

# **Autoreferat**

**Dr inż. Rafał Cygan**

**Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o.**

**Rzeszów 2023**

**Spis treści**

Spis treści.....	2
1 Imię i nazwisko: .....	3
2 Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.....	4
4 Osiągnięcie naukowe.....	4
4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego .....	5
4.2 Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....	5
4.3 Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	12
5 Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	23
5.1 Działalność prowadzona przed doktoratem.....	25
5.2 Działalność prowadzona po uzyskaniu doktoratu.....	27
6 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....	32
7 Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	35

**1 Imię i nazwisko:**

Rafał Cygan

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

Stopień doktora

Dyplom doktora – załącznik nr 2

Dziedzina: Nauki techniczne

Dyscyplina: Inżynieria Materiałowa

Data uzyskania stopnia: 25.10.2010 r.

Tytuł rozprawy doktorskiej: Przyczyny powstawania niedolewów w supercienkościennych elementach odlewanych z nadstopów na osnowie niklu

Podmiot nadający: AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydział Odlewnictwa

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Szczepan Suchy

Recenzenci: dr hab. inż. Andriy Burbelko prof. AGH, dr hab. inż. Krzysztof Kubiak prof. PRz

Stopień zawodowy Magistra Inżyniera

Dyplom ukończenia studiów magisterskich

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydział Odlewnictwa

Kierunek studiów: Metalurgia

Specjalność: Modelowanie w odlewnictwie

Okres odbywania studiów: 01.10.1999 – 01.07.2004 r.

Data uzyskania stopnia: 01.07.2004 r.

Tytuł pracy magisterskiej: Porównanie wybranych metod wytwarzania modeli techniką Rapid Prototyping

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Szczepan Suchy

### 3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- a) 2003 – 2004: Institute of Foundry Technology (Niemcy, Düsseldorf) – staż naukowy (6 miesięcy).
- b) 2016 – 2018: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa – jako kierownik (lider projektu) w ramach programu LIDER VII finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju prowadziłem projekt CERLOT pt. „Opracowanie technologii odlewania krytycznych elementów części gorącej silników lotniczych z zastosowaniem materiałów ceramicznych nowej generacji” [B16].
- c) 2023: Akademia Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej – staż naukowy (2 tygodnie)

### 4 Osiągnięcie naukowe

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z 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.) i stanowiące podstawę ubiegania się o uzyskanie stopnia naukowego doktora habilitowanego wskazuję **cykl powiązanych tematycznie 10 publikacji naukowych.**

W autoreferacie przyjęto następujące odniesienia do dokumentu (załącznika nr 4) „Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny”:

[1], [2], [3]... [10] - publikacje stanowiące osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

[B1], [B2]... - projekty badawcze

[C1], [C2]... - artykuły w czasopismach po doktoracie

[KP1], [KP2]... - konferencje po doktoracie (postery)

[KW1], [KW2]... - konferencje po doktoracie (wystąpienia)

[P1], [P2]... - patenty i zgłoszenia patentowe

[PD1], [PD2]... - publikacje przed doktoratem

#### 4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

*Określenie wpływu materiałów ceramicznych form i rdzeni na kształtowanie makro- i mikrostruktury oraz wybranych właściwości nadstopów niklu w odlewach precyzyjnych elementów części gorącej silników lotniczych.*

#### 4.2 Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Poniżej przedstawiam cykl powiązanych tematycznie 10 publikacji naukowych, gdzie dla każdej publikacji wskazano całkowitą liczbę cytowań wg bazy Web of Science (WOS) i Scopus (S) - w nawiasach liczba cytowań po odrzuceniu cytowań własnych, współczynnik Impact Factor (IF) czasopisma obowiązujący w roku opublikowania artykułu (w przypadku 2023 r. wskazano dane za 2022 r.), oraz liczbę punktów zgodnie z listą Ministerstwa Edukacji i Nauki (poprzednio Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego) obowiązującą w roku opublikowania artykułu.

Dane bibliograficzne cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

Całkowita liczba publikacji: 10

Suma punktów MNiSW/MEiN: 152 pkt (lista obowiązująca do 2018 r.), 380 pkt (lista obowiązująca od 2019 r.)

Sumaryczny IF wg listy JCR, zgodnie z rokiem opublikowania: **21.171**

Liczba cytowań (bez autocytowań) wg Web of Science: **135 (100)**

Liczba cytowań wg Scopus (bez autocytowań): **135 (105)**

1. **R. Cygan**, D. Szeliga, P. Rokicki, J. Sieniawski, J.S. Suchy. The control of solidification kinetics of the vacuum-cast thin-wall nickel-based superalloys by changing the geometrical characteristics of the ceramic mold. Archives of Foundry Engineering, 2013, 13, 4, 21-28.

Wynikiem badań było opracowanie krzywych rozkładu pola temperatury form ceramicznych o różnych cechach geometrycznych, w tym ilości warstw. Krzywe pozwoliły określić wpływ zmian wybranych parametrów geometrycznych na rozkład temperatury w badanym układzie formy ceramicznej podczas: wyżarzania, zalewania, krzepnięcia, krystalizacji i chłodzenia. Wykazano możliwość sterowania procesem krzepnięcia i krystalizacji, w tym zmiany pola temperatury w przekroju poprzecznym formy ceramicznej

podczas procesów technologicznych. Określono wpływ grubości warstwy ceramicznej (liczby warstw) na rozkład temperatury formy ceramicznej podczas procesu wyżarzania oraz podczas procesu zalewania i krzepnięcia odlewów cienkościennych.

W ramach prac badawczych opracowałem założenia do eksperymentu. Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowałem tekst publikacji.

WOS: 1 (1); S: 1 (1); IF: 0.00; Lista MNiSW: 15 pkt

2. Ł. Rakoczy, **R. Cygan**. Analysis of temperature distribution in shell mould during thin-wall superalloy casting and its effect on the resultant microstructure. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18 (4), 1441-1450.

Wynikiem prac była realizacja badań wpływu rozkładu temperatury w formie skorupowej podczas zalewania, krzepnięcia i krystalizacji cienkościennych odlewów na makro- i mikrostrukturę, skład chemiczny wydzielań umacniających oraz parametr niedopasowania sieci  $\gamma/\gamma'$ . Zależności te pozwoliły na lepsze zrozumienie procesu, a tym samym na obniżenie kosztów produkcji, poprzez optymalizację technologii precyzyjnego odlewania krytycznych części silników lotniczych, w szczególności kontroli frontu krzepnięcia w odlewach cienkościennych z nadstopów niklu. W przedstawionej publikacji określono także wpływ temperatury zalewania, ilości warstw oraz czasu wygrzania form ceramicznych na mikrostrukturę cienkościennych odlewów. Wykazano, że mikrostruktura odlewów z nadstopu niklu Inconel 713C charakteryzowała się znaczną niejednorodnością składu chemicznego, wynikającą z segregacji pierwiastków stopowych podczas krzepnięcia.

Opracowałem koncepcję całego artykułu (dobór próbek, zakres badań), kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki, przeprowadziłem dyskusję wyników badań oraz uczestniczyłem w przygotowywaniu tekstu publikacji.

WOS: 15 (7); S: (14) 7; IF: 2,846; Lista MNiSW: 30 pkt

3. H. Matysiak, M. Zagorska, A. Balkowiec, B. Adamczyk-Cieslak, K. Dobkowski, M. Koralnik, **R. Cygan**, J. Nawrocki, J. Cwajna, K. Kurzydłowski. The influence of the melt-pouring temperature and inoculant content on the macro and microstructure of the IN713C Ni-based superalloy. JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2015, 10, 1-13.

Wynikiem prac badawczych było określenie wpływu temperatury zalewania (w zakresie 1450–1520°C) oraz stężenia modyfikatora w postaci glinianu kobaltu ( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ) w warstwie przymodelowej formy skorupowej na makro- i mikrostrukturę nadstopu Inconel 713C. Wyniki przedstawione w publikacji wskazują, że glinian kobaltu jest skutecznym modyfikatorem w procesie odlewania krytycznych elementów silników lotniczych, w tym łopatek turbiny niskiego ciśnienia z nadstopu Inconel 713C. Wykazano że zastosowanie glinianu kobaltu powoduje rozdrobnienie ziaren równoosiowych oraz zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia nieakceptowalnych ziaren kolumnowych na powierzchni odlewów. Na podstawie otrzymanych wyników pogłębiono wiedzę w zakresie modyfikacji makro- i mikrostruktury powierzchni odlewów z nadstopu Inconel 713C. Wyniki te pozwoliły na lepsze zrozumienie procesów zachodzących podczas krzepnięcia i krystalizacji stopu, a tym samym optymalizację ilości oraz sposobu dozowania glinianu kobaltu w produkcji wirujących krytycznych elementów silników lotniczych.

Brałem udział w planowaniu eksperymentów, wykonaniu odlewów oraz opracowaniu uzyskanych wyników, jak również w przygotowywaniu tekstu publikacji.

WOS: 16 (10); S: (17) 11; IF: 1,798; Lista MNiSW: 30 pkt

4. **R. Cygan.** Nowoczesne spoiwa ceramiczne w odlewnictwie precyzyjnym. Szkło i Ceramika, 2013, 69, 25-27.

Wynikiem prac było przeprowadzenie badań nowoczesnych materiałów ceramicznych oraz ich oddziaływania w produkcji krytycznych elementów części gorącej silników lotniczych z wykorzystaniem technologii odlewania precyzyjnego. Przedstawiona w artykule tematyka przygotowania ceramicznych form odlewniczych z zastosowaniem spoiw wodnych, emulsji akrylowych oraz włókien szklanych jako wypełniaczy, przyczyni się do zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska oraz zwiększy efektywność procesu odlewania precyzyjnego. Odlewy segmentów aparatów kierujących wykonane w formach ceramicznych z opracowanej mieszanki, spełniają wszystkie wymagania jakościowe (wymiary, wady odlewnicze, chropowatość powierzchni, porowatość) stawiane przez odbiorców. Opracowana mieszanka ceramiczna zawierająca włókna szklane pozwoliła na zmniejszenie liczby wykonywanych warstw z 8 do 6, co ma bezpośredni wpływ na zmianę rozkładu pola temperatury podczas procesu wypalania i zalewania oraz bezpośrednio wpływa na wzrost oszczędności wynikających ze skrócenia czasu produkcji form ceramicznych o około 25%. Zaproponowane zmiany w procesie technologicznym mają również bezpośredni wpływ na zmniejszenie masy

stosowanych materiałów ceramicznych o 15%. Ponadto, formy tego typu charakteryzują się wyższymi właściwościami mechanicznym oraz większą gazoprzepuszczalnością, co również zwiększa obszar ich zastosowania w firmie CPP Polska.

Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki oraz przygotowywałem tekst publikacji.

