

dr Jacek Krawczyk



AUTOREFERAT

Załącznik III

Chorzów, 2023

1. Imię i nazwisko

Jacek Krawczyk

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- 2012 doktor nauk technicznych – dyscyplina: inżynieria materiałowa –
Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Informatyki i Nauki
o Materiałach
Temat rozprawy doktorskiej: „*Otrzymywanie oraz charakterystyka
kompozytów typu kryształ-kwazikryształ stopów Al-Cu-Fe
i Al-Cu-Co*” – praca wyróżniona uchwałą Rady Wydziału Informatyki
i Nauki o Materiałach
Promotor: dr hab. Włodzimierz Bogdanowicz, prof. UŚ
Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Żmija, WAT
Recenzent: prof. dr. hab. Janusz Wolny, AGH
- 2006 magister materiałoznawstwa, Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział
Informatyki i Nauki o Materiałach
Temat pracy dyplomowej: „*Otrzymywanie monokryształów $Co_{1-x}Fe_xSi_2$
metodą Bridgmana*”
Promotor: dr hab. Zygmunt Wokulski, prof. UŚ
- 2001 technik elektronik o specjalizacji „Elektryczna i elektroniczna automatyka
przemysłowa”, Zespół Szkół Technicznych w Jaworznie
Temat pracy dyplomowej: „*Stanowisko laboratoryjne do badania układów
mikroprocesorowych*”
Promotor: mgr inż. Tomasz Grabowski

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- 2012 – nadal Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Informatyki i Nauki
o Materiałach, Instytut Nauki o Materiałach – obecnie na skutek reorganizacji
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych, Instytut Inżynierii Materiałowej,
stanowisko: adiunkt
- 2011 – 2012 Uniwersytet Śląski w Katowicach, Wydział Informatyki i Nauki
o Materiałach, Instytut Nauki o Materiałach, stanowisko: asystent

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

Jako główne osiągnięcie naukowe, o którym mowa z art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa, wskazuję cykl czternastu jednotematycznych artykułów naukowych, w których zawarto rezultaty badań skoncentrowanych wokół tematyki badawczej dotyczącej zagadnienia zatytułowanego:

„Defekty strukturalne i mechanizmy ich tworzenia podczas osiowego i bocznego wzrostu dendrytów w monokrystalicznych łopatkach turbiny z nadstopów niklu”

- a. Wykaz publikacji będących podstawą głównego osiągnięcia naukowego wraz z indywidualnym wkładem wnioskodawcy w ich powstanie

Poniżej przedstawiono spis artykułów wchodzących w skład cyklu stanowiącego podstawę wiodącego osiągnięcia naukowego, z syntetycznym opisem zakresu prac badawczych wykonanych przez autora wniosku. Artykuły zestawiono w porządku odpowiadającym badaniom procesu formowania się defektów strukturalnych w trakcie procesu wytwarzania łopatek, w kolejnych krystalizujących po sobie strefach monokrystalicznego odlewu. W zestawieniu wskazano autora prowadzącego korespondencję z wydawnictwem i recenzentami poprzez oznaczenie (*).

[C1] W. Bogdanowicz, A. Tondos*, **J. Krawczyk**, R. Albrecht, J. Sieniawski

Dendrite growth in selector-root area of single crystal CMSX-4 turbine blades.

Acta Physica Polonica A 130, 4 str. 1107-1109 (2016)

MNiSW: 15; IF: 0,469

<http://dx.doi.org/10.12693/APhysPolA.130.1107>

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na zaproponowaniu hipotezy badawczej i opracowaniu metodyki procesu badawczego. Dla przygotowanych próbek odlewów monokrystalicznych łopatek wyznaczyłem orientację krystaliczną metodą Lauego i wykonałem badania metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej. Przeprowadziłem analizę rozkładu intensywności kontrastu na topogramach i analizę uzyskanych obrazów mikrostruktury (SEM). W oparciu o wykonane badania ustaliłem korelację pomiędzy

obrazami mikrostruktury dendrytycznej i topogramami. Wyzaczyłem obszary niejednorodności kierunku wzrostu dendrytów w selektorze oraz zamku monokrystalicznych odlewów łopatek. Zidentyfikowałem systemy wzrostu dendrytów przy ściankach ceramicznej formy odlewniczej. Określiłem krytyczną wartość kąta „wygięcia” dendrytu. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu i uczestniczyłem w przygotowaniu tekstu publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 70%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [AT], [RA], [JS]

[C2] R. Paszkowski*, **J. Krawczyk**, W. Bogdanowicz, D. Szeliga, J. Sieniawski

Heterogeneity of the dendrite array created in the root of cored SX turbine blades during initial stage of crystallization.

Materials, 14, 1, 80, str. 1-17 (2021)

MEiN: 140; IF: 3,748

<http://dx.doi.org/10.3390/ma14010080>

We wskazanej publikacji zaproponowałem hipotezę badawczą i plan realizacji badań. Wykonałem badania metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej, badania mikroskopowe (SEM), a także metodą Lauego wyznaczyłem orientację krystaliczną odlewów badanych łopatek. Przeprowadziłem analizę uzyskanych wyników. Opracowałem koncepcję liniowego pomiaru odległości międzydendrytycznych z wyodrębnieniem obszarów mikrostruktury dendrytycznej o różnym stopniu niejednorodności. Ustaliłem korelację wyników badań mikroskopowych – obrazów mikrostruktury – z rozkładem intensywności kontrastu na topogramach rentgenowskich. Zinterpretowałem zależności pomiędzy defektami zespołów dendrytów ujawnionymi na obrazach SEM i ich obrazem na topogramach. Na podstawie analizy wyników badań zaproponowałem sposób modyfikacji warunków krystalizacji kierunkowej w procesie produkcji monokrystalicznych łopatek. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu i uczestniczyłem w redagowaniu tekstu publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 70%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [RP], [WB], [DS], [JS]

- [C3] **J. Krawczyk**, R. Paszkowski*, W. Bogdanowicz, A. Hanc-Kuczkowska, J. Sieniawski, B. Terlecki

Defect creation in the root of single-crystalline turbine blades made of Ni-based superalloy.

Materials, 12, 6, str. 870-885 (2019)

MNiSW: 140; IF: 3,057

<http://dx.doi.org/10.3390/ma12060870>

W ramach prac badawczych opracowałem koncepcję realizacji badań oraz ich metodykę. Przygotowałem próbki do badań, przeprowadziłem część badań metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej oraz wykonałem badania mikroskopowe (SEM). Brałem czynny udział w badaniach odlewów monokrystalicznych łopatek metodą spektroskopii anihilacji pozytonów oraz w analizie uzyskanych wyników. Przeprowadziłem analizę porównawczą wyników badań uzyskanych stosowanymi w pracy metodami doświadczalnymi. Ustaliłem korelację rezultatów uzyskanych metodą anihilacji pozytonów z wynikami uzyskanymi metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej oraz obrazów mikrostruktury dendrytycznej. Zinterpretowałem występujące zależności, a także określiłem liniową odległość międzydendrytyczną w warstwie nieustalonego wzrostu dendrytów. Opracowałem model tworzenia się granic małego kąta podczas krystalizacji zamka łopatek monokrystalicznych. Kierowałem całością badań i prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu oraz przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 70%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [RP], [WB], [AHK], [JS]

- [C4] W. Bogdanowicz, **J. Krawczyk***, R. Paszkowski, J. Sieniawski

Variation of crystal orientation and dendrite array generated in the root of SX turbine blades.

Materials, 12, 24, 4126, str. 1-13 (2019)

MNiSW: 140; IF: 3,057

<http://dx.doi.org/10.3390/ma12244126>

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu hipotezy i metodyki badań. Wykonałem pomiary orientacji krystalicznej odlewów monokrystalicznych łopatek metodą Lauego i badania mikroskopowe (SEM) oraz część badań metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej. Dokonałem analizy uzyskanych wyników badań.

Przeprowadziłem analizę stopnia niejednorodności w budowie zespołu dendrytów stosując autorską metodę obrazowania połączonej z zaawansowaną komputerową obróbką obrazów mikrostruktury dendrytycznej (SEM) (patent UPRP nr 241044, Zał. IV pkt. III.3 poz. 4). Na podstawie analizy rozkładu intensywności kontrastu na topogramach i obrazów struktury dendrytycznej określiłem mechanizmy wzrostu dendrytów w różnych strefach zamka łopatki, jak również zmiany w rozkładzie lokalnej orientacji krystalicznej dendrytów. Kierowałem całością badań i prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 75%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [RP], [JS]

- [C5] **J. Krawczyk***, W. Bogdanowicz, A. Hanc-Kuczkowska, A. Tondos, J. Sieniawski
Influence of heat treatment on defect structures in single-crystalline blade roots studied by X-ray topography and positron annihilation lifetime spectroscopy.

Metallurgical and Materials Transactions A, 49, 9 str. 4353-4361 (2018)

MNiSW: 35; IF: 1,985

<http://dx.doi.org/10.1007/s11661-018-4704-2>

W ramach udziału w powstanie wskazanej publikacji opracowałem koncepcję i metodykę badań. Wykonałem próbki do badań, w tym zestaw próbek do badań metodą spektroskopii anihilacji pozytonów (PALS). Wyzaczyłem orientację krystaliczną metodą Lauego i wykonałem badania mikroskopowe (SEM) oraz badania metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej, a także czynnie uczestniczyłem w badaniach metodą PALS. Przeprowadziłem analizę wyników badań, w tym analizę rozkładu intensywności kontrastu na topogramach rentgenowskich, która stanowiła podstawę do ustalenia sposobu tworzenia kontrastu dla charakterystycznych stref zamka łopatki. Opracowałem schemat tworzenia kontrastu na topogramach rentgenowskich. Ustaliłem stopień niejednorodności w budowie zespołu dendrytów w oparciu o autorską metodę obrazowania mikrostruktury dendrytycznej (patent UPRP nr 241044, Zał. IV pkt. III.3 poz. 4), a wyniki skorelowałem z danymi uzyskanymi w badaniach PALS oraz badaniach metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej. Określiłem zależność zmiany stężenia wakansów i gęstości dyslokacji od dezorientacji krystalicznej w charakterystycznej strefie łopatek będącej strefą ustalonego wzrostu dendrytów. Określiłem również wpływ obróbki cieplnej na zmiany stężenia wakansów i gęstości

dyslokacji. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne. Opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 80%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [AHK], [AT], [JS]

[C6] **J. Krawczyk**, A. Tondos*, W. Bogdanowicz, R. Paszkowski

Structural defects of initial crystallization areas in single-crystalline turbine blades.

Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 56, 7-8, str. 481-486 (2017)

MNiSW: 15; IF: 0,326

<http://dx.doi.org/10.1007/s11106-017-9919-z>

We wskazanej publikacji opracowałem koncepcję i metodykę badań. Wykonałem badania metodami dyfrakcji rentgenowskiej: metodą Ω -skan i, w części, metodą topografii dyfrakcyjnej. Przeprowadziłem badania mikroskopowe (SEM), a uzyskane obrazy mikrostruktury dendrytycznej poddawałem analizie przy zastosowaniu autorskiej metody obróbki komputerowej (patent UPRP nr 241044, Zał. IV pkt. III.3 poz. 4). Zidentyfikowałem obszary o niejednorodnej budowie zespołu dendrytów, a następnie skorelowałem te obszary z obszarami wykazującymi dezorientację krystaliczną wizualizowaną na topogramach rentgenowskich i na mapach rozkładu wartości kąta dezorientacji otrzymanych metodą Ω -skan. Przeprowadziłem analizę rozmycia kontrastu na topogramach i określiłem obszary łopatki, w których powstają naprężenia własne. Dokonałem interpretacji uzyskanych wyników. Kierowałem całością badań i prowadziłem prace eksperymentalne. Opracowałem konspekt i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 80%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [AT], [WB], [RP]

[C7] **J. Krawczyk***;

Dendritic structure analysis of CMSX-4 cored turbine blades roots.

Archives of Metallurgy and Materials, 61, 2B, str. 1129–1134 (2016)

MNiSW: 30; IF: 0,361

<http://dx.doi.org/10.1515/amm-2016-0189>

Publikacja monoautorska – publikacja zawiera rezultaty prac badawczych prowadzonych według przeprowadzonej przeze mnie koncepcji i planu badań. Wykonałem próbki do badań i przeprowadziłem pomiary orientacji krystalicznej metodą Lauego, wykonałem badania metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej i przeprowadziłem badania mikroskopowe (SEM) mikrostruktury dendrytycznej. Zinterpretowałem zależności pomiędzy defektami zespołów dendrytów ujawnionymi na obrazach SEM i ich obrazem na topogramach. Ustaliłem mechanizm bocznego wzrostu dendrytów w obszarach zamka łopatki rdzeniowanej oddalonych od selektora. Określiłem relację pomiędzy dezorientacją tworzących się bloków krystalicznych i niejednorodnością w budowie zespołu dendrytów. Prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

[C8] **J. Krawczyk***, W. Bogdanowicz, J. Sieniawski

The influence of the cooling Bores on crystal orientation and lattice parameter in single-crystalline cored turbine blades.

