

Prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski  
Katedra Nauki o Materiałach  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska  
ul. Żwirki i Wigury 4  
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 20 listopada 2016 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina MAŁKA

pt.: „*Opracowanie ekologicznej technologii wytwarzania form ceramicznych do odlewania precyzyjnego łopatek turbin silników lotniczych z nadstopów niklu*” -  
podstawa opracowania recenzji – pismo Dziekana Wydziału Inżynierii  
Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 10.10.2016 r.

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Małka pt. „Opracowanie ekologicznej technologii wytwarzania form ceramicznych do odlewania precyzyjnego łopatek turbin silników lotniczych z nadstopów niklu” stanowi obszerne opracowanie charakteryzacji zagadnień uściślonych w jej tytule. Dotyczy doboru materiałów – modeli woskowych i wielowarstwowej formy ceramicznej, także elementów układów wlewowego i zasilającego w zestawach modelowych i formach ceramicznych z uwzględnieniem kryterium ekologicznego oraz zachowania dotychczasowych właściwości użytkowych odlewów łopatek części gorącej silników lotniczych wytwarzanych w procesach odlewania precyzyjnego metodą wytapianych modeli.

Obecnie światowe wytwórnie silników lotniczych – Pratt & Whitney, General Electric, Safran – wprowadzają nowe rodziny silników, m.in. Pratt & Whitney – o zmienionej konstrukcji – przekładnia planetarna pomiędzy wentylatorem i turbiną – cechujących się lepszymi osiąganiami, m.in. większym ciągiem, mniejszym zużyciem paliwa i mniejszą ilością spalin ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$ ), również mniejszym hałasem, i stąd także większym stopniem ich ekologiczności. Jednocześnie skierowano prace nad usunięciem lub poprawą warunków szkodliwie wpływających na środowisko w procesach produkcji elementów i podzespołów silników lotniczych. Dotyczą



zarówno ich procesów technologicznych, jak również ich składników – doboru materiałów pomocniczych w poszczególnych operacjach i zabiegach.

Odlewanie precyzyjne łopatek i elementów stacjonarnych części gorącej silników lotniczych w procesach krystalizacji konwencjonalnej oraz kierunkowej jest techniką wytwarzania podstawową i o szerokim zakresie zastosowania w produkcji elementów i podzespołów, przede wszystkim z nadstopów niklu. Technologia form ceramicznych dla odlewania precyzyjnego jest złożoną i wymaga wprowadzenia do procesu różnych materiałów, zarówno podstawowych – ceramika, najczęściej tlenki i krzemiany (m.in.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrSiO}_4$ ) oraz glinian kobaltu ( $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ), jak również materiałów pomocniczych – środki zwilżające, spoiwa – zwykle krzemian etylu (zhydrolizowany ester kwasu ortokrzemianowego). Stosowane dotychczas spoiwo – zhydrolizowany krzemian etylu należy do grupy materiałów wskazanych Dyrektywą Unii Europejskiej do usunięcia z procesu technologicznego ze względu na szkodliwość dla środowiska. Ogólnie można przyjąć, że obecnie wprowadzenie nowych spoiw ceramicznych do mas formierskich jest jednym z głównych zagadnień dotyczących poprawy wskaźnika ekologiczności nowej rodziny silników lotniczych, również w procesach ich wytwarzania. Jest to szczególnie istotne ze względu na skalę produkcji odlewów łopatek turbiny. Dlatego uwzględnienie tej tematyki w rozprawie doktorskiej uważam za w pełni uzasadnione.

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Małka pt. „Opracowanie ekologicznej technologii wytwarzania form ceramicznych do odlewania precyzyjnego łopatek turbin silników lotniczych z nadstopów niklu” jest opracowaniem dotyczącym zagadnień metaloznawstwa nadstopów niklu – INI00, IN713C, IN713LC, MAR247 i MAR509 oraz form ceramicznych materiałów  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrSiO}_4$  i  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ , także charakteryzacji związków chemicznych wprowadzanych do mas formierskich –  $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$  (zhydrolizowany krzemian etylu) oraz krzemionka koloidalna – hydrozol kwasu krzemowego. Podstawowymi problemami rozprawy są zagadnienia technologiczne dotyczące opracowania technologii form ceramicznych z zastosowaniem materiałów ekologicznych. Rezultaty zadań badawczych wykonywanych w obszarze technologii wnoszą nowe dane do aktualnego stanu ich wiedzy – są potrzebne i wręcz niezbędne.

