

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina MAŁKA pt. *Opracowanie ekologicznej technologii wytwarzania form ceramicznych do odlewania precyzyjnego łopatek turbin silników lotniczych z nadstopów niklu*

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 22 czerwca 2016 r. oraz będącego jej wynikiem pisma Prodziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej PW, dr hab. inż. Jerzego Roberta Sobieckiego, prof. PW z dnia 10.10.2016 r.

### OCENA DOBORU TEMATYKI PRACY

Treść pracy odpowiada jej tytułowi: *Opracowanie ekologicznej technologii wytwarzania form ceramicznych do odlewania precyzyjnego łopatek turbin silników lotniczych z nadstopów niklu*. Produkcja elementów silników lotniczych z nadstopów niklu jest zadaniem bardzo odpowiedzialnym i wymaga stosowania najnowszych metod zarówno wytwarzania, jak i kontroli jakości. Podstawowym celem pracy mgr inż. Marcina Małka było opracowanie takiej technologii wytwarzania form, która wyeliminowałaby zhydrolizowany krzemian etylu (ZKE). Spoiwo wykorzystujące ZKE jest szkodliwe dla pracowników odlewni oraz środowiska. Należało tak zmienić technologię, by wykorzystać istniejący park maszynowy oraz uzyskać parametry form i gotowych wyrobów spełniające wszystkie kryteria procesu produkcyjnego oraz końcowej kontroli jakości. Postawiony cel udało się osiągnąć dzięki wykorzystaniu spoiw wodorocieńczalnych zawierających krzemionkę koloidalną.

Praca nie była oderwana od rzeczywistych warunków, gdyż wykonywano ją we współpracy z Pratt & Whitney Rzeszów. Ponadto została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER36/10/L-2/10/NCBiR/2011.

Biorąc pod uwagę powyższe ustalenia należy stwierdzić, że tematyka pracy została dobrze wybrana, odpowiada aktualnemu stanowi wiedzy i techniki, a ponadto służy rozwiązaniu konkretnego problemu. Na uznanie zasługuje fakt, że badania prowadzono w ścisłej współpracy z dużym, nowoczesnym zakładem przemysłowym.

### UWAGI WSTĘPNE I OGÓLNE

Przedstawiona do recenzji praca została wykonana pod kierunkiem promotora, prof. dr hab. inż. Krzysztofa Jana Kurzydłowskiego oraz promotora pomocniczego, dr inż. Pawła Wiśniewskiego. Rozprawa została wydrukowana i oprawiona w formie broszury formatu 235 x 162 mm. Praca liczy 119 stron, 106 rysunków (ilustracji) oraz 13 tabel. Ponadto rozprawa zawiera streszczenia w języku polskim oraz angielskim, spis rysunków, spis tabel i bibliografię, która liczy 96 pozycji, w zdecydowanej większości angielskojęzycznych i opublikowanych po 2000 r. Pozycje literaturowe

*prof. dr hab. inż. Leszek Wojnar*

Dąbrowa Szlachecka 169, 32-070 Czernichów e-mail: [leszek.wojnar@gmail.com](mailto:leszek.wojnar@gmail.com) tel. 603 582 292



podano w kolejności przywoływania ich w pracy, przy czym informacja bibliograficzna jest niepełna. W przypadku artykułów z czasopism nie podano numerów stron dla poszczególnych publikacji.

Treść pracy zamknięto w 5 rozdziałach o silnie zróżnicowanej objętości:

1. Wprowadzenie (str. 11-26; 6 podrozdziałów)
2. Opis problemu badawczego i cel pracy (str. 27-30; bez podrozdziałów)
3. Materiały i metodyka badawcza (str. 31-44; 6 podrozdziałów)
4. Wyniki badań i ich analiza (str. 45-105; 5 podrozdziałów)
5. Podsumowanie (str. 106; bez podrozdziałów)

Po podsumowaniu następują: literatura, spis rysunków oraz spis tabel. Streszczenia spis treści umieszczono na samym początku rozprawy. Zarówno układ treści, jak i objętości poszczególnych rozdziałów nie budzą zastrzeżeń. Jedną z zalet recenzowanej rozprawy, uwidaczniającą się już w spisie treści, jest brak tezy, która zazwyczaj bywa formułowana w sztuczny i nadęty sposób. Zamiast tego zamieszczono opis problemu badawczego i cel pracy. Dodatkowo we wprowadzeniu (str. 12, drugi akapit) autor w sposób jasny i jednoznaczny zapisał, co w istocie chciał zrobić.