Materials, 14, 3842, str. 1-15 (2021)

MEiN: 140; IF: 3,748

<http://dx.doi.org/10.3390/ma14143842>

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu hipotezy i metodyki przeprowadzonych badań oraz określeniu warunków procesu krystalizacji kierunkowej dla uzyskania odlewów rdzeniowanych łopatek monokrystalicznych. Przeprowadziłem badania metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej oraz metodą dyfrakcji rentgenowskiej – Ω -skan. Określiłem pierwotną orientację krystaliczną i parametr sieciowy kryształów fazy γ' . Wyzaczyłem krytyczne strefy przekroju łopatek i poddałem analizie uzyskany rozkład wartości kąta dezorientacji pierwotnej i wartości parametru sieciowego w funkcji odległości od powierzchni odlewu łopatki monokrystalicznej. Określiłem zależność między pierwotną orientacją krystaliczną i parametrem sieciowym, które charakteryzują doskonałość struktury krystalicznej łopatek. Dokonałem

interpretacji zauważonej zależności pomiędzy defektami identyfikowanymi na topogramach i obszarami charakterystycznej zmiany wartości kąta dezorientacji pierwotnej oraz parametru sieciowego. Na podstawie analizy wyników badań zaproponowałem teoretyczny model tworzenia charakterystycznego rozkładu pierwiastków, które stanowią dodatki stopowe, takich jak Re, W, Mo, Al, Ti, Ta, w pobliżu ścianek formy ceramicznej. Przedstawiłem również dyfuzyjny mechanizm transportu tych pierwiastków pomiędzy warstwą dyfuzyjną ciekłego metalu i tworzącymi się podczas krystalizacji dendrytami. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 80%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [JS]

[C9] **J. Krawczyk***, W. Bogdanowicz

The influence of the cooling bores on the dendritic structure and crystal orientation in single-crystalline cored CMSX-4 turbine blades.

Materials, 14, 3966, str. 1-17 (2021)

MEiN: 140; IF: 3,748

<http://dx.doi.org/10.3390/ma14143966>

We wskazanej publikacji opracowałem koncepcję i metodykę badań. Wyzaczyłem pełną orientację krystaliczną na przekroju zamka i pióra łopatki z wykorzystaniem rentgenowskiej metody dyfrakcyjnej Ω -skan. Wykonałem badania mikroskopowe (SEM) mikrostruktury dendrytycznej. Wykorzystując autorską metodę analizy danych określiłem liniową odległość międzydendrytyczną na przekroju wzdłużnym łopatki oraz standardową odległość międzydendrytyczną na przekroju poprzecznym. Ustaliłem warunki determinujące wystąpienie tzw. „efektu wachlarza”. Oszacowałem wartość gradientu temperatury w kierunku wzrostu bocznego dendrytów. Zinterpretowałem wyniki badań mikroskopowych (SEM) i metody Ω -skan ustalając występujące zależności. Scharakteryzowałem efekty powstające podczas ograniczenia wzrostu bocznego dendrytów przez rdzenie kanałów wewnętrznych oraz ścianki zewnętrzne formy odlewniczej. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne. Opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 85%.

Udział współautora przedstawiono w oświadczeniu [WB]

[C10] **J. Krawczyk***, W. Bogdanowicz

Correlation between the dendritic structure and lattice parameter of γ' -phase in single-crystalline turbine blades made of superalloys.

Materials, 3, 781, str. 1-14 (2022)

MEiN: 140; IF: 3,748

<http://dx.doi.org/10.3390/ma15030781>

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował opracowanie planu badań i metod badawczych. Po uprzednim przygotowaniu próbek wykonałem badania mikroskopowe (SEM) mikrostruktury dendrytycznej, a w badaniach metodą dyfrakcji rentgenowskiej Ω -skan określiłem parametr sieciowy kryształów fazy γ' . Przeprowadziłem analizę obrazów mikrostruktury dendrytycznej (SEM) i w oparciu o uzyskane rezultaty ustaliłem obszary łopatki, które poddałem szczegółowym pomiarom parametru sieciowego. Na podstawie zależności wartości parametru sieciowego w funkcji odległości od powierzchni odlewu łopatki, w zestawieniu z odpowiadającym obrazem mikrostruktury charakteryzowanego obszaru, wskazałem strefy łopatek, w których następują zmiany wartości parametru sieciowego oraz określiłem poziom tych zmian. Wyznaczyłem liniową odległość międzidendrytyczną dla charakteryzowanych obszarów oraz ustaliłem jej zależność od zmian parametru sieciowego. Kierowałem całością badań i prowadziłem prace eksperymentalne. Opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem treść publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 85%.

Udział współautora przedstawiono w oświadczeniu [WB]

[C11] **J. Krawczyk***, W. Bogdanowicz, J. Sieniawski, K. Kubiak[†]

Mould walls inclination and dendritic morphology of CMSX-4 blades airfoils.

Acta Physica Polonica A 130, 4, str. 1100-1103 (2016)

MNiSW: 15; IF: 0,469

<http://dx.doi.org/10.12693/APhysPolA.130.1100>

W ramach prac badawczych, skutkujących powstaniem publikacji opracowałem koncepcję badań i metodykę ich realizacji. Przygotowałem próbki do badań i wyznaczyłem orientację krystaliczną metodą Lauego oraz wykonałem badania mikrostruktury dendrytycznej metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM). Zaproponowałem model wzrostu dendrytów w cienkościennym odlewie pióra łopatki monokrystalicznej. W modelu uwzględniłem zmiany orientacji krystalicznej i zmiany

kształtu powierzchni pióra łopatki. Określiłem wpływ rodzaju i kształtu ścianek formy na morfologię dendrytów w funkcji odległości od powierzchni dla przekrojów cienkościennych pióra łopatki i poza nimi (zamek łopatki). Ustaliłem zależność pomiędzy kątem odchylenia kierunku wzrostu dendrytów i kątem nachylenia ścianki formy od osi łopatki. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne. Opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstaniu publikacji szacuję na 80%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [JS], [KK]

[C12] W. Bogdanowicz, **J. Krawczyk***, R. Paszkowski, J. Sieniawski

Primary crystal orientation of the thin-walled area of single-crystalline turbine blade airfoils.

Materials, 12, 17, 2699, str. 1-13 (2019)

MNiSW: 140; IF: 3,057

<http://dx.doi.org/10.3390/ma12172699>

We wskazanej publikacji zaproponowałem koncepcję i metodykę badań. Przeprowadziłem badania mikroskopowe (SEM), wykonałem badania pierwotnej orientacji krystalicznej metodą dyfrakcji rentgenowskiej Ω -skan i metodą Lauego. Opracowałem dane pomiarowe, w tym rozkłady kąta dezorientacji pierwotnej w funkcji odległości od powierzchni odlewu łopatki monokrystalicznej. Zaproponowałem model wzrostu dendrytów w przekrojach cienkościennych pióra łopatki. Ustaliłem krytyczną wartość odległości pomiędzy ściankami formy, przy której występuje efekt ukierunkowania rosnącego dendrytu niezgodnie z pierwotnym kierunkiem jego wzrostu. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstaniu publikacji szacuję na 80%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [RP], [JS]

[C13] W. Bogdanowicz, **J. Krawczyk***, A. Tondos, J. Sieniawski

Subgrain boundaries in single crystal blade airfoil of aircraft engine.

Crystal Research and Technology, 52, 8, 600372, str. 1-6 (2017)

MNiSW: 20; IF: 1,122

<http://dx.doi.org/10.1002/crat.201600372>

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu hipotezy i metodyki badań. Wykonałem badania mikroskopowe (SEM) oraz badania metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej. Opracowałem wyniki badań, wykonałem analizę rozkładu intensywności kontrastu na topogramach, określiłem liczbę i wartości kąta dezorientacji bloków krystalicznych oraz umiejscowienie granic małego kąta. Określiłem sposób „dziedziczenia” defektów powstających w zamku łopatki i pozostających w dalszych strefach pióra łopatki w oparciu o analizę wyników badań przeprowadzoną dla kilku przekrojów poprzecznych łopatki. Poddałem rozważaniom scharakteryzowane w badaniach zjawisko zmiany kierunku wzrostu dendrytów spowodowane przez zetknięcie rosnącego dendrytu ze ścianką ceramicznej formy odlewniczej. Podjąłem próbę ustalenia wpływu zjawiska zmiany kierunku wzrostu dendrytów przy ściankach formy odlewniczej na powstawanie granic małego kąta w obszarach występowania tego zjawiska. Kierowałem całością badań oraz prowadziłem prace eksperymentalne, opracowałem konspekt artykułu i przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 75%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [AT], [JS]

[C14] **J. Krawczyk***, W. Bogdanowicz, J. Sieniawski

The number of subgrain boundaries in the airfoil of heat-treated single-crystalline turbine blades.

Materials, 1, 8, str. 1-16 (2021)

MEiN: 140; IF: 3,748

<http://dx.doi.org/10.3390/ma14010008>

W ramach prac badawczych, skutkujących powstaniem publikacji opracowałem hipotezę badawczą i przygotowałem metodologię badań. Wyznaczyłem orientację krystaliczną metodą Lauego oraz wykonałem badania metodą dyfrakcyjnej topografii rentgenowskiej. Opracowałem wyniki badań zastosowanych metod rentgenowskich. Określiłem liczbę granic małego kąta występujących w zdefiniowanych obszarach przekroju pióra łopatki

i wyznaczyłem kąt dezorientacji bloków krystalicznych. Dla wyznaczonych obszarów przekroju pióra łopatki określiłem pierwotną orientację krystaliczną. Wyznaczyłem stopień jej korelacji z kształtem i rozmiarami każdego z fragmentów pióra. Zinterpretowałem zależności kątowe ustalone w wyniku tej korelacji. W oparciu o przeprowadzoną analizę wyników badań opracowałem metodę określania liczby granic małego kąta, które powstaną w piórze łopatki monokrystalicznej, na podstawie charakterystyki tylko początkowej strefy zamka łopatki. Kierowałem całością badań i prowadziłem prace eksperymentalne. Opracowałem konspekt artykułu oraz przygotowałem tekst publikacji.

Swój udział w powstanie publikacji szacuję na 85%.

Udział współautorów przedstawiono w oświadczeniach [WB], [JS]

Punktację artykułów z czasopism z lat 2016-2017 przygotowano na podstawie Ujednoliconego wykazu czasopism naukowych za lata 2013-2016 opublikowanego w komunikacie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego 25 stycznia 2017 r. Wskaźniki Impact Factor (IF) przygotowano na podstawie bazy Journal Citation Reports.

- b. Omówienie celu naukowego przedstawionych prac i osiągniętych wyników oraz omówienie ich ewentualnego wykorzystania

Artykuły wchodzące w skład cyklu publikacji, a stanowiące podstawę wiodącego osiągnięcia naukowego, przedstawiają wyniki wieloskalowej analizy procesu formowania się, dyfuzji oraz zaniku defektów strukturalnych podczas procesu krystalizacji monokrystalicznych łopatek turbin silników lotniczych. Prowadzone badania wpisują się w światowy nurt intensywnych poszukiwań czynników umożliwiających rozwój technologii produkcji wysokiej jakości monokrystalicznych łopatek turbin silników lotniczych.

Ewolucja konstruowania maszyn i urządzeń, których integralnym podzespołem są turbiny gazowe, ukierunkowana jest na zwiększenie sprawności i zmniejszenie szkodliwego ich oddziaływania na środowisko naturalne, a także na obniżenie kosztów wytwarzania i eksploatacji wspomnianego typu maszyn i urządzeń. Poprawa właściwości wytrzymałościowych i wydłużenie czasu eksploatacji elementów konstrukcyjnych turbin, w szczególności elementów takich jak łopatki części gorącej silników lotniczych, które narażone są na największe obciążenia mechaniczne, cieplne i chemiczne, jest głównym kierunkiem wprowadzanych w powyższym celu modyfikacji. Łopatki części gorącej silników lotniczych, przede wszystkim łopatki 1-go i 2-go stopnia turbiny wysokiego ciśnienia, poddawane są oddziaływaniu dużych obciążeń mechanicznych i wysokiej temperatury oraz agresywnego środowiska utleniającego. Stąd konieczność posiadania przez materiały użyte do wytworzenia łopatek unikatowych właściwości użytkowych, m. in. dobrej żarowytrzymałości, zwłaszcza odporności na wysokotemperaturowe pełzanie. Proces rozwoju omawianych elementów, wymaga określenia najistotniejszych parametrów, które wpływając na wskazane właściwości, umożliwiają ich kształtowanie i dostosowanie do specyficznych warunków pracy. Przeprowadzane badania własne z uwzględnieniem literatury przedmiotu, wskazują na kluczowe znaczenie wieloskalowej i kompleksowej charakterystyki defektów strukturalnych, rozumianych jako niedoskonałości struktury krystalicznej, takie jak wakanse, dyslokacje, granice małego kąta, defekty budowy dendrytycznej, niejednorodności parametru sieciowego lub zmiany kąta dezorientacji bloków krystalicznych. Określenie rodzaju i koncentracji defektów strukturalnych wraz z próbą opisu mechanizmów ich tworzenia, dyfuzji i zaniku podczas procesu wytwarzania i kształtowania łopatek ma w tym względzie istotne znaczenie poznawcze oraz aplikacyjne.

