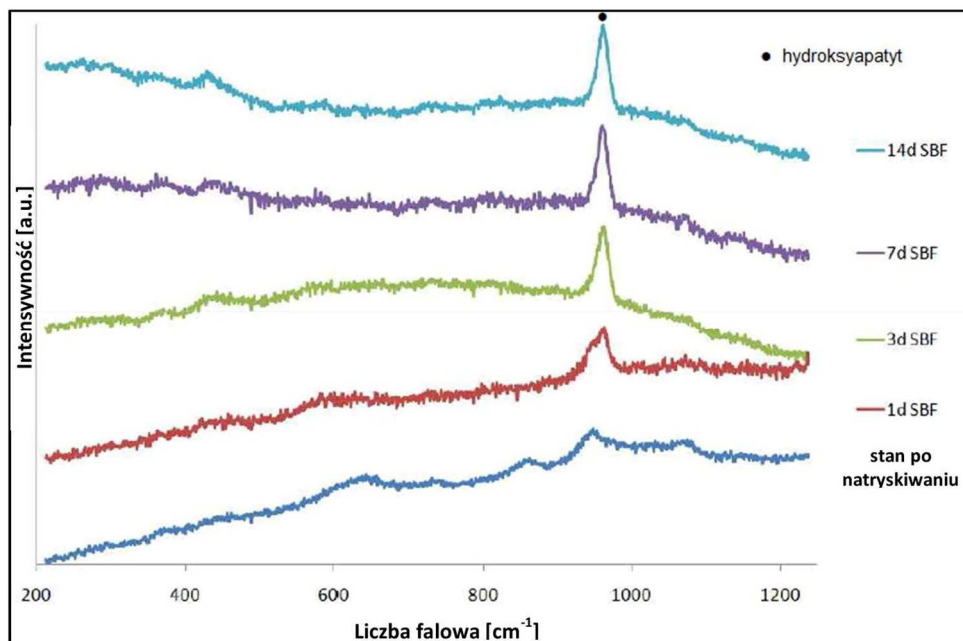
okres, 1, 3, 7 i 14 dni. Zauważono, że wraz z czasem zanurzenia w powłokach następuje rozwój tzw. struktury kalafiorowej, która jest charakterystyczna dla wzrostu HCA w warunkach *in vitro*. Ze względu na prędkość wzrostu tego typu struktur można wyróżnić dwie grupy powłok (dla każdego rodzaju szkła): (i) wyraźnie zaznaczonymi narostami HCA już po 1 dniu zanurzenia w SBF (BG3, Bg4, BG5, BGCa3, BGCa4 i BGCa5) oraz (ii) gdzie struktury HCA zaczęły się wyodrębniać przynajmniej po 3 dniach zanurzenia (BG1, BG2, BGCa1 i BGCa2). Prawdopodobnie różnica w szybkości zachodzących reakcji wynika ze zróżnicowanej mikrostruktury powłok. Szczególnie istotna jest w tym przypadku porowatość powłok, w wyniku której zachodzą różne reakcje, a to z kolei powoduje różne zachowanie pomiędzy szkłem a SBF.

W celu weryfikacji uzyskanych wyników z rentgenowskiej jakościowej analizy fazowej (rys. 6) powłoki szkieł bioaktywnych poddano jeszcze badaniom spektroskopii Ramana (rys. 7).



Rys. 6. Dyfraktogramy rentgenowskie próbek BG1 zanurzonych w SBF

Podczas analizy uzyskanych widm zauważono, że niezależnie od parametrów procesu (a także od rodzaju szkła), po pierwszym dniu zanurzenia pojawia się pik hydroksyapatytu ok. 970 cm^{-1} . Jest to charakterystyczne dla grup fosforanowych. Jednak zaobserwowano ciekawe zachowanie tego piku, ponieważ dla dłuższych czasów zanurzenia w SBF przesunął się on w pobliże 960 cm^{-1} , a to z kolei jest głównym pikiem hydroksyapatytu. To przesunięcie następowało po 3 dniach zanurzenia. Ponadto dla próbek serii BGCa zaobserwowano dwa wtórne piki hydroksyapatytu (ok. 440 cm^{-1} i 610 cm^{-1}). interesujące było również pojawienie się po 14 dniach piku ok. 1070 cm^{-1} , który odpowiadał grupie węglanowej, co potwierdziło opisywany w literaturze fakt, że podczas zanurzenia powłok ze szkła bioaktywnych w SBF następuje wzrost węglanowego hydroksyapatytu.



Rys. 7. Widma Ramana próbek BG5 zanurzonych w SBF

Obserwacje topografii powierzchni próbek BG ujawniły obecność iglastych struktur mikrometrycznych, które występowały w bardziej lub mniej upakowanych grupach. Taka struktura jest pożądana przy wytwarzaniu katod polowych (tzw. zimnych katod) ze względu na możliwość koncentracji pola elektrycznego. Wytworzone powłoki BG można podzielić na dwie grupy: (i) charakteryzujące się dobrą emisją (BG1, BG2, BG5) oraz (ii) słabo emitujące elektrony (BG3 i BG4). Bardzo ważną zaletą grupy pierwszej jest stosunkowo duża (szczególnie dla BG5) powierzchnia emisyjna, która wskazuje na to, że było wiele źródeł emisji elektronów i że ich indywidualny ładunek został zmniejszony. Natomiast w drugiej grupie wystąpiły problemy z zainicjowaniem emisji elektronów oraz jej stabilnością. Podstawowe parametry polowej emisji elektronowej powłok ze szkła BG zebrano w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe parametry polowej emisji elektronowej z powierzchni powłok szkła BG

