

RECENZJA

Wniosku dr. inż. Rafała Cygana w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego na podstawie pisma Przewodniczącego Rady ds. Stopni Naukowych w Dyscyplinie Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Macieja Motyki prof. PRZ. o sygnaturze RM/531-10-05/2023 z dnia 27 grudnia 2023 r.

1. Podstawowe dane o kandydacie

Dr inż. Rafał Cygan jest absolwentem Akademii Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie, Wydziału Odlewnictwa. W roku 2010 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie Nauk Technicznych, dyscyplinie Inżynieria Materiałowa na Wydziale Odlewnictwa AGH, broniąc pracy doktorskiej pt. *„Przyczyny powstawania niedolewów w supercienkościennych elementach odlewanych z nadstopów na osnowie niklu”*. W maju 2005 r. rozpoczął pracę w odlewni precyzyjnej WSK PZL - Rzeszów S.A. Obecnie pracuje w Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o.

2. Ocena osiągnięcia naukowego

Dr inż. Rafał Cygan przedstawił do oceny jako najważniejsze osiągnięcie naukowe cykl 10 publikacji pod wspólnym tytułem *„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”*.

Tematyka prowadzonych badań jest bardzo aktualna i nowatorska, gdyż nadstopy na osnowie niklu charakteryzują się bardzo wysokimi właściwościami mechanicznymi i dużą odpornością na korozję, szczególnie utlenianie w temperaturze podwyższonej, dlatego stanowią kluczową grupą materiałów stosowanych w przemyśle lotniczym.

Obecnie, większość łopatek turbin oraz aparatów kierujących do silników lotniczych, wytwarza się metodą wytapianych modeli woskowych nadstopów niklu. Należą one 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. Wytwarzanie odlewów jest procesem bardzo złożonym, a ich końcowy odbiór poprzedza wiele rygorystycznych kontroli.

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 Kandydat wykazał 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.

Kandydat w ramach prowadzonych prac badawczych opracował technologię produkcji rdzeni ceramicznych. Prace skupiały się na zastosowaniu metody formowania wtryskowego, która składa się z czterech podstawowych etapów: przygotowania wsadu, formowania elementu, usunięcia spoiwa i spiekania. Przebadwał kilkanaście kompozycji materiałów

ceramicznych. W procedurze doboru materiału na rdzenie uwzględniono dwa najważniejsze parametry: porowatość pozorną oraz wytrzymałość na zginanie materiałów spiekanych. W efekcie prowadzonych prac badawczych zaproponował 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.

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 intensywna reakcja metal-rdzeń nie zachodzi. Maksymalna głębokość ubytku warstwy łopatek wynosiła 20 μm . Świadczy to o poprawnej selekcji materiału oraz możliwości jego zastosowania w przemyśle. Dodatkowo należy podkreślić, że firma Consolidated Precision Products Poland Sp. z o.o. wykupiła licencję na produkcję rdzeni ceramicznych według opracowanej technologii.

Bardzo ciekawe badania Kandydata dotyczą doboru warstw form odlewniczych. Rolą pierwszej powłoki jest odwzorowanie geometrii modelu oraz przeciwdziałanie reakcjom na granicy ciekły stop forma ceramiczna. Druga powłoka, stanowi warstwę przejściową, natomiast kolejne powłoki zewnętrzne muszą zagwarantować odpowiednio wysoką wytrzymałość formy. Duża część badań dotyczyła wykorzystania krzemianu etylu, które potwierdziły 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 wykazał, że spoiwa te charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi oraz krótkim czasem schnięcia.

Według mnie najciekawsze badania z punktu naukowego i nowatorskiego to opracowanie przez dr inż. Rafała Cygana technologii produkcji kompozytowych form ceramicznych z włóknami ceramicznymi pełniącymi funkcję wypełniacza. Włókna szklane są stosowane w produkcji form ceramicznych w celu uzyskania odpowiednio wysokiej ich wytrzymałości. W ramach projektu LIDER VII opracował 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 wzmocnione 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*”.

Również bardzo interesujące są badania Kandydata, dotyczące 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 wydzieleni wtórnych fazy γ' i węglików MC.