Warunki pracy silników lotniczych, zarówno łopatek jak również elementów stacjonarnych turbiny takich jak kierownica gazów, związane ze sposobem zamiany energii gazów powstałych podczas spalania mieszaniny paliwa i powietrza, determinują ich budowę i sposób ochrony przed

wysoką temperaturą. Ważnym jest w tym aspekcie wskazanie związku pomiędzy konstrukcją i budową oraz sposobem ochrony przed wysoką temperaturą a mechanizmem tworzenia defektów strukturalnych, które determinują właściwości omawianych materiałów. Cienkościenne pióro łopatki ma złożony kształt, pozwalający na efektywne przemieszczanie się gazów spalinowych o dużym natężeniu przepływu i wysokiej temperaturze, kształt zamka natomiast, zapewnia stabilne ich zamocowanie w dysku wirnika. Łopatki turbiny wysokiego ciśnienia narażone na oddziaływanie gazów o najwyższej temperaturze posiadają dodatkowo wewnętrzne kanały chłodzące, które umożliwiają wprowadzenie do wnętrza łopatki powietrza o niższej temperaturze rozprowadzanego przez otwory na krawędzi natarcia pióra łopatki na całą jej powierzchnię. Utworzona w ten sposób cienka warstwa powietrza oddziela pióro łopatki od strumienia gazów spalinowych, zapewniając poprawę właściwości eksploatacyjnych. Poprawa ta uzyskiwana jest dzięki ingerencji w parametry determinujące strukturę stopów używanych do formowania omawianych łopatek. Opisana złożona budowa oraz warunki pracy łopatek turbiny silników lotniczych w istotny sposób determinują na przykład sposób tworzenia i dyfuzji oraz zaniku defektów strukturalnych, identyfikowanych w różnych strefach łopatek. Dodatkowym czynnikiem istotnie wpływającym na rodzaj i koncentrację defektów strukturalnych jest skład chemiczny stopów konstrukcyjnych, które używane są podczas krystalizacji monokrystalicznych łopatek.

Obecnie do wytwarzania elementów oraz podzespołów części gorącej silników lotniczych stosuje się najczęściej wieloskładnikowe stopy z układu Al-Ni nazywane nadstopami niklu, zawierające dodatki stopowe, takie jak: Re, W, Mo, Al, Ti, Ta, które decydują o wysokiej temperaturze topnienia, żaroodporności, żarowytrzymałości i odporności na pełzanie nadstopów. Nadstopy niklu cechują się dużą zawartością cząstek umacniających fazy γ' (faza międzymetaliczna Ni_3Al o strukturze regularnej) wydzielanych w osnowie fazy γ (roztwór stały na osnowie Ni). W mikrostrukturze nadstopu niklu mogą występować inne składniki fazowe, m.in. węgliki i wydzielania fazy międzymetalicznej o topologicznie zwartej strukturze – TCP (ang. Topologically Closed Packed). Najbardziej rozpowszechnioną w produkcji odlewów monokrystalicznych grupą nadstopów niklu są gatunki komercyjnie oznaczane serią CMSX[®].

Dla zwiększenia odporności na pełzanie łopatek z nadstopów niklu odlewy wytwarza się w postaci monokrystalicznej w procesie krystalizacji kierunkowej metodą Bridgmana. Monokrystaliczne odlewy nadstopów niklu charakteryzuje mikrostruktura dendrytyczna cechująca się przestrzennie uporządkowanym zespołem równoległych dendrytów złożonych z kryształów fazy γ i γ' oraz kryształów fazy γ w obszarach międzydendrytycznych. Parametry sieciowe obu tych faz wykazują różnicę wartości tylko ok. $2,5 \cdot 10^{-3}$ nm, oraz dużą koherencję ich

granicy międzyfazowej. Odlewy z nadstopu niklu mimo ich struktury dwufazowej wykazują cechy i właściwości monokryształu i mogą być wytwarzane w postaci monokrystalicznej. W procesie krystalizacji kierunkowej nadstopów niklu następuje osiowy i boczny wzrost dendrytów, prowadzący do powstawania defektów makroskopowej budowy dendrytycznej odlewów monokrystalicznych. Mogą tworzyć się defekty strukturalne o różnej skali, spowodowane różnicą lokalnych warunków wzrostu dendrytów i ich wzajemnego oddziaływania.

Złożona technologia odlewu monokrystalicznych łopatek oraz złożony ich kształt są przyczyną powstawania defektów struktury krystalicznej związanych z niejednorodnością składu chemicznego, morfologią i rozmiarami cząstek fazy umacniającej γ' , a także z niejednorodnością ich orientacji krystalicznej. Defekty te powstają już podczas początkowego procesu krystalizacji kierunkowej odlewów łopatek, w tym również w zintegrowanych z odlewem łopatki elementach zestawu odlewniczego, m.in. w selektorze, kontynuatorze oraz w półce dolnej i górnej łopatki. Dlatego łopatki w stanie *as-cast* w dalszym etapie procesu wytwarzania poddaje się złożonej obróbce cieplnej dla wyeliminowania części powstałych w nich defektów. Pomimo złożonego technologicznie procesu wytwarzania łopatek monokrystalicznych oraz wysokich kosztów wytwarzania stosuje się je obecnie najczęściej, ponieważ właściwości wytrzymałościowe łopatek monokrystalicznych są lepsze niż łopatek polikrystalicznych – przede wszystkim wyższa jest odporność na pełzanie. Warunkiem uzyskania dużej odporności na pełzanie jest zachowanie określonej orientacji krystalicznej. Jest ona charakteryzowana wartością kąta odchylenia kierunku krystalograficznego $[001]_{\gamma'}$ od głównej osi łopatki, będącej jednocześnie, zgodnie z obecnie przyjętymi standardami, kierunkiem wyciągania w procesie krystalizacji. Wpływ na doskonałość struktury krystalicznej odlewów monokrystalicznych łopatek ma również rozmieszczenie oraz stężenie i gęstość defektów struktury, tworzących się zarówno w procesie kierunkowej krystalizacji metodą Bridgmana, jak również w trakcie kolejnych operacji procesu technologicznego.

Aerodynamiczne kryteria warunków pracy łopatek determinują kształt powierzchni czynnej ich pióra. Dlatego zmiana kształtu łopatek dla ograniczenia powstawania defektów ich struktury krystalicznej związanych z geometrią formy odlewniczej nie jest możliwa. Podstawowym kierunkiem rozwoju nadstopów jest więc wskazanie ich optymalnego składu chemicznego, modyfikowanego w celu podwyższenia granicznej temperatury pracy elementów z nich wytwarzanych, jak również określenie sposobów, warunków i parametrów modyfikacji procesu technologicznego.

Badania prowadzone w toku opracowania materiału o nowym składzie chemicznym i fazowym najczęściej wykonuje się na półwyrobach, zwykle w postaci prętów i blach, których struktura krystaliczna istotnie różni się od struktury krystalicznej łopatek jako wyrobów końcowych, cechujących się złożonym kształtem. Właściwości określone dla półwyrobów nie oddają także w pełni stopnia zmian spowodowanych warunkami procesu krystalizacji kierunkowej w monokrystalicznych nadstopach niklu. Kinetyka procesów tworzenia, dyfuzji i zaniku defektów strukturalnych podczas krystalizacji określana w półwyrobach i łopatkach o złożonym kształcie i budowie, także nie stanowi tożsamego procesu. Istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego ma więc określenie wszystkich czynników determinujących rozwój nadstopów niklu w oparciu o wnioski z badań przeprowadzonych na próbkach gotowych wyrobów, a nie materiałów o prostej geometrycznej budowie, przygotowywanych na potrzeby procesu badawczego.

Dodatkowo, w badaniach stopnia zdefektowania struktury krystalicznej gotowych wyrobów o złożonym kształcie, na przykład łopatek turbiny, występują trudności metodologiczne, bowiem możliwość prawidłowego opisu defektów strukturalnych zależy m.in. od położenia poddanego analizie fragmentu łopatki. Złożony kształt i budowa łopatki determinują kinetykę procesu krystalizacji, implikując tym samym defekty strukturalne. Łopatki *as-cast* poddawane są obróbce cieplnej, mającej na celu między innymi ujednorodnienie rozkładu pierwiastków chemicznych i obniżenie stężenia defektów powstałych w procesie krystalizacji. Badania gotowych wyrobów muszą być zatem prowadzone również dla łopatek poddanych obróbce cieplnej, aby dokonać analizy wpływu tego procesu na strukturę defektową. Intensywnie modyfikowane są dlatego znane metody badawcze służące opisowi struktury defektowej, a także trwają poszukiwania nowych metod, umożliwiających realizację badań w zakresie kompleksowej charakteryzacji struktury i mikrostruktury w wielu skalach, w odniesieniu do materiałów o złożonym kształcie i skomplikowanej budowie.

Istotne znaczenie ma także właściwa interpretacja uzyskiwanych wyników, która z uwagi na złożoność zagadnienia jest trudna i wymaga zastosowania złożonych narzędzi. W tym względzie duże znaczenie metodologiczne ma zastosowanie uzupełniających się metod badawczych do opisu złożonej struktury defektowej, która charakteryzowana być powinna zarówno w skali makroskopowej – budowy dendrytycznej oraz mikroskopowej dotyczącej morfologii cząstek fazy γ/γ' i parametru sieciowego tych faz. Analiza danych literaturowych i wyniki badań własnych, wskazują, że użycie skorelowanych metod badań pozwalających opisać defekty strukturalne w sposób kompleksowy umożliwia wskazanie krytycznych stref odlewów monokrystalicznych łopatek. Badając fragmenty o skokowej zmianie powierzchni pola przekroju poprzecznego

łopatki, m.in. selektor / zamek łopatki i zamek / pióro, również przekroje cienkościennie pióra łopatki, oraz w łopatkach rdzeniowanych – kanały wewnętrzne / powierzchnia pióra łopatki, scharakteryzowano najistotniejsze zmiany w zakresie struktury defektowej.

Intensywnie prowadzone badania nad modyfikacją parametrów technologicznych procesu produkcji monokrystalicznych łopatek turbin, nie są opisywane w literaturze, a ich wyniki stanowią informacje poufne. Potrzebne jest zatem zbadanie wpływu parametrów procesu wytwarzania odlewów monokrystalicznych łopatek w procesie kierunkowej krystalizacji metodą Bridgmana na powstawanie defektów strukturalnych i podjęcia prób modyfikacji standardowych warunków produkcji łopatek monokrystalicznych w celu obniżenia stężenia defektów.

Realizowane prace badawcze scharakteryzowane w treści publikacji włączonych w cykl o wspólnym tytule: „*Defekty strukturalne i mechanizmy ich tworzenia podczas osiowego i boczego wzrostu dendrytów w monokrystalicznych łopatkach turbiny z nadstopów niklu*” dotyczyły przede wszystkim charakteryzacji defektów strukturalnych w łopatkach rdzeniowanych i litych, a także określenia wpływu różnych wartości prędkości wyciągania formy odlewniczej z ciekłym metalem ze strefy wysokiej temperatury i różnych gradientów roboczych temperatury na rodzaj oraz koncentrację omawianych defektów.

Do ustalenia możliwych zmian parametrów technologicznych w procesie odlewu monokrystalicznych łopatek konieczne jest określenie mechanizmów tworzenia się i wzrostu dendrytów oraz powstawania defektów struktury krystalicznej. Analiza złożonego procesu wzrostu osiowego i boczego dendrytów podczas kierunkowej krystalizacji metodą Bridgmana monokrystalicznego odlewu łopatki wraz z selektorem prowadzona w korelacji z opisem struktury defektów możliwa jest dzięki zastosowaniu szerokiego spektrum metod badawczych pozwalających na charakteryzację defektów w różnych skalach i skorelowanie rezultatów tych metod ze sobą.

Na podstawie analizy danych literaturowych dotyczących zagadnienia niejednorodności kształtowanej mikrostruktury dendrytycznej oraz defektów struktury krystalicznej powstających w procesie wzrostu dendrytów, a także w oparciu o wyniki badań własnych, określono, jako zasadne dla dalszego rozwoju technologii łopatek turbiny, opracowanie metodyki badań mikrostruktury dendrytycznej, procesu kinetyki wzrostu dendrytów oraz tworzenia się defektów struktury krystalicznej o różnej skali w odlewach łopatek monokrystalicznych. Jednocześnie uznano za istotne określenie przyczyny powstawania defektów w różnych strefach łopatki, co umożliwiło wskazanie sposobów eliminacji lub zmniejszenia stężenia oraz gęstości defektów.

Przyjęto hipotezę badawczą, że opracowanie metodyki szczegółowej i wieloskalowej analizy struktury i mikrostruktury dendrytycznej *as-cast*, morfologii składników fazowych oraz określenie warunków procesu krystalizacji prowadzących do osiowego i bocznego wzrostu dendrytów w monokrystalicznych łopatkach wytwarzanych z nadstopów niklu metodą Bridgmana, umożliwi określenie sposobów modyfikowania parametrów procesu technologicznego ich odlewania.

Celem prowadzonych prac badawczych jest zatem kompleksowa charakteryzacja defektów strukturalnych i wyjaśnienie mechanizmów tworzenia defektów podczas osiowego i bocznego wzrostu dendrytów w monokrystalicznych łopatkach z nadstopów niklu, jak również określenie sposobów modyfikacji parametrów procesu technologicznego, co może przełożyć się na poprawę końcowych właściwości użytkowych monokrystalicznych łopatek wykonanych z nadstopów niklu.

Użyte w badaniach modelowe odlewy łopatek monokrystalicznych wykonano przy współpracy z Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej odwzorowując kształt i warunki krystalizacji łopatek stosowanych w konstrukcjach wytwarzanych obecnie silników. Dla opracowanych modeli łopatek i elementów zestawu modelowego wykonano wielowarstwowe formy ceramiczne do pracy w szczególnie trudnych warunkach – wysoka temperatura zalewania formy (1520°C) i długi czas oddziaływania ciekłego metalu na ścianki formy. Procesy krystalizacji kierunkowej odlewów łopatek prowadzono z użyciem odlewniczego pieca próżniowego VIM 2 E-DS/S.C. firmy ALD Vacuum Technologies (max. masa wsadu 25 kg). Stosowano standardowe dla produkcji przemysłowej wartości prędkości wyciągania formy (2 ÷ 5 mm/min.).