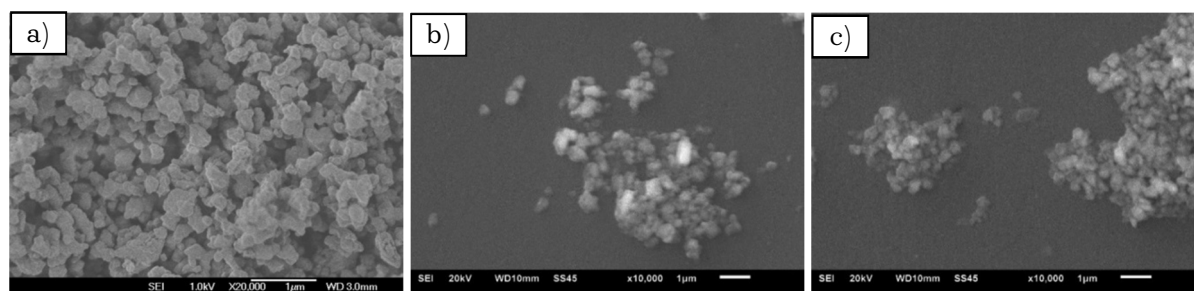
	Chropowatość powierzchni, Ra; Rz, μm	Współczynnik wzmocnienia pola elektrycznego, β	Krytyczne natężenia pola elektrycznego, $E_{\text{th}}, \text{V}/\mu\text{m}$	Powierzchnia emisyjna, α, cm^2	Oszacowanie emisji
BG1	7,4; 51,6	190	20	$2,7 \cdot 10^{-6}$	dobra emisja
BG2	9,0; 51,3	200	25	$3,2 \cdot 10^{-7}$	b. dobra emisja
BG3	8,9; 53,6	80	25	$1,4 \cdot 10^{-5}$	b. słaba emisja
BG4	8,4; 56,0	90	20	$7,4 \cdot 10^{-7}$	słaba emisja
BG5	7,4; 51,6	280	12	$6,6 \cdot 10^{-3}$	b. dobra emisja

Uzyskane wyniki wskazują na możliwości zastosowania szkieł bioaktywnych jako nowego rodzaju emiterów elektronów. Oprócz nanorurek węglowych, materiałem powłokowym, który z powodzeniem jest stosowany w zimnych katodach jest dwutlenek tytanu, TiO_2 . Na szczególną uwagę zasługuje to, że w powłokach szkieł bioaktywnych łatwiej jest uzyskać, a także kontrolować powstawanie struktur iglastych.

Osiągnięte wyniki – powłoki ze stabilizowanego tlenku cyrkonu

Drugim rodzajem materiału był stabilizowany tlenek cyrkonu. Jest on poddawany odwracalnym przemianom fazowym wraz ze zmianami temperatury. Towarzyszy im pewna zmiana objętości ze względu na zmianę parametrów sieciowych komórek elementarnych. Generują one naprężenia, które mogą w krańcowym efekcie doprowadzić do pęknięcia materiału. Oczywiście, podczas chłodzenia zachodzą przemiany odwrotne. Jednak gdy zachodzi przemiana z fazy tetragonalnej w jednoskośną, wówczas zachodzi zjawisko zwiększenia objętości materiału aż o 3 do 5%, co jest już wartością niebezpieczną, szczególnie w przypadku częstych zmian temperatury zachodzących np. w turbinach gazowych. W związku z powyższym, tlenek cyrkonu musi być stabilizowany, aby w jak największym stopniu uniknąć przemian fazowych, tak aby po procesie natryskiwania plazmowego (szczególnie przy użyciu zawiesin) skład fazowy otrzymanej powłoki był możliwie najbardziej zbliżony do wyjściowego proszku. W pracy stosowano trzy rodzaje proszków, które oznaczono w następujący sposób:

- T-YSZ (tlenek cyrkonu w pełni stabilizowany 14% wag. tlenku itru);
- YSZ (tlenek cyrkonu częściowo stabilizowany 8% wag. tlenku itru);
- YCeSZ (tlenek cyrkonu w pełni stabilizowany 24,5% wag. tlenku ceru oraz 2,5% wag. tlenku itru). Widok proszków gotowych do przygotowania zawiesin pokazano na rysunku 8.

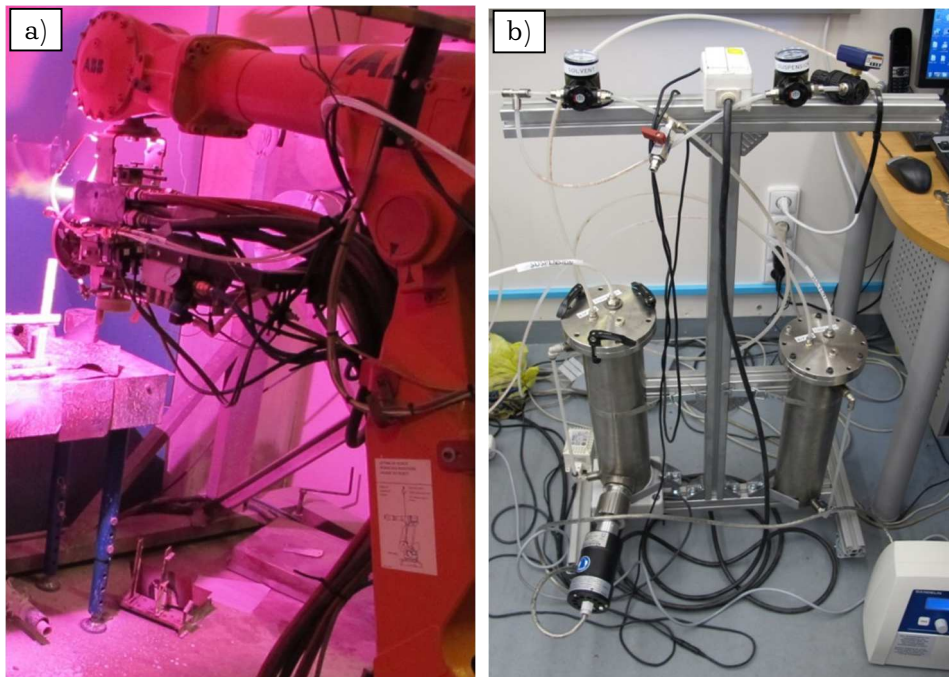


Rys. 8. Widok proszku: a) T-YSZ ($d_{50} = 0,49 \mu\text{m}$), b) YSZ ($d_{50} = 0,69 \mu\text{m}$), c) YCeSZ ($d_{50} = 0,83 \mu\text{m}$)

Powłoki z zawiesin proszków stabilizowanego tlenku cyrkonu zostały natryskane na stanowisku wyposażonym w palnik plazmowy WSP-H 500 (IPP, Praga). Widok stanowiska pokazano na rysunku 9.

