

Prof. dr hab. inż.  
**Marcin Górny**  
Wydział Odlewnictwa  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Kraków, 18.03.2024 r.

**Recenzja w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego Pana dr. inż.  
Rafała Cygana, wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny  
Inżynieria Materiałowa, Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza  
Prof. dr. hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz z dnia 27.12.2023 r.**

Recenzja wykonana na podstawie dokumentacji w formie papierowej oraz elektronicznej zawierającej:

- a) autoreferat obejmujący życiorys zawodowy Habilitanta wraz z osiągnięciami naukowymi,
- b) cykl 10 publikacji dotyczących osiągnięcia: **„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”**,
- c) wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny,
- d) oświadczenia o wkładzie pracy do cyklu 10 publikacji,
- e) dyplom doktora nauk technicznych w dyscyplinie metalurgia, nadany uchwałą Rady Wydziału Odlewnictwa AGH z dnia 25.10.2010 r.
- f) pismo przewodnie Habilitanta,
- g) dane wnioskodawcy.

## 1. Ogólna charakterystyka Habilitanta

Dr inż. Rafał Cygan jest absolwentem Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracę magisterką *Porównanie wybranych metod wytwarzania modeli techniką Rapid Prototyping* obronił w 2004 r. pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Józefa Szczepana Suchego. W trakcie trwania studiów (2003-2004) odbył sześćmiesięczny staż naukowy związany m.in. z wykonywaniem prototypów w procesie selektywnego spiekania laserowego (SLS) oraz symulacji procesów odlewniczych: modelowania przepływu ciekłego metalu, krystalizacji oraz naprężeń i mikrostruktury za pomocą oprogramowania MAGMASOFT w Institute of Foundry Technology (Niemcy, Düsseldorf). Na przełomie 2004-2005 dr inż. Rafał Cygan rozpoczął pracę w Odlewni Żeliwa KFP BIAŁOGON (Kielce) na stanowisku Inżynier produktu, Inżynier procesu. Od 2005 r. pracuje w odlewni precyzyjnej WSK PZL - Rzeszów S.A. na stanowisku kolejno: Inżynier procesu, Inżynier produktu, Konstruktor. Od 2011 r. jest głównym specjalistą ds. Rozwoju Technologii Odlewni Precyzyjnych WSK EX/SX/DS. W 2010 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych (AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydział Odlewnictwa) w dyscyplinie metalurgia na podstawie rozprawy *Przyczyny powstawania niedolewów w supercienkościennych elementach odlewanych z nadstopów na osnowie niklu*. Promotorem pracy był prof. dr hab. inż. Józef Szczepan Suchy.

Zgodnie z wymaganiami określonymi w art. 219 ust. 1 pkt. 2 i 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.) Habilitant wskazał jako osiągnięcia naukowe wyniki badań opublikowanych w cyklu 10 publikacji dotyczących: *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*.

## 2. Ocena osiągnięć naukowych

Habilitant złożył 15.09.2023 r. wniosek o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Jako osiągnięcie naukowe będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego wskazał wyniki badań opublikowanych w cyklu publikacji *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*.