W pracy zwraca uwagę duża liczba przeprowadzonych różnorodnych badań. W przypadku proszków formierskich wykonano obserwacje mikrostruktury za pomocą mikroskopu skaningowego, zmierzono metodą LALLS (Low Angle Laser Light Scattering) wielkość cząstek proszków, zbadano skład chemiczny i fazowy oraz wyznaczono potencjał Zeta. Podobnie, przeprowadzono dużą liczbę badań spoiwa. Wykonano obserwacje mikrostruktury za pomocą dwóch mikroskopów skaningowych, zbadano zawartość fazy stałej, wyznaczono kąt zwilżania, wykonano badania spektroskopowe w podczerwieni oraz badania termogravimetryczne. W przypadku form zbadano różnymi metodami czasy suszenia, wykonano obserwacje mikroskopowe i jakościową analizę powierzchni form, badania dyfraktometryczne, analizy profilometryczne chropowatości powierzchni, a także liczne badania właściwości mechanicznych.

Najistotniejsze dla końcowego wyniku pracy było przygotowanie dwóch rodzajów form: tradycyjnych z użyciem ZKE oraz nowych, wykorzystujących wyłącznie spoiwa wodorozcieńczalne. Autor słusznie zaproponował wykonanie pełnych badań testowej formy przygotowanej z użycie ZKE, aby otrzymać referencyjne dane do oceny form przygotowanych z użyciem nowych spoiw wodorozcieńczalnych. Formy zostały użyte do wykonania testowych odlewów łopatek turbin. Kontrola otrzymanych odlewów wykazała ich dobrą jakość, odpowiadającą wymogom Pratt & Whitney Rzeszów. Tym samym został osiągnięty podstawowy cel pracy.

Niezależnie od bardzo szerokiego zakresu badań, który wykazał dobrą orientację doktoranta we współczesnych metodach badawczych, należy zwrócić uwagę, że nie przedstawiono żadnego planu tych badań (w sensie metodyki planowania doświadczeń). W ten sposób nie była możliwa żadna optymalizacja uzyskanych rozwiązań. Z drugiej strony należy wziąć pod uwagę, że autor musiał zmierzyć się z bardzo silnymi ograniczeniami, dotyczącymi parku technologicznego, szczegółowych wymagań kontrahenta oraz kosztów. W tej sytuacji autor zdecydował się na inny sposób rozwiązania problemu, polegający na jego wstępnej analizie zaproponowaniu konkretnego rozwiązania. W takim przypadku badania doświadczalne można ograniczyć do sprawdzenia, czy zaproponowane rozwiązanie spełnia stawiane w stosunku do niego wymagania. Uznajemy wtedy, że spełnienie wszystkich minimalnych wymagań jest wystarczające, nawet jeżeli wynik nie jest optymalny.

Opisany powyżej sposób planowania i przeprowadzenia badań należy uznać za poprawny, tym bardziej, że uzyskane wyniki są satysfakcjonujące. Próby dalszej optymalizacji proponowanego rozwiązania wymagałyby dodatkowych środków finansowych i czasu, a zakres niezbędnych prac istotnie wykraczałby poza zakres tradycyjnie przyjmowany w rozprawach doktorskich.