WOS: 0 (0); S: 0 (0); IF: 0,000; Lista MNiSW: 7 pkt

5. Ł. Rakoczy, M. Grudzień, **R. Cygan**, A Zielińska-Lipiec. Effect of cobalt aluminate content and pouring temperature on macrostructure, tensile strength and creep rupture of Inconel 713C castings. Archives of Metallurgy and Materials, 2018, 63, 3, 1537-1545.

Wynikiem prac było przeprowadzenie badań wpływu modyfikatora glinianu kobaltu (0% mas. lub 5% mas. w warstwie przymodelowej) i temperatury zalewania (1480°C i 1520°C) na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne nadstopu niklu. Wykazano że zastosowanie  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  w pierwszej warstwie formy ceramicznej przyczynia się do rozdrobnienia ziaren równoosiowych oraz zmniejsza ryzyko wystąpienia nieakceptowalnych ziaren kolumnowych. Za pomocą zrealizowanych badań poszerzono dotychczasową wiedzę na temat modyfikacji mikrostruktury odlewniczego nadstopu niklu. Wykazano również korzystny wpływ rozdrobnienia ziarna na wytrzymałość na rozciąganie i twardość, co stanowi istotną zmianę z punktu widzenia warunków eksploatacji łopatek kierowniczych turbiny niskiego ciśnienia.

Kierowałem całością prac eksperymentalnych związanych z przygotowaniem materiału badawczego, wykonałem badania mechaniczne i dokonałem ich analizy. Opracowałem uzyskane wyniki badań mikrostruktury oraz koordynowałem przygotowanie manuskryptu.

WOS: 8 (3); S: 7 (3); IF: 0,697; Lista MNiSW: 30 pkt

6. Ł. Rakoczy, M. Grudzień, **R. Cygan**. Influence of melt-pouring temperature and composition of primary coating of shell mold on tensile strength and creep resistance of Ni-based superalloy. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28, 3826-3834.

Wynikiem prac było przeprowadzenie badań wpływu parametrów technologicznych wytwarzania odlewów z nadstopu niklu Inconel 713C na makro- i mikrostrukturę oraz wybrane właściwości mechaniczne. Zastosowano dwa warianty (składy chemiczne) warstwy przymodelowej (bez i z dodatkiem 5% mas. modyfikatora  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ), a także cztery temperatury



zalewania (1400-1520°C). Wykonano badania za pomocą mikroskopii świetlnej, skaningowej mikroskopii elektronowej, statyczną próbę rozciągania oraz pomiary odporności na pełzanie.

Wykazano, że glinian kobaltu podczas zalewania i krystalizacji nadstopu niklu wchodzi w reakcję z pierwiastkami stopowymi zawartymi w nadstopie i tym samym pozwala uzyskać zarodki krystalizacji w postaci cząstek kobaltu przyczyniające się do wyraźnego rozdrobnienia mikrostruktury. Zmniejszenie wielkości ziarna przekłada się na wzrost wytrzymałości w temperaturze pokojowej, szczególnie dla odlewów z wyższą temperaturą zalewania. Na podstawie wyników badań pełzania stwierdzono, że rozdrobnienie ziarna będące efektem modyfikacji przyczynia się do zmniejszenia odporności na pełzanie. Odnotowano skrócenie czasu do zerwania oraz wzrost prędkości pełzania w stanie ustalonym.

Opracowałam koncepcję artykułu (przygotowanie materiału do badań, dobór próbek, zakres badań). Kierowałam całością prac eksperymentalnych, wykonałam badania mechaniczne odlewów, uczestniczyłam w badaniach mikrostruktury, opracowałam uzyskane wyniki oraz uczestniczyłam w przygotowywaniu tekstu publikacji.

WOS: 13 (7); S: 13 (8); IF: 1,652; Lista MEiN: 70 pkt

7. Ł. Rakoczy, M. Grudzień, **R. Cygan**. The influence of shell mold composition on the as-cast macro-and microstructure of thin-walled IN713C superalloy castings. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28, 3974-3985.

Wynikiem prac było przeprowadzenie badań wpływu składu formy ceramicznej na mikrostrukturę i wybrane właściwości odlewów z nadstopu Inconel 713C. Określono także wytrzymałość form ceramicznych. Formy wykorzystane w eksperymencie zostały wzmocnione włóknami szklanymi zawartymi w zawieszynie oraz proszkiem metalowym Al, Cu, Fe lub Ni w pokryciu. Badania zginania wykazały, że wytrzymałość wszystkich nowo opracowanych form były wyższe niż standardowych form niezmodyfikowanych. Wyprodukowane cienkościennie odlewy poddano badaniom mikrostruktury (mikroskopia świetlna oraz skaningowa mikroskopia elektronowa) w celu weryfikacji czy nowo opracowany skład form ceramicznych można zastosować do produkcji elementów silników turbowentylatorowych. Badania mikrostruktury wykazały, że skład formy ma silny wpływ na morfologię wydzieleni umacniających, porowatość oraz twardość odlewów.

Opracowałam koncepcję całego artykułu (przygotowanie materiału do badań, dobór próbek, zakres badań). Kierowałam całością prac eksperymentalnych, opracowałam uzyskane

wyniki, przeprowadziłem analizę wyników badań oraz uczestniczyłem w przygotowywaniu tekstu publikacji.

WOS: 7 (2); S: 6 (2); IF: 1,652; Lista MEiN: 70 pkt

8. **R. Cygan, Ł. Rakoczy.** The effect of  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  as a nucleating agent and pouring temperature on the microstructure and properties of Inconel 713C® nickel-based superalloy castings. *Materials*, 2023, 16, 5588.

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury odlewania stopu (1450 °C, 1480 °C, 1520 °C) oraz stężenia modyfikatora ( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ) w pierwszej powłoce formy (0% mas., 5% mas. i 10% mas.) na makro- i mikrostrukturę, wytrzymałość na rozciąganie oraz żarowytrzymałość czasową nadstopu na bazie niklu Inconel 713C. Określono temperatury przemian fazowych w nadstopie za pomocą symulacji termodynamicznych oraz różnicowej analizy termicznej. Na podstawie badań mikroskopii świetlnej przedstawiono zależność pomiędzy zastosowaną temperaturą zalewania i składem formy ceramicznej, a wielkością ziarna oraz odległością pomiędzy ramionami wtórnymi dendrytów. Scharakteryzowano morfologię wydzieleni umacniających ze szczególnym uwzględnieniem wielkości wydzieleni fazy międzymetalicznej  $\gamma'$  w obszarach dendrytycznych. Wykazano również, że wskutek segregacji pierwiastków stopowych podczas krzepnięcia, w przestrzeniach międzydendrytycznych odlewów występują wydzielenia borków  $\text{M}_3\text{B}_2$ , fazy międzymetalicznej  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2$ , węglików MC oraz eutektyki  $\gamma-\gamma'$ . Przedstawiono mechanizm wydzielania się tych faz oraz omówiono ich stabilność w wysokich temperaturach. Na podstawie statycznej próby rozciągania wykazano, że modyfikacja odlewów przyczynia się do wzrostu granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie. Na podstawie badań żarowytrzymałości czasowej określono czas do zerwania w warunkach pełzania wysokotemperaturowego ( $T=982\text{ °C}$ ;  $\sigma=152\text{ MPa}$ ).

Opracowałem koncepcję artykułu (przygotowanie materiału do badań, dobór próbek, zakres wszystkich badań). Kierowałem całością prac eksperymentalnych, opracowałem uzyskane wyniki, przeprowadziłem dyskusję wyników badań oraz uczestniczyłem w przygotowywaniu tekstu publikacji.

WOS: 0 (0); S: 0 (0); IF: 3,4; Lista MEiN: 140 pkt

9. M. Gromada, A. Świeca, M. Kostecki, A. Olszyna, **R. Cygan**. Ceramic cores for turbine blades via injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220, 107-112.

Wynikiem prac badawczych było opracowanie metod wtrysku do wytwarzania ceramicznych rdzeni wykorzystywanych w produkcji łopatek turbin. W ramach eksperymentów dobrano surowce, termoplastyfikatory oraz określono optymalne parametry technologiczne dla wyselekcjonowanych materiałów. Wybrane materiały umożliwiły formowanie rdzeni o małej powierzchni przekroju i charakteryzowały się niskim skurczem oraz stosunkowo niskim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Wysoka wytrzymałość mechaniczna materiałów pozwoliła na wtrysk rdzeni w modelu woskowym i ich montaż w formie odlewniczej. Dodatkowo odpowiednia porowatość rdzeni zapewniała ich łatwe trawienie wodnym roztworem zasad. Rdzenie charakteryzowały się dużą dokładnością wymiarową i pomijalnie małą deformacją kształtu. Przydatność rdzeni została pozytywnie zweryfikowana w procesie odlewania łopatek turbin w warunkach produkcyjnych.

Brałem udział w planowaniu eksperymentów, wykonaniu odlewów, określeniu parametrów technologicznych procesu trawienia rdzeni, opracowaniu uzyskanych wyników jak również przygotowywaniu tekstu publikacji.

WOS: 74 (69); S: 76 (72); IF: 3,594; Lista MNiSW: 40 pkt

10. M. Gromada, A. Świeca, **R. Cygan**. The effect of additives on properties of silica-based ceramic cores utilised in fabrication of multivane clusters for turbofan jet engine. *Ceramic International*, 2022, 48, 17, 25621-25627.

W ramach prac badawczych opracowano materiał na rdzenie ceramiczne służące do odwzorowania wewnętrznych kanałów chłodzących w krytycznych odlewach turbowentylatorowego silnika lotniczego. Uzyskane wyniki potwierdziły że opracowany materiał spełnia wymagania rygorystyczne wymagania dotyczące właściwości materiału, kontaktu z ciekłym metalem oraz precyzji wymiarowej. W badaniach przedstawiono również wpływ różnych dodatków (szkło borokrzemianowe, tlenek glinu i krzemian cyrkonu) na właściwości rdzeni ceramicznych na bazie krzemionki. Opracowany w artykule materiał do wytwarzania rdzeni składa się z: 64,0% mas. szkła kwarcowego, 11,0% mas. borokrzemianu szkło, 13,0% wag. krzemianu cyrkonu i 12,0% wag. tlenku glinu. Charakteryzuje się on wytrzymałością na zginanie 25,8 MPa, współczynnikiem rozszerzalności cieplnej

$3,52 \cdot 10^{-6}$  1/K, chropowatością powierzchni  $2,3 \mu\text{m}$ , skurczem mniejszym niż 1,9% i średnią wielkością porów  $4,8 \mu\text{m}$ . Cienkościenne, długie rdzenie ceramiczne zostały ukształtowane metodą wtrysku ciśnieniowego, która obejmowała wybór termoplastyfikatora, opracowanie wsadu oraz określenie parametrów obróbki zabezpieczających formowane rdzenie przed niedoskonałością i deformacją. Wysoka dokładność wymiarowa rdzeni została zweryfikowana wynikami pomiarów wykonanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej.