Od początku kariery zawodowej Habilitant swoje zainteresowania naukowe koncentruje na tematyce odlewnictwa precyzyjnego nadstopów niklu. Od 2005 r. Kandydat współpracuje z Akademią Górniczo-Hutniczą, Politechniką Warszawską, Politechniką Śląską oraz Siecią Badawczą Łukasiewicz. Habilitant odbył 6-miesięczny staż w Institute of Foundry Technology (Düsseldorf, Niemcy), podczas którego brał udział w pracach zespołu odpowiedzialnego za opracowanie i produkcję kolektorów wydechowych do samochodów osobowych wiodących marek europejskich. W wyżej wymienionym zespole Kandydat odpowiadał za pracę drukarek, wydruku form z wykorzystaniem technologii SLM oraz ich obróbkę i przygotowanie do kolejnych etapów produkcji. Dodatkowo prowadził prace badawcze związane z wirtualizacją procesów odlewniczych, w tym w szczególności: modelowaniem przepływu ciekłego metalu, krystalizacją oraz naprężeniami i mikrostrukturą za pomocą specjalistycznego oprogramowania oraz badaniem organicznych i nieorganicznych spoiw i piasków formierskich. Habilitant był kierownikiem projektu CERLOT pt. *Opracowanie technologii odlewania krytycznych elementów części gorącej silników lotniczych z zastosowaniem materiałów ceramicznych nowej generacji* – projekt LIDER VII - finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Przed uzyskaniem stopnia doktora Habilitant opublikował 10 prac, w tym 5 w czasopiśmie naukowych. Brał udział w 6 projektach (5 projektów celowych, 1 projekt badawczy - zamawiany PBZ-MNiSW). Po uzyskaniu stopnia doktora Habilitant brał udział w 14 projektach badawczych – w 4 jako kierownik. Był odpowiedzialny za



wdrożenia w CPP m.in. wysokojakościowych odlewów ze stopu Haynes 282 metodą odlewania precyzyjnego, technologii druku filtrów ceramicznych i technologii wytwarzania kompozytowych lejnych mas ceramicznych na bazie krzemionki koloidalnej z włóknami szklanymi, opracowanie stanowiska do pomiaru przepuszczalności form ceramicznych i wdrożenie łopatki wirnika turbiny wysokiego ciśnienia (ang. *HPT, high pressure turbine*) silnika lotniczego z nadstopu René 125 do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych. Habilitant brał czynny udział w licznych (49) konferencjach w kraju i za granicą w tym również w roli *invited speaker*.

Dorobek naukowy Kandydata do stopnia doktora habilitowanego obejmuje (po doktoracie) 37 publikacji, w tym 29 artykułów w czasopismach i 6 publikacji w materiałach konferencyjnych indeksowanych w bazie Web of Science. Liczba cytowań artykułów Habilitanta według Web of Science wynosi 387 (310 bez autocytowań), a Indeks Hirscha - według Web of Science (WoS): 12 (10 bez autocytowań). Habilitant nie posiada w dorobku monografii oraz rozdziałów w monografiach naukowych. Opublikował łącznie 42 artykuły w takich czasopismach jak: Archives of Foundry Engineering, Journal of Kones Powertrain and Transport, Solid State Phenomena, Materials, Journal of Materials Engineering and Performance, International Journal of Cast Metals Research, Inżynieria Materiałowa, Advances in Applied Plasma Science, Experimental Thermal and Fluid Science, Journal of Manufacturing Processes, Applied Sciences, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Metallurgical and Materials Transactions A. Biorąc powyższe pod uwagę, można stwierdzić, że Habilitant wykazał się znaczną aktywnością naukową zwłaszcza po uzyskaniu stopnia doktora.

Dr inż. Rafał Cygan jako swoje główne osiągnięcie naukowe po uzyskaniu stopnia doktora wskazał cykl publikacji *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*. Artykuły zostały opublikowane w latach 2013-2023 w następujących czasopismach: Archives of Foundry Engineering, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, Szkło i Ceramika, Archives of Metallurgy and

Materials, Journal of Materials Engineering and Performance, Materials, Journal of Materials Processing Technology oraz Ceramic International.

Wskazane przez Habilitanta osiągnięcie naukowe obejmuje 10 pozycji (532 punkty wg MNiSW/MEiN). Sumaryczny IF tych prac 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).