Dla weryfikacji sformułowanej hipotezy przeprowadzono szereg badań, którym poddano modelowe odlewy odwzorowujące standardowe dla części gorącej silników lotniczych łopatki 1-go i 2-go stopnia turbiny wysokiego ciśnienia – łopatki rdzeniowane z wewnętrznymi kanałami chłodzenia powietrzem oraz lite. Zastosowano metodykę badań materiałów monokrystalicznych pozwalającą na uzyskanie unikatowych wyników charakteryzujących defekty struktury monokryształów w różnej skali. Umożliwiła ona również ich interpretację opracowaną autorską metodą.

Wytworzone modelowe monokrystaliczne łopatki rdzeniowane oraz lite poddano konwencjonalnym badaniom mikroskopowym metodami elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM) i transmisyjnej (TEM). Realizowano również badania metodami stosowanymi od niedawna w badaniu monokrystalicznych łopatek z nadstopu niklu, m.in. metodą rentgenowskiej

topografii dyfrakcyjnej i metodą spektroskopii anihilacji pozytonów. W badaniach zastosowano także opracowaną na potrzeby badań monokrystalicznych łopatek z nadstopu niklu, nowatorską metodę dyfrakcji rentgenowskiej Ω -skan, która pozwala na określenie pełnej orientacji krystalicznej oraz parametru sieciowego kryształów fazy γ' w obszarach łopatki o dużej powierzchni.

W badaniach monokrystalicznych łopatek rdzeniowanych i litych zastosowano autorskie metody analizy uzyskanych rezultatów polegające na wzajemnym powiązaniu wyników badań uzyskanych metodami przeznaczonymi do pomiarów defektów strukturalnych o różnej skali. Te nowe metody umożliwiły określenie synergii powstałych defektów i mechanizmów ich tworzenia w różnej skali.

Uzyskane wyniki badań przedstawiono w cyklu artykułów [C1-C14], z uwzględnieniem charakterystyki dotyczącej kolejnych stref krytycznych powstających w procesie krystalizacji kierunkowej odlewów monokrystalicznych łopatek z nadstopu niklu serii CMSX[®]. Opis przedstawionych w publikacjach wyników uporządkowano ze względu na kolejność krystalizujących po sobie stref monokrystalicznego odlewu łopatki w procesie wytwarzania łopatek z racji występujących zależności pomiędzy mechanizmami i rodzajem tworzenia się defektów strukturalnych a poszczególnymi strefami łopatki, w których te defekty powstają.

Najistotniejsze rezultaty badawcze skoncentrowane na opisie **krystalizacji dendrytycznej w początkowej strefie odlewu monokrystalicznej łopatki** opisano w publikacjach [C1-C4]. Początkowa strefa odlewu monokrystalicznej łopatki obejmuje selektor nadający orientację krystaliczną w zamku i w piórze łopatki poprzez selekcję ziaren o określonej orientacji krystalicznej, oraz dolny fragment zamka łopatki. W procesie krystalizacji kierunkowej stosowano selektory spiralne. Wykonano badania mikroskopowe SEM metodą elektronów wstecznie rozproszonych (BSE) na przekroju poprzecznym i wzdłużnym selektora, zarówno dla odlewów łopatek rdzeniowanych jak również litych. Analiza obrazów mikrostruktury dendrytycznej – geometrii położenia dendrytów w połączeniu z wynikami metody dyfrakcji rentgenowskiej Lauego, pozwoliła na ustalenie (dla różnych składowych) kierunku wzrostu dendrytów. Ustalono, że spiralny kształt selektora ogranicza wzrost osiowo zorientowanych rdzeni dendrytów, w strefie przypowierzchniowej jest on ograniczany przez ścianki formy odlewniczej. Efekt tego ograniczenia ma dwojaki charakter i zależy od wartości kąta pomiędzy rdzeniem dendrytu i płaszczyzną powierzchni ścianki formy w miejscu jego zetknięcia. Wykazano, że może nastąpić zahamowanie osiowego wzrostu dendrytu lub zmiana kierunku jego

wzrostu – wtedy efektem będzie „wygięcie” dendrytu [C1]. Uzasadniono uzyskane rezultaty, wskazano, że występuje krytyczna wartość kąta odchylenia równa 12° . Dla mniejszej wartości kąta odchylenia następuje „wygięcie” dendrytu [C1]. Odchylenie dendrytów od ustalonego kierunku wzrostu w określonym zespole dendrytów powoduje, że w tym obszarze mogą wystąpić naprężenia resztkowe i lokalne zmiany orientacji krystalicznej. Potwierdzono to zjawisko w analizie topogramów rentgenowskich. Uwidoczniono rozmyte pasma kontrastu, niebędące efektem orientacyjnym [C1]. Określono również w tej analizie dotychczas nieustaloną graniczną wartość kąta odchylenia dendrytu równą 24° . Stwierdzono, że wyższe wartości tego kąta powodują zahamowanie wzrostu osiowego dendrytu. Dalszy wzrost dendrytu odbywa się poprzez wzrost ramion kolejnych rzędów [C1]. Tworzące się w ten sposób defekty w mikrostrukturze dendrytycznej selektora mogą prowadzić do tworzenia się lokalnej zmiany orientacji krystalicznej już w początkowym etapie krystalizacji w selektorze. W efekcie defekty te mogą być „dziedziczone” do strefy zamka, i następnie do pióra łopatki monokrystalicznej.

Selektor w odlewie monokrystalicznym połączony jest z łopatką w płaszczyźnie podstawy jej zamka bezpośrednio lub poprzez kontynuator. W tej krytycznej strefie następuje skokowa zmiana przekroju – zmiana kształtu formy odlewniczej i objętości odlewu. Spirala selektora ma średnicę $4 \div 6$ mm, natomiast zamek, w zależności od typu łopatki, ma wymiary 10×20 mm² lub 20×50 mm². W procesie krystalizacji kierunkowej w krótkim czasie, zależnym od prędkości wyciągania formy ze strefy wysokiej temperatury, występuje szybki boczny wzrost dendrytów w dużej objętości ciekłego metalu w porównaniu do selektora. Zachowany więc musi być rozkład segregacji składników stopowych oraz, w założeniu, jednorodna orientacja krystalograficzna w całej objętości strefy początkowej zamka przy jego podstawie. W prowadzonej analizie obrazów SEM BSE mikrostruktury strefy przejścia selektor / zamek (przekrój poprzeczny) oraz strefy podstawy zamka (przekrój wzdłużny), określono morfologię zespołu dendrytów w wybranych fragmentach strefy początkowej zamka łopatek. Stwierdzono w tej strefie niejednorodność mikrostruktury dendrytycznej. Ustalono, że skutkuje ona możliwością powstawania lokalnej dezorientacji krystalicznej. Wykazano, że krystalizacja ciekłego metalu w takiej strefie łopatki następuje w warunkach nieustalonych. Dotyczy to zarówno łopatek rdzeniowanych jak również litych [C2,C3]. Warstwa nieustalonego wzrostu dendrytycznego przyjmuje kształt falisty, a jej grubości zależy od rozmiarów zamka łopatki. Określono grubość tej warstwy – są to pierwsze wyniki badań dotyczące tego zagadnienia przedstawione w literaturze. Grubość warstwy, w której występują nieustalone warunki krystalizacji, dla łopatek rdzeniowanych o dłuższej krawędzi przekroju poprzecznego zamka – 50 mm wynosi ~ 5 mm

[C2], a dla łopatek litych o dłuższej krawędzi przekroju poprzecznego zamka – 20 mm, wynosi ~2 mm [C3].

Dla określenia stopnia niejednorodności mikrostruktury dendrytycznej odlewów monokrystalicznych łopatek opracowano autorską metodę wizualizacji położenia liniowego rdzeni dendrytów na zglądzie metalograficznym. Wprowadzono także po raz pierwszy do charakteryzacji mikrostruktury parametr liniowej odległości międzidendrytycznej [C2,C3]. Stwierdzono, że tylko we fragmencie warstwy nieustalonego wzrostu dendrytycznego, położonym ponad centralną częścią selektora ukształtowana mikrostruktura dendrytyczna jest jednorodną. Również kierunek rdzeni dendrytów (ramion 1-go rzędu, wzrastających bezpośrednio od selektora) jest w stopniu największym zbliżony do kierunku osi łopatki. Fragment ten jest charakteryzowany na topogramach jednorodnym rozkładem kontrastu. Ustalono także, że mikrostruktura dendrytyczna w pozostałych fragmentach początkowej strefy zamka łopatek jest kształtowana poprzez wzrost boczny z dużą prędkością wiodących ramion 2-go rzędu od dendrytów wzrastających z selektora. Określono zależność prędkości wzrostu boczego od prędkości wzrostu osiowego dendrytów. Stanowiło to podstawę do oszacowania, że prędkość wzrostu boczego jest większa 10-krotnie od prędkości zadanego wzrostu osiowego [C3]. Generalnie, większa prędkość wzrostu kryształów skutkuje powstawaniem drobnoziarnistej mikrostruktury dendrytycznej. Zjawisko takie obserwowano dla wzrostu boczego dendrytów, a potwierdzone zostało przez określenie liniowej odległości międzidendrytycznej dla powstających wskutek wzrostu boczego ramion 3-go rzędu. Wyrastają one osiowo od wiodących ramion 2-go rzędu. Na podstawie analizy porównawczej dla ramion 1-go i 2-go rzędu wzrastających osiowo bezpośrednio od selektora ustalono, że wzrost boczny wiodących ramion 2-go rzędu może być zniekształcony przez zmiany lokalnego rozkładu wartości temperatury i gradientu temperatury wewnątrz komory pieca odlewniczego. Jest on także spowodowany przez złożony kształt łopatki oraz rdzenie położone na drodze ich wzrostu w łopatkach z kanałami wewnętrznymi. Wykazano, że zakrzywienie frontu krystalizacji przy bocznych ściankach ceramicznej formy odlewniczej, spowodowane lokalną zmianą ilości i kierunku odprowadzania ciepła od ciekłego metalu oraz duża prędkość wyciągania formy ze strefy grzania pieca może doprowadzić do zakrzywienia dendrytu wiodącego w pobliżu bocznych ścianek formy. Stwierdzono, że od zakrzywionego fragmentu dendrytu wiodącego wyrastają ortogonalnie ramiona 3-go rzędu dendrytów. Ramiona te są zdeorientowane względem podobnych ramion wyrastających z niezakrzywionego odcinka ramienia dendrytu wiodącego, zarówno dla łopatek litych [C3] jak również dla łopatek rdzeniowanych [C2]. Deorientację krystaliczną tych dwóch

zespołów dendrytów potwierdzono również w analizie topogramów obrazujących utworzenie w tych strefach bloków krystalicznych rozdzielonych granicą małego kąta [C2,C3].

Badania mikroskopowe i analiza obrazów granic małego kąta powstających w strefie intensywnego wzrostu bocznych dendrytów była podstawą do opracowania modelu ich zarodkowania i wzrostu. Uwzględniono w nim m.in. skład chemiczny kryształów faz γ/γ' oraz rozkład pierwiastków stopowych na froncie krystalizacji ciekłego metalu i w fazie stałej – dla dendrytów i obszarów międzydendrytycznych. Stwierdzono, że podczas procesu krystalizacji atomy pierwiastków stopowych segregują w strefie dyfuzji ciekłego metalu. Większość atomów pierwiastków o wysokiej temperaturze topnienia np. Co, Mo i Cr dyfunduje do strefy krystalizujących dendrytów. Natomiast atomy pierwiastków takich jak np. Al i Ti dyfundują do przestrzeni międzydendrytycznych. Tworzy się więc pomiędzy tymi obszarami fazy γ (powyżej solwus) gradient stężenia pierwiastków. Ustalono także, że w dalszym etapie kształtowania mikrostruktury dendrytycznej ważną rolę odgrywa przemiana roztworu stałego: kryształy fazy $\gamma \rightarrow \gamma'$. Występujący gradient stężenia powoduje, że w tym etapie krystalizacji pierwiastki o wysokiej temperaturze topnienia dyfundują od dendrytów do przestrzeni międzydendrytycznych, natomiast pierwiastki o niższej temperaturze topnienia – w kierunku przeciwnym. Ponieważ obie grupy pierwiastków cechują się różną wartością współczynnika dyfuzji, stąd wg teorii Kirkendalla, powstałe jednocześnie defekty struktury – pierwotnie głównie wakanse, tworzone są poprzez mechanizm dyfuzyjny [C3].

Wykazano, że w początkowym etapie krystalizacji ciekłego nadstopu niklu – w stanie nieustalonym, występująca znacznie większa prędkość bocznej krystalizacji, prowadzi do tworzenia się dendrytów o mniejszych rozmiarach i o większej liczbie ramion. Ramiona tych dendrytów rosną w kierunku osiowym i podlegają zjawisku wzrostu konkurencyjnego. Określono, że część tych dendrytów jest blokowana przez inne, cechujące się większą prędkością wzrostu. Hamowanie konkurencyjnego wzrostu dendrytów zależy m.in. od prędkości dyfuzji atomów ich składników w ciekłym nadstopie przed frontem krystalizacji [C2].