Brałem udział w planowaniu eksperymentów, wykonaniu rdzeni, produkcji odlewów, określeniu parametrów technologicznych procesu trawienia rdzeni, opracowaniu uzyskanych wyników, jak również koordynowałam przygotowanie manuskryptu.

WOS: 1 (1); S: 1 (1); IF: 5,532; Lista MEiN: 100 pkt

#### **4.3 Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Celem naukowym prowadzonych prac badawczych było określenie możliwości kształtowania właściwości mechanicznych odlewów precyzyjnych z nadstopów niklu poprzez dobór materiałów ceramicznych i parametrów technologicznych procesu wytwarzania krytycznych elementów lotniczych turbiny silnika turbowentylatorowego. W trakcie prowadzonych prac wykazano możliwość osiągnięcia zakładanych parametrów ich makro- i mikrostruktury poprzez sterowanie procesami krzepnięcia i krystalizacji. Zrealizowane prace dotyczyły również analizy oddziaływania zastosowanych materiałów ceramicznych oraz dodatków takich jak np. glinian kobaltu czy włókna szklane na właściwości form ceramicznych, a tym samym odlewów elementów konstrukcji silników lotniczych [1-10].

Wybranych 10 powiązanych tematycznie publikacji, prezentujących najważniejsze osiągnięcia naukowe, uważam za reprezentatywne dla mojego znacznie obszerniejszego dorobku naukowego, dotyczącego szeroko pojętego odlewnictwa precyzyjnego, a w szczególności zagadnień związanych z określeniem wpływu materiałów ceramicznych form i rdzeni na kształtowanie makro- i mikrostruktury oraz wybrane właściwości mechaniczne nadstopów niklu przeznaczonych na odlewy elementów części gorącej silników lotniczych [1-10].

Nadstopy na osnowie niklu charakteryzują bardzo wysokie właściwości mechaniczne i duża odporność na korozję, szczególnie utlenianie w temperaturze podwyższonej, co czyni je kluczową grupą materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym. Od opracowania pierwszych nadstopów niklu minęło już przeszło 100 lat, a impulsem do projektowania coraz nowszych

gatunków i rozwoju technologii kształtowania są zwiększające się wymagania dotyczące ich funkcjonalności - wyższa temperatura pracy elementów turbin silników lotniczych - a także produkcji części lotniczych – redukcja kosztów i aspekty ekologiczne. W porównaniu ze stałą, stopami aluminium czy stopami tytanu, stanowią względnie nową grupę materiałów inżynierskich. Do produkcji wysokojakościowych, cienkościennych części o skomplikowanej geometrii stosuje się odlewanie precyzyjne. Obecnie, większość łopatek turbin oraz aparatów kierujących do silników lotniczych, wytwarza się metodą wytapianych modeli woskowych. Nadstopy niklu należą do grupy materiałów trudnoobrabialnych metodami obróbki mechanicznej, dlatego proces odlewania precyzyjnego w produkcji odpowiedzialnych komponentów lotniczych uważany jest za bezkonkurencyjny. Gotowe elementy charakteryzuje wysoka dokładność wymiarowa i doskonałe jakościowo wykończenie powierzchni [C5]. Wytwarzanie odlewów jest procesem bardzo złożonym, a ich końcowy odbiór poprzedza wiele rygorystycznych kontroli [7]. Jakość odlewów precyzyjnych determinuje poprawna realizacja poszczególnych etapów procesu technologicznego prac i czasochłonnych, co stanowi główną jego wadę, przyczyniając się do wysokich kosztów wytwarzania. Pierwszym etapem technologii odlewania precyzyjnego jest wykonanie modelu części przez wtrysk stopionego wosku do metalowej matrycy. W przypadku odlewów z kanałami chłodzącymi, wymagane jest umieszczenie w matrycy rdzeni ceramicznych, będących ich wiernym odwzorowaniem. Modele woskowe składa się w zestaw, umożliwiając wytwarzanie kilkunastu elementów w jednym cyklu produkcyjnym. Kolejnym, a zarazem najbardziej czasochłonnym etapem jest wykonanie wielowarstwowej formy ceramicznej na modelu woskowym.

Wyniki badań własnych, dotyczących oceny wpływu materiałów ceramicznych formy i rdzeni na makro- i mikrostrukturę oraz wybrane właściwości mechaniczne odlewów precyzyjnych elementów części gorącej silników lotniczych z nadstopów niklu, były podstawą do ustalenia kryteriów doboru warunków procesu wytwarzania, umożliwiającego zwiększenie ich właściwości użytkowych [1-10]. Ich analiza stanowiła podstawę symulacji numerycznej rozkładu pola temperatury, procesów krzepnięcia i krystalizacji w zależności od przyjętych warunków brzegowych (temperatury, czasu i środowiska).

Wewnętrzne kanały chłodzące, kształtowane za pomocą rdzeni ceramicznych w procesie odlewania łopatek turbin, wpływają znacząco na zwiększenie sprawności silnika turbinowego. Ich obecność w zamku i piórze łopatki, w połączeniu z innymi stosowanymi metodami intensyfikacji chłodzenia, jak np. zwiększenie natężenia przepływu strumienia powietrza wzdłuż powierzchni pióra, spowodowało oprócz zwiększenia wydajności układów chłodzenia, również dużą zmianę wartości temperatury w poszczególnych strefach łopatki oraz

czynników korozyjnych. Stąd, na początkowym etapie badań rozważano zagadnienia dotyczące analizy wpływu składu fazowego oraz morfologii składników mikrostruktury i ich stabilności cieplnej w nadstopach niklu na właściwości użytkowe odlewów. Ustalono, że decydujące znaczenie w tym aspekcie ma oddziaływanie i stabilność wydzieleni faz umacniających. Prowadzono badania mikroskopowe nadstopów niklu Inconel 740 i jego modyfikacji w stanie litym oraz nadstopu René 108 po obróbce cieplnej [C19, C20, C24]. Stwierdzono między innymi, że ze względu na charakter pracy odlewów polikrystalicznych z nadstopu Inconel 740, w tym modyfikowanych, wymaga ujednorodnienia mikrostruktury i stabilizacji jej składników. Na podstawie wyników badań z użyciem podstawowych oraz zaawansowanych technik mikroskopowych, analiz kalorymetrycznych i dylatometrycznych scharakteryzowano skład fazowy odlewów z nadstopu Inconel 740 oraz stabilność faz w wysokiej temperaturze, dzięki wyznaczeniu charakterystycznych wartości temperatury przemian fazowych. Analiza wyników badań była podstawą do zaproponowania warunków obróbki cieplnej odlewów umożliwiającej uzyskanie ich odpowiednio wysokich właściwości wytrzymałościowych, niezbędnych w warunkach eksploatacji w wysokiej temperaturze. Pierwszym etapem obróbki cieplnej nadstopów jest przesycanie, które ma na celu rozpuszczenie możliwie największej objętości względnej wydzieleni w roztworze oraz częściowe ujednorodnienie składu chemicznego. Stwierdzono, że w kontekście doboru temperatury przesycania należy uwzględnić nie tylko proces rozpuszczania w osnowie głównej fazy umacniającej  $\gamma'$ , ale także ryzyko nadtopienia podczas obróbki cieplnej innych faz. Na podstawie analizy stabilności mikrostruktury nadstopu niklu René 108 charakteryzującym się dużą objętością względną fazy  $\gamma'$  (ponad 60%) wykazano, że obniżenie energii wewnętrznej układu jest siłą napędową do zmiany mikrostruktury w nadstopie [C20, C21, C23]. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów wskazano, że rozpuszczanie się w osnowie wydzieleni fazy  $\gamma'$  następuje pod wpływem oddziaływań sprężystych związanych z parametrem niedopasowania sieci  $\gamma/\gamma'$ . O tym, które z wydzieleni będą stabilne, a które zaczną się rozpuszczać decyduje różnica w lokalnej równowadze wynikającej z oddziaływań sprężystych pomiędzy nimi. Stwierdzono, że morfologia wydzieleni fazy międzymetalicznej  $\gamma'$  jest wypadkową obniżenia sumy jej energii odkształceń sprężystych spowodowanych niedopasowaniem sieci  $\gamma/\gamma'$ , energii międzyfazowej, a także oddziaływań sprężystych pomiędzy wydzieleniami [C21, C23]. Oddziaływanie sprężyste jest związane z nakładaniem się poszczególnych pól naprężeń wydzieleni fazy  $\gamma'$  i jest proporcjonalne do ich objętości względnej. Zmiana energii wewnętrznej zachodzi w sposób ciągły w każdej z wybranych wartości temperatury. Zaobserwowano również, że równowagowy skład chemiczny na granicy międzyfazowej  $\gamma/\gamma'$  ulega zmianie wraz

ze wzrostem temperatury. Analiza zmian morfologii fazy  $\gamma'$  po krótkotrwałym wyżarzaniu w zakresie temperatury 900-1100°C wykazała, że nawet kilkuminutowe wytrzymanie może prowadzić do znacznego zmniejszenia objętości względnej wydzielen i w konsekwencji spadku właściwości wytrzymałościowych. Wskazuje to więc na istotną rolę systemów chłodzących w łopatkach lotniczych będących wynikiem stosowania rdzeni ceramicznych.