## OCENA PRACY POD WZGLĘDEM EDYTORSKIM

Praca sprawia dobre wrażenie podczas jej pobieżnego przeglądu. Została starannie sformatowana, rysunki (często będące de facto fotografiami lub mapami bitowymi wygenerowanymi przez urządzenia badawcze) są dostatecznie duże i czytelne. Rozprawa, zapewne dzięki funkcjom autokorekty wbudowanym w edytor tekstu, nie zawiera błędów ortograficznych i literówek. Znajduje się w niej jednak dużo usterek interpunkcyjnych, głównie w postaci niepotrzebnych przecinków. Dość liczne są również błędy gramatyczne oraz stylistyczne i niezręczne sformułowania. Niekiedy trafiają się też błędy redakcyjne. Poniżej podaję przykłady dostrzeżonych usterek:

- Spis treści - zgubiono rozdział 1.2.2 (po rozdziale 1.2.1 następuje bezpośrednio 1.2.3), który znajduje się w pracy i rozpoczyna na str. 17.
- Str. 11, wiersze 4-5 od góry – zdanie: *Pozwalały one (skrzydła) latać, choć lot zakończył się tragicznie dla Ikara, to pragnienie zdobycia przestworzy zostało*, stanowi niezbyt szczęśliwe połączenie dwóch zdań. Wystarczyłoby po słowie *latać* dać kropkę zamiast przecinka.
- Str. 12, pierwszy akapit. Nieszczęśliwie wybrano słowo: *grupa*, bo w każdej z grup mamy wszystkie rodzaje łopatek. Najprawdopodobniej autor pod pojęciem różnych grup autor rozumiał te same zestawy łopatek, ale podzielone w podzbiory na podstawie różnych kryteriów podziału.
- Str. 13, wiersz 4 od dołu – jest: *cechują się od nich lepszymi właściwościami*. Powinno być: *cechują się lepszymi od nich właściwościami*.
- Str. 15, wiersze 12-13 od dołu – jest: *wytworzona warstwa w ten sposób jest suszona*. Powinno być: *wytworzona w ten sposób warstwa jest suszona*.
- Str. 16, wiersz 6 od góry – jest: *wyższa temperatura nagrzanej formy do zalewania ciekłym metalem*. Powinno być: *wyższa temperatura formy nagrzanej do zalewania ciekłym metalem*.
- Str. 17, wiersze 14-15 od góry – jest: *podstawowym jest rodzaj stopu oraz rodzaj procesu i sposobu zalewania, do których przeznaczona jest forma*. Powinno być: *podstawowymi są rodzaj stopu oraz rodzaj procesu i sposobu zalewania, do których przeznaczona jest forma*.
- Str. 22, wiersz 1 od góry – jest: *gęstością zbliżoną do 0,887 g/cm<sup>3</sup> wody*. Powinno się wykreślić ostatnie słowo (*wody*).
- Str. 23, wiersz 8 od dołu – zamiast: *regularnie* powinno być: *regularnej*.
- Str. 25, wiersz 4 od dołu – wprowadzono symbol RSC, który nie został wcześniej zdefiniowany. We wcześniejszej części pracy opisywano rodzaj sieci używając pełnej nazwy: *regularna ściennie centrowana*.
- Str. 27, wiersze 7-8 od góry – Sformułowanie opisujące drugi problem badawczy jest całkowicie niezrozumiałe i z pewnością zawiera istotne błędy gramatyczne.
- Str. 37, wiersz 8 od dołu – zdanie: *osiągnięcie temperatury otoczenia, więc wskazywało na wyschnięcie formy należy przeredagować*. Można np. zapisać je następująco: *osiągnięcie temperatury otoczenia wskazywało zatem na wyschnięcie formy*.
- Str. 34, wiersz 5 od dołu. Zamiast: *pomiędzy głowice umieszczono* powinno być: *pomiędzy głowicami umieszczono*.
- Str. 50, wiersz 1 od góry – zamiast: *obserwowano wziąć zacieki po osypaniu formy*.
- Str. 60, wiersz 7 od dołu – zamiast: *w skutek* powinno być: *wskutek*.
- Str. 75 (Tabela 10), uwagi dotyczące 3 dnia prób. Nie wiadomo, jak rozumieć zdanie: *obserwowano wziąć zacieki po osypaniu formy*.
- Str. 77, wiersz 5 od dołu – przy słowie: *spoiwa* powinno być dodane, że chodzi o spoiwo wodorozcieńczalne.
- Str. 77, wiersz 1 od dołu – sformułowanie: *schną w większym czasie* jest co najmniej niezręczne. Lepiej byłoby napisać: *schną przez dłuższy okres czasu* lub *schną wolniej*.