Cykl publikacji rozpoczyna praca *The control of solidification kinetics of the vacuum-cast thin-wall nickel-based superalloys by changing the geometrical characteristics of the ceramic mold*, w której Autorzy wyznaczyli krzywe rozkładu pola temperatury w formach ceramicznych, wykonanych w technologii wytapianych modeli, z uwzględnieniem dwóch wariantów liczby warstw form. Wyniki badań dotyczyły odlewów cienkościennych wykonanych ze stopu IN713C o grubości ścianki 4mm. Drugi artykuł (*Analysis of temperature distribution in shell mould during thin-wall superalloy casting and its effect on the resultant microstructure*) stanowi kontynuację prac badawczych związanych z cienkościennymi odlewami ( $g = 4\text{mm}$ ) ze stopu IN713C. Autorzy określili rozkład temperatury w formie oraz makro- i mikrostrukturę badanego stopu. Wykazano, że mikrostruktura odlewów z nadstopu niklu IN713C charakteryzuje się znaczną niejednorodnością składu chemicznego, wynikającą z segregacji pierwiastków stopowych podczas krystalizacji. Dodatkowo Autorzy określili wartości niedopasowania parametrów sieciowych między fazami  $\gamma$  i  $\gamma'$ , co ma duże znaczenie z punktu widzenia umocnienia stopu. Kolejna praca (*The influence of the melt-pouring temperature and inoculant content on the macro and microstructure of the IN713C Ni-based superalloy*) dotyczy stopu IN713C przeznaczonego również na odlewy cienkościenne ( $g=5\text{mm}$ ). Autorzy pracy analizie poddali wpływ zabiegu modyfikacji formy oraz temperatury zalewania na mikro i makrostrukturę badanego stopu. Wykazano, że związek  $\text{Co}(\text{AlO}_2)_2$  powoduje rozdrobnienie ziaren pierwotnych oraz zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia ziaren kolumnowych na powierzchni odlewów. Praca zawiera również wyniki badań TEM, które pozwoliły Autorom na analizę mechanizmu działania wspomnianego związku na modyfikację warstwy powierzchniowej odlewów. W czwartej pracy cyklu (*Nowoczesne spoiwa ceramiczne w odlewnictwie precyzyjnym*)



analizie poddano aspekt technologii formy poprzez zastosowanie nowoczesnych materiałów ceramicznych w produkcji krytycznych elementów części gorącej silników lotniczych ze stopu IN713C z wykorzystaniem technologii odlewania precyzyjnego. Jest to wartościowa praca z ważnym aspektem użytkowym (również dla firmy, w której pracuje Habilitant). W kolejnym artykule (*Effect of cobalt aluminate content and pouring temperature on macrostructure, tensile strength and creep rupture of Inconel 713C castings*) przedstawiono wyniki badań modyfikacji struktury stopu IN713C za pomocą  $\text{Co}(\text{AlO}_2)_2$  z uwzględnieniem temperatury zalewania. W pracy przedstawiono analizę makro- i mikrostruktury, mikroanalizę składu chemicznego oraz wyniki badań właściwości mechanicznych. Wykazano, że wyższa temperatura zalewania obniża skuteczność modyfikacji oraz że modyfikacja struktury pierwotnej negatywnie wpływa na szybkość pełzania odlewów.

Dwie kolejne prace prezentowane były na 73 Światowym Kongresie Odlewniczym (2018 r.). Artykuł (*Influence of melt-pouring temperature and composition of primary coating of shell mold on tensile strength and creep resistance of Ni based superalloy*) dotyczy kontynuacji prac nad wpływem temperatury zalewania oraz składu masy przymodelowej na właściwości mechaniczne stopu IN 713C. Praca zawiera cenne informacje związane z krystalizacją i odpornością na pełzanie badanego stopu, a wyniki zostały uzupełnione o dobrej jakości zdjęcia mikro i makrostruktury, a także krzywe z prób wytrzymałościowych. Praca siódma (*The influence of shell mold composition on the as-cast macro- and microstructure of thin-walled IN713C superalloy castings*) poświęcona jest wpływowi składu formy ceramicznej na mikrostrukturę i wybrane właściwości odlewów ze stopu IN713C. W ramach badań formy skorupowe wzmocniano włóknami szklanymi zawartymi w zawieszynie oraz proszkami metali w pokryciu. Praca zawiera szereg danych metalograficznych związanych z badanym stopem, a także wyniki wytrzymałości form ceramicznych. Publikacja *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* dotyczy kontynuacji prac nad modyfikacją struktury pierwotnej za pomocą związku  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  oraz wpływu temperatury zalewania na strukturę stopu IN713C. W pracy przedstawiono wyniki badań DSC, makro i mikrostruktury,