W ramach prowadzonych prac badawczych opracowano również technologię produkcji rdzeni ceramicznych [9,10]. Prace skupiały się na zastosowaniu metody formowania wtryskowego, która składa się z czterech podstawowych etapów: przygotowania wsadu, formowania elementu, usunięcia spoiwa i spiekania. Przebadano kilkanaście kompozycji materiałów ceramicznych [9]. Wykazano, że jedynie część z nich charakteryzuje się odpowiednią porowatością pozorną oraz wytrzymałością na zginanie. W celu zabezpieczenia kształtowych rdzeni przed powstawaniem wad i odkształceniem dobrano właściwe parametry wtrysku. Stwierdzono, że temperatura formy i czas przebywania półwyrobów mają istotny wpływ na odkształcenie rdzeni. Wytrzymałość na zginanie materiałów określono metodą trójpunktowego zginania. Analiza uzyskanych wyników była podstawą doboru odpowiedniego materiału do produkcji rdzeni. Określono i przeanalizowano inne właściwości wpływające na przydatność rdzeni. W procedurze doboru materiału na rdzenie uwzględniono dwa najważniejsze parametry: porowatość pozorną oraz wytrzymałość na zginanie materiałów spiekanych materiałów. W efekcie prowadzonych prac badawczych zaproponowano materiał składający się z: 55,0% mas. szkła kwarcowego, 4,2% mas. szkła borowego, 10,3% mas. krzemianu cyrkonu i 9,5% mas. tlenku glinu i 21,0% mas termoplastyfikatora. Uzyskana wytrzymałość na zginanie (14,7 MPa) umożliwiła formowanie rdzeni w modelu woskowym i ich montaż w formie odlewniczej. Wynik ten był co najmniej o 22,5% wyższy niż dla podobnych rdzeni przedstawionych w literaturze. Uwzględniając skład chemiczny materiału i zadane warunki procesu wtrysku uzyskaną wartość skurczu materiału (poniżej 0,1%) podczas procesu formowania należy uznać za bardzo korzystną. Zmierzona chropowatość powierzchni pozwala na dobre odwzorowanie kanału wewnętrznych łopatek po ich odlaniu. Względnie mała wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej ( $6,23 \cdot 10^{-6}$  1/K) zapewnia wystarczającą odporność na szok cieplny oraz stabilność wymiarową rdzeni w temperaturze zalewania ciekłymi stopami. Bardzo korzystna, niewielka wartość skurczu materiału poniżej 1,45% po procesie wypalenia lepiszcza i spiekania jest wynikiem zastosowania jednorodnego wsadu o dużej zawartości proszku. Uzyskano materiał do formowania wtryskowego, który posiada odpowiednie właściwości do zastosowania w rdzeniach łopatek stosowanych w turbinach gazowych i turbosprężarkach. Za optymalny parametr materiałowy uznano kompozycję

gruboziarnistych szkieł kwarcowych i borowych oraz drobniejszego tlenku glinu i krzemianu cyrkonu. Otrzymany materiał pozwolił na formowanie rdzeni o skomplikowanych kształtach z dużą dokładnością wymiarową. Charakterystyka gęstości pozornej materiału, nasiąkliwości i porowatości pozornej wraz z badaniem mikrostruktury i przebiegu trawienia (w odniesieniu do wytrzymałości na zginanie) potwierdzają przydatność rdzeni do odlewania kanału wewnętrznego w łopatkach oraz łatwość ich wyjmowania z odlewów. Dodatkowo niski współczynnik rozszerzalności cieplnej oraz mała chropowatość powierzchni opracowanego materiału zapewnia dobre odwzorowanie wewnętrznego kształtu ostrzy kanałów. Rdzeń ma bezpośredni kontakt z ciekłym metalem, tak więc w celu próby jego zastosowania konieczne było także przeprowadzenie prac badawczych w celu określenia braku jego reaktywności. Wyniki badań wskazały, że intensywne reakcje metal-rdzeń nie zachodzi. Maksymalna głębokość ubytku warstwy łopatek wynosiła 20  $\mu\text{m}$  [9]. Świadczy to o poprawnej selekcji materiału oraz możliwości jego zastosowania w przemyśle. Dodatkowo należy podkreślić, że firma CPP wykupiła licencję na produkcję rdzeni ceramicznych według opracowanej technologii.

Gotowa forma do odlewania elementów z nadstopów niklu składa się z kilku warstw o różnej grubości, które spełniają odpowiednie funkcje. Rolą pierwszej powłoki jest odwzorowanie geometrii modelu oraz przeciwdziałanie reakcjom na granicy ciekły nadstop/forma ceramiczna. Druga powłoka, stanowi warstwę przejściową, natomiast kolejne powłoki zewnętrzne (tylne) muszą zagwarantować odpowiednio wysoką wytrzymałość formy. Przeprowadzone prace badawcze obejmowały analizę wpływu spoiwa oraz składu formy ceramicznej (włókna szklane, glinian kobaltu) na makro- i mikrostrukturę wytwarzanych odlewów. Podstawowymi składnikami tworzącymi formę są osnowa oraz spoiwo. Z przeglądu literatury oraz doświadczenia firmy CPP wynika, że podstawowym spoiwem znajdującym zastosowanie w odlewnictwie jest krzemian etylu  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ . Podczas prac wykonano szereg eksperymentów z zastosowaniem materiałów ceramicznych poddawanych procesowi hydrolizy według reakcji:  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}(\text{OH})_4 + 4\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Potwierdzono, że materiał ten jest chemicznie obojętny, odporny na działanie wysokiej temperatury i posiada zdolność wiązania sypkich materiałów ceramicznych poprzez hydrolizę kwasu chlorowodorowego i amoniaku z alkoholem etylowym. W ramach prowadzonych prac [7, K1], wykazano, że spoiwa te charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi oraz krótkim czasem schnięcia, jednakże mają szkodliwy wpływ na zdrowie oraz środowisko naturalne. Uwzględniając te czynniki, w ramach kolejnych prac badawczych [7, K2] opracowano technologię produkcji form ceramicznych z zastosowaniem spoiwa wodnego zawierające



krzemionkę  $\text{Si(OH)}_4$ . Stwierdzono, że można zastąpić spoiwa alkoholowe spoiwami na osnowie krzemionki koloidalnej, która jest zawiesiną cząstek krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ) w wodzie. Prowadzone prace wykazały również, że nowe materiały charakteryzują się przydatnością technologiczną

w długim okresie oraz obojętnością dla środowiska naturalnego. Wadą materiałów ceramicznych na osnowie spoiw wodnych jest jednak dłuższy czas schnięcia poszczególnych warstw oraz nierównomierne pokrywanie skomplikowanych geometrycznie elementów.

Dodatkowo w ramach przeprowadzonych prac opracowano technologię produkcji kompozytowych form ceramicznych z włóknami ceramicznymi pełniącymi funkcję wypełniacza [4, 7]. Włókna szklane są stosowane w produkcji form ceramicznych w celu uzyskania odpowiednio wysokiej ich wytrzymałości. W ramach projektu LIDER VII opracowano spoiwo na osnowie polimerowej emulsji akrylowej, zawierające fazę stałą o objętości względnej ok. 48-50% mas. oraz dodatkowo 1-10% mas. włókien szklanych. Zastosowane włókna szklane pozwoliły zmniejszyć liczbę wykonywanych warstw z 8 do 6, co ma bezpośredni wpływ na zmianę rozkładu pola temperatury podczas procesu wypalania i zalewania oraz przyczynia się do oszczędności wynikających ze skrócenia czasu produkcji form ceramicznych o około 25%. Zaproponowane zmiany w procesie technologicznym miały również wpływ na zmniejszenie masy stosowanych materiałów ceramicznych o 15%. Formy wzmacniane włóknami szklanymi charakteryzują się dodatkowo wyższą wytrzymałością oraz większą gazoprzepuszczalnością. Opracowane w ramach tego projektu materiały ceramiczne zgłoszono do ochrony patentowej w Urzędzie Patentowym Rzeczypospolitej Polskiej w dniu 22.05.2017 r., nr zgłoszenia P.421560, tytuł „Samonośne wielowarstwowe formy ceramiczne z dodatkiem metali do wytwarzania odlewów precyzyjnych” - do dnia dzisiejszego (28.07.2023 r.) postępowanie nadal jest w toku. Forma ceramiczna szczególnie podczas zalewania ciekłym stopem i krystalizacji odlewu narażona jest na oddziaływanie naprężeń cieplnych, które mogą doprowadzić do jej pęknięć, dlatego liczba warstw formy jest zawsze ściśle określona. Wykazano, że wytrzymałość na zginanie form siedmiowarstwowych wynosi 3,0 MPa ( $\pm 1,5$  MPa). Zaobserwowano, że właściwości wytrzymałościowe form do odlewania nadstopu Inconel 713C mogą zostać zwiększone poprzez dodatek 1,5% mas. włókien szklanych z glinianu wapnia oraz 5% mas. proszków metali do mieszanki ceramicznej [7]. Wybrane proszki metali (Al lub Cu lub Fe lub Ni) znacznie różnią się temperaturą topnienia, dlatego podczas zalewania form mogą zmieniać stan skupienia. Na podstawie badań wariantów z dodatkiem włókien i proszków wykazano wzrost wytrzymałości na zginanie o co najmniej 20%, przy czym wzrost wytrzymałości w stanie „zielonym” uzyskano dla wszystkich

modyfikowanych form. Dodatek Al pozwala uzyskać wytrzymałość na zginanie wynoszącą 3,65 MPa ( $\pm 0,89$  MPa) przy niezmienionej liczbie warstw. Z kolei wariant z włóknami szklanymi w spoiwie oraz proszkiem niklu jako obsypką cechował się najwyższą średnią wytrzymałością na zginanie 3,94 MPa. Prace te pozwoliły na osiągnięcie jednego z ważnych celów technologicznych, a mianowicie, jednoczesnego wzmocnienia form za pomocą włókien szklanych oraz proszków metali. Wykazano, że dodatek włókien szklanych i proszku Al przyczynia się do uzyskania makrostruktury o bardzo dużym uziarnieniu (średni rozmiar ziarn około  $7,26 \text{ mm}^2$ ). Warianty form z dodatkiem Cu lub Ni doprowadziły z kolei do rozdrobnienia ziarn w porównaniu z odlewami z formy niezmodyfikowanej, do średniego rozmiaru ziarn, odpowiednio 4,76 mm i 5,04 mm. Najbardziej równomierny rozkład rozmiaru ziarn uzyskano w odlewie wyprodukowanym w formie z dodatkiem Ni. Badania wykazały, że możliwe jest sterowanie makro- i mikrostrukturą za pomocą odpowiednich dodatków do form ceramicznych, zarówno w warstwie przymodelowej, jak i w warstwach zewnętrznych. Wynika to w głównej mierze ze wzrostu przewodności cieplnej modyfikowanych formy na co wskazywały wyniki pomiarów odległości pomiędzy ramionami drugiego rzędu dendrytów. Zaobserwowano także, że rodzaj proszku metalu w formie ceramicznej może wpływać na porowatość, współczynnik segregacji pierwiastków stopowych, oraz objętość względną wydzielen wtórnych fazy  $\gamma'$  i węglików MC. Na dzień dzisiejszy, opracowane kompozytowe systemy formierskie zawierające włókna szklane przechodzą próby w warunkach przemysłowych w odlewni Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o. W przypadku osiągnięcia zadawalających rezultatów, opracowane systemy zostaną wdrożone na automatycznej linii i wykorzystywane w produkcji krytycznych elementów części gorących silników lotniczych. Zakończenie prób przemysłowych planowane jest do końca 2023 roku.