Treść opiniowanej rozprawy mgr. inż. Marcina Małka podzielono na 5 rozdziałów, streszczenia i wykaz literatury – 96 pozycji. Zawiera także rysunki – 106 i tablice – 13. Problematykę rozprawy przedstawiono na podstawie przeglądu piśmiennictwa (rozd. 1) dotyczącego zagadnień będących jej tematyką. W rozdziale tym omówiono ogólną charakterystykę materiałów ceramicznych i nadstopów niklu, także technologie form ceramicznych – modele woskowe, kryteria doboru materiałów ceramicznych oraz technologię mas formierskich z użyciem jako spoiwa zhydrolizowanego krzemianu etylu lub krzemionki koloidalnej. Jednocześnie



wyodrębnienie czynników materiałowych i technologicznych było podstawą opisu problemu badawczego i celu rozprawy (rozdz. 2). Autor odwołuje się do stosowanych technologii w przemyśle lotniczym – firmie Pratt & Whitney Rzeszów i przedstawia własne rozwiązanie zagadnień technologicznych w procesach wytwarzania form ceramicznych oraz weryfikacji ich jakości w warunkach produkcji przemysłowej. Wymagało to dużego wysiłku zarówno w organizacji badań, jak również dyscypliny technologii. Podjęte zadania badawcze cechuje duża złożoność, szczególnie w technologii formy ceramicznej, także dotycząca procesu zalewania ciekłym metalem i jakości uzyskanych odlewów łopatek turbiny PWA1 i PWCI – warstwa wierzchnia – porowatość.

W rozdziale 3. *Materiały i metodyka badań* przedstawiono podstawową charakterystykę stosowanych materiałów ceramicznych – proszki tlenku aluminium, glinianu kobaltu i krzemianu cyrkonu oraz spoiwa z wyróżnieniem 1. warstwy formy i kolejnych jej warstw konstrukcyjnych. Przyjęto w pracy zarówno rodzaj, jak i metodykę badań stosowaną w Odlewni Precyzyjnej Pratt & Whitney Rzeszów z uzupełnieniem analizy składu fazowego. Wyniki badań i ich analizę (rozdz. 4 i 5) omówiono z wyodrębnieniem charakterystyki proszków i spoiw formierskich, masy formierskiej i form ceramicznych oraz weryfikacji doświadczalnej modelowej technologii form ceramicznych do odlewania precyzyjnego łopatek turbiny. Doktorant w tym rozdziale stara się z powodzeniem potwierdzić sformułowany cel pracy i opiera się na powszechnie akceptowanej wiedzy dotyczącej zagadnień rozprawy. W tej części rozprawy nie stwierdziłem błędów, ani uchybień w samym warsztacie badawczym – moje uwagi dotyczą sposobu ich przedstawienia z uwzględnieniem trudnej działalności Doktoranta w warunkach przemysłowych – przy ciągłej produkcji i zastrzeżeniach o nierozpowszechnianiu danych dotyczących technologii. Skupiono więc uwagę w większym stopniu na praktycznych aspektach wytwarzania i zastosowania niż na pogłębionej refleksji dotyczących podstawowych zjawisk determinujących warunki prowadzonych procesów dla nowych materiałów formy. Jednocześnie zarysowano rozwiązania, do których konsekwentnie zmierza Doktorant. Ta krytyczna część recenzji nie powinna sprawić wrażenia, że rozprawa zawiera sporo usterek. Wymienione uwagi są bowiem również przyczynkiem do dyskusji i nie wpływają na ogólną, pozytywną, ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Małka. Uważam, że Doktorant samodzielnie i na dobrym poziomie rozwiązał postawione zadania badawcze. Podkreślić należy, że przyjęte w założeniach cele planowanych badań realizował w procesach technologicznych w warunkach produkcyjnych Odlewni Precyzyjnej Pratt & Whitney Rzeszów. Włożył duży wysiłek w prawidłową realizację części doświadczalnej pracy. Potrafił poprawnie interpretować uzyskane wyniki badań z uwzględnieniem kryteriów



wysokozaawansowanej technologii i wysokich wymagań jakości odlewów łopatek turbiny.