właściwości mechaniczne, a także odporność na pełzanie badanego stopu dla trzech różnych wartości temperatury zalewania oraz dwóch dawek modyfikatora do powłoki masy skorupowej. Autorzy potwierdzili wcześniejsze badania własne, że modyfikacja struktury pierwotnej za pomocą związku  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  dodanego do powłoki masy skorupowej odlewów przyczynia się do wzrostu ich granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie i obniżenie odporności na pełzanie. Badania uzupełniono o analizę parametrów mikrostruktury badanego stopu. W pracy nie wskazano wymiarów badanych odlewów. Dwie ostatnie prace cyklu publikacji wykonano w ramach projektu Innocast. Pierwsza z nich (*Ceramic cores for turbine blades via injection moulding*) dotyczy ważnego aspektu w technologii odlewów cienkościennych przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach obciążeń termicznych tj. rdzeni ceramicznych. Wynikiem pracy była analiza metod wtrysku do wytwarzania ceramicznych rdzeni wykorzystywanych w produkcji łopatek turbin. Badaniom poddano 11 wariantów obejmujących zróżnicowany skład chemiczny rdzeni. Kryterium optymalizacji technologii obejmowało dwa kluczowe parametry, tj. porowatość rdzeni oraz ich wytrzymałość na zginanie. Cykl publikacji zamyka praca *The effect of additives on properties of silica-based ceramic cores utilised in fabrication of multivane clusters for turbofan jet engine*. Analizie poddano sześć wariantów materiału do otrzymywania rdzeni ceramicznych służących do odwzorowania wewnętrznych kanałów chłodzących w krytycznych cienkościennych odlewach turbowentylatorowego silnika lotniczego. Wyniki badań wskazały, że opracowany materiał spełnia rygorystyczne wymagania dotyczące właściwości materiału, kontaktu z ciekłym metalem oraz precyzji wymiarowej. Dokonano optymalizacji badanych wariantów składu chemicznego rdzeni, rozbudowując badania związane m.in. z ich porowatością, gęstością czy współczynnikiem rozszerzalności termicznej.

Habilitant w swojej pracy naukowej zajmował się zagadnieniami kształtowania struktury i właściwości odlewów – głównie cienkościennych z nadstopu niklu IN713C. Obszar zainteresowań naukowych obejmował ważne czynniki technologiczne związane ze stanem fizykochemicznym ciekłego metalu, tj. temperaturę zalewania oraz modyfikacji oraz technologii form skorupowych. Na podstawie przedstawionego do recenzji