W większości przypadków dostrzeżone błędy były błędami drobnymi, które mogą pozostać wręcz niezauważone przez osobę mniej wrażliwą na stronę językową prac naukowych. Nie mają one istotnego wpływu na merytoryczną wartość pracy.

## WYBRANE UWAGI KRYTYCZNE LUB Dyskusyjne

W kilku miejscach natrafiłem jednak na nieco poważniejsze usterki językowe, które mogą wypaczyć treść pracy lub nie pozwalają na zrozumienie pewnych jej fragmentów. Poniżej przytoczyłem kilka przykładów tego typu usterek:

- Str. 13, wiersz 7 od dołu – jak należy rozumieć pojęcie *odporności ceramiki na tarcie*?
- Str. 34, wiersz 10 od góry – na czym polegały i czemu służyły *badania pomiaru suszenia*?
- Str. 37: w opisie metody prądowej wskazano osiągnięcie temperatury otoczenia jako kryterium wyschnięcia formy. Następnie to samo kryterium znalazło się (i słusznie) w opisie metody termicznej. Nie wiadomo dlaczego wzmianka o temperaturze znalazła się w opisie metody prądowej. Sugeruje się w ten sposób, że wyniki metody prądowej i termicznej wykazują dużą zgodność. Niestety, w zdecydowany sposób przeczą temu wyniki pomiarów czasu schnięcia formy zaprezentowane na wykresach rys. 71 i 72. Poza tym określenie (str. 38) *temperatury zbliżonej do otoczenia* jest bardzo nieprecyzyjne i nie powinno mieć miejsca w opisie ilościowej metody badawczej.
- Przy opisie morfologii cząstek proszków autor stwierdza, że wykazują one nieregularny kształt, ostre krawędzie oraz silnie rozwiniętą powierzchnię. Można się domyślić, że brak możliwości dopasowania cząstek do prostych, ściśle zdefiniowanych brył daje podstawy do stwierdzenia, że kształt jest nieregularny. Podobnie, dobrze widoczne krawędzie można nazwać ostrymi. Pozostaje jednak pytanie, na jakiej podstawie autor ocenił powierzchnię jako silnie rozwiniętą i jakie jest kryterium uznania powierzchni za silnie rozwiniętą? Ta sama uwaga dotyczy analizy proszków przeznaczonych na warstwy konstrukcyjne.
- Przy analizie wielkości nanocząstek należy pamiętać, że z powodu ich małych rozmiarów wszelkie pomiary mogą być i zapewne są obciążone dużym błędem.
- Wyniki badań spoiw przedstawiono za pomocą wykresów słupkowych: zawartość fazy stałej na rys. 48, odczyn pH na rys. 53, gęstość na rys. 55, lepkość na rys. 56, a kąt zwilżania na rys. 58. Za każdym razem podawana jest tylko jedna wartość. Nie wiadomo, czy jest to wartość średnia z kilku pomiarów, a jeśli tak, to jaki był rozrzut wyników? Informacja na temat rozrzutu pozwoliłaby na ocenę, czy różnice pomiędzy poszczególnymi spoiwami są statystycznie istotne.
- Str. 20, pierwszy akapit – opisując prace zmierzające do wykorzystania węgliku krzemu do budowy form warto byłoby od razu nadmienić, że doktorant brał udział w tych pracach. W obecnej wersji rozprawy można się o tym dowiedzieć dopiero po sięgnięciu do spisu literatury.
- Rys. 7 (str. 23) – w tekście brakuje jakiegokolwiek komentarza do przedstawionego wykresu. Sprawia on tym samym wrażenie wklejonego jako pewna forma dekoracji.
- Rys. 8 (str. 23) został wprost skopiowany z publikacji. Pozostawiono oryginalne opisy, które są w języku angielskim (cała praca została napisana po polsku), a dodatkowo są praktycznie nieczytelne z powodu bardzo małej czcionki.
- Przy ogólnej charakterystyce nadstopów niklu dobrze byłoby wspomnieć w jakich warunkach powstają poszczególne rodzaje mikrostruktury, tj. ziarna równoosiowe, ziarna kolumnowe i monokryształy.
- Str. 28, akapit dotyczący charakterystyki systemu formierskiego – niejasne jest, co było robione i dlaczego. Z jednej strony autor stwierdza, że dane dotyczące systemu są objęte tajemnicą, a z drugiej strony stwierdza, że prowadzone przez niego próby prowadzono w oparciu o pełną charakterystykę aktualnie stosowanego systemu formierskiego. Powstaje