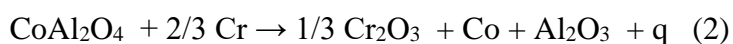
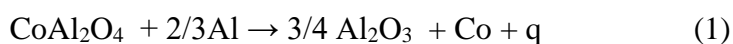
Na podstawie analizy wyników badań wpływu cyklu cieplnego, jakiemu poddawana jest forma (na osnowie spoiwa wodnego), na rozkład temperatury w wybranych warstwach stwierdzono, że znajomość rozkładu temperatury i grubości poszczególnych warstw umożliwia optymalizację procesu wygrzewania form [1, 2]. Zmierzona podczas prób technologicznych prędkość nagrzewania w 9 warstwowej formie zawiera się w zakresie pomiędzy 11,7-12,3°C/min., a wymaganą temperaturę 1250°C, w której następuje wytrzymanie form osiąga się po około 100 min. Zgodnie z pomiarami rozkładu temperatury w formie podczas zalewania ciekłym nadstopem Inconel 713C o temperaturze 1470°C stwierdzono, że w 2 warstwie maksymalna temperatura może wynosić 1322°C. Należy więc zaznaczyć, że stanowi to temperaturę wyższą niż temperatura topnienia aluminium (660°C) oraz miedzi (1085°C), które mogą znaleźć się w formie ceramicznej. Odległość od obszaru mającego bezpośrednio kontakt

z ciekłym metalem (grubość warstwy 1 i 2) wynosiła wówczas 1,31 mm ( $\pm 0,27$  mm). Po zalaniu wnęki formy ciekłym nadstopem następuje swobodne chłodzenie i krystalizacja nadstopu. Określono, że zarejestrowana prędkość chłodzenia w formie ceramicznej przyjmuje wartości 5-6°C/min. Temperatura likwidus oraz solidus nadstopu Inconel 713C została wyznaczona za pomocą badań kalorymetrycznych i wynosi odpowiednio 1342°C oraz 1263°C [3]. Wykazano ponadto, że rodzaj zastosowanej formy ceramicznej oraz jej grubość (ilość warstw) wpływa na prędkość chłodzenia wielowarstwowych form ceramicznych. Prowadzi to z kolei do krzepnięcia dendrytycznego ze znaczną mikrosegregacją składników mikrostrukturalnych oraz do uzyskania gruboziarnistej mikrostruktury odlewów. Wskutek zmniejszającej się z temperaturą rozpuszczalności pierwiastków stopowych w fazie  $\gamma$ , w przestrzeniach międzydendrytycznych nadstopu Inconel 713C wydzielają się borki typu  $(Cr, Mo)_3B_2$ , wydzielenia fazy międzymetalicznej  $Ni_7Zr_2$  oraz eutektyka  $\gamma-\gamma'$  [C6]. W obszarach rdzeni dendrytów i ramion wtórnych dominują natomiast koherentne z osnową wydzielenia fazy międzymetalicznej

o dodatnim parametrze niedopasowania  $\delta$ . Na podstawie wyników badań stwierdzono, że część wydzielen borków typu  $(Cr, Mo)_3B_2$  i wydzielen fazy międzymetalicznej  $Ni_7Zr_2$  może wydzielać się bezpośrednio z cieczy jako trójskładnikowa eutektyka zgodnie z przemianą  $L$  (wzbogacona w Zr i B)  $\rightarrow \gamma + Ni_7Zr_2 + M_3B_2$ . Do tej pory w literaturze nie odnotowano tego zjawiska dla nadstopu niklu Inconel 713C, dlatego była to prawdopodobnie pierwsza wzmianka o możliwości zajścia tego typu przemiany [6].

Do pracy w warunkach pełzania wysokotemperaturowego korzystne właściwości mechaniczne zapewnia struktura gruboziarnista odlewów z nadstopów niklu [6, C16]. Z kolei dla aparatów kierujących współtworzących turbinę niskiego ciśnienia, które pracują w niższej temperaturze, wskazana jest drobnoziarnista struktura. Rozdrobnienie mikrostruktury jest możliwe poprzez przyspieszone chłodzenie po odlaniu, oddziaływanie pola elektromagnetycznego lub też wprowadzenie zarodków krystalizacji. W ramach prowadzonych prac w głównej mierze skupiono się na możliwości opracowania technologii modyfikacji warstwy wierzchniej elementów części gorącej silników lotniczych wytwarzanych metodą odlewania precyzyjnego poprzez odpowiednią modyfikację składu chemicznego pierwszej warstwy formy ceramicznej, która ma bezpośredni kontakt z ciekłym metalem podczas zalewania i krystalizacji. Po przeprowadzeniu analizy literatury oraz korzystając z doświadczenia odlewni precyzyjnej CPP do grona dodatków mających na celu rozdrobnienie struktury zaliczono glinian kobaltu ( $CoAl_2O_4$ ). Glinian kobaltu jest zwykle wytwarzany poprzez wypalanie tlenku kobaltu ( $CoO \cdot Co_2O_3$ ) oraz wodorotlenku aluminium  $Al(OH)_3$

w temperaturze 1200÷1300°C. Reakcja ta zachodzi w stanie stałym, co prowadzi do powstania spinelowej struktury związku  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ . Dodatek glinianu kobaltu do pierwszej warstwy formy może być różny, zwykle wynosi od 1 do 10% mas. Oddziaływanie  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  badano w odlewach z nadstopu niklu Inconel 713C [5, 6]. Na podstawie analizy wyników badań i danych literaturowych stwierdzono, że podczas zalewania formy ciekłym nadstopem glinian kobaltu zaczyna reagować z aktywnymi chemicznie pierwiastkami stopowymi: Al, Cr oraz Ti. Wskutek tych reakcji powstają tlenki tych metali oraz nanocząstki kobaltu będące zarodkami krystalizacji:



Wyniki przeprowadzonych prac badawczych dowodzą, że reakcje te mają charakter egzotermiczny, co pozwala ograniczyć powstanie tzw. strefy kryształów zamrożonych (ang. *chill zone*). Wykazano, że zarówno dodatek glinianu kobaltu, jak i temperatura zalewania formy ciekłym nadstopem wpływają na wielkość ziarn w nadstopie Inconel 713C [3]. Metodą cyfrowej analizy obrazu wyznaczono średni rozmiar ziarn dla różnych wartości temperatury zalewania oraz różnej zawartości glinianu kobaltu. Dla temperatury zalewania 1450°C wzrost zawartości  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  z 0% mas. do 10% mas. w formie spowodował prawie sześciokrotne zmniejszenie rozmiaru ziarn z 3,07 mm do 0,53 mm. Podobną zależność uzyskano dla innych wartości temperatury zalewania. Oddziaływanie  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  było najbardziej znaczące dla temperatury zalewania 1520°C, ponieważ w odlewach z form bez dodatku glinianu kobaltu średni rozmiar ziarn wynosił 6,91 mm, a z dodatkiem 5% mas i 10% mas znacznie mniej – odpowiednio 1,03 mm oraz 0,73 mm. Wyniki próby statycznej rozciągania wykazały, że rozdrobnienie ziarn wynikające z dodatku glinianu kobaltu do pierwszej warstwy formy ceramicznej wpływa także na właściwości mechaniczne odlewów [5]. Odlewy z nadstopu Inconel 713C zalewane w temperaturze 1480°C do formy z dodatkiem 5% mas. glinianu kobaltu charakteryzują się granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie wynoszącą odpowiednio około 820 MPa i 1030 MPa. Dla porównania, odlewy wyprodukowane w formie bez dodatku glinianu kobaltu charakteryzowały się wartościami niższymi, kolejno 750 MPa i 926 MPa. Dla temperatury zalewania wynoszącej 1520°C również zaobserwowano wzrost właściwości mechanicznych odlewów wyprodukowanych w formach z dodatkiem  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ . Wartość granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie wzrosła kolejno z 749 MPa do 821 MPa oraz z 861MPa do 980 MPa.

Wpływ modyfikacji mikrostruktury za pomocą glinianu kobaltu (0% mas. lub 5% mas.) na odporność na pełzanie ( $T = 982^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma = 152 \text{ MPa}$ ) nadstopu Inconel 713C badano dla 4 wariantów temperatury zalewania z zakresu  $1400\text{-}1520^{\circ}\text{C}$  [6]. Wraz ze wzrostem temperatury zalewania nadstopu czas do zerwania wydłużał się z średnio 48,1 godzin ( $T = 1400^{\circ}\text{C}$ , 0% mas.) i 46,0 godzin ( $T = 1400^{\circ}\text{C}$ , 5% mas.) do średnio 76,8 godzin ( $T = 1520^{\circ}\text{C}$ , 0% mas.) i 69,4 godzin ( $T = 1520^{\circ}\text{C}$ , 5% mas.). W odlewach niemodyfikowanych prędkość pełzania w stanie ustalonym spadła wraz ze wzrostem temperatury zalewania, z  $0,0306 \text{ \%/godz.}$  do  $0,021 \text{ \%/godz.}$  W odlewach modyfikowanych stwierdzono zmniejszenie prędkości pełzania w stanie ustalonym z  $0,035 \text{ \%/godz.}$  do  $0,024 \text{ \%/godz.}$  Na podstawie badań mikrostruktury próbek po pełzaniu wykazano, że pęknięcia rozprzestrzeniają się wzdłuż granic ziarn. Zaobserwowano, że podczas pełzania, w przestrzeniach międzydendrytycznych zaszła przemiana fazowa  $\text{MC} + \gamma \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6 + \gamma'$ . Analiza wyników tych badań przyczyniła się do optymalizacji technologii wytwarzania odlewów precyzyjnych w CPP Poland. Umożliwiła dobór rodzaju oraz zawartości glinianu kobaltu stosowanego w warstwie przymodelowej. Pozwoliło to firmie CPP obniżyć koszty wytwarzania, również poprzez zmniejszenie liczby wadliwych odlewów, niespełniających norm odbiorczych klientów w zakresie makrostruktury.

