

Imię i nazwisko recenzenta:

Dr hab. inż. Grzegorz MOSKAL, Prof. PŚ

Dane adresowe:

Politechnika Śląska

Wydział Inżynierii Materiałowej

40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8

14.02.2024

(data i miejsce)

Recenzja pracy doktorskiej

Mgr inż. Anna PYTEL

(imię i nazwisko doktoranta / doktorantki)

pod tytułem: „Wpływ obróbki mechanicznej i morfologii wydzielen węglików w żarowytrzymałych stopach odlewniczych ŻS6U-WI na własności zmęczeniowe Łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki stosowanych w produkcji lotniczej”

przygotowanej pod kierunkiem:

dr hab. inż. Andrzeja Nowotnika, Prof. PRz.

(imię i nazwisko promotora)

n/d

(imię i nazwisko promotora / promotora pomocniczego)

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.)

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Zdaniem Recenzenta, przedstawiona do oceny dysertacja doktorska Pani mgr inż. Anny Pytel, wskazuje, iż jej Autorka **posiada niezbędną wiedzę teoretyczną** predestynującą Ją do ubiegania się o stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Uzasadnienie:

Mgr inż. Anna Pytel w swej pracy przedstawiła zagadnienie optymalizacji wybranych aspektów procesu wytwarzania łopatek I stopnia turbiny sprężarki wykonanych z nadstopu niklu ŻS6U-WI technologią odlewania precyzyjnego. Zakres jej dysertacji obejmował część teoretyczną (R2), w której bardzo precyzyjnie scharakteryzowała obiekt swych badań, charakteryzując jego aspekty konstrukcyjne, materiałowe oraz eksploatacyjne. Dokonała również szczegółowego opisu (w zakresie możliwości ich publicznej prezentacji) procesu produkcyjnego, którego charakterystyka wskazuje jednoznacznie, iż Doktorantka bądź jest absolwentką kierunku inżynieria produkcji/jakości lub obecnie pracuje w tym zakresie obowiązków służbowych. Wskazuje na to charakter stosowanego języka technicznego i sam sposób podejścia do zagadnienia. Z jednej strony ubogaca to pracę, ujawniając praktyczne podejście korporacyjne do procesów optymalizacji technologii, z drugiej jednak utrudnia nieco czytanie pracy, ze względu na specyficzny styl pisanie i język. Ponadto w części tej możemy znaleźć podstawowe informacje dotyczące nadstopów niklu stosowanych na tego typu elementy konstrukcyjne siników turbowentylatorowych. Głównym motywem prowadzonych badań jest optymalizacja procesu technologicznego wytwarzania wspomnianych łopatek, których głównym kryterium optymalizacji jest poprawa właściwości zmęczeniowych i ich ocena na poszczególnych etapach procesu technologicznego wytwarzania tj.: odlewania, procesów specjalnych, obróbki strumieniowo ścierniej oraz obróbki wykańczającej.

Cześć teoretyczna zaczyna się i kończy tezą pracy, które to wersje różnią się znacznie co do opisywanego zakresu i szczegółowości, ale zasadniczo co do znaczenia są tożsame i dotyczą kwestii możliwości wytworzenia wysokojakościowych łopatek I sekcji turbiny poprzez odpowiednie manipulowanie parametrami technologicznymi procesu wytwarzania. Ta wersja tezy dotyczy inżynierii materiałowej. Natomiast wersja zamieszczona w końcowej części rozdziału jest zdecydowanie bardziej zawiła i mało klarowna ale zrozumiała dla specjalistów z zakresu inżynierii produkcji/jakości.

Analizując tę część rozprawy w kontekście jej tytułu, należą jednak stwierdzić pewien istotny dysonans w postaci braku szerszego wprowadzenia do zagadnień budowy mikrostrukturalnych nadstopów na bazie niklu (morfologia wydzieleń węglików) oraz kwestii mechanizmów zmęczeniowych rozpatrywanych w kontekście zmian mikrostrukturalnych uzyskiwanych w trakcie poszczególnych etapów procesu technologicznego wytwarzania łopatek. Stanowi to dość istotną słabość ocenianej dysertacji, tym bardziej że w treści tego rozdziału znajdują się następujące stwierdzenia:

- „...Należy jednak zaznaczyć, że analiza mikrostruktury stopu jest bardzo ważna przy ocenie jakości wykonania części”...

- „...”Odlwanie w warunkach kontrolowanego chłodzenia, przy zastosowaniu odpowiedniego gradientu temperatury na granicy rozdziału ciekłego i krystalizującego stopu, umożliwia uzyskanie łopatek charakteryzujących się ziarnem o **wymagającej** strukturze”...