Orientacja krystaliczna dendrytów utworzonych podczas początkowego etapu krystalizacji ciekłego nadstopu w selektorze łopatki jest zachowana przy dalszym ich wzroście – już w zamku łopatki. Lokalną orientację tego zespołu dendrytów określano metodą dyfrakcji rentgenowskiej Lauego. Ustalono, że nawet niewielkie odchylenie kierunku wzrostu rdzeni dendrytów od osi łopatki w strefie przejścia selektor/zamek powoduje zwiększenie ich niejednorodności w dolnych fragmentach zamka [C4]. Ramiona 2-go rzędu wzrastające prostopadle do rdzenia dendrytu ukierunkowane są, przy takim ich odchyleniu, nierównoległe do podstawy zamka

łopatki i rozrastają się niesymetrycznie. Efektem takiego wzrostu bocznego niektórych ramion 2-go rzędu jest ograniczanie długości rosnących ramion dendrytów przez dolną powierzchnię formy odlewniczej. Występuje zjawisko analogiczne do wykazanego dla wzrostu dendrytów w selektorze [C1]. Ustalono, że wzrastające ramię dendrytu, po kontakcie ze ścianką formy, ulega wygięciu. Wówczas może dojść do utworzenia dwóch bloków krystalicznych o różnej orientacji oddzielonych granicą małego kąta. Odchylenie rdzeni dendrytów od założonego kierunku krystalograficznego spowodowane ich oddziaływaniem ze ściankami formy w strefie selektora występuje głównie w pobliżu tych ścianek. Stąd dendryty wzrastające ze środkowej części selektora bezpośrednio do zamka łopatki cechują się największą jednorodnością i najmniejszym kątem odchylenia od założonej ich orientacji [001]. Ustalono, że odchylenie kierunku wzrostu dendrytów, które nastąpiło w selektorze w pobliżu ścianek formy, może doprowadzić do zmiany orientacji krystalicznej przy dalszym wzroście dendrytów, także w strefie zamka nad selektorem. Powoduje to powstawanie w zamku niejednorodności orientacji o kształcie pierścieniowym. Ustalono, że niejednorodność pierścieniowa prowadzi do zmiany kierunku wzrostu ramion 2-go rzędu. Wykazano, bowiem, że ramiona 2-go rzędu mogą rosnąć nierównolegle do podstawy zamka i są w pewnych kierunkach blokowane przez dolną ściankę formy. Mogą także nieznacznie zmieniać orientację krystaliczną w efekcie obrotu wokół własnej osi [C4]. Dodatkowo, na podstawie prowadzonych badań po raz pierwszy wykazano, że ramiona te poprzez ich szybki wzrost boczny, mogą tworzyć liniowe zespoły dendrytów tzw. „łańcuszki dendrytyczne”, narzucając ich orientację sąsiadnym dendrytom, w odróżnieniu od oczekiwanej orientacji krystalograficznej. Efektem analizy wyników tych badań doświadczalnych jest zaproponowanie modelu powstawania tego rodzaju defektów z uwzględnieniem rozkładu orientacji sieci krystalicznej dendrytów [C4].

Podsumowując, najważniejszym osiągnięciem z tego zakresu jest ustalenie mechanizmów krystalizacji dendrytycznej w początkowej strefie odlewu monokrystalicznej łopatki oraz określenie krytycznej wartości kąta pomiędzy rdzeniem dendrytu i płaszczyzną powierzchni ścianki formy odlewniczej, przy której to wartości zmienia się charakter wzrostu dendrytu w strefie przypowierzchniowej. Istotnym jest również wykazanie, że w dolnym fragmencie zamka łopatki, tworzy się warstwa nieustalonego wzrostu dendrytów, a także ustalenie grubości tej warstwy. Ważnym jest wskazanie, że obserwowany jest intensywniejszy wzrost boczny dendrytów, w porównaniu do ich wzrostu osiowego, z prędkością dużo większą niż prędkość wyciągania formy odlewniczej ze strefy wysokiej temperatury. Istotnym jest także ustalenie warunków tworzenia się granic niskiego kąta na podstawie wykonanej analizy mechanizmów wzrostu dendrytycznego i wprowadzeniu parametru liniowej odległości międzydendrytycznej.

Zagadnienie dotyczące **krystalizacji dendrytycznej zamka łopatki monokrystalicznej** opisano w publikacjach [C3-C11] jako efekt przeprowadzonych badań charakteryzujących stopień oddziaływania warunków krystalizacji kierunkowej w procesie wytwarzania łopatek monokrystalicznych o złożonym kształcie. Uzyskane rezultaty stanowiły podstawę wyodrębnienia z zamka łopatki stref cechujących się różnym zdefektowaniem struktury. Wyodrębniono strefę hipotetycznego wydłużenia selektora do zamka, która cechuje się największą jednorodnością zespołu dendrytów i najmniejszą liczbą granic małego kąta [C4,C5].

Charakteryzacji zjawiska tworzenia się defektów struktury krystalicznej, w szczególności granic małego kąta w zamku łopatek, podczas procesu monokrystalizacji, dokonano na podstawie opracowanej autorskiej metody interpretacji wyników badań [C3-C5] dla łopatek monokrystalicznych o złożonym kształcie. Metoda obejmuje wieloskalową analizę porównawczą wyników badań prowadzonych w skali makro- i mikrometrycznej oraz wyników badań w skali nanometrycznej. Zastosowano w tych badaniach spektroskopię anihilacji pozytonów (PALS). Metodę tą przystosowano i po raz pierwszy użyto do badania makroskopowych granic małego kąta charakterystycznych dla monokrystalicznych nadstopów niklu [C3,C5]. Analizę prowadzono dla obszarów mikrostruktury zamka łopatki zawierającej makroskopowe granice małego kąta – identyfikowane metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej oraz dla obszarów jednorodnych pozbawionych tych granic. Obszary jednorodne zamka łopatki krystalizowały bezpośrednio od selektora. Ustalono, że w obszarach krystalizujących osiowo – bezpośrednio od selektora, są identyfikowane przede wszystkim mono-wakanse niklu będące dominującymi defektami punktowymi, oraz klastery wakansów. Natomiast w obszarach, w których rozpoznawano granice małego kąta, przeważającym rodzajem identyfikowanych defektów są klastery wakansów [C3].

Ważnym etapem w procesie produkcji łopatek silników lotniczych z nadstopów niklu jest ich obróbka cieplna. Dlatego wytworzone łopatki monokrystaliczne poddano standardowej obróbce cieplnej. Dla obrobionych cieplnie łopatek wykonano badania metodą PALS w obszarach analogicznych do tych wybranych dla łopatek *as-cast*. Wykazano, że w zamkach łopatek po obróbce cieplnej, gęstość dyslokacji w obszarach wzrostu osiowego dendrytów bezpośrednio od selektora jest mniejsza w porównaniu do obszarów, w których występują granice małego kąta. Ustalono, że niejednorodność stężenia wakansów zależy przede wszystkim od kinetyki procesów dyfuzyjnych. Stwierdzono, że przeprowadzona obróbka cieplna nie eliminuje większości makroskopowych defektów struktury krystalicznej związanych z dezorientacją dendrytów [C5]. Wykazano także, że przyjęta wieloskalowa analiza defektów struktury przez zastosowanie wzajemnie uzupełniających się metod – rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej i spektroskopii anihilacji pozytonów – pozwala na określenie defektów struktury, jak również na ustalenie

wzajemnej relacji defektów w skali makroskopowej (granice małego kąta) oraz w skali mikro- i nanometrycznej (wakanse i skupiska wakansów) [C3,C5].

Przeprowadzono kompleksową analizę defektów struktury krystalicznej łopatek monokrystalicznych z nadstopów niklu przy zastosowaniu nowatorskiej metody dyfrakcji rentgenowskiej Ω -skan. Umożliwia ona wyznaczanie pełnej orientacji krystalograficznej oraz parametru sieciowego na całej powierzchni zamka i pióra łopatek. Ustalono na podstawie analizy wyników badań, że dotychczas scharakteryzowane lokalne zmiany orientacji krystalicznej dendrytów mogą być źródłem powstawania granic małego kąta. Granice te mogą być „dziedziczone” w mikrostrukturze dendrytycznej kształtowanej w kolejnym etapie monokrystalizacji [C6]. Granice małego kąta powstające w strefie połączenia selektora i zamka łopatki w większości są kontynuowane także w strefie całej objętości zamka wzdłuż kierunku krystalizacji. Wykazano również, że strefy występowania granic małego kąta charakteryzują się zniekształceniami sieci krystalicznej. Stwierdzono lokalne zmiany wartości parametru sieciowego i związane z nimi lokalne naprężenia własne (rozmycie kontrastu na topogramach rentgenowskich) [C6].

Ustalono w badaniach łopatek rdzeniowanych – z wewnętrznymi kanałami, że występowanie tych dodatkowych elementów w postaci ścianek kanałów wewnętrznych, ogranicza prędkość bocznego wzrostu dendrytów. Wykazano, że swobodny wzrost boczny od selektora może nastąpić wyłącznie, gdy rozmieszczenie kanałów wewnętrznych i selektora pozwala na prostoliniowy wzrost ramion dendrytów 2-go rzędu pomiędzy tymi kanałami. Natomiast, gdy połączenie selektora i zamka położone jest niesymetrycznie na płaszczyźnie podstawy łopatki, przeciwległe do kanałów wewnętrznych, wzrastające z dużą prędkością ramiona wiodące 2-go rzędu dendrytów, których boczny wzrost jest ograniczony przez ścianki ceramicznych rdzeni lub ścianki formy, są zahamowane lub zmieniają kierunek wzrostu. Powoduje to, odpowiednio, dalszy wzrost dendrytów poprzez wzrost ramion kolejnych rzędów lub ich zakrzywienie. Występuje zjawisko analogiczne do ograniczenia wzrostu osiowego przez ścianki formy w selektorze [C1]. Wykazano, że występujące defekty struktury zwiększają swoją intensywność ze wzrostem odległości od strefy selektora. Wielokrotna multiplikacja ramion dendrytów oraz wygięcie i zniekształcenie wiodących ramion dendrytów, mogą spowodować utworzenie granicy małego kąta, a nawet, w skrajnym przypadku, granicy dużego kąta [C7]. Określono, że dalsza krystalizacja dendrytów poprzez tworzenie się i wzrost ramion kolejnego rzędu powoduje lokalne zwiększenie prędkości krystalizacji łopatki, i stąd prowadzi do rozdrobnienia dendrytów lub wydłużenia tworzących się ramion [C7].

Metoda dyfrakcji rentgenowskiej w geometrii Ω -skan zastosowana w badaniach łopatek rdzeniowanych umożliwiła szczegółową charakteryzację struktury krystalicznej wokół kanałów wewnętrznych. Określono występujące lokalne zmiany parametru sieciowego cząstek fazy γ' i zmianę ich orientacji krystalicznej. Wykazano, że szerokość obszaru cechującego się istotnymi zmianami parametru sieciowego i orientacji krystalicznej wynosi 3÷4 mm od powierzchni bocznej kanału [C8, C9]. W badaniach stosowano opracowany autorski model rozkładu pierwiastków stopowych na froncie krystalizacji w pobliżu ceramicznych rdzeni formy odlewniczej. Ustalono, że na zmiany wartości parametru sieciowego w obszarach wokół kanałów wewnętrznych może mieć wpływ segregacja pierwiastków stopowych w strefie tworzących się wierzchołków dendrytów. Spowodowana ona jest występującymi lokalnymi odkształceniami makroskopowymi frontu krystalizacji w strefie przy rdzeniach ceramicznych kanałów wewnętrznych [C8]. Wykazano, że lokalne zmiany parametru sieciowego kryształów fazy γ' są większe w strefach objętości nadstopu położonych w większej odległości od strefy hipotetycznego wydłużenia selektora do środka objętości łopatki. Określone niekorzystne efekty spowodowane są niesymetrycznym położeniem selektora w odlewach łopatek rdzeniowanych. Stwierdzono, że nawet niewielkie lokalne zmiany kształtu frontu krystalizacji powodują dezorientację tworzących się dendrytów – od 2° do 3° [C8]. Analiza wyników prowadzonych badań była podstawą do opracowania sposobu ograniczenia wpływu rdzeni kanałów wewnętrznych formy na rozrost dendrytów i powstawanie niejednorodności mikrostruktury i struktury łopatek. Sposób ten polega na wprowadzeniu rdzeni wykonanych w postaci rurek ceramicznych o mniejszej przewodności cieplnej zamiast elementów litych [C8]. Wprowadzone rdzenie powodują zmniejszenie strumienia ciepła rozpraszanego przez nie kierunkowo oraz zmniejszenie lokalnego zniekształcenia frontu krystalizacji.