Wykazał, 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 γ , w przestrzeniach międzydendrytycznych nadstopu Inconel 713C wydzielają się borki, wydzielenia fazy międzymetalicznej Ni_7Zr_2 oraz eutektyka $\gamma-\gamma'$. W obszarach rdzeni dendrytów i ramion wtórnych dominują natomiast koherentne z osnową wydzielenia fazy międzymetalicznej o dodatnim parametrze niedopasowania δ . Nie obserwowano dotychczas takich przemian w nadstopie niklu Inconel 713C.

Należy też wyróżnić prace, które dotyczyły kontroli wielkości ziarna poprzez modyfikację warstwy wierzchniej elementów części gorącej silników lotniczych wytwarzanych metodą odlewania precyzyjnego poprzez odpowiednią zmianę składu chemicznego pierwszej warstwy formy ceramicznej, która ma bezpośredni kontakt z ciekłym metalem podczas zalewania i krystalizacji. Na podstawie analizy wyników badań i danych literaturowych stwierdził, 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. Wykazano, że zarówno dodatek glinianu kobaltu, jak i temperatura zalewania formy ciekłym nadstopem wpływają na wielkość ziarn w nadstopie Inconel 713C.

Wiele nowych rozwiązań zaproponowanych przez dr mgr. Rafała Cygana zostało wdrożenia do działalności gospodarczej przedsiębiorstw: WSK PZL Rzeszów, Pratt&Whitney Rzeszów oraz Consolidated Precision Products Poland. Wdrożono między innymi:

1. Technologię wytwarzania łopatek wirnika turbiny wysokiego ciśnienia HPT silnika lotniczego z kanałami wewnętrznymi odtwarzanymi za pomocą monolitycznych rdzeni ceramicznych,
2. technologię odlewania precyzyjnego komponentów turbiny niskiego ciśnienia silnika, turbowentylatorowego PW1000 z wykorzystaniem filtrów ceramicznych nowej generacji, wytwarzanych metodami drukowania 3D,
3. technologię wytwarzania typoszeregu precyzyjnych, polikrystalicznych, rdzeniowych odlewów cienkościennych, wielkogabarytowych łopatek rotora ciśnienia turbiny nowej generacji silnika lotniczego GP7200,
4. technologię wielowarstwowej ceramicznej formy odlewniczej do precyzyjnego odlewania krytycznych części turbin silników lotniczych,
5. technologię wytwarzania form odlewniczych z zastosowaniem tlenkowych faz ceramicznych, przeznaczonych do precyzyjnego odlewania części lotniczych z nadstopów niklu,
6. technologię wytwarzania form odlewniczych z zastosowaniem materiałów kompozytowych, przeznaczonych do precyzyjnego odlewania części lotniczych z nadstopów niklu,

7. technologię produkcji łopatek wirnika turbiny wysokiego ciśnienia HPT silnika lotniczego,
8. technologię wytwarzania precyzyjnych odlewów nowej generacji łopatek i segmentów łopatkowych silnika lotniczego z kanałami do chłodzenia wewnętrznego odtwarzanymi za pomocą monolitycznych rdzeni ceramicznych,
9. zoptymalizowano konstrukcję i technologię układów zasilających form ceramicznych do precyzyjnego odlewania części lotniczych.

Dr inż. Rafał Cygan ma w dorobku 42 prac naukowych (w tym 29 artykułów w czasopismach i 6 publikacji w materiałach konferencyjnych indeksowanych w bazie Web of Science) oraz 7 patentów. Posiada wiele publikacji w wartościowych czasopismach znajdujących się na Web of Science takich jak: *Ceramic International*, *Journal of Materials Processing Technology*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, *Journal of Materials Engineering and Performance*, *Archives of Metallurgy and Materials*, *JOM: the Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *Archives of Foundry Engineering*, *Journal of Manufacturing Processes*.

Większość Jego dorobku jest w języku angielskim. Jest on znany i ceniony w kręgach specjalistów, czego dowodem jest bardzo duża liczba cytowań wg Web of Science jest ich 387 (bez autocytowań 310) oraz bardzo wysoki Indeks Hirscha – 12. Sumaryczny impact factor zgodnie z rokiem opublikowania wynosi 64,424.