Zakres zmiennych parametrów procesu był podobny jak w przypadku powłok ze szkieł bioaktywnych. Jednak dodatkową zmienną był sposób przygotowania powierzchni podłoża. Materiałem była stal chromowo-niklowa o struktu-

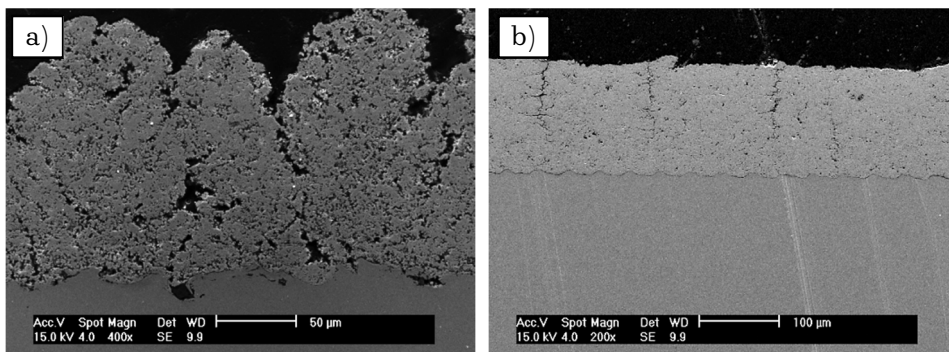
rze austenitycznej (X2CrNi19-11). Powierzchnię podłoża przygotowano przez obróbkę strumieniowo-ścierną, obróbkę laserową oraz szlifowanie.

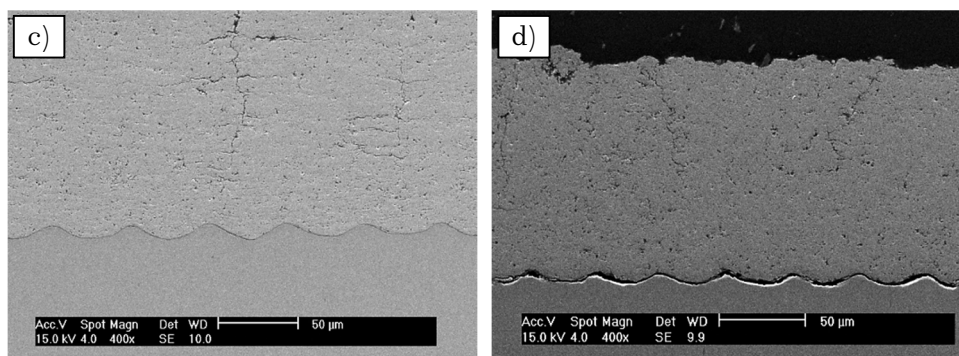


Rys. 9. Widok stanowiska WSP-H 500: (a) palnik zamontowany na ramieniu robota ABB, (b) zbiorniki z zawiesziną

Uzyskane powłoki zostały następnie poddane badaniom mikrostruktury i topografii, przeprowadzono analizy fazowe a także określono podstawowe właściwości mechaniczne (przyczepność, twardość, moduł sprężystości podłużnej).

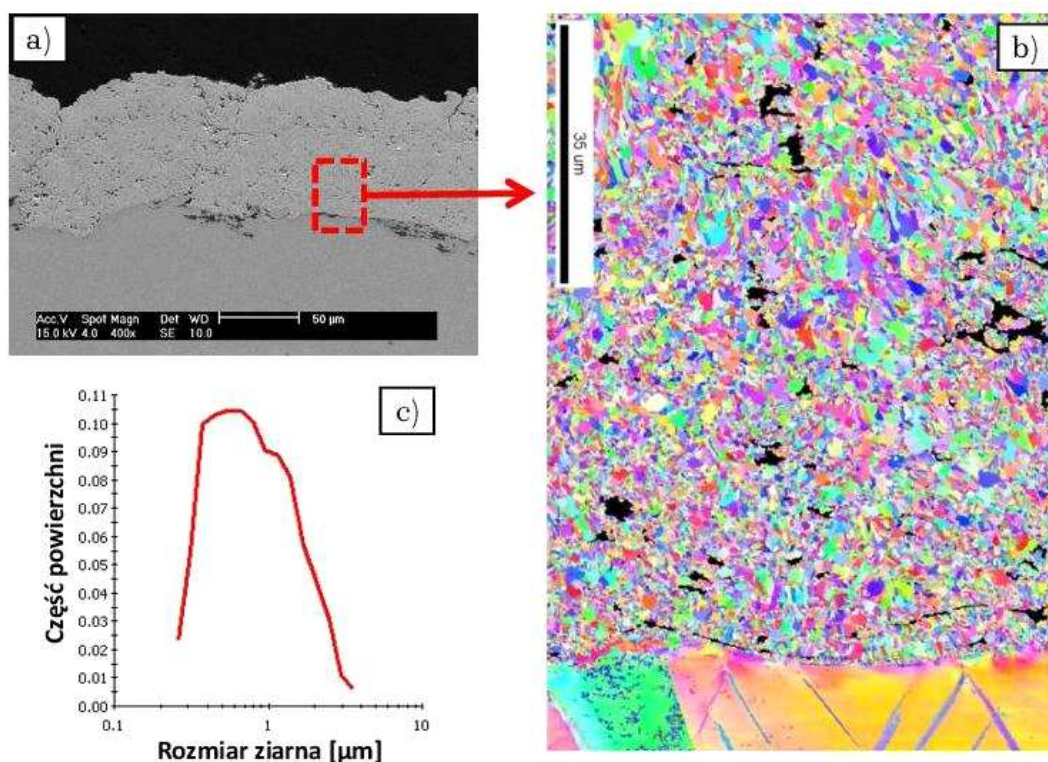
Jednak najbardziej istotną częścią tych badań było wyznaczenie wartości przewodności cieplnej powłok z różnych materiałów i o różnej strukturze. Powiązано je z parametrami procesu oraz zaproponowano mechanizmy formowania się tych struktur. Rozróżniono cztery rodzaje powstałych struktur (rys. 10). Ich obserwacja prowadzono za pomocą konwencjonalnej skaningowej mikroskopii elektronowej a także uzupełniono je o techniki EBSD oraz SFS.