W oparciu o wyniki badań stwierdzono, że tworzące się w początkowym etapie krystalizacji liniowe zespoły dendrytów tzw. „łańcuszki dendrytyczne” są efektem przede wszystkim istotnie większej prędkości wzrostu bocznego dendrytów w porównaniu do ich wzrostu osiowego. Powodują one defekty mikrostruktury dendrytycznej i mogą wpływać również na zmiany defektów struktury krystalicznej w skali nanometrycznej, m.in. na wartość parametru sieciowego [C10]. Badania mikrostruktury dendrytycznej prowadzono na przekrojach wzdłużnych łopatek. Uwzględniono obszary niezaburzonego wzrostu zespołu dendrytów. Cechują się one tylko nieznaczną zmianą wartości parametru sieciowego kryształów fazy γ' . Wykazano te zmiany przez określenie korelacji danych charakteryzacji mikrostruktury dendrytycznej w jednorodnych jej obszarach i przebiegu funkcji zmiany parametru sieciowego w tych obszarach. Ustalono, że w obszarach łopatek, w których występują lokalne anomalie wzrostu dendrytów, np. „łańcuszki

dendrytyczne”, wartość parametru sieciowego zmniejsza się o ok. $0,2 \cdot 10^{-3}$ nm w porównaniu do wartości w obszarach bez zniekształceń [C10]. To nowe podejście opracowane i zastosowane do interpretacji wyników analizy porównawczej mikrostruktury dendrytycznej i zmian wartości parametru sieciowego komórki elementarnej pozwala na wyodrębnienie zmiany wartości parametru sieciowego spowodowanej występowaniem defektów w skali nanometrycznej struktury od tej spowodowanej występowaniem defektów w skali makrometrycznej mikrostruktury dendrytycznej odlewów łopatek.

Przeprowadzona wieloskalowa analiza wyników badań charakteryzujących strukturę i mikrostrukturę dendrytyczną łopatek rdzeniowanych, zarówno w skali makroskopowej, obejmującej fragmenty zespołu dendrytów – kilka lub kilkadziesiąt dendrytów (skala rzędu kilku milimetrów), jak również w skali mikroskopowej obejmującej pojedyncze dendryty (skala rzędu setek mikrometrów) i w skali nanometrycznej dotyczącej komórki elementarnej fazy γ' (dziesiątne części nanometra) pozwoliła stwierdzić, że osiowy wzrost dendrytów w zamku łopatki cechuje się najmniejszym stopniem ich zniekształcenia. Również parametr sieciowy kryształów fazy γ' cechuje się najmniejszymi zmianami wartości w strefie, w której proces krystalizacji wyróżnia się udziałem ramion pierwotnych dendrytów wzrastających bezpośrednio od selektora. Ustalono, że w pozostałych strefach łopatki występuje „efekt wachlarza”. Zjawisko to charakteryzuje gradientowe odchylenie kierunku wzrostu dendrytów na zewnątrz hipotetycznego wydłużenia selektora do objętości zamka łopatki [C8,C9]. Spowodowane jest to oddziaływaniem lokalnej zmiany orientacji krystalicznej w pierścieniu odwzorowującym zarys selektora w strefie połączenia selektora i zamka, występującej w początkowym etapie krystalizacji [C4,C5]. Ustalono, że występujące lokalne zmiany orientacji krystalicznej w pobliżu kanałów wewnętrznych mogą zmniejszyć dezorientację spowodowaną „efektem wachlarza” [C9].

Podsumowując, istotnym osiągnięciem z tego zakresu jest opracowanie autorskiej metody interpretacji rezultatów prac badawczych, obejmującej wieloskalową analizę porównawczą wyników badań prowadzonych w skali makro-, mikro- i nanometrycznej oraz użycie po raz pierwszy spektroskopii anihilacji pozytonów (PALS) do badania monokrystalicznych łopatek. Ważnym jest także wykazanie zjawiska „dziedziczenia” defektów powstałych w początkowym etapie krystalizacji do stref łopatki krystalizujących w dalszym etapie procesu. Kluczowym jest ustalenie, że niektóre rodzaje defektów struktury i mikrostruktury dendrytycznej pozostają w odlewie pomimo przeprowadzonej standardowej obróbki cieplnej. Znaczące jest również opracowanie sposobu ograniczenia wpływu rdzeni kanałów wewnętrznych formy na rozrost boczny dendrytów i na powstawanie niejednorodności mikrostruktury dendrytycznej łopatek.

Krystalizacja dendrytyczna w piórze łopatki monokrystalicznej jest zjawiskiem interesującym z uwagi na fakt, iż pióro łopatki jest obszarem cienkościennym o stosunkowo niewielkiej odległości między ściankami, w którym proces krystalizacji następuje w warunkach odmiennych od tych występujących w zamku. Zagadnieniu temu poświęcono publikacje C11-C14. W strefie przejścia zamek / pióro łopatki następuje duże i skokowe zmniejszenie powierzchni przekroju, w którym występuje osiowy wzrost dendrytów. Zablockowanie wzrostu części dendrytów w kierunku osiowym w strefie półki zamka może spowodować zmiany w ukierunkowaniu wzrastających dendrytów. Skutkiem tego jest ich intensywny rozrost boczny oddziałujący na inne, sąsiednie dendryty, wzrastające w strefę pióra łopatki. Zaburzenie kierunku wzrostu dendrytów może spowodować powstanie lokalnych naprężeń własnych sieci krystalicznej. Przyczyną zaburzenia wzrostu dendrytów jest skokowe zmniejszenie objętości ciekłego metalu związane ze zmianą rozmiarów przekroju poprzecznego formy odlewniczej. Zmniejszenie objętości prowadzi do dużej zmiany w dystrybucji ciepła w tej strefie oraz do zmiany kształtu frontu krystalizacji. Ustalono, że zmiana wszystkich tych parametrów procesu monokrystalizacji oddziałuje na stopień uzyskania zadanej orientacji krystalicznej dendrytów rosnących w kierunku pióra łopatki monokrystalicznej.

Powierzchnia pióra łopatek turbin silników lotniczych dla uzyskania dużego efektu aerodynamicznego ma kształt linii śrubowej. Również powierzchnie zewnętrzna i wewnętrzna pióra nie są wzajemnie równoległe – zbliżają się do siebie w kierunku wierzchołka łopatki. Stąd duży fragment pióra łopatki jest cienkościennym. Ciekły metal krystalizuje w małej objętości między ściankami formy odlewniczej – rzędu kilku mm. Stwierdzono, że w zależności od kąta wzajemnego nachylenia rdzeni dendrytów i powierzchni ścianki formy odlewniczej w strefie cienkościennej pióra łopatki może wystąpić efekt rozdrobnienia dendrytów przy ściankach formy, które są nachylone zbieżnie z kierunkiem wzrostu zespołu dendrytów [C11]. Jest to spowodowane lokalnym zwiększeniem prędkości boczego wzrostu dendrytów w kierunku do ścianek formy.

Analiza wyników badań stanowi podstawę do stwierdzenia, że zarówno osiowy, jak również boczny wzrost dendrytów w ciekłym metalu we fragmencie formy o niewielkiej odległości między jej przeciwległymi ściankami, jest zakłócany przez te ścianki. Uzyskane wyniki badań są pierwszymi, w których określono krytyczną wartość tej odległości – wynosi 1,5 mm [C12]. Tworzące się zaburzenia w budowie dendrytów powodują zmiany ich pierwotnej orientacji krystalicznej w kierunku zgodnym z kierunkiem nachylenia powierzchni formy – efekt „ukierunkowania” dendrytów.

Opracowano autorski i nowatorski dla monokrystalicznych łopatek turbin sposób określania wartości kąta odchylenia i orientacji kierunku [001] dendrytów od kierunku wyciągania odlewu w procesie monokryształizacji łopatki [C12]. Ustalono, że w zależności od kierunku dezorientacji zespołu dendrytów w strefie przejścia między zamkiem i piórem „ukierunkowywanie” się dendrytów w krystalizującym piórze łopatki w zależności od warunków krystalizacji może doprowadzić do zwiększenia lub zmniejszenia wartości kąta odchylenia od kierunku krystalicznego [001] [C12].

Wykazano jednocześnie, że w krystalizującym piórze oddziaływanie rosnących dendrytów ze ściankami formy odlewniczej prowadzić może do powstawania lokalnej zmiany w ich orientacji krystalicznej. Powoduje ona tworzenie się granic małego kąta. Ustalono, że tworzenie się tych granic zależy od wartości kąta pomiędzy ścianką formy i kierunkiem wzrostu dendrytu [C13]. Wykazano również, że granice małego kąta, powstałe w początkowym stadium krystalizacji mogą być „dziedziczone” do pióra łopatki. Określono także, że granice małego kąta nie zawsze mogą zostać usunięte w zabiegach obróbki cieplnej. Stwierdzono, że w strefie przy wierzchołku pióra łopatki tworzy się większa liczba granic małego kąta. Jest ona spowodowana kumulacją granic małego kąta utworzonych podczas krystalizacji zamka łopatki i „dziedziczonych” do jej pióra. Większa liczba granic małego kąta jest także spowodowana dodatkowym ich generowaniem w piórze łopatki w wyniku oddziaływania dendrytów ze ściankami formy odlewniczej [C13].

Analiza uzyskanych wyników badań z uwzględnieniem kształtu geometrycznego i struktury pióra łopatki była podstawą opracowania metodyki określania liczby granic małego kąta w wierzchołku pióra. Uwzględniono kształt i parametry geometryczne tego fragmentu pióra i rezultaty nieniszczących pomiarów orientacji krystalicznej zespołu dendrytów, a także liczbę granic małego kąta w obszarze początkowym łopatki. Zaproponowana nowatorska metodyka badań może znaleźć zastosowanie w odlewniach precyzyjnych i stanowić podstawy kontroli jakości półwyrobów w produkcji łopatek monokrystalicznych przeznaczonych do zastosowania na różne stopnie turbiny wysokiego ciśnienia [C14].

Podsumowując, najważniejszym osiągnięciem z tego zakresu jest ustalenie, że zarówno osiowy, jak również boczny wzrost dendrytów w ciekłym metalu we fragmentach cienkościennych, jest zakłócany przez ścianki formy, powodując ukierunkowanie wzrastających dendrytów. Istotnym jest określenie krytycznej wartości odległości między ściankami formy, dla której ukierunkowanie może powodować tworzenie granic małego kąta. Znaczącym jest również opracowanie metodyki określania liczby granic małego kąta w wierzchołku pióra łopatki w oparciu o ich liczbę w zamku i orientację krystaliczną oraz kształt geometryczny pióra.

Podsumowanie

Mechanizm tworzenia, dyfuzji i zaniku defektów strukturalnych podczas osiowego i boczego wzrostu dendrytów w trakcie krystalizacji monokrystalicznych łopatek turbiny z nadstopów niklu scharakteryzowany został w aspekcie wielkoskalowym z uwzględnieniem stref łopatkki wynikających z jej kształtu i parametrów geometrycznych.

Rezultaty badań, szczegółowo scharakteryzowane w publikacjach [C1-C14], uzyskano przy zastosowaniu autorskiej metodyki i przy użyciu, w sposób skorelowany, metod badawczych, niestosowanych dotychczas do oceny jakości łopatek monokrystalicznych. Przyjęta metodyka badawcza i odpowiednio dobrane metody eksperymentalne oraz unikatowy sposób analizy uzyskanych wyników badań, pozwoliły w sposób kompleksowy opisać zmiany zachodzące w trakcie procesu krystalizacji w strukturze krystalicznej monokrystalicznych łopatek turbin.

Najważniejsze rezultaty oraz wnioski z przeprowadzonych prac badawczych mają aspekt poznawczy, dotyczący charakteryzacji w ujęciu wieloskalowym monokrystalicznych łopatek litych i rdzeniowanych uzyskanych metodą Bridgmana z nadstopów niklu oraz aspekt metodologiczny, wynikający z zastosowania autorskich metod analizy uzyskiwanych danych eksperymentalnych oraz metod i technik badawczych zastosowanych w ocenie struktury krystalicznej badanych materiałów i elementów z nich wykonanych.

W zakresie charakteryzacji materiału badań, osiągnięcie stanowi kompleksowy opis zmian morfologii zespołu dendrytów w odlewach łopatek monokrystalicznych litych i rdzeniowanych, z uwzględnieniem ich stref krytycznych: selektor / zamek, zamek / pióro, wierzchołek pióra, występujących w procesie krystalizacji. Wykazano, że w dolnym fragmencie zamka łopatkki, w strefie przejścia selektor / zamek, tworzy się warstwa nieustalonego wzrostu dendrytów. Wskazano, że tym etapie krystalizacji obserwowany jest intensywniejszy wzrost boczny dendrytów, w porównaniu do ich wzrostu osiowego. Stwierdzono, że efekt ten spowodowany jest skokową zmianą objętości ciekłego metalu w formie – zwiększa się powierzchnia przekroju odlewu łopatkki. Wzrost boczny dendrytów odbywa się w tej strefie z prędkością dużo większą niż prędkość wyciągania formy odlewniczej ze strefy wysokiej temperatury i często skutkuje powstawaniem długich ramion 2-go rzędu dendrytów. Określono grubość warstwy nieustalonego wzrostu dendrytów. Wykazano, że analiza mechanizmów zarodkowania i wzrostu dendrytów w procesie krystalizacji, a także analiza procesu tworzenia defektów struktury w warstwie nieustalonego wzrostu jest szczególnie istotna z powodu występowania zjawiska „dziedziczenia” defektów do kolejnych fragmentów odlewu monokrystalicznych łopatek podczas procesu krystalizacji kierunkowej.