osiągnięcia naukowego Habilitanta, omówienia celu naukowego oraz osiągniętych wyników (zawartych w autoreferacie) stwierdzam, że stanowi ono znaczny wkład Habilitanta w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa. Na podkreślenie zasługuje opublikowanie części prac w prestiżowych czasopismach o wysokich wskaźnikach bibliometrycznych, takich jak: Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, Journal of Materials Processing Technology oraz Ceramic International. Kandydat wykazał się znajomością krystalizacji metali i stopów, modyfikacji struktury pierwotnej, właściwą interpretacją wyników z transmisyjnej mikroskopii elektronowej, badań DSC, metalografii ilościowej, umiejętnością planowania eksperymentów i wnioskowania. Widoczny jest dobry warsztat naukowy zdobyty podczas realizacji prac magisterskiej oraz doktorskiej. Habilitant prowadził badania związane z modelowaniem numerycznym oraz jego weryfikacją doświadczalną w obszarze odlewnictwa precyzyjnego, co niewątpliwie miało wpływ na jakość realizowanych prac naukowych oraz wdrożeniowych. Kandydat swoje badania naukowe ulokował w obszarze odlewów pracujących w ekstremalnie trudnych warunkach pracy co powoduje, że wymagania im stawiane są niezwykle rygorystyczne. Dr inż. Rafał Cygan dobrze porusza się w tym obszarze badawczym. Wysoko oceniam badania Kandydata związane z opracowaniem ceramicznych rdzeni do cienkościennych odlewów, spełniających surowe normy odbioru. Prace z tego obszaru wymagały pogłębionej wiedzy z zakresu technologii formy oraz ceramicznych materiałów ogniotrwałych.

Habilitant załączył oświadczenia o swoim i współautorów udziałach w powstanie 10 publikacji, które zostały wskazane jako osiągnięcie naukowe. Niestety nie podano udziałów procentowych co utrudnia ocenę wkładu Habilitanta w podanym cyklu prac. Z lektury oświadczeń wynika jednak, że Kandydat miał znaczący udział w powstanie wyżej wymienionych publikacji. Dotyczy to koncepcji, badań, redagowania tekstu, dyskusji wyników oraz formułowania wniosków. Jedna praca jest samodzielna, w dwóch Habilitant występuje na pierwszym miejscu jako współautor.



### **3. Ocena działalności dydaktycznej**

Kandydat do stopnia doktora habilitowanego ze względu na charakter pracy w zakładzie przemysłowym nie prowadził wykładów, seminariów czy laboratoriów. Był promotorem pomocniczym w dwóch zakończonych postępowaniach o nadanie stopnia doktora, a także 5 prac magisterskich oraz 3 inżynierskich. Habilitant był zapraszany na prelekcje dla studentów trzech uczelni, tj. Politechniki Rzeszowskiej, AGH oraz Politechniki Śląskiej. Pomimo skromnego dorobku działalność dydaktyczną Habilitanta oceniam jako wystarczającą.

### **4. Ocena działalności organizacyjnej**

Dr inż. Rafał Cygan był członkiem komitetu organizacyjnego I Targów Jakościowych organizowanych przez WSK PZL Rzeszów, uczestniczył w Programie Pionierzy Naszej Przyszłości, tj. promowaniu innowacyjnych projektów badawczo-rozwojowych mających duży wpływ na rozwój korporacji Pratt&Whitney Canada. Jest wieloletnim ekspertem do oceny prac wykonywanych w ramach projektów badawczo-rozwojowych. Był przewodniczącym oraz członkiem zespołów ekspertów odpowiedzialnych za ocenę wniosków badawczo-rozwojowych oraz wniosków w zakresie wykonalności technologicznej. Współpracował z Narodowym Centrum Badań i Rozwoju, Narodową Agencją Wymiany Akademickiej, Polską Agencją Rozwoju Przedsiębiorczości, Urzędem Marszałkowskim Województwa Podkarpackiego oraz Fundacją Rozwoju Systemu Edukacji. Zgodnie z deklaracją Habilitanta wykonał on około 1 000 recenzji dla powyższych instytucji w ramach przeprowadzonych w Polsce konkursów naukowo-badawczo-wdrożeniowych. Działalność organizacyjną Habilitanta oceniam pozytywnie.

## **5. Wniosek końcowy**

Analiza dorobku naukowego, dydaktycznego oraz organizacyjnego dr. inż. Rafała Cygana wskazuje, że spełnia on wymogi określone w art. 219 ust. 1 pkt. 2 i 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 ze zm.). Na tej podstawie wnoszę o możliwość przystąpienia dr. inż. Rafała Cygana do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. G. Cygan', is positioned to the right of the main text block.