Opisane badania prowadzono w ramach projektów badawczych współfinansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Głównym ich celem było wdrożenie nowej wiedzy, pozyskanej w wyniku ich realizacji. Wiedza ta stanowiła podstawę opracowania wielu technologii oraz ich wdrożenia do działalności gospodarczej przedsiębiorstw: WSK PZL Rzeszów, Pratt&Whitney Rzeszów czy Consolidated Precision Products Poland. Do produkcji wdrożono między innymi:

- technologię wytwarzania łopatek wirnika turbiny wysokiego ciśnienia HPT silnika lotniczego z kanałami wewnętrznymi odtwarzanymi za pomocą monolitycznych rdzeni ceramicznych [B17];
- technologię odlewania precyzyjnego komponentów turbiny niskiego ciśnienia silnika turbowentylatorowego PW1000 z wykorzystaniem filtrów ceramicznych nowej generacji, wytwarzanych metodami drukowania 3D [B19];
- technologię wytwarzania typoszeregu precyzyjnych, polikrystalicznych, rdzeniowych odlewów cienkościennych, wielkogabarytowych łopatek rotora ciśnienia turbiny nowej generacji silnika lotniczego GP7200 [B12];
- technologię wielowarstwowej ceramicznej formy odlewniczej do precyzyjnego odlewania krytycznych części turbin silników lotniczych [B11];

- technologię wytwarzania form odlewniczych z zastosowaniem tlenkowych faz ceramicznych, przeznaczonych do precyzyjnego odlewania części lotniczych z nadstopów niklu [B6];
- technologię wytwarzania form odlewniczych z zastosowaniem materiałów kompozytowych, przeznaczonych do precyzyjnego odlewania części lotniczych z nadstopów niklu [B16];
- technologię produkcji łopatek wirnika turbiny wysokiego ciśnienia HPT silnika lotniczego [B8];
- technologię wytwarzania precyzyjnych odlewów nowej generacji łopatek i segmentów łopatkowych silnika lotniczego z kanałami do chłodzenia wewnętrznego odtwarzanymi za pomocą monolitycznych rdzeni ceramicznych [B2].
- zoptymalizowano konstrukcję i technologię układów zasilających form ceramicznych do precyzyjnego odlewania części lotniczych [B3];

**Bezpośrednim wkładem w rozwój dziedziny inżynierii materiałowej w zakresie zagadnień oddziaływania materiałów ceramicznych form i rdzeni na kształtowanie makro- i mikrostruktury oraz wybranych właściwości nadstopów niklu w odlewach precyzyjnych elementów części gorącej silników lotniczych jest:**

- określenie możliwości sterowania właściwościami fizycznymi odlewów precyzyjnych z nadstopów niklu poprzez dobór materiałów ceramicznych i parametrów technologicznych procesu wytwarzania krytycznych elementów lotniczych turbiny silnika turbowentylatorowego;
- określenie kryteriów doboru materiałów ceramicznych oraz warunków procesów technologicznych prowadzących do zwiększenia właściwości użytkowych krytycznych elementów lotniczych turbiny silnika turbowentylatorowego;
- zaproponowanie optymalnych parametrów symulacji numerycznej rozkładu pola temperatury, krzepnięcia i krystalizacji w zależności od materiałów ceramicznych oraz przyjętych warunków brzegowych (temperatury, czasu i środowiska);
- zaproponowanie warunków obróbki cieplnej elementów lotniczych wykonanych z nadstopów niklu przy zastosowaniu materiałów ceramicznych umożliwiających uzyskanie odpowiednio wysokich właściwości wytrzymałościowych, niezbędnych w warunkach eksploatacji w wysokiej temperaturze.

Do osiągnięć naukowo-badawczych w tym zakresie należą również:

- opracowanie i wdrożenie technologii produkcji rdzeni ceramicznych;
- opracowanie i wdrożenie technologii produkcji form ceramicznych z zastosowaniem spoiwa wodnego zawierającego krzemionkę  $\text{Si(OH)}_4$ . Wykazano, że można zastąpić spoiwa

alkoholowe spoiwami na bazie krzemionki koloidalnej, która jest zawiesiną cząstek krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ) w wodzie;

- opracowanie automatycznego systemu urządzeń do mycia zestawów woskowych, czyszczenia form ceramicznych, badania szczelności oraz suszenia.

Dodatkowo w ramach prowadzonych prac opracowano technologię produkcji kompozytowych form ceramicznych z wypełniaczem w postaci włókien ceramicznych i stwierdzono:

- zwiększenie właściwości wytrzymałościowych form do odlewania nadstopów w wyniku dodania 1,5% mas. włókien szklanych z glinianu wapnia oraz 5% mas. proszków metali do mieszanki ceramicznej. Spośród wielu badanych wariantów z dodatkiem włókien i proszków metali (Al lub Cu lub Fe lub Ni) wykazano możliwość zwiększenia ich wytrzymałości na zginanie o co najmniej 20%;

- możliwość optymalizacji procesu wygrzewania form na osnowie spoiwa wodnego dzięki znajomości rozkładu temperatury i grubości poszczególnych warstw, określonych na podstawie analizy wyników badań wpływu cyklu cieplnego jakiemu jest poddawana na rozkład temperatury w wybranych w warstwach;

- rozdrobnienie ziarn w odlewach spowodowane przez dodatek glinianu kobaltu do pierwszej warstwy formy ceramicznej i w konsekwencji zmianę ich właściwości mechanicznych.

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

Głównym tematem moich zainteresowań naukowych, ze względu na wykonywany zawód i pracę w Odlewni Precyzyjnej CPP, są zagadnienia dotyczące technologii odlewania, rozwijane w celu wdrażania nowych produktów, w szczególności odlewów precyzyjnych turbiny niskiego i wysokiego ciśnienia wytwarzanych z wykorzystaniem nadstopów niklu.

Ciągła konkurencja na rynku wymusza na firmie CPP wdrażanie nowych bardziej skomplikowanych odlewów precyzyjnych. Działania te wymagają ciągłego doskonalenia procesu wytwarzania. Jest to możliwe jedynie dzięki współpracy z wyspecjalizowanymi komórkami znajdującymi się na różnych uczelniach. Od 2005 r. współpracuję z Ośrodkami Akademickimi takimi jak: AGH, PW, PRz, PŚ, Sieć Badawcza Łukasiewicz-Krakowski Instytut Technologiczny (poprzednio Instytut Odlewnictwa), Sieć Badawcza Łukasiewicz-Górnośląski Instytut Technologiczny (poprzednio Instytut Metalurgii Żelaza), Instytut

Ceramiki CEREL. W ramach mojej aktywności naukowej prowadziłem liczne prace badawcze w tym:

- W latach 2003 – 2004 odbyłem 6-miesięczny staż w Institute of Foundry Technology (Düsseldorf, Niemcy). Pracowałem w zespole odpowiedzialnym za opracowanie i produkcję kolektorów wydechowych do samochodów osobowych takich marek jak Audi i BMW z wykorzystaniem technik szybkiego prototypowania. W zespole odpowiadałem za przygotowanie drukarek, wydruk form z wykorzystaniem technologii SLM oraz ich obróbkę i przygotowanie do kolejnych etapów produkcji. Prowadziłem również prace badawcze związane z wirtualizacją procesów odlewniczych, w tym w szczególności: modelowania przepływu ciekłego metalu, krzepnięcia i krystalizacji oraz naprężeń i mikrostruktury za pomocą oprogramowania MAGMASOFT czy badaniem organicznych i nieorganicznych spoiw i piasków formierskich.

- W latach 2016 – 2018 na Politechnice Rzeszowskiej (Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa) jako kierownik (lider projektu) w ramach programu LIDER VII finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju prowadziłem projekt CERLOT pt. „Opracowanie technologii odlewania krytycznych elementów części gorącej silników lotniczych z zastosowaniem materiałów ceramicznych nowej generacji” – projekt LIDER VII finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju [B16]. Współpraca prowadzona również była w ramach umowy nr 510/RU/19170 z 2016 roku. W ramach prace odpowiedzialny byłem za wykonanie symulacji numerycznej oraz określenie właściwości fizycznych dla procesów zalewania i krystalizacji rdzeni łopatek HPC (współudział 11%). W ramach umowy nr 315/RU/19170 prowadziłem prace związane z określeniem wartości współczynników cieplno-fizycznych materiałów ceramicznych na rdzenie łopatek HPT oraz wykonanie symulacji numerycznej rozkładu temperatury w cienkościennym rdzeniowanym odlewie łopatki HPT z uwzględnieniem wyznaczonych współczynników cieplno-fizycznych (współudział 16%). Kolejne prace badawcze na Politechnice Rzeszowskiej związane były z umową nr 818/RU/19170 z 2020 roku i dotyczyły wykonania ceramicznych form odlewniczych oraz odlewów łopatek HPT z pomiarem temperatury w trzech punktach odlewów (współudział 35%). Prace badawcze prowadziłem również w ramach umowy nr 671/RU/21099 związanej z wykonaniem symulacji numerycznej procesu krystalizacji kierunkowej odlewów płyt i łopatek (współudział 24%) czy umowy nr 1202/RU/19170 dotyczącej oceny makrostruktury, mikrostruktury i objętości względnej porów w trzech wybranych obszarach odlewów łopatek HPT (współudział 20 %). Wynikiem tych prac była publikacja [C26].



- W sierpniu 2023 r. odbyłem dwutygodniowy staż na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej prowadziłem badania mikrostruktury odlewów z nadstopu niklu za pomocą mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej. Wyniki badań umożliwiły mi zgłębienie wiedzy na temat wpływu oddziaływania glinianu kobaltu zawartego w pierwszej warstwie formy ceramicznej na wielkość ziarn, morfologię i wielkość wydzielen umacniających w nadstopie niklu oraz na morfologię pęknięć po badaniach wytrzymałościowych.

## 5.1 Działalność prowadzona przed doktoratem

W listopadzie 2003 r., jeszcze jako student Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH), rozpocząłem 6-miesięczny staż naukowy w Institute of Foundry Technology (Düsseldorf, Niemcy). Prowadziłem tam prace badawcze związane z:

- Wykonywaniem prototypów w procesie selektywnego spiekania laserowego (SLS);
- Wykonywaniem symulacji procesów odlewniczych: modelowania przepływu ciekłego metalu, krzepnięcia i krystalizacji oraz naprężeń i mikrostruktury za pomocą oprogramowania MAGMASOFT;
- Projektowaniem modeli 3D w oprogramowaniu CAD – Unigraphics;
- Badaniem organicznych i nieorganicznych spoiw i piasków formierskiego;
- Pomiarami lepkości spoiw i mas formierskich dla rdzeni utwardzanych CO<sub>2</sub>;
- Wykonywaniem prototypowych form i rdzeni w eksperymentalnej odlewni IFG;
- Pomiarami lepkości i właściwości płynięcia materiałów formujących.

W szczególności zainteresowałem się rozwojem technologii przyrostowych, w tym metody SLS (ang. *Selective Laser Sintering*) i możliwości jej aplikacji w odlewnictwie. Badania były podstawą do napisania pracy magisterskiej. Po obronie pracy magisterskiej rozpocząłem pracę (2004-2005) w Odlewni Żeliwa KFP BIALOGON (Kielce), na stanowisku Inżynier produktu, Inżynier procesu. Do moich obowiązków należało:

- Tworzenie i optymalizacja technologii wytwarzania części ze staliwa i żeliwa;
- Nadzór nad procesami metalurgicznymi wytwarzania stopów odlewniczych;
- Optymalizacja pracy żeliwiaków koksowych.