Rozdziały części badań własnych rozprawy – eksperymentalnych – potwierdzają dobrą organizację zaplanowanych i prowadzonych zadań badawczych oraz umiejętność w systematyzowaniu działań prowadzonych do uzyskania zaplanowanego celu – trudnego do rozwiązania ze względu na ograniczenia warunkami produkcji – wprowadzenie materiałów ekologicznych do procesu technologicznego wytwarzania form ceramicznych. Niewątpliwie walorem prowadzonych badań weryfikujących przyjęte założenia – dobór jako ekologicznego spoiwa masy formierskiej – krzemionki koloidalnej – hydrozolu kwasu krzemowego w postaci zawiesiny wodnej – jest skrupulatność i dążenie do uzyskania maksymalnej liczny informacji zwiększających prawdopodobieństwo potwierdzenia przyjętych założeń i prawidłowego przyjęcia rodzaju materiału spoiwa. Jednocześnie do wykazania i potwierdzenia dobrej jakości odlewów łopatek wytworzonych w warunkach procesu produkcji w Odlewni Precyzyjnej Pratt & Whitney Rzeszów po wprowadzeniu nowych materiałów soiwa.

Uznaję w mojej ocenie, że mgr inż. Marcin Małek prawidłowo i na dobrym poziomie prowadzi dyskusję wyników w środowisku dużych zastrzeżeń dotyczących technologii. Dokonał właściwej oceny uzyskanych wyników badań przy zastosowaniu szerokiego zakresu metod badawczych, zarówno materiałów formy ceramicznej, jak również materiału odlewów łopatek – nadstopów niklu. Jednocześnie uzasadnił i potwierdził swoją wiedzę poznawczą w obszarze stosowanych materiałów ceramicznych i metalicznych oraz szeroką wiedzę w zakresie technologii form ceramicznych.

Mgr inż. Marcin Małek ma na pewno w planie rozpowszechnienie wyników swoich badań w publikacjach, z uwzględnieniem zastrzeżeń technologicznych, dlatego zwracam uwagę na przyłożenie większej staranności w terminologii i opisie podstawowych zjawisk występujących, bądź charakteryzujących materiały i technologie materiałowe i na przykład: str. 25 – typ struktury i rodzaj sieci krystalicznej nie są synonimami – struktura jest regularna i sieć krystaliczna może być regularna i tak się „udało” dla wielu metali. Jednak to nie znaczy, że można stosować aż takie uproszczenia, bowiem jest struktura regularna, ale sieci mogą być różne. W tym przypadku sieć jest także regularna, ale jest ściennie centrowaną. Również na tej stronie – proces nieuporządkowanego wydzielania z roztworu stałego – co to znaczy? i czy z każdego roztworu...?; str. 40 – Kąta zwilżania się nie bada ..., oraz str. 36 – rys. 14 i 15 oraz str. 62 – rys. 49 – 52 – czy podpisy rysunków są prawidłowe?

### **Wniosek końcowy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Małka pt. „Opracowanie ekologicznej technologii wytwarzania form ceramicznych do odlewania precyzyjnego łopatek turbin silników lotniczych z nadstopów niklu” w mojej ocenie stanowi opracowanie naukowe rozszerzające wiedzę w zakresie materiałów na formy ceramiczne z uwzględnieniem kryterium ekologiczności procesu technologicznego. Doktorant dobrze sformułował cel swojej rozprawy, prawidłowo dobrał metodykę badań w warunkach produkcyjnych. Przedstawił i dokonał wyczerpującej analizy uzyskanych wyników. Potwierdził swoje dobre przygotowanie do prowadzenia pracy badawczej w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Spełnił wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez art. 13 pkt. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Marcina Małka do publicznej obrony swojej rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