---

prof. dr hab. inż. Leszek Wojnar

Dąbrowa Szlachecka 169, 32-070 Czernichów e-mail: leszek.wojnar@gmail.com tel. 603 582 292



pytanie: co było objęte tajemnicą, a co pozostawało dostępne? Ponadto wydaje się, że autor powinien mieć dostęp do wielu informacji, skoro cały projekt był realizowany we współpracy z Pratt & Whitney Rzeszów.

- Str. 29, drugi akapit od góry – niejasne jest, co oznaczają symbole PWA 1 oraz PWC 1. Czy mają to być gotowe wyroby, czy może formy? Czy formy mają być wykonane zgodnie z technologią ZKE, czy też już na bazie krzemionki koloidalnej? W istocie, dalsza część rozdziału przynosi odpowiedzi na powyższe pytania, ale nie zmienia to faktu, że rozdział powinien być przeredagowany.
- Str. 30, drugi akapit – wątpliwość budzi stwierdzenie, że próby miały być wykonane na nowej linii produkcyjnej, gdyż w celem pracy było wykorzystanie starej linii, korzystającej z ZKE. Ponadto zdanie tworzące ten akapit zawiera błędy gramatyczne które powodują, że część stwierdzeń jest niejednoznaczna.
- Str. 32 – spoiwa. Wyjaśnienia wymaga fakt zmiany spoiwa pierwszej warstwy, ze spoiwa Ludox SK na spoiwo Keysol. Niniejsza uwaga nie kwestionuje zasadności tej zmiany, chodzi po prostu o jej uzasadnienie.
- Str. 33 – bardzo ogólnikowo opisano przygotowanie i badanie mas formierskich.
- Str. 33-34 – opis przygotowania form. Nie wiadomo dlaczego ten opis jest niepełny – niektóre informacje znajdują się w dalszej części pracy. Przykładowo, na str. 34 znajdujemy odwołanie do tabel nr 8 i 9, które umieszczono na str. 69 i 70.
- Str. 34-35 – opis metody ultradźwiękowej jest niepełny i nie do końca zrozumiały.