Te braki merytoryczne wynikają również z doboru literatury, która bazuje na pozycjach, w dominującej części polskojęzycznych, lub książkowych. Brak jest wielu istotnych z punktu widzenia tematyki badawczej pozycji literaturowych charakteryzujących choćby sam stop podstawowy.

Z drugiej strony, zrównoważeniem w pewnym stopniu tych słabości, jest rozdział 2.5 charakteryzujący problemy technologiczne i eksploatacyjne łopatek turbiny sprężarki.

Kolejna część oceny dotyczy kwestii **umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta** ubiegającego się o nadanie stopnia doktora. Analiza tego wymagania ustawowego, w poniższym kontekście, wskazuje jednoznacznie, że Doktorantka nie tylko ma dostęp do ogromnego zaplecza laboratoryjnego, badawczego i technologicznego, ale potrafi również z niego w sposób efektywny korzystać, prawidłowo planując badań (może czasem zbyt obszernie), realizując je w sposób poprawny metodycznie oraz prawidłowo je interpretując (co szerzej zostanie omówione w kolejnym podpunkcie).

Uzasadnienie:

Odpowiedź na to pytanie zawiera kolejna część dysertacji czyli rozdział IIa dotyczący zakresu, planu i metodyki badań. Ta część pracy bardzo precyzyjnie opisuje zakres i metodykę prowadzonych badań i stanowią bardzo mocną część prezentowanej pracy. Pewnym niedopowiedzeniem jest jednak stwierdzenie typ opracowanie parametrów odlewniczych oraz parametrów obróbki cieplnej. Autorce chodziło raczej o ich pewnego rodzaju optymalizację z poprawionymi właściwościami zmęczeniowymi, jako kryterium optymalizacyjnym. Nie mniej zakres prowadzonych badań jest przeogromny, znacznie wykraczający poza konieczny do zastosowania celem realizacji badań wynikających z tytułu pracy.

Zakres zrealizowanych badań, może budzić pewne wątpliwości, zwłaszcza w kontekście czasu przeznaczanego na realizację doktoratu oraz ich samodzielności. Recenzent zakłada jednak, iż Pani Mgr inż. Anna Pytel, miała do dyspozycji cały potężny potencjał ludzki, technologiczny, materiałowy oraz badawczy macierzystej jednostki, w której pracuje, oraz samej Politechniki Rzeszowskiej. Wskazuje na to chociażby Tabela 4, w której przedstawiono wyniki badań składu chemicznego odlewów wytworzonych w latach 2015-2018. W najmniejszym stopniu, nie jest to jednak zarzut, ale raczej pochwała z nutą zazdrości dotyczącą skali dostępu do możliwości badawczych Doktorantki.

Odrębną kwestią jest pewnego rodzaju ucieczka Doktorantki od głównego tematu dysertacji. Znalazło to odzwierciedlenie np. w pewnych rozbieżnościach w celach realizacji prezentowanych badań. I tak na przykład w rozdziale I można znaleźć informację, iż celem pracy było „zdefiniowanie problemów mających bezpośredni wpływ na technologię wytwarzania łopatek, co miało zapewnić podwyższenie liczby gotowych elementów charakteryzujących się **własnościami** spełniającymi wysokie wymagania odbiorcze.” W części podsumowującej można z kolei znaleźć informację, iż głównym celem projektu była optymalizacja technologii wytwarzania łopatek z uwzględnieniem czynników wpływających na jakość wyrobu, celem uzyskania stabilnego i powtarzalnego procesu.

Widać tu wyraźnie swoistą dychotomię oczekiwań Promotora (inżyniera materiałowego) i Doktorantki (prawdopodobnie specjalistki w kwestiach zarządzania produkcją/jakością z wykształcenia lub sprawowanej funkcji).

Ostatnia część oceny stanowi kwestia **oryginalności rozwiązania problemu naukowego**. To zagadnienie można rozpatrywać zdaniem Recenzenta w dwojaki sposób. Pierwszy z nich dotyczy stricte merytorycznych aspektów inżynierii materiałowej/metalurgii, a drugi

inżynierii produkcji. Ze względu na fakt, że w dokumentacji zawarto informacje, iż Doktorantka pretenduje to stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa, Recenzent odniesie się jedynie do tej kwestii, **stwierdzając że przedstawiona do oceny dysertacja jest oryginalnym rozwiązaniem naukowym.**

Uzasadnienie:

Z punktu widzenia naukowego, rozpatrywany stop ZS6U-WI nie jest najnowszym rozwiązaniem materiałowym. Jest to kwestia oczywista. Podobnie, jego zastosowanie na łopatkę turbiny I stopnia silnika PLZ-10W również nie jest rzeczą odkrywczą, a tym bardziej oryginalną. Cechy oryginalności można natomiast przypisać ewidentnie badaniom charakteryzującym wpływ subtelnych zmian w technologii wytwarzania łopatek na poziom właściwości użytkowych, które wyrażono trwałością zmęczeniową czy też badaniom żarowytrzymałości.