Rys. 10. Przekroje poprzeczne powłok o różnej budowie:
 a) kolumnowa, b) gęsta z pionowymi pęknięciami, c) dwustrefowa, d) gęsta

Zauważono, że w przypadku każdej analizowanej powłoki (kolumnowa, dwustrefowa i gęsta) wielkość ziaren była zbliżona do wielkości cząstek wyjściowego proszku (co potwierdziło tezę o drobnoziarnistości powstałej struktury). Drugim podobieństwem była dość przypadkowa orientacja ziaren. Natomiast ich morfologia istotnie różniła się dla różnych struktur. Wynik przykładowej analizy EBSD powłoki o strukturze dwustrefowej pokazano na rysunku 11.



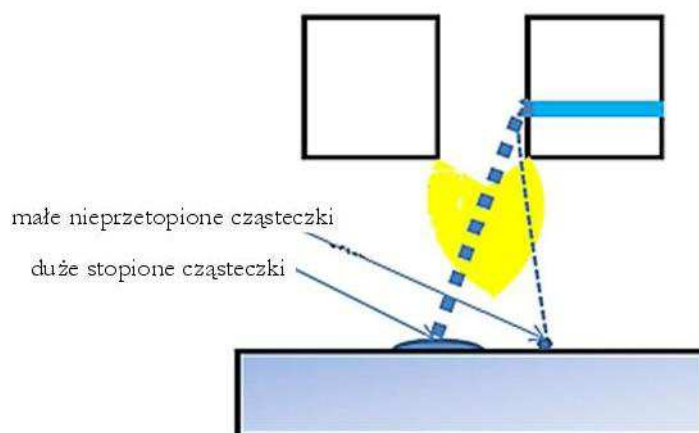
Rys. 11. Analiza EBSD powłoki Y101: (a) wybrany obszar,
 (b) mapa orientacji krystalograficznej, (c) rozkład wielkości ziaren

W metodzie natryskiwania SPS występuje wiele czynników, które w różny sposób wpływają na tworzenie się kilku typów struktur otrzymanych powłok. Analizując wyniki przeprowadzonych badań można dojść do wniosku, że metodą SPS można uzyskać różne typy struktur oraz, że są znaczne różnice w mechani-

zmach ich formowania. Zasadniczą rolę odgrywa topografia powierzchni podłoża oraz jego chropowatość. Rodzaj rozpuszczalnika, zawartość fazy stałej oraz sposób wstrzeliwania zawiesiny równie istotnie wpływają na powstawanie różnych struktur. Ponadto nie bez znaczenia pozostają takie parametry, jak rodzaj i natężenie przepływu gazów plazmotwórczych, moc elektryczna i odległość natryskiwania.

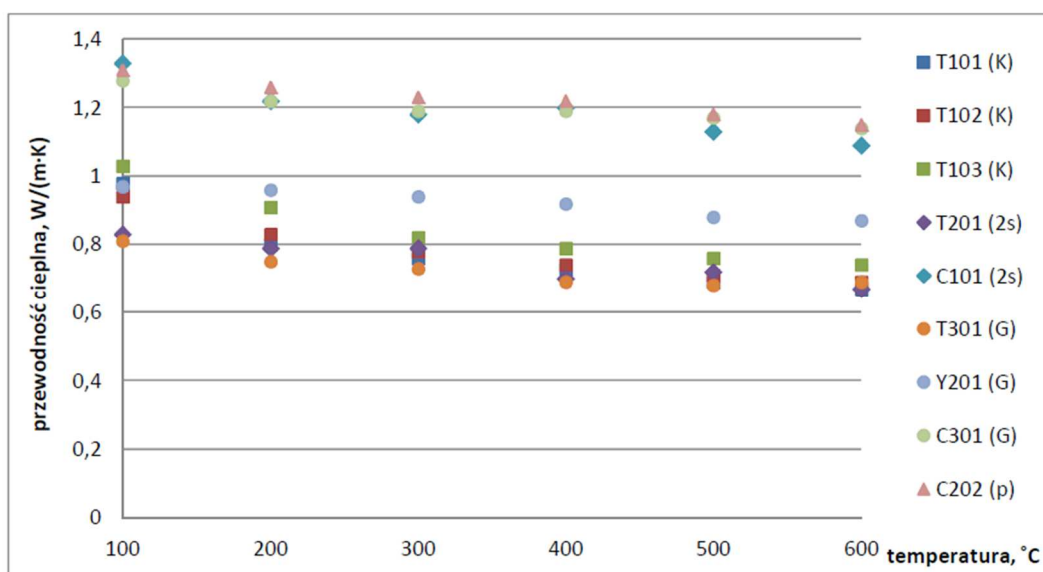
Podstawowym mechanizmem narastania kolumn był wzrost na nierównościach chropowatości powierzchni (zarówno naturalnych jak i wytworzonych poprzez osadzone pojedyncze cząstki w przypadku podłoża szlifowanych). Z kolei struktury dwustrefowe powstawały w wyniku dwutorowego podążania cząstek w strumieniu plazmy. Większe z nich, mające większe wartości momentu pędu, podążały w gorących obszarach strumienia, podczas gdy mniejsze cząstki były kierowane w tzw. peryferia, gdzie temperatura była znacznie niższa. Efektem było jedynie nadtopienie ich powierzchni i wytworzenie specyficznej strefy tzw. spieczonych aglomeratów. Struktury gęste powstawały natomiast w wyniku zastosowania zawiesin o dużej zawartości fazy stałej (najczęściej 30% wag.) i formowały budowę powłoki złożoną z dobrze przetopionych lameli, z równomiernie rozłożoną porowatością (lub, biorąc pod uwagę jej wielkość, raczej mikroporowatością). Mechanizm powstawania był w tym przypadku podobny do konwencjonalnego natryskiwania proszkowego, oczywiście z różnicą w skali wielkości użytego proszku.