W maju 2005 r. rozpocząłem pracę w odlewni precyzyjnej WSK PZL - Rzeszów S.A. (Rzeszów) na stanowisku kolejno: Inżynier procesu, Inżynier produktu, Konstruktor. Od 01.01.2011 r. jestem głównym specjalistą ds. Rozwoju Technologii Odlewni Precyzyjnych WSK EX/SX/DS. Do moich obowiązków należały m.in.:

- Opracowanie i optymalizacja technologii wykonywania nowych krytycznych części lotniczych, w tym łopatek, segmentów aparatów kierujących czy integralnych aparatów kierujących;
- Wykonywanie symulacji procesów odlewniczych: modelowania przepływu ciekłego metalu, krzepnięcia i krystalizacji oraz naprężeń i mikrostruktury w oprogramowaniu ProCast,
- Wykonywanie rysunków i modeli 3-D krytycznych części lotniczych z zastosowaniem oprogramowania CAD – Unigraphics, Catia;
- Wykonywanie rysunków i modeli 2-D z zastosowaniem oprogramowania AutoCad;
- Obliczanie wydajność i przepływu produkcji dla maszyny i urządzeń;
- Zakup maszyn i urządzeń;
- Współpraca z zewnętrznymi jednostkami badawczymi;
- Uczestnictwo i koordynacja zadań WSK w ramach projektów badawczo-rozwojowych w ramach współpracy z jednostkami badawczymi, współfinansowanymi przez NCBiR.

W tym okresie intensywnie rozwijała się współpraca naukowa WSK PZL - Rzeszów S.A. z Politechniką Warszawską, Politechniką Rzeszowską, AGH Akademią Górniczo-Hutniczą oraz Politechniką Śląską m.in. w zakresie opracowania nowych materiałów ceramicznych, w tym opracowania nowych form i rdzeni wykorzystywanych w produkcji krytycznych wirujących części lotniczych. Od 2006 r. współpracuje przy realizacji projektów z wieloma jednostkami naukowo-badawczym. Uczestniczyłem w rozwoju technologii odlewania precyzyjnego, w tym nowych technologii m.in.: krystalizacji kierunkowej oraz monokrystalicznej nadstopów niklu. Posiadam udokumentowane doświadczenie w realizacji i koordynowaniu prac badawczych oraz wdrożeniowych w zakresie technologii odlewania precyzyjnego elementów turbin lotniczych z nadstopów niklu i kobaltu.

Przed uzyskaniem stopnia doktora opublikowałem 10 prac, w tym 5 publikacji w czasopiśmie naukowych [PD1 – PD5]. Brałem udział jako kadra badawcza w 6 projektach [B1-6]. W tym czasie uczestniczyłem również w licznych targach i konferencjach naukowych:

- 3rd International PhD Foundry Conference, Czechy, Brno, 2006;
- XI Jesienna Szkoła Stereologii i Analizy Obrazu, Zakopane, 2006;
- XII Jesienna Szkoła Stereologii i Analizy Obrazu, Zakopane, 15-18.09.2008;
- World Technical Forum, Czechy, Brno, 1-3.06.2009;
- Seminarium „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 14-15.12.2009;

- Seminarium Naukowe Indywidualnego Projektu Kluczowego „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Zakopane, 13-17.10.2009;
- Seminarium Naukowe Projektu Zamawianego „Opracowanie technologii wytwarzania elementów konstrukcyjnych części gorącej silników lotniczych metodą krystalizacji kierunkowej”, Zakopane, 20-24.05.2009;
- 27 International Conference EICF, Kraków, 16-19.05.2010;
- 51. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Krzepnięcie i krystalizacja metali”, Cedzyna, 27-29.09.2010;
- Członek komitetu organizacyjnego – I Targi Jakościowe (organizowane przez WSK PZL Rzeszów), Rzeszów, 26-27.10.2010.

## 5.2 Działalność prowadzona po uzyskaniu doktoratu

Po obronie rozprawy doktorskiej (2011 r.) kontynuowałem pracę w odlewni precyzyjnej WSK PZL Rzeszów/Pratt&Whitney Rzeszów, a obecnie w Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o. Przez wszystkie lata pracy w tym zakładzie moja praca koncentrowała się na odlewnictwie precyzyjnym. W szczególności w obszarach związanych z materiałami ceramicznymi. W ramach prowadzonych prac badawczych uczestniczyłem i nadal uczestniczę w realizacji licznych projektów badawczo-rozwojowych [B7-20]. Na szczególną uwagę zasługują projekty:

- HITECAST [B10], w ramach którego stworzono konsorcjum 4 podmiotów: Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska, WSK PZL Rzeszów oraz VOLVO AERO (obecnie GKN) ze Szwecji. Projekt miał na celu opracowanie technologii odlewania części wylotowej silnika (ang. *turbine exhaust kays*) ze stopu niklu Haynes 282. W projekcie pełniłem funkcję kierownika zadań ze strony WSK i byłem odpowiedzialny za opracowanie technologii oraz wdrożenie do produkcji tych elementów. Projekt skończył się sukcesem, wykazano, że możliwe jest wykonanie wysokojakościowych odlewów ze stopu Haynes 282 metodą odlewania precyzyjnego. Projekt został wybrany do grona 5 najlepszych projektów z ponad 300 realizowanych w ramach programu *Clean Sky*. Miałem przyjemność reprezentować nasze konsorcjum podczas gali rozdania nagród, która odbyła się w Brukseli (Belgia) w dniu 17.03.2015 r.;
- LIDER [B16], w ramach którego pełniłem funkcję lidera projektu. Na uwagę zasługuje również fakt, że projekt został najwyżej oceniony spośród wszystkich 236 projektów złożonych w naborze. Utworzony przeze mnie zespół badawczy składał się zarówno

z przedstawicieli przemysłu Pratt&Whitney, Consolidated Precision Products Poland, jak również jednostek naukowych: Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska czy Akademia Górniczo Hutnicza. W ramach projektu opracowaliśmy liczne technologie, w tym: technologię druku filtrów ceramicznych i technologię wytwarzania kompozytowych lejnych mas ceramicznych na bazie krzemionki koloidalnej z włóknami szklanymi. W celu poprawy właściwości cieplnych form opracowano również technologię wytwarzania lejnych mas ceramicznych z zastosowaniem tlenków metali. Technologia ta została zgłoszona do ochrony patentowej [P1]. Opracowano również manualne stanowisko do pomiaru przepuszczalności form ceramicznych. Stanowisko to zostało rozwinięte, zautomatyzowane i wdrożone w CPP Rzeszów ramach projektu [B18]. Automatyczne stanowisko do pomiaru szczelności form ceramicznych bazujące na pomiarze przepuszczalności zostało zgłoszone do ochrony patentowej [P2]. W ramach tego projektu realizowano również prace związane z wpływem materiałów ceramicznych form i rdzeni na rodzaj wtrąceń niemetalicznych wykrywanych podczas kontroli odlewów (badań radiograficznych oraz penetracyjnych). Efektem tych prac było przygotowanie automatycznego stanowiska do czyszczenia form odlewniczych. Technologia polega na zastosowaniu podciśnienia oraz środka myjącego, a następnie umyte formy są poddawane procesowi suszenia w podczerwieni. Technologię (stanowisko) zgłoszono do ochrony patentowej [P3]. Do ochrony zgłoszono również poszczególne podzespoły urządzenia [P3-6] oraz wzór użytkowy: uchwyt na formy odlewnicze [P7].;

- HPT [B17], którego celem było opracowanie i wdrożenie nowego wyrobu, łopatki wirnika turbiny wysokiego ciśnienia (ang. *HPT, high pressure turbine*) silnika lotniczego z nadstopu Renè 125, która przeznaczona jest do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych. Byłem odpowiedzialny za prace związane z opracowaniem materiałów ceramicznych na rdzenie grzebieniowe. Specjalne kanały w odlewie łopatki HPT powstałe na skutek zastosowania rdzeni ceramicznych tworzą system wewnętrznego chłodzenia za pomocą przepływających mediów. W ramach projektu uczestniczyłem w opracowaniu technologii oraz wdrożeniu do produkcji grzebieniowych rdzeni ceramicznych wykorzystywanych w produkcji odlewów o strukturze równoosiowej.;

- projekt PBS [B11], którego byłem kierownikiem skupiał się nad optymalizacją technologii produkcji form ceramicznych. Prace te zakończyły się między innymi opracowaniem optymalnych parametrów technologicznych wykonywania 1 warstwy formy oraz określeniem wpływu ilości glinianu kobaltu na makro- i mikrostrukturę odlewów stosowanych w lotnictwie. Jednym z głównych tematów badawczych było także określenie wpływu procesu przygotowania powierzchni wosku, przed pokryciem jej warstwą przymodelową. Wyniki

badania stanowiły podstawę do opracowania i wdrożenia w działalności gospodarczej odlewni CPP automatycznego stanowiska do mycia zestawów woskowych, które do dzisiaj jest wykorzystywane w procesie produkcyjnym.;

- INNOCAST [B14], w którym jako kierownik projektu uczestniczyłem w opracowaniu technologii produkcji wielkogabarytowych odlewów segmentów aparatów kierujących wykorzystywanych w jednym z największych silników turbowentylatorowych GP7000 napędzających największy na rynku przewozów pasażerskich samolot Airbus A380. Ze względu na duże gabaryty elementów, byłem odpowiedzialny za opracowanie technologii produkcji form ceramicznych. W celu obniżenia wytrzymałości oraz zwiększenia przepuszczalności form zastosowano poza obsypkami ceramicznymi odpowiednio spreparowane wióry drewniane (opis technologii został utajniony przez CPP).

Obecnie prowadzę prace w ramach dwóch projektów badawczych, w których pełnię rolę kluczowej kadry B+R. W projekcie Szybka Ścieżka [B19] odpowiedzialny jestem za prowadzenie eksperymentów na formach ceramicznych, opracowanie technik badań nieniszczących, ocenę porowatości skurczowej i gazowej, analizę wtrąceń niemetalicznych, a także zatwierdzenie opracowanych technik nieniszczących, w tym fluorescencyjnych i radiograficznych zgodnie z wytycznymi i normami klienta. Projekt w ramach konkursu Szybka Ścieżka [B20] ma z kolei na celu wdrożenie do produkcji łopatkę wysokiego ciśnienia o strukturze dendrytycznej-kolumnowej wytwarzanej metodą krystalizacji kierunkowej. W tym projekcie jestem odpowiedzialny za opracowanie technologii wykonania rdzeni ceramicznych. Na szczególną uwagę zasługują badania związane z wytwarzaniem rdzeni ceramicznych metodami przyrostowymi. Do moich obowiązków należy także:

- opracowanie koncepcji oraz procedur procesu kontroli materiałów wejściowych;
- dobór parametrów wejściowych w procesie wykonania form ceramicznych;
- opracowanie zakresu prowadzonych prób oraz czynny udział w pracach zleconych podwykonawcom;
- opracowanie planu oraz wykonanie prób z wykorzystaniem różnych wosków odlewniczych stosowanych w produkcji modeli wytwarzanych części oraz elementów układów wlewowych.