Podsumowując osiągnięcie naukowe dr inż. Rafała Cygana pt. „*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*” stwierdzam, że jest bardzo aktualne, porusza wiele nowych zagadnień, zostało przedstawione w wartościowych publikacjach. Uważam więc, że stanowi ono znaczny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa. Należy też podkreślić, że wiele technologii opracowanych przez Kandydata zostało wdrożonych do produkcji w różnych przedsiębiorstwach.

Dr inż. Rafał Cygan posiada również inne ważne osiągnięcie naukowe, którym jest opracowanie koncepcji oraz wdrożenie do produkcji zrobotyzowanego stanowiska do czyszczenia form ceramicznych oraz opracowanie technologii przygotowania form odlewniczych aparatów kierujących osiowych turbin lotniczych. Prace były realizowane w latach 2017-2021, w ramach projektu: POIR.01.01.01-00-0763/17 pt. „*Opracowanie technologii wytwarzania oraz wdrożenie do produkcji aparatów kierujących lotniczej turbiny niskiego ciśnienia*”. Kandydat był kierownikiem zespołu koncepcyjnego, projektowania oraz wdrażania opracowanego rozwiązania. Zadaniem opracowanego stanowiska z robotem przemysłowym było wykonanie zaprogramowanych wcześniej oraz zatwierdzonych przez technologów prowadzących sekwencji operacji: czyszczenie form z wykorzystaniem podciśnienia; mycie z wykorzystaniem specjalistycznego opracowanego również w ramach tego projektu środka myjącego charakteryzującego się obniżoną wartością napięcia powierzchniowego oraz ograniczoną penetracją porowatych form ceramicznych; badania szczelności form mające na celu wyeliminowanie z dalszego procesu technologicznego wadliwych form ceramicznych; automatyczny proces suszenia z wykorzystaniem promienników podczerwieni. W ramach projektu m.in. zaprojektowano oraz wdrożono w cyklu technologicznym firmy Consolidated Precision Products Poland zrobotyzowane stanowisko czyszcząco-myjąco-suszące do przygotowania form odlewniczych integralnych aparatów kierujących osiowych turbin lotniczych.

Podsumowując potwierdzam, dr inż. Rafał Cygan posiada osiągnięcia stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa.

3. Aktywność naukowa realizowana w więcej niż jednej uczelni lub jednostce naukowej.

Dr. inż. Rafał Cygan wykazał się bardzo dużą aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni.

W latach 2003 – 2004 odbył 6-miesięczny staż w Institute of Foundry Technology (Düsseldorf, Niemcy). Pracował w zespole odpowiedzialnym za opracowanie i produkcję kolektorów wydechowych do samochodów osobowych takich marek jak Audi i BMW z wykorzystaniem technik szybkiego prototypowania.

W latach 2016 – 2018 był zatrudniony na Politechnice Rzeszowskiej (Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa) jako kierownik (lider projektu) w ramach programu LIDER VII finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju prowadził 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.

W sierpniu 2023 r. odbył dwutygodniowy staż na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej prowadził badania mikrostruktury odlewów z nadstopu niklu za pomocą mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej.

Wszystkie wymienione aktywności są również potwierdzone wartościowymi publikacjami.

4. Konkluzja końcowa

Dr. inż. Rafał Cygan przedstawił do oceny jako najważniejsze osiągnięcie naukowe cykl 10 publikacji pod wspólnym tytułem „*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*”. Uważam, że jest ono bardzo aktualne, porusza wiele nowych zagadnień, zostało przedstawione w wartościowych publikacjach i stanowi znaczny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa. Dr inż. Rafał Cygan posiada również inne ważne osiągnięcie naukowe, którym jest opracowanie koncepcji oraz wdrożenie do produkcji zrobotyzowanego stanowiska do czyszczenia form ceramicznych oraz opracowanie technologii przygotowania form odlewniczych aparatów kierujących osiowych turbin lotniczych.

Stwierdzam, że dr inż. Rafał Cygan spełnia wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2022 poz. 574) ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