Siły oddziałujące na cząstki, które zostają wprowadzone w strumień plazmy są różnorodne. Do najważniejszych należą te powodujące rozpad kropli zawiesiny tuż po jej wprowadzeniu. Istotne są również oddziaływania występujące w samej zawieszynie, które można opisać tensorem naprężeń lepkości. W wyniku jarzenia się łuku plazmowego pojawiają się również siły pola magnetycznego powodujące uginanie się łuku, co wpływa również na odchylenie torów cząstek o mniejszych wymiarach. Ogólny schemat torów cząstek o różnej wielkości, na które oddziałują różne siły pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Możliwe trajektorie lotu cząstek w strumieniu plazmy podczas natryskiwania SPS

Określenie wartości przewodności cieplnej powłok ze stabilizowanego tlenku cyrkonu polegało na wyznaczeniu ich dyfuzyjności (za pomocą urządzenia LFA 427 – Netzsch). Opracowano specjalny model dwuwarstwowy, w którym uwzględniono poprawki wynikające ze strat ciepła, czasu trwania impulsu laserowego oraz rezystancji styku pomiędzy powłoką a podłożem. Wyznaczone wartości przewodności cieplnej dla powłok o różnej budowie zebrano oraz pokazano na rysunku 13. Najmniejsze wartości, szczególnie w temperaturach wyższych niż 300°C, są charakterystyczne dla powłok o strukturze kolumnowej. Jest to związane z największą porowatością występującą w tych powłokach (powyżej 20%). Interesującym zjawiskiem jest mała wartość przewodności cieplnej powłok, które mają bardziej zwartą strukturę oraz mniejszą porowatość (kilkanaście %). Ponadto, w przeciwieństwie do struktur kolumnowych, powłoki o budowie dwustrefowej oraz gęstej charakteryzują się niewielką zmianą wartości przewodności w całym zakresie temperatury. Prawdopodobnie wynika to z rodzaju materiału dodatkowego, ponieważ proszek T-YSZ charakteryzował się najmniejszą średnią wielkością cząstek oraz najwęższym rozkładem ich wielkości. Ponadto, w strukturze dwustrefowej, obszary spieczonych aglomeratów zachowują się podobnie jak pory, wpływając na zmniejszenie wartości przewodności cieplnej.



Rys. 13. Wartości przewodności cieplnej powłok o różnej strukturze:
(K – kolumnowa, 2s – dwustrefowa, G – gęsta, p – pionowe pęknięcia)

Zauważono, że bardzo istotne, z perspektywy minimalizacji przewodności cieplnej, są porowatość oraz drobna struktura. Im większa porowatość, tym mniejsza przewodność cieplna. Wynika to z faktu, iż w porach gromadzi się gaz, którego przewodność jest niewielka. Dla powietrza wynosi ona jedynie 0,026 W/(m·K), w związku z czym podczas transportu ciepła przez porowatą strukturę znaczna jego część zostaje wytracona. Ponadto ważne są wielkość, kształt oraz orientacja porów. Jednak jak dotąd nie jest możliwe określenie rozkładu i orien-

tacji porów w całej powłoce. Istniejące metody pozwalają jedynie na zbadanie niewielkiego fragmentu a cała procedura jest długotrwała.

Podsumowanie

Prezentowany cykl publikacji wraz z monografią stanowią osiągnięcie naukowe i wpisuje się w aktualne światowe trendy badawcze. Do najważniejszych wniosków, wynikających z badań i analiz składających się na przedstawione osiągnięcie, zaliczam:

- określenie istotnej zależności sposobu przygotowania zawiesiny (zawartość fazy stałej, rodzaj rozpuszczalnika, rodzaj środka dyspergującego, wartość potencjału zeta) na sposób formowania się powłok;
- kluczowymi parametrami w natryskiwaniu powłok ze szkieł bioaktywnych są: natężenie przepływu wtórnego gazu plazmotwórczego, odległość natryskiwania oraz moc elektryczna;
- zastosowanie szkieł bioaktywnych charakteryzujących się ograniczoną tendencją do krystalizacji, pozwoliło na uzyskanie powłok amorficznych z bardzo znikomym rozwojem wollastonitu;
- specyficzną cechą mikrostruktury powłok ze szkieł bioaktywnych była obecność drobnych struktur igiełkowych, które mogły powstać w wyniku częściowej krystalizacji strefy spieczonych aglomeratów;
- grubość powłok oraz ich właściwości mechaniczne (szczególnie wartość instrumentalnego modułu Younga) są odpowiednie dla zastosowań biomedycznych jako zewnętrzna warstwa na implantach ortopedycznych. Ponadto otrzymana chropowata topografia powierzchni powłok ze szkieł bioaktywnych jest korzystna, gdyż sprzyja wchłanianiu metabolitów oraz przyłączaniu komórek;
- badania *in vitro* przeprowadzone w symulowanym płynie ustrojowym (SBF) wykazały, że we wszystkich powłokach wytworzyła się warstwa hydroksyapatytu węglanowego, w której wzrosła pośredniczyła przejściowa faza żelu krzemionkowego. Na ogólną kinetykę reakcji pomiędzy SBF a materiałem powłokowym największy wpływ miała porowatość uzyskanych warstw jak również stopień ich krystaliczności. Zależą one w dużym stopniu od odległości natryskiwania;
- mikrostruktura powłok ze stabilizowanego tlenku cyrkonu zależała głównie od zawartości fazy stałej w zawiesinie oraz rozkładu wielkości cząstek proszku. Powłoki natryskane z zawiesin o niskiej koncentracji fazy stałej charakteryzowały się bardziej niejednorodną budową oraz większym stopniem porowatości. Natomiast te uzyskane z zawiesin o większej zawartości proszku były bardziej zwarte i jednolite;