#### UWAGI DOTYCZĄCE PRZEBIEGU ORAZ INTERPRETACJI WYNIKÓW BADAŃ

- Doktorant stwierdza (str. 47), że rozkłady wielkości cząstek wykazujące więcej, niż jedno maksimum (rys. 27, str. 46) mogą świadczyć o występowaniu aglomeratów. Słuszność takiego wniosku wydaje się być wątpliwa, gdyż analiza obrazów cząstek proszków (rys. 23-26, str. 45) wskazuje raczej na niejednorodność wielkości cząstek. Inaczej mówiąc, obserwacja obrazów cząstek skłania do stwierdzenia, że stanowią one mieszaniny cząstek większych oraz mniejszych. Przedstawione w pracy obrazy nie dają podstaw do interpretowania dużych cząstek jako aglomeratów mniejszych obiektów. Poza tym wydaje się, że przy tak nieregularnych kształtach ocena wielkości na podstawie średnicy jest złym rozwiązaniem, choć wybrany przez autora parametr jest w ogólności proporcjonalny do wielkości analizowanych cząstek.
- Str. 78 – komentarze dotyczące wyników próby suszenia. Analiza wyników próby suszenia budzi pewne wątpliwości, szczególnie w zakresie możliwości porównania wyników różnych prób. W przypadku użycia spoiwa ZKE najczęściej najdłuższy czas schnięcia dawała metoda termiczna, a w przypadku użycia spoiw wodorocieńczyalnych najdłuższy czas schnięcia wykazywała przeważnie metoda wagowa. Rozbieżności te są o tyle zastanawiające, że w obydwu przypadkach warstwy konstrukcyjne były wykonywane z użyciem spoiw wodorocieńczyalnych. Należałoby zatem w pierwszej kolejności dokładniej przeanalizować wszystkie używane metody tak, aby ocenić ich dokładność i ustalić precyzyjne zasady prowadzenia pomiarów. Przykładowo, w przypadku metody termicznej duże znaczenie może mieć miejsce i sposób umieszczenia termopary. Wobec braku takiej analizy i dużych różnic wyników (w większości przypadków wynik największy stanowi ponad dwukrotność najmniejszego), które w dodatku nie wykazują systematycznego charakteru (żadna z metod nie daje zawsze wyników najmniejszych lub największych) wyciągnięte przez doktoranta wnioski mogą okazać się błędne.
- Analiza obrazów powierzchni formy (rys. 73-78) jest utrudniona ze względu na brak systematycznego i wyraźnego oznaczenia powiększeń poszczególnych obrazów. Wydaje się również, że o ile na wszystkich rysunkach zachowano ten sam schemat obrazów

*prof. dr hab. inż. Leszek Wojnar*

Dąbrowa Szlachecka 169, 32-070 Czernichów e-mail: leszek.wojnar@gmail.com tel. 603 582 292



(powierzchnia i przełom), o tyle przynajmniej część obrazów zarejestrowano przy różnych powiększeniach, co istotnie utrudnia ich porównywanie.

- W przypadku badania właściwości mechanicznych zastanawiający jest wyraźny spadek wartości modułu Younga w przypadku formy K+M po wyżarzaniu w temperaturze 760°C/1h. W pracy nie ma na ten temat żadnego komentarza.

Wątpliwości recenzenta budzi też Tabela 13 oraz interpretacja jej zawartości, przedstawiona na str. 105, a w szczególności:

- Nie wiadomo, na jakiej podstawie doktorant stwierdza, że głównym czynnikiem determinującym wymiary odlewów jest materiał ceramiczny zastosowany jako składnik masy formierskiej. W pracy nie udokumentowano żadnych badań, które potwierdzałyby taki wniosek.
- Trudno też zgodzić się, że należy dopracować właściwości fizyczne i chemiczne mas formierskich. Należy raczej dopracować (wcześniej w recenzji zwróciłem uwagę na brak klasycznego planu badań i tym samym możliwości optymalizacji nowych mas formierskich) skład mas formierskich lub technologię przygotowywania mas i form, które mogą doprowadzić do lepszych właściwości fizycznych i chemicznych.
- Niejasne jest użyte w Tabeli 13 i opisie na str. 105 pojęcie uzysku, które powinno zostać wyraźnie zdefiniowane.

## PODSUMOWANIE

Przystępując do końcowej oceny rozprawy mgr inż. Marcina Małka biorę pod uwagę właściwy dobór tematyki pracy, umiejętne wykorzystanie szerokiego zakresu badań, współpracę z przemysłem oraz końcowy sukces polegający na uzyskaniu zakładanego wyniku. Dodatkowo stwierdzam, że w swojej ostatecznej formie, przesłanej do recenzji, praca została zredagowana poprawnie. Podczas analizy recenzowanej pracy stwierdziłem liczne usterki oraz niedociągnięcia, które przedstawiłem w recenzji. Ponadto niektóre fragmenty budzą moje wątpliwości, co również zawarłem w recenzji. Muszę jednak stwierdzić, że wszystkie uwagi krytyczne nie zmieniają mojej końcowej, jednoznacznie pozytywnej oceny.

Podsumowując, uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Małka spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Dąbrowa Szlachecka, 11 stycznia 2017 r.