W pierwszym rzędzie wymienić należy analizę wpływu chromu na właściwości zmęczeniowe. Autorka wykazała bowiem, iż jest to czynnik bardzo istotnie wpływający na ilość i morfologię wydzieleni węglkowych, zwłaszcza w przypadku przekroczenia pewnej wartości krytycznej wynoszącej 8.5 % mas. Po przekroczeniu tej, nawet w minimalnym zakresie, wartości trwałość pełzaniową ulega istotnemu zmniejszeniu. Doktorantka powiązała ten fenomen z tworzeniem się kruchych węglków, będących miejscem inicjacji pęknięć zmęczeniowych. Szkoda, że nie pokusiła się o udokumentowanie mikrostrukturalnego zjawiska, co jest dość istotną słabością pracy. **Ze względu na fakt, iż nie udało się zidentyfikować w badanych odlewach przekroczeń innych pierwiastków węglkotwórczych, nie można stwierdzić, czy tendencja ta dotyczyłaby również innych węglków. Poproszę tu Doktorantkę o ustosunkowanie się do przedstawionego problemu.**

Informacja na ten temat byłaby bowiem bardzo ważnym, jeżeli nie krytycznym czynnikiem oceny jakości materiałów wsadowych do procesu odlewania precyzyjnego. Kolejne istotne zagadnienie to ocena wpływu temperatury zalewania formy na właściwości zmęczeniowe. Autorka twierdzi, że wzrost tej temperatury do 1564°C powoduje wydzielanie węglków pierwotnych typu MC, stanowiących miejsce zarodkowania pęknięć. Identyfikacji tej dokonała na podstawie kształtu wydzieleni i analizy składu chemicznego metodą EDS, co jest dość umiarkowanie poprawne metodycznie. Doktorantka dokonała również korelacji ilości powstałych węglków z odpornością na zmęczenie. Kolejnym elementem badań była ocena wielkości ziarna pierwotnego stopu. Jak wykazano, kwestia ta jest mocno dyskusyjna i nie udało się uzyskać jednoznacznych korelacji pomiędzy parametrami procesu odlewania a wielkością ziarna. Stosując podobne parametry procesu uzyskiwano łopatki różniące się wielkością tego parametru w sposób drastyczny. Uwzględniając sugestię, iż wielkość ziarna ma istotny wpływ na przebieg procesu zmęczeniowego (łatwa kumulacja odkształcenia w dużych ziarnach, co sprzyja pękaniu), Doktorantka podkreśliła konieczność modyfikacji procesu odlewania w taki sposób aby zapewnić względne rozdrobienie ziarna, np. poprzez wprowadzenie modyfikatora na bazie aluminium kobaltu. Modyfikator ten okazał się być bardzo skutecznym czynnikiem rozdrabniającym strukturę odlewów na bazie nadstopów niklu, co wykazała w swoich pracach zespół profesorów J. Cwajny i F. Binczyka z Politechniki Śląskiej. W kolejnym zadaniu Doktorantka w sposób systematyczny podeszła do kwestii projektowania obróbki cieplnej, wykorzystując do tego metody analizy termicznej. Na tej

podstawie określiła temperatury krytyczne z punktu widzenia doboru parametrów przesycania. Przeprowadzone badania wykazały, że szybkość nagrzewania do temperatury przesycania nie ma wpływu na właściwości mechanicznego badanego stopu. Analogiczną obserwację poczyniono dla temperatury przesycania na poziomie 1210 i 1225°C. Co więcej, wyższa temperatura przesycania nie zapewniła pełnego rozpuszczenia niepożądanych elementów strukturalnych w postaci eutektyk i różnego typu faz topologicznie zwartych, nieprawidłowo określanych przez Doktorantkę jako fazy międzymetaliczne. Podsumowanie wyników badań charakteryzujących rolę obróbki cieplnej przedstawiono w sposób tabelaryczny, co w sposób syntetyczny skonkludowało całość badań. **Nie mniej, odnosząc się do tej części badań, proszę o odpowiedź na pytanie dlaczego badany stop podlega obróbce cieplnej polegającej tylko na przesycaniu bez starzenia. Proszę również udzielić odpowiedzi na pytanie dotyczące sposobu tworzenia i roli w stopie fazy gamma prim pierwotnej, drugo- i trzeciorzędowej.** Należy również zauważyć, iż w przeprowadzonych badaniach nie dokonano bardziej szczegółowej analizy miejsca występowania faz węglkowych, zwłaszcza w obrębie powierzchni, co jest czynnikiem niezwykle istotnym z punktu widzenia inicjacji procesów zmęczeniowych. Obróbka powierzchniowa chemiczna i mechaniczna jest również elementem dalszych badań Doktorantki.