Swoje doświadczenie oraz wiedzę teoretyczną pogłębiałem uczestnicząc w licznych spotkaniach przemysł-nauka (również jako ich organizator) oraz na konferencjach naukowych:

- Targi Rapid Tech, Erfurt, Niemcy, 24-25.05.2011;

- XII międzynarodowa konferencja naukowa „Zapewnienie jakości w odlewnictwie”, Lasocin, 25-27.05.2011;
- Targi GIFA 2011, Dusseldorf, Niemcy, 28.06.2011;
- Konferencja naukowo-techniczna WSK-AGH, Krynica Zdrój, 7-8.07.2011;
- Konferencja naukowo-techniczna, Śmiłowice, 24-25.10.2011;
- 52 międzynarodowa konferencja naukowa „Krzepnięcie i krystalizacja metali”, Cedzyna, 27-29.09.2011;
- XI ogólnopolska konferencja naukowa „Tytan i jego stopy”, Myczkowce, 9-12.10.2011;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Zakopane, 12-16.09.2011;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 13-14.06.2011;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 12-13.12.2011;
- XV Seminarium PTMK: Kompozyty 2011, Spała, 27-29.04.2011;
- 53 międzynarodowa konferencja naukowa „Krzepnięcie i krystalizacja metali”, Cedzyna, 24-26.09.2012;
- Konferencja Naukowo-Techniczna, Krynica Zdrój, 19-20.05.2012;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 25-26.06.2012;
- Konferencja Nano and Advanced Materials Workshop and Fair NAMF 2013, Warszawa, 16-19.09.2013;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Rzeszów 9-10.12.2013;
- Konferencja UTC Additive Manufacturing Conference, USA, Hartford, 22-23.09.2014;
- Seminarium „Innowacyjność, a nauka i gospodarka”. Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH, Kraków, 24.11.2014;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 23-24.06.2014;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 8-9.12.2014;
- Konferencja Leadership Adwords, USA, Hartford, 8.10.2014;
- 44 National Conference of Non-Destructive Testing, Wisła, 20-22.10.2015;

- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 25-26.05.2015;
- Konferencja „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Rzeszów, 30.11-01.12.2015;
- II Forum Współpracy Nauka-Gospodarka, Rzeszów, 30.06.2015;
- 13<sup>th</sup> International Symposium on Superalloys, Seven Springs Mountain Resort, Seven Springs, Pennsylvania, USA, 11-15.09.2016;
- XVI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Zapewnienie jakości w odlewnictwie”, Arłamów, 17-19.05.2016;
- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów, 21.06.2016;
- TMS 2017 146<sup>th</sup> Annual Meeting&Exhibition, San Diego California, USA, 26.02– 2.03.2017;
- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów, 21.02.2017;
- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów, 27.06.2017;
- ICEAF V 5<sup>th</sup> International Conference of Engineering Against Failure, Chios, Grecja, 20-22.06.2018;
- 29th International Conference Lectures, Suppliers Exhibition & Turbocharger Seminar “Addressing today’s and tomorrow’s Investment Casting challenges”, Porto, Portugalia, 22-25.04.2018;
- IDTechEx Show Connecting Emerging Technologies With Global Brands, Santa Clara Convention Center, CA, USA, 14 – 15.11.2018;
- 57 Sympozjum „Modelowanie, mechanika, optymalizacja, mechanika, symulacje”, Ustroń, 24-28.02.2018;
- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów, 4.06.2018;
- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów, 27.06.2018;
- 66th Investment Casting Institute (ICI) Annual Technical Conference & Expo St. Louis Union Station: 27-30.10.2019;
- TMS 2019 148th Annual Meeting&Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 10–14.03.2019;
- VI Konferencja pod hasłem przewodnim „Innowacje”, Zakopane, 19-20.09.2019;
- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów, 25.06.2019;
- Clean Sky 2 Info Day, Rzeszów-Jasionka, 13.02.2020;
- Metalurgia 2020 XVII Konferencja Sprawozdawcza Komitetu Metalurgii PAN, Bukowina Tatrzańska, 20-22.10.2021;
- XXV Jubileuszowe Seminarium PTM, Arłamów, 24-27.10.2021;
- Konferencja 2021 „Biznes i Produkcja”, Kraków, 31.03.2022;

- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów, 24.06.2021;
- World Conference on Investment Casting and Equipment Expo, Anaheim, CA, USA, 21–24.08.2022;
- 2022 EICF International Conference & Exhibition, Santander, Hiszpania, 15-18.05.2022;
- Konferencja CZT „Aeronet – Dolina Lotnicza”, Rzeszów 6.12.2022;
- 47<sup>th</sup> Conference and Expo on Advanced Ceramics and Composites (ICACC 2023), USA, Floryda, Daytona Beach, 22-27.01.2023;

W ramach tych konferencji dzieliłem się swoją wiedzą [KW1-9] również jako *invited speaker* [KW7]. Przygotowywałem materiały oraz brałem udział w sesjach posterowych [KP1-24].

Mój dorobek naukowy po doktoracie obejmuje 37 publikacji (w tym 29 artykułów w czasopiśmie i 6 publikacji w materiałach konferencyjnych indeksowanych w bazie Web of Science. Liczba cytowań artykułów, których jestem autorem lub współautorem na dzień 10.08.2023 r. wynoszą:

-według Web of Science (WoS): **387 (310 bez autocytowań)**

-według Scopus: **423 (347 bez autocytowań)**

Indeks Hirscha

-według Web of Science (WoS): **12 (10 bez autocytowań)**

-według Scopus: **12 (10 bez autocytowań)**

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

### **Promotor pomocniczy rozpraw doktorskich:**

- Michał Kwiatkowski

Uczelnia: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Metali Nieżelaznych

Dyscyplina: Inżynieria Materiałowa

Temat rozprawy: Wykorzystanie metod skanowania 3D, termowizji i tomografii komputerowej do sterowania jakością w procesie wytwarzania krytycznych części silników lotniczych

Rok obrony: 2016 r.

- Małgorzata Grudzień-Rakoczy

Uczelnia: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej



Dyscyplina: Inżynieria Materiałowa

Temat rozprawy: Wpływ modyfikacji składu chemicznego na mikrostrukturę i wybrane właściwości odlewniczego nadstopu niklu Inconel 740

Rok obrony: 2022 r.

**Promotor pomocniczy prac magisterskich i inżynierskich oraz kierowanie częścią praktyczną prac prowadzonych w WSK/PWR/PPP Rzeszów.**

**Przed uzyskaniem stopnia doktora:**

- Dominik Kozik

Uczelnia: Politechnika Rzeszowska

Temat pracy magisterskiej: Wykorzystanie programów symulacyjnych w komputerowym projektowaniu odlewów.

Rok obrony: 2008 r.

- Mirosław Tutak

Uczelnia: Politechnika Rzeszowska

Temat pracy magisterskiej: Zastosowanie symulacji komputerowej w projektowaniu odlewów z żeliwa sferoidalnego.

Rok obrony: 2008 r.

**Po uzyskaniu stopnia doktora:**

- Krystian Toczek

Uczelnia: Politechnika Rzeszowska

Temat pracy inżynierskiej: Technika pomiaru łopatk w wirnika białym światłem.

Rok obrony: 2012 r.

- Krystian Toczek

Uczelnia: Politechnika Rzeszowska

Temat pracy magisterskiej: Analiza powtarzalności wyników pomiarów współrzędnościowych wybranych wyrobów z użyciem systemu pomiarowego ATOS Triple Scan III.

Rok obrony: 2014 r.

- Magdalena Mogilany

Uczelnia: Politechnika Rzeszowska

Temat pracy inżynierskiej: Wpływ filtra ceramicznego na proces krystalizacji odlewów z nadstopów niklu.

Rok obrony: 2017 r.

- Paulina Solecka

Uczelnia: Politechnika Rzeszowska

Temat pracy magisterskiej: Ocena przepuszczalności odlewniczych form ceramicznych.

Rok obrony: 2019 r.

- Sylwester Fuglewicz

Uczelnia: Politechnika Rzeszowska

Temat pracy magisterskiej: Analiza procesu wytwarzania oraz badania nieniszczące odlewanych elementów silników lotniczych.

Rok obrony: 2021 r.

- Justyna Kłusek

Uczelnia: Akademia Górniczo-Hutnicza)

Temat pracy inżynierska: Kontrola jakościowa zestawu wytapianych odlewów łopatkii turbinowej ze stopu Inconel 713C.

Rok obrony: 2022 r.

**Prowadziłem prelekcje dla studentów (po uzyskaniu stopnia doktora):**

- Politechniki Śląskiej na temat odlewnictwa precyzyjnego w inżynierii materiałowej w dniu 13.05.2019;
- Politechniki Rzeszowskiej na temat odlewnictwa precyzyjnego w inżynierii materiałowej w dniu 23.05.2018;
- Politechniki Rzeszowskiej na temat odlewnictwa precyzyjnego w inżynierii materiałowej, połączony ze zwiedzaniem zakładu produkcyjnego Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o. w dniu 28.04.2023;
- AGH Kraków (Wydział Odlewnictwa) na temat odlewnictwa precyzyjnego w inżynierii materiałowej połączony ze zwiedzaniem zakładu produkcyjnego Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o. w dniu 10.05.2023.

**Aktywność w mediach (działalność popularno-naukowa):**

- Gość audycji w Radiu Rzeszów - „Tajemnice laboratorium” wyemitowanej 10.02.2016;
- Artykuł w „Gazeta Politechniki” – Pismo pracowników i studentów Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza – 11.2015;
- Artykuł w „Wiadomości” – Magazyn pracowników Pratt&Whitney Rzeszów SA I/II 2016;

- **Artykuł** w portalu informacyjny innpoland.pl <http://innpoland.pl/124589.loty-maja-byc-bezpieczniejsze-o-jakosc-silnikow-lotniczych-zadba-polski-naukowiec>
- **Artykuł** na stronie: <https://www.cpppoland.pl/news/rafal-cygan-laureate-of-the-ncbir-lider-program>
- **Film** o odlewnictwie precyzyjnym nakręcony na zlecenie NCBR w ramach projektu LIDER <https://www.youtube.com/watch?v=pMzUvTn3bDM&t=3s>

**7 Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

**Listy gratulacyjne – nagrody:**

- Nagroda w kategorii: Poprawa jakości, redukcja kosztów, przeciwdziałanie narażeniu przedsiębiorstwa na straty (14.12.2012);
- Nagroda w kategorii: Doskonalenie procesu wytwarzania odlewu (03.10.2014) ;
- Nagroda w kategorii: Sukces WSK/Korporacji na poziomie lokalnym i/lub globalnym (26.09.2014);
- Nagroda w kategorii: Innowacyjny odlew łopatki PT1 PW100 (z dimplem) (14.10.2015).

.....  
(podpis wnioskodawcy)