Analiza uzyskanych wyników badań stanowiła podstawę do określenia mechanizmu oddziaływania zespołu wzrastających równoległych dendrytów ze ściankami formy, zarówno na powierzchni zewnętrznej pióra łopatki jak również powierzchni wewnętrznej jej kanałów. Scharakteryzowano mechanizm oddziaływania dendrytów wzrastających w objętości zamka łopatki, w różnych strefach jej pióra (również cienkościennej, przy krawędzi spływu pióra) oraz w strefie zlokalizowanej przy wewnętrznych kanałach pióra. Wykazano dla badanych stref odlewu monokrystalicznego łopatki charakterystyczne ich cechy, które spowodowane są występowaniem przede wszystkim różnych warunków odprowadzania ciepła przez ścianki formy ceramicznej oraz niejednorodnym rozkładem gradientu temperatury w komorze pieca odlewniczego.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazano także, że pomimo prowadzonej standardowej obróbki cieplnej odlewów monokrystalicznych niektóre rodzaje defektów strukturalnych pozostają w odlewie z nadstopu. Zaobserwowano, że w trakcie procesu obróbki cieplnej mogą powstawać nowe, innego typu defekty, między innymi makro- i mikroskopowa niejednorodność orientacji kryształów (np. granice bloków lub błędnie zorientowane pasma dendrytów), która należy do defektów strukturalnych i wad odlewniczych pozostających po obróbce cieplnej.

W prowadzonym cyklu badawczym stwierdzono, że w celu uzyskania pełnego opisu zmian zachodzących w strukturze defektowej łopatek monokrystalicznych z nadstopów niklu oraz poprawnej analizy uzyskanych rezultatów badań, konieczne jest przeprowadzenie chronologicznie uporządkowanych procedur pomiarowych.

W aspekcie metodyki badań, osiągnięcie stanowi zastosowanie w sposób skorelowany różnych metod eksperymentalnych umożliwiających analizę defektów struktury w różnej skali. Wprowadzono także autorskie metody analizy wyników badań mikroskopowych, dyfrakcji rentgenowskiej i spektroskopii anihilacji pozytonów, które szczegółowo scharakteryzowano w pracach [C1-C14]. Przy wykorzystaniu opracowanych metod analizy wyników eksperymentalnych możliwe było określenie zależności poszczególnych składowych kierunku wzrostu dendrytów i parametru sieciowego fazy γ' od stopnia zdefektowania struktury krystalicznej. Autorskie metody użyte w trakcie analizy wyników badań uzupełnione zostały opisem modeli teoretycznych, charakteryzujących proces powstawania defektów wzrostowych dendrytów, m.in. granic małego kąta i nieprawidłowości morfologii zespołu dendrytów.

Analiza porównawcza morfologii zespołu dendrytów i ich właściwości przeprowadzona z użyciem metod służących charakteryzacji defektów struktury w różnej skali umożliwiła stwierdzenie występowania różnych mechanizmów wzrostu dendrytów i ich scharakteryzowanie.

Wykazano, że mechanizmy wzrostu zależą od warunków procesu krystalizacji metodą Bridgmana. Ustalono sposób modyfikowania warunków procesu krystalizacji kierunkowej dla podwyższenia doskonałości struktury krystalicznej odlewów monokrystalicznych łopatek turbin silników lotniczych.

Korelacja wyników badań uzyskanych metodą dyfrakcyjnej topografii rentgenowskiej – charakteryzującej defekty w skali makroskopowej, spektroskopii anihilacji pozytonów – charakteryzującej defekty w skali mikro- i nanometrycznej, a także wartościami parametru sieciowego fazy γ' (skala nanometryczna), przy jednoczesnym uwzględnieniu morfologii zespołu dendrytów, umożliwiła określenie zarówno charakteru jak również mechanizmów tworzenia się defektów w odlewie monokrystalicznej łopatki w trakcie procesu krystalizacji kierunkowej.

Opracowana autorska metoda analizy rozmieszczenia rdzeni dendrytów na wzdłużnym przekroju łopatki umożliwiła natomiast ilościowe określenie stopnia niejednorodności zespołu dendrytów na płaszczyźnie. Jest ona charakteryzowana wartością współczynnika liniowej odległości międzidendrytycznej w skali nieosiągalnej dla innych metod badawczych.

Przeprowadzona analiza wykazanych defektów struktury krystalicznej i wad odlewniczych stwarza możliwość ukierunkowania dalszych badań odlewów monokrystalicznych łopatek w stanie *as-cast* i po ich obróbce cieplnej, z uwzględnieniem ustalonego rozkładu przestrzennego składowych orientacji krystalicznej oraz kształtu i rozmiaru łopatek. Pozwala także na określenie mechanizmów osiowego i bocznego wzrostu dendrytów.

Uzyskane wyniki badań i ich kompleksowa analiza stanowi podstawę do sformułowania wniosków wskazujących na postęp w poznaniu mechanizmów wzrostu dendrytów fazy γ i fazy γ' podczas krystalizacji monokrystalicznych łopatek z nadstopów niklu. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się więc do modyfikacji technologii łopatek monokrystalicznych wytwarzanych w procesie krystalizacji kierunkowej metodą Bridgmana.

Wskazane osiągnięcia, zarówno o charakterze poznawczym jak i metodologicznym, stanowią rozszerzenie wiedzy w zakresie tematyki omawianego zagadnienia, w obszarze inżynierii materiałowej.

c. Omówienie pozostałych istotnych osiągnięć naukowo-badawczych

Zagadnieniami badawczymi dotyczącymi wytwarzania materiałów inżynierskich w procesie monokryształizacji z ciekłego metalu zająłem się już na studiach magisterskich, które ukończyłem w 2006 roku obroną pracy magisterskiej pt. „*Otrzymywanie monokryształów $Co_{1-x}Fe_xSi_2$ metodą Bridgmana*”. W ramach badań określiłem możliwość wytwarzania monokrystalicznego dwukrzemku kobaltu domieszkowanego atomami żelaza – nowego materiału do zastosowania w mikroelektronice. W czasie wykonywania badań zdobyłem pierwsze doświadczenia z zakresu technologii monokryształów metodami kierunkowej krystalizacji. Nabyłem także umiejętności praktyczne w zakresie niektórych metod badań monokryształów, w tym określania ich orientacji krystalicznej i charakteryzowania defektów strukturalnych.

Badania w zakresie tematyki związanej z technologią wytwarzania materiałów monokrystalicznych kontynuowałem w toku podjętych w 2006 roku studiów doktoranckich. Zaprojektowałem nowego rodzaju kompozyty typu kryształ-kwazikryształ z udziałem faz kwazikrystalicznych. Podstawą składu chemicznego zaprojektowanych kompozytów były trójskładnikowe stopy układu Al-Cu-Fe i Al-Cu-Co. W prowadzonych badaniach koncentrowałem się głównie na określeniu parametrów technologicznych prowadzonego procesu krystalizacji oraz na doborze odpowiedniego namiarowego składu chemicznego. Celem było wytworzenie nowego rodzaju monokrystalicznych kompozytów, które powinny cechować się stabilnością chemiczną i anizotropowymi właściwościami uzyskanymi przez ukierunkowanie zbrojenia w postaci włókien z frakcją faz kwazikrystalicznych. W ramach działalności naukowej prowadziłem badania mikroskopowe i rentgenowskie nowego rodzaju kompozytów celem charakteryzacji wytworzonych składników fazowych, w szczególności faz kwazikrystalicznych. Scharakteryzowałem mikrostrukturę kompozytów, określiłem skład chemiczny składników fazowych oraz ich orientację krystaliczną. Określiłem także poziom zdefektowania kompozytów metodą rentgenowskiej topografii dyfrakcyjnej i wyznaczyłem wartości współczynnika przewodności cieplnej w kierunku wzdłużnym i poprzecznym do położenia włókien zbrojących. Część wyników, które uzyskałem w trakcie realizacji badań stały się podstawą do przygotowania rozprawy doktorskiej pt. „*Otrzymywanie oraz charakterystyka kompozytów typu kryształ-kwazikryształ stopów Al-Cu-Fe i Al-Cu-Co*”, którą obroniłem z wyróżnieniem. W efekcie przeprowadzonych badań znacząco poszerzyłem swoje doświadczenie w zakresie krystalizacji kompozytowych materiałów monokrystalicznych.

Wyniki uzyskane podczas kilkuletnich badań pozwoliły na opracowanie oryginalnego procesu wytwarzania kompozytów typu kryształ-kwazikryształ stopów układu Al-Cu-Fe

i Al-Cu-Co oraz określenie kryteriów doboru optymalnych parametrów procesu. Zaprojektowanie oraz wytworzenie nowego rodzaju kompozytów typu kryształ-kwazikryształ stopów układu Al-Cu-Fe i Al-Cu-Co a także uzyskane wyniki badań pozwoliły na scharakteryzowanie nowego rodzaju kompozytu włóknistego o anizotropowych właściwościach. Składniki fazowe tego kompozytu pełniące rolę zbrojenia i osnowy, powstają in-situ podczas jednego procesu kierunkowej krystalizacji. Zapewnia to, przy określonej zawartości w kompozycie fazy kwazikrystalicznej, większą wytrzymałość na rozciąganie i kierunkowe odprowadzanie ciepła. Uzyskane wyniki badań pozwoliły także na opracowanie jakościowego modelu tworzenia włókien zbrojących w kompozytach in-situ typu kryształ-kwazikryształ [Zał. IV pkt. II.4 poz. 12]. Szczególnym osiągnięciem uzyskanym w przeprowadzonych badaniach było opracowanie nowego rodzaju kompozytów włóknistych wytworzonych podczas procesu monokrystalizacji. Określiłem także zakres namiarowy składu chemicznego, dla którego powstaje stabilny chemicznie i strukturalnie materiał inżynierski. Proces wytwarzania i jego parametry technologiczne, jak również zaprojektowany materiał zostały objęte ochroną patentową Urzędu Patentowego RP [Zał. IV pkt. III.3 poz. 1-2]. Aktualnie moje zainteresowania naukowe koncentrują się na technologii produkcji i badaniu monokrystalicznych elementów konstrukcyjnych turbin silników lotniczych i generatorów energetycznych oraz monokrystalicznych kryształów optycznych i półprzewodników, które badam w ramach współpracy z przemysłem.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Poza działalnością naukową skoncentrowaną na tematyce wskazanej jako główne osiągnięcie naukowe stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, współpracuję z kilkoma ośrodkami naukowymi w kraju. Główną współpracę naukowo-badawczą podjąłem z Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. W roku 2017 odbyłem tam miesięczny staż [Zał. IV, pkt. II.10 poz. 1], w ramach którego brałem czynny udział w procesie wytwarzania i obróbki cieplnej różnych typów monokrystalicznych łopatek turbin wysokiego ciśnienia silników lotniczych z nadstopów niklu. Przeprowadziłem badania tych łopatek z wykorzystaniem specjalistycznej aparatury będącej na wyposażeniu Laboratorium. Odbyłem w Laboratorium wiele wizyt stażowych [Zał. IV, pkt. II.10 poz. 2-6], w czasie których realizowałem kompleksowe badania łopatek litych i rdzeniowanych oraz przeprowadzałem zabiegi obróbki cieplnej wytworzonych łopatek. Opracowałem i zweryfikowałem wstępne propozycje modyfikacji niektórych parametrów procesu technologicznego wytwarzania łopatek. Rezultatem badań realizowanych podczas odbytych staży oraz współpracy nawiązanej z pracownikami Laboratorium było opracowanie nowej metody kontroli jakości odlewów monokrystalicznych łopatek. Podstawą metody jest określenie kąta nachylenia rdzeni dendrytów względem powierzchni formy odlewniczej. Opracowana metoda została objęta ochroną patentową udzieloną przez Urząd Patentowy RP [Zał. IV, pkt. III.3 poz. 3]. W efekcie współpracy opublikowano szereg wspólnych artykułów naukowych [Zał. IV, pkt. II.4].

W trakcie realizacji badań dotyczących projektowania kompozytów typu krysztalkwazikryształ trójskładnikowych stopów układu Al-Cu-Fe i Al-Cu-Co, współpracowałem z innymi ośrodkami naukowymi, m.in. Politechniką Śląską oraz Akademią Górniczo-Hutniczą w Krakowie. Wykonałem w tych ośrodkach prace badawcze, np. określenie wartości współczynnika przewodności cieplnej oraz charakteryzację struktury krystalicznej faz kwazikrystalicznych. Współpracuję również z pracownikami Katedry Nauki o Materiałach Politechniki Rzeszowskiej. Efektem współpracy są publikacje naukowe, a także zrealizowany projekt badawczy w ramach konsorcjum Politechniki Rzeszowskiej, Uniwersytetu Śląskiego i firmy Pratt & Whitney Rzeszów S.A., finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju [Zał. IV, pkt. II.8 poz. 1].

Najważniejsze wyniki prowadzonych przeze mnie badań naukowych do czasu uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych opublikowane zostały w 17 publikacjach

naukowych [Zał. IV, pkt. II.4], 6 wygłoszonych referatach i na 21 posterach zaprezentowanych na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Byłem również czynnym uczestnikiem 5 sympozjów w formie szkół naukowych organizowanych przez krajowe instytucje naukowe [Zał. IV, pkt. II.6].

Po uzyskaniu stopnia doktora tematyka moich badań przez pewien czas nadal dotyczyła kompozytów typu kryształ-kwazikryształ. Później moje zainteresowania naukowe skoncentrowały się głównie na technologii i badaniu stopnia doskonałości struktury krystalicznej monokrystalicznych łopatek turbin silników lotniczych. Tematyką tą w Polsce zajmuje się nieliczna grupa pracowników naukowych. Wyniki prowadzonej pracy naukowo-badawczej po uzyskaniu stopnia doktora zaprezentowałem w 30 publikacjach naukowych [Zał. IV, pkt. II.4], 7 wygłoszonych referatach i na 31 posterach zaprezentowanych na konferencjach krajowych i międzynarodowych [Zał. IV, pkt. II.6]. Za działalność naukowo-badawczą otrzymałem w roku 2015 nagrodę JM Rektora UŚ [Zał. V, pkt. 1 poz. 1]. Brałem także udział w szkoleniach i wykładach realizowanych w ramach szkół naukowych organizowanych przez zewnętrzne ośrodki szkoleniowe i naukowe. Uzyskane w tym czasie wyniki badań, a także opracowana metodyka badań były podstawą do złożenia do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej 3 zgłoszeń patentowych, które uzyskały pozytywną decyzję o udzieleniu patentu [Zał. IV, pkt. III.3 poz. 4-6]. Przyznane patenty opisują nieniszczące sposoby identyfikacji defektów odlewniczych w monokrystalicznych łopatkach wytwarzanych z nadstopów niklu.