- struktury kolumnowe były możliwe do otrzymania w przypadku zastosowania zawiesin o małej zawartości fazy stałej oraz dla proszku o najmniejszej wielkości ziaren i najwęższym rozkładzie wielkości. Ponadto na charakter wzrostu kolumnowego bardzo istotnie wpływa topografia podłoża. W przypadku bardziej skoncentrowanych zawiesin uzyskano powłoki o budowie dwustrefowej oraz gęstej, szczególnie dla proszków o większych rozmiarach; W tym przypadku nie zauważono wpływu sposobu przygotowania powierzchni podłoża. Dzięki wykorzystaniu metody EBSD potwierdzono zachowanie drobnej struktury w powłokach natryskanych z zawiesin, gdyż wielkość ziaren w warstwach była porównywalna z wielkością cząstek wyjściowego proszku;
- wartość przewodności cieplnej powłok stabilizowanego tlenku cyrkonu otrzymanych metodą natryskiwania plazmowego z zawiesin jest mniejsza, niż ich odpowiedników natryskanych z proszków (APS) lub osadzonych techniką EB-PVD.

Na podstawie wyników dotychczasowych osiągnięć wyznaczyłem również kierunki dalszych pracy:

- zaprojektowanie i wykonanie palnika plazmowego dedykowanego do natryskiwania plazmowego z zawiesin;
- wykonanie powłok na elementach, które mogą pracować w symulowanych środowiskach i/lub w egzemplarzach prototypowych;
- opracowanie parametrów natryskiwania, wytworzenie oraz przebadanie kompletnych struktur trójwarstwowych stosowanych jako bariery cieplne;
- opracowanie parametrów natryskiwania, wytworzenie oraz przebadanie kompletnych struktur trójwarstwowych stosowanych jako stałotlenkowe ogniwa paliwowe (SOFC);
- wytwarzanie nowej gamy powłok biozgodnych na bazie szkieł bioaktywnych oraz hydroksyapatytu;
- wytwarzanie nowej gamy powłok odpornych na zużycie ściernie.

(UWAGA - źródła wszystkich ilustracji są szczegółowo przedstawione w monografii; w autoreferacie nie podano ich ze względu na ograniczoną objętość)

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-dydaktycznych

5.1. Działalność prowadzona przed doktoratem

W 2006 r. trafiłem do Zakładu Spawalnictwa w Instytucie Technologii Maszyn i Automatyzacji w celu rozpoczęcia realizacji pracy magisterskiej. Jej promotorem był prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak. Dotyczyła ona możliwości wykorzystania fal ultradźwiękowych do oceny jakości połączeń zgrzewanych punktowo elementów w czasie rzeczywistym. Ponadto elementy miały naniesione powłoki ochronne. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że całe stanowisko było od podstaw projektowane i wykonane w ramach pracy dyplomowej. Po rocznej przerwie, w czasie której pracowałem jako konstruktor i technolog w Wytwórni Pomp Hydraulicznych we Wrocławiu, powróciłem do Zakładu Spawalnictwa w celu rozpoczęcia pracy naukowo-badawczej. W jej ramach zająłem się nanoszeniem powłok, wykorzystując nowatorską metodą, jaką jest natryskiwanie plazmowe z zawieszin. Przewód doktorski otworzyłem w 2009 r. i w tym samym rozpocząłem studia w ramach dwustronnej umowy z Uniwersytetem Lille 1 (Francja). Pracowałem tam pod kierunkiem jednego z najbardziej znanych naukowców z dziedziny natryskiwania cieplnego, Prof. dra hab. inż. Lecha Pawłowskiego. Odbyłem też krótki staż badawczy w Centrum Ceramiki w Mons (Belgia).

Pracę doktorską pod tytułem: *„Badania właściwości warstw natryskanych plazmowo z zawieszin proszków ceramicznych”* obroniłem w listopadzie 2012 r. Jej promotorami byli: ze strony francuskiej - prof. dr hab. inż. Didier Chicot a ze strony polskiej - prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak. W ramach pracy wykazałem, że nowatorska metoda natryskiwania umożliwia nanoszenie powłok o strukturze submikrometrycznej, co przekłada się na lepsze właściwości funkcyjne zastosowanych różnych materiałów. Była to jedna z pierwszych prac, w której powiązано właściwości (zarówno mechaniczne jak i użytkowe) uzyskanych powłok w zależności od zastosowanych parametrów procesu. Dysertacja została obroniona z wyróżnieniem i była pierwszą tego typu rozprawą doktorską na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Jednocześnie uzyskałem stopień doktora Uniwersytetu Lille 1 (w ramach umowy co-tutelle).

W tym okresie aktywnie uczestniczyłem w organizacji 2 międzynarodowych konferencji naukowych dotyczących natryskiwania cieplnego, RIPT (2009 i 2011) oraz na gruncie lokalnym, 1. Dolnośląskiego Sympozjum Spawalniczego (2012).

Przed uzyskaniem stopnia doktora prowadziłem zajęcia laboratoryjne oraz projektowe z zakresu spawalnictwa, technologii materiałów inżynierskich oraz metrologii wielkości geometrycznych. Ponadto podczas staży zagranicznych (w ramach współpracy oraz umowy co-tutelle) prowadziłem zajęcia laboratoryjne dotyczące inżynierii powierzchni i byłem opiekunem naukowym 6 studentów, którzy realizowali swoje projekty dyplomowe.