Kolejne dwa zagadnienia dotyczą obróbki strumieniowo ścierniej oraz szlifowania i polerowania łopatek. Wyniki badań dotyczące kulowania wykazały, że jest to istotny czynnik poprawiający odporność zmęczeniową badanych odlewów, co w samo siebie nie jest żadną nowością. Istotnym wnioskiem jest natomiast stwierdzenie, że efekt badane łopatki są mniej czuła na pozytywny wpływ kulowania, a ich odporność zmęczeniowa zależy będzie bardziej od wielkości ziarna i jego jednorodności. Rozpatrując zaś sam proces kulowania istotne są w tym przypadku czas i ciśnienie czynnika roboczego, których wzrost zapewnia wygenerowanie stanu korzystnych naprężeń ściskających.

Finalnym elementem procesu wytwarzania łopatek I sekcji turbiny są szlifowanie i polerowanie. Szczególnie istotnym elementem w tym przypadku jest skłonności do tworzenia się tzw. białej warstwy – kruchej i twardej strefy będącej efektem oddziaływań mechanicznych narzędzie – podłoże.

Ostatnią częścią pracy jest podsumowanie i wnioski. Zwrócić należy tu uwagę na syntetyczne przedstawienie uzyskanych wyników w postaci Tabeli 53, która w praktyce zawiera swoistego rodzaju wytyczne wdrożeniowej i stanowi bezcenny element tej pracy.

Analizując zaś wnioski, Doktorantka nieco zagubiła główny cel pracy, a zwłaszcza jej tytuł. Sugerował on uzyskanie odpowiedzi na pytanie jak obróbka mechaniczna i wynikające z tego zmiany w morfologii węglków wpływają na własności zmęczeniowe łopatek I stopnia turbiny wykonanych ze stopu ŻS6U-WI? **W zasadzie Doktorantka nie udzieliła odpowiedzi na to pytanie, o co teraz ją proszę.**

Kolejnym pytanie jakie musi tu paść jest następujące: Teoretycznie stop ŻS6U-WI podlega jedynie obróbce cieplnej polegającej na przesycaniu w temperaturze ok. 1210-1225°C. W praktyce zaś podlega on dodatkowo wygrzewaniu podczas aluminiowania w temperaturze ok. 1000°C z chłodzeniem w retorcie (de facto starzenie) z następującym wygrzewaniem w celu usunięcia kruchych faz

aluminidkowych w temperaturze 950°C i finalnemu wyżarzaniu odpężającym w 950°C. Jaka zatem będzie końcowa mikrostruktura stopu bazowego w odniesieniu do udziału i kształtu wydzielen fazy gamma prim, szerokości kanałów fazy gamma, udziałowi eutektyki oraz ilości, rodzaju i morfologii faz węglkowych, w tym zwłaszcza węglków pierwotnych MC.

3. Wniosek końcowy

*Przygotowując niniejszą opinię Recenzent celowo nie wspominał, iż jest to praca przygotowana w ramach programu Doktoraty Wdrożeniowe a Pani **Mgr inż. Anna PYTEL** jest pracownikiem **Consolidated Precision Products CPP**. Wyniki przedstawione w tej pracy zaś będą stanowiły podstawę wdrożeń technologicznych. Rozpatrując zatem i tę kwestię, pomimo różnych uwag krytycznych i dyskusyjnych (wynikających z ciekawości poznawczej i chęci rozwiania wątpliwości) pracę tę należy uznać za doskonały przykład współpracy z przemysłem, a wyniki w niej uzyskane jako niezwykle cenne.*

Doktorantka udowodniła również, że jest doskonale przygotowana do pracy zarówno technologicznej jak i naukowej, a jej umiejętności powinny zostać należycie docenione (\$).

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Ponadto biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny badań, kolosalny zakres badawczy, aktualność tematyki, przemysłowe znaczenie, zaliczam rozprawę do kategorii