Wiedza i doświadczenie uzyskane w trakcie mojej dotychczasowej pracy naukowej pozwoliły na powołanie mnie do pełnienia roli promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim. Tematyka pracy doktorskiej dotyczyła analizy defektów strukturalnych oraz ich związku z krystalizacją monokrystalicznych łopatek silników lotniczych [Zał. V pkt. 2 poz. 2].

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

a. Działalność dydaktyczna

Jako Doktorant, a następnie pracownik naukowo-dydaktyczny prowadziłem zajęcia dla studentów I i II stopnia studiów stacjonarnych oraz słuchaczy studiów niestacjonarnych na kierunkach edukacja techniczno-informatyczna, inżynieria materiałowa (w języku polskim i angielskim), inżynieria biomedyczna, mechatronika i organizacja produkcji filmowej i telewizyjnej oraz filologia słowiańska, a także studentów jednolitych studiów magisterskich oraz zajęcia w języku angielskim dla studentów uczestniczących w programie Erasmus+ [Zał. V pkt. 3 poz. 1]. Opracowałem i prowadziłem 12 autorskich wykładów, w tym między innymi *Kompozyty, Materiały dla lotnictwa i techniki kosmicznej, Metrologia techniczna, Nanomateriały i nanotechnologie, Projektowanie CAD, Projektowanie i grafika inżynierska, Układy sterowania systemami mikromechatronicznymi*, oraz cztery autorskie wykłady w języku angielskim: *Composites, Crystallography, Designing and engineering graphics, Technical drawing*. Prowadziłem także zajęcia laboratoryjne i ćwiczenia w ramach 15 modułów, dla których opracowałem treści dydaktyczne i zorganizowałem większość stanowisk laboratoryjnych. Było to 12 zajęć w języku polskim: *Podstawy konstrukcji i eksploatacji maszyn, Biomateriały, Kompozyty, Krystalografia, Materialoznawstwo, Metrologia techniczna, Niekonwencjonalne techniki wytwarzania materiałów, Projektowanie CAD, Projektowanie i grafika inżynierska, Sieci komputerowe i ich wykorzystanie w inżynierii materiałowej, Technologia informacyjna, Pracownia dyplomowa*, i 3 w języku angielskim: *Composites, Crystallography, Designing and engineering graphics*. W przypadku 11 przedmiotów byłem koordynatorem modułu [Zał. V pkt. 3 poz. 2].

Dodatkowo prowadziłem kursy uzupełniające oraz konsultacje e-learningowe w zakresie przedmiotów *Krystalografia* oraz *Projektowanie i grafika inżynierska* w ramach projektu „Inżynier Materiałów – Materiał na Inżyniera” współfinansowanego ze środków UE w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki. Prowadziłem również zajęcia przygotowujące studentów do udziału w 3 edycjach Ogólnopolskiej Olimpiady Krystalograficznej organizowanych przez Komitet Krystalografii PAN.

Byłem promotorem / opiekunem naukowym 9 prac dyplomowych, w tym 5 inżynierskich i 4 magisterskich [Zał. V pkt. 2 poz. 1]. Byłem także promotorem pomocniczym 1 rozprawy doktorskiej [Zał. V pkt. 2 poz. 2].

W mojej działalności dydaktycznej ciągle uzupełniam wiedzę i systematycznie ją pogłębiam poprzez analizę najnowszych osiągnięć w dziedzinach nauki powiązanych z treściami przekazywanymi na zajęciach oraz udział w ogólnych oraz specjalistycznych szkoleniach dotyczących dydaktyki [Zał. V pkt. 5]. Potwierdzeniem wysokiego poziomu merytorycznego prowadzonych przeze mnie zajęć oraz właściwego doboru technik dydaktycznych jest uzyskanie wysokich ocen w ankietach studenckich [Zał. V pkt. 3 poz. 3].

b. Działalność organizacyjna

W czasie odbywania studiów doktoranckich w 2009 roku byłem elektorem reprezentującym doktorantów Uniwersytetu Śląskiego w wyborach członków Rady Głównej Szkolnictwa Wyższego. W latach 2016 – 2020 byłem członkiem Rady Instytutu Nauki o Materiałach (obecnie Instytut Inżynierii Materiałowej). Uczestniczyłem w posiedzeniach Rady jako przedstawiciel niesamodzielných pracowników naukowych [Zał. V pkt. 2 poz. 3]. Ponadto w latach 2016 - 2020 brałem udział w pracach Kierunkowego Zespołu ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia na kierunku inżynieria materiałowa. Byłem odpowiedzialny za analizę sylabusów i opisu modułów [Zał. V pkt. 2 poz. 4].

Zmiana siedziby i reorganizacja Instytutu Nauki o Materiałach (obecnie Instytutu Inżynierii Materiałowej) była przyczyną utworzenia Laboratorium Badań Materiałów Monokrystalicznych. Zadanie organizacji tego Laboratorium podjąłem w roku 2012. Od podstaw organizowałem strukturę i koordynowałem pracę poszczególnych pracowni Laboratorium, m.in. Pracowni topografii rentgenowskiej, Pracowni monokryształów, Pracowni badań defektów strukturalnych monokryształów oraz, w części, Pracowni precyzyjnego pomiaru parametrów sieciowych. Obecnie pełnię funkcję koordynatora Laboratorium [Zał. V pkt. 2 poz. 5].

Uczestniczyłem czynnie w organizacji 5 konferencji naukowych, w tym 4 konferencji międzynarodowych – 3 kolejnych edycji Conference on Applied Crystallography i International Conference on Electron Microscopy, oraz 1 krajowej – XVIII Seminarium Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego. W ramach XXIII Conference on Applied Crystallography (CAC 2015) pełniłem funkcję sekretarza, w pozostałych byłem aktywnym członkiem Komitetu organizacyjnego [Zał. IV pkt. II.7]. Aktualnie pełnię obowiązki sekretarza XIII Ogólnopolskiego Seminarium Spektroskopii Mössbauerowskiej, które odbędzie się w 2024 roku [Zał. IV pkt. II.7].

W 2017 roku byłem organizatorem seminarium nt. „*Recent Research on high Temperature Alloy Systems*”, w którym uczestniczył światowej sławy uczonej w dziedzinie inżynierii materiałowej, profesor Roger C. Reed z Uniwersytetu w Oxfordzie.

Pełniłem funkcję współredaktora specjalnego wydania czasopisma *Acta Physica Polonica A* (2016) zawierającego recenzowane materiały konferencyjne XXIII Conference on Applied Crystallography (CAC 2015) [Zał. IV pkt. II.11 poz. 1].

Za uzyskany dorobek organizacyjny, w roku 2016 otrzymałem nagrodę JM Rektora UŚ [Zał. V pkt. 1 poz. 2].

Jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Wzrostu Kryształów, które zrzesza pracowników polskich instytucji naukowych jak i innych dziedzin gospodarki narodowej zajmujących się wzrostem kryształów i zagadnieniami pokrewnymi w celu wymiany wiedzy i doświadczeń w zakresie technologii i charakteryzacji materiałów krystalicznych [Zał. IV pkt. II.9].

Od roku 2020 jestem członkiem tematycznego panelu doradczego (Topical Advisory Panel) czasopisma *Crystals* (IF 2,670) [Zał. IV pkt. II.11 poz. 2]. Rolą panelu jest opracowywanie tematyki nowych wydań specjalnych czasopisma, ich promocja oraz wsparcie naukowe redaktorów tematycznych. Dwukrotnie, w roku 2021 i 2022, powierzono mi funkcję edytora gościnnego w specjalnym wydaniu czasopisma *Crystals* (IF 2,670). Pierwsze wydanie specjalne zatytułowane było „*Single-Crystalline Composition Materials*” [Zał. IV pkt. II.11 poz. 3], a drugie – „*Novelties in Solidification Techniques of Single-Crystalline Materials*” [Zał. IV pkt. II.11 poz. 4].

Byłem twórcą i administratorem strony internetowej Instytutu Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach (2014 - 2020). Od roku 2020 administruję stroną internetową Instytutu Inżynierii Materiałowej. Zbudowałem również oraz zarządzałem stronami internetowymi powiązаныmi z działalnością Instytutu i jego pracowników: kierunku Inżynieria Materiałowa, Zakładu Krystalografii, Polskiego Towarzystwa Spektroskopii Mössbauerowskiej, także stroną internetową konferencji CAC (Conference on Applied Crystallography) oraz stroną internetową XIII Ogólnopolskiego Seminarium Spektroskopii Mössbauerowskiej [Zał. V pkt. 4].

W latach 2014, 2016 i 2018 zorganizowałem i przeprowadziłem dla studentów kierunku inżynieria materiałowa Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach eliminacje do kolejnych edycji Ogólnopolskiej Olimpiady Krystalograficznej. Olimpiada organizowana jest przez Komitet Krystalografii Polskiej Akademii Nauk. Sprawowałem opiekę naukową i organizowałem wyjazdy laureatów na finały krajowe, które odbywają się cyklicznie na Uniwersytecie

Wrocławskim [Zał. V pkt. 2 poz. 6]. W zakresie swojej działalności organizacyjnej w latach 2014 - 2018 pełniłem funkcję opiekuna roku dla studentów kierunku Inżynieria Materiałowa [Zał. V pkt. 2 poz. 7].

c. Działalność popularyzatorska

W ramach popularyzowania nauki prowadziłem wykłady i pokazy w liceach i technikach oraz organizowałem i prowadziłem wizyty uczniów tych szkół w Instytucie Inżynierii Materiałowej [Zał. V pkt. 6 poz. 2].

Jako współorganizator zorganizowanego w 2016 roku przez Instytut Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach konkursu pod nazwą „*Materia widziana oczami grafika*”, którego celem była popularyzacja inżynierii materiałowej wśród młodzieży, przewodniczyłem obradom jury oceniającego zgłoszone prace [Zał. V pkt. 2 poz. 8].

Biorę czynny udział w corocznych wydarzeniach popularnonaukowych – organizowanych przez Instytut Inżynierii Materiałowej i Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Śląskiego – promujących inżynierię materiałową. Przedstawiam uczestnikom prowadzoną przeze mnie tematykę badawczą i demonstruję aparaturę laboratoryjną [Zał. V pkt. 6 poz. 2].

Wyniki moich badań zostały opisane przez zespół prasowy Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach w 4 artykułach o charakterze popularno-naukowym. Artykuły zostały opublikowane na stronie internetowej Uniwersytetu Śląskiego, w witrynie głównej oraz powiązanych z nią mediach społecznościowych. Dodatkowo, autorski artykuł dotyczący lotnictwa i roli inżynierii materiałowej w rozwoju awiacji opublikowano na stronie internetowej Wydziału Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Śląskiego oraz powiązanych z nią mediach społecznościowych w ramach cyklu „*Kartka z kalendarza*” [Zał. V pkt. 6 poz. 3].

7. Inne informacje, ważne z punktu widzenia wnioskodawcy, dotyczące jego kariery zawodowej

Wypracowany przeze mnie dorobek naukowy i przedstawiona tematyka badań pozwoliły na uzyskanie w latach 2007-2011 stypendium dla młodych naukowców w ramach programu UPGOW (Uniwersytet Partnerem Gospodarki Opartej na Wiedzy) współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego [Zał. IV pkt. II.13 poz. 1].

W roku 2011 byłem nominowany do nagrody James Clark Maxwell Young Writers Prize przyznawanej przez czasopismo *Philosophical Magazine* [Zał. V pkt. 1 poz. 3].

W roku 2018 zostałem zaproszony do wygłoszenia referatu pt. „*Influence of heat treatment on defect structures in single-crystalline blade roots studied by X-ray topography and positron annihilation lifetime spectroscopy*” w ramach sesji plenarnej podczas konferencji EuroSuperalloys 2018 zorganizowanej przez Oxford University w Wielkiej Brytanii [Zał. IV pkt. II.6 poz. 6].

W roku 2022 i 2023 zostałem laureatem uniwersyteckiego konkursu „*Swoboda badań*” w ramach programu pn. „*Inicjatywa Doskonałości Badawczej*”, który ukierunkowany jest na doskonalenie warunków rozwoju naukowego oraz upowszechnianie i komercjalizację wiedzy. Tematem pierwszego z projektów, którym kierowałem w ramach programu była „*Niejednorodność struktury dendrytycznej i parametru sieciowego w monokrystalicznych łopatkach turbin silników lotniczych z nadstopów na bazie niklu*”. Obecnie jestem kierownikiem i realizuję projekt nt. „*Wpływ geometrii odlewów na zmiany parametru sieciowego i orientacji krystalicznej w monokrystalicznych łopatkach turbin silników lotniczych*” [Zał. IV pkt. II.14 poz. 4-5].

.....
Krawczyk
.....
(podpis wnioskodawcy)