Moimi głównymi osiągnięciami przed uzyskaniem stopnia doktora jest udział w sześciu konferencjach o zasięgu międzynarodowym oraz krajowym, podczas których wygłosiłem referaty (lub prezentowałem plakat). Na ich podstawie powstało 6 artykułów. Ponadto jestem współautorem jednego rozdziału w książce i pracowałem w komitetach organizacyjnych 4 konferencji i seminariów. Podczas konferencji International Thermal Spray Conference (ITSC 2011) w Hamburgu artykuł mojego współautorstwa (Łatka L., et al., *Build-up mechanism of suspension plasma sprayed ZrO₂ + 8wt.% Y₂O₃ coatings*) został wyróżniony w konkursie na najlepsze zgłoszone publikacje.

5.2. Działalność prowadzona po obronie pracy doktorskiej

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa (do 2015 r. w Zakładzie Spawalnictwa Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji) Politechniki Wrocławskiej, w której aktualnie pracuję.

Moja działalność naukowo-badawcza jest związana przede wszystkim z zagadnieniami inżynierii powierzchni, nanoszenia warstw i regeneracji metodami natryskiwania cieplnego. Prowadzę badania pod kątem nowych technologii oraz nowych materiałów, które mogą być wykorzystane w wielu różnorodnych przypadkach (m.in. bariery cieplne, powierzchnie fotokatalityczne, powłoki biodegradowalne, powłoki odporne na zużycie).

Poza głównym nurtem działalności prowadzę badania związane z technologiami spawalniczymi (przede wszystkim spawanie łukowe, techniki zgrzewania, cięcia termicznego oraz spawania laserowego).

W wyniku pogłębionej pracy w obszarze powłok natryskiwanych cieplnie w 2014 r. w ramach konkursu dla młodych pracowników naukowych uzyskałem finansowanie w ramach projektu przyznanego przez Narodowe Centrum Nauki (Sonata 6) pt. *Mechanizm formowania struktury kolumnowej w powłokach otrzymywanych metodą natryskiwania plazmowego z zawieszin*, którego byłem kierownikiem. Poza wyżej wymienionym projektem brałem udział w opracowaniu 5 innych wniosków grantowych do różnych instytucji. W momencie składania dokumentacji 2 nadal pozostają w ocenie.

Decyzją Rady Wydziału zostałem powołany na funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim prowadzonym przez prof. dra hab. inż. Andrzeja Ambroziaka, mgr inż. Moniki Michalak (*Analiza wybranych właściwości powłok Al₂O₃ + TiO₂ natryskiwanych metodami plazmowymi*), otwarty w dniu 14.06.2017 r. (przewidywany termin obrony: grudzień 2020 r.). Wcześniej byłem opiekunem naukowym w przewodzie doktorskim dra inż. Pawła Sokołowskiego: *Properties of suspension plasma sprayed zirconia coatings using different plasma torches*, promotorzy: prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak oraz prof. dr hab. inż. Lech Pawłowski (praca obroniona 25.11.2016 r.).

Brałem aktywny udział w opracowaniu i przygotowaniu umowy pomiędzy Wydziałem Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej a Uniwersytetem w Limoges dotyczącą podwójnego dyplomowania studentów II-go stopnia (magisterskich). Pierwsza dwójka studentów PWr rozpoczęła tego rodzaju studia w roku akademickim 2015/2016. Byłem promotorem pracy magisterskiej jednej z tych dwóch osób. Od pierwszej edycji zajmuję się również, razem z drem inż. Pawłem Sokołowskim, rekrutacją na tego typu studia.

W marcu 2017 r. zostałem powołany przez prof. Andrzeja Ambroziaka, Kierownika Katedry Materiałoznawstwa, Wytrzymałości i Spawalnictwa, na stanowisko Kierownika Pracowni Natryskiwania Plazmowego.

W ramach działalności opiniotwórczej recenzowałem **46** artykułów dla czasopism z listy JCR:

1. Surface and Coatings Technology (IF = 2.906): **23**
2. Ceramics International (IF = 3.057): **1**
3. Journal of Coatings Technology and Research (IF = 1.619): **1**
4. Measurement (IF = 2.218): **1**
5. Materials Letters (IF = 2.687): **1**
6. Coatings (IF = 2.350): **10**
7. Materials (IF = 2.467): **4**
8. Molecules (IF = 3.098): **1**
9. Polymers (IF = 2.935): **3**
10. Symmetry (IF = 1.256): **1**

oraz **11** artykułów dla czasopism wydawanych w języku polskim:

1. Przegląd Spawalnictwa (wykaz MNiSW - 9 pkt.): **10**
2. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa (wykaz MNiSW - 11 pkt.): **1**

a także **3** artykułów dla krajowego czasopisma anglojęzycznego: *Advances in Materials Science* (wykaz MNiSW - 11 pkt.)

oraz **3** dla międzynarodowych materiałów pokonferencyjnych (wykaz MNiSW - 15 pkt).

Ponadto od stycznia 2018 r. jestem członkiem redakcji czasopisma **Ceramic Sciences and Engineering** (wydawca EnPress).

W obszarze organizacji konferencji wykazywałem duże zaangażowanie. Pełniłem funkcję sekretarza komitetu organizacyjnego podczas dwóch edycji międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej International Thermal Spraying and Hardfacing Conference (2015, 2018) odbywających się we Wrocławiu (ITSHC). Od 2012 r. jestem członkiem komitetu organizacyjnego Dolnośląskiego Sympozjum Spawalniczego we Wrocławiu. Wspomagałem też organizacyjnie dwie edycje międzynarodowej konferencji RIPT (Les Rencontres Internationales sur la Projection Thermique) w Limoges (2015, 2017). Ponadto byłem

członkiem komitetu naukowego dwóch konferencji: ITSHC 2018 oraz Computational Methods in Engineering Science (CMES 2018).

Referaty dotyczące badanych przeze mnie zagadnień wygłaszałem w trakcie **6** międzynarodowych i **6** krajowych konferencjach tematycznych... Podczas konferencji CMES 2018 wygłaszałem wykład plenarny, natomiast w trakcie konferencji RIPT 2017 wystąpiłem w charakterze tzw. *invited speaker*.

Podczas konferencji naukowych oraz naukowo-technicznych pełniłem funkcje przewodniczącego sesji na **5** konferencjach międzynarodowych i **4** krajowych oraz prowadziłem **1** sesję plakatową (również podczas konferencji międzynarodowej).

Działalność dydaktyczna

W ramach działalności dydaktycznej moje zaangażowanie jest szczególnie widoczne w opiece nad studentami. Dotychczas byłem promotorem 75 prac dyplomowych studentów następujących kierunków: Mechanika i Budowa Maszyn, Mechatronika, Automatyka i Robotyka oraz Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, w tym 57 prac stopnia inżynierskiego i 18 prac magisterskich. Spośród tych prac 1 była związana z tzw. podwójnym dyplomowaniem (w języku angielskim). Ponadto sporządziłem 70 recenzji prac dyplomowych.

Po zatrudnieniu na stanowisku adiunkta prowadziłem zajęcia (zarówno w formie laboratoriów jak i wykładów) z zakresu technologii materiałów inżynierskich, podstawowych metod spawalniczych, automatyzacji oraz robotyzacji procesów spajania, materiałoznawstwa, wytrzymałości materiałów oraz nanoszenia warstw i regeneracji. Zajęcia te prowadziłem na kierunkach Mechanika i Budowa Maszyn, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji (dzienne i zaoczne), Automatyka i Robotyka, Mechatronika (dzienne). Opracowałem od podstaw kilka tematów w ramach kursów tzw. składanych (prowadzonych przez pracowników co najmniej 2 zespołów).

Dodatkowo opracowałem wg wytycznych Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa i prowadziłem wykłady dla uczestników Studium Podyplomowego IWE (Międzynarodowy Inżynier Spawalniki) w Autoryzowanym Ośrodku Szkoleniowym Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa przy Politechnice Wrocławskiej z zakresu spawania metodą TIG, spawania stali do zbrojenia betonu, mechaniki pęknięcia oraz tribologii i warstw zabezpieczających. Zajęcia na studiach podyplomowych prowadzę od 2016 r., ponadto jestem również członkiem komisji egzaminacyjnej podczas egzaminu wewnętrznego.

W latach 2014-2016 prowadziłem zajęcia z technik spawalniczych dla studentów z Indii (Parul Group of Institutes) w ramach Indian Summer School organizowanej przez Politechnikę Wrocławską.

Od 2018 r. prowadzę zajęcia z podstawowych technik spawalniczych w języku angielskim dla studentów kierunku Mechanika i Budowa Maszyn w języku angielskim oraz studentów z programu Erasmus.

Pogłębiałem współpracę dydaktyczną z następującymi ośrodkami krajowymi: Politechnika Śląska w Gliwicach (Katedra Spawalnictwa) oraz Politechnika Gdańska (Katedra Inżynierii Materiałowej i Spajania). Dotyczyła ona głównie rozwoju bazy laboratoryjnej oraz wymiany materiałów dydaktycznych (próbki, konspekty zajęć itp.).

Zestawienie osiągnięć naukowych i dydaktycznych (w dniu 15.04.2019 r.)

Lp.	Wykaz osiągnięć	Przed doktoratem	Po doktoracie	Suma
1	Publikacje w czasopiśmie wyróżnionym w Journal Citation Reports, posiadającym współczynnik wpływ (IF), wykaz A MNiSW	4	7	11
2	Publikacje w czasopiśmie nie posiadającym współczynnika wpływu (IF), indeksowanym w bazie Web of Science	1	3	4
3	Publikacje w czasopiśmie nie posiadającym współczynnika wpływu (IF), wykaz B MNiSW	1	10	11
4	Publikacje w czasopiśmie krajowym albo zagranicznym spoza wykazu MNiSW	5	11	16
5	Autorstwo monografii	0	1	1
6	Opracowania w ramach działalności statutowej i badań własnych	1	4	5
7	Patenty	0	0	0
8	Wykonanie ekspertyz i innych opracowań na zamówienie przedsiębiorców i innych podmiotów realizujących zadania publiczne	0	3	3
9	Udział w projektach badawczych	1	2	3
10	Udział w konferencjach międzynarodowych	4	11	15
11	Udział w konferencjach krajowych	2	14	16
12	Udział w komitetach organizacyjnych konferencji i seminariów	4	9	13
13	Udział w komitetach naukowych konferencjach międzynarodowych i krajowych	0	2	2
14	Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	0	1	1
15	Wykłady specjalne i plenarne podczas konferencji międzynarodowych	0	2	2
16	Członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych	0	1	1
17	Stáže w zagranicznych lub krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	4	5	9
18	Recenzowanie projektów międzynarodowych lub krajowych oraz publikacji w czasopismach międzynarodowych lub krajowych	0	63	63
19	Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego	0	1	1
20	Opieka naukowa nad studentami i promotorstwo prac i projektów dyplomowych	6	75	81
21	Osiągnięcia dydaktyczne w zakresie popularyzacji nauki	0	3	3
22	Otrzymane nagrody i wyróżnienia	1	1	2

Zestawienie danych bibliometrycznych (w dniu 15.04.2019 r.)

wskaźnik/baza	Web of Science	Scopus
liczba cytowań	(172) 150*	(218) 195*
indeks Hirscha	7*	8*

* bez autocytowań

Po obronie doktoratu sumaryczny **IF = 15,272** a sumaryczna liczba punktów wg wykazu MNiSW wynosi **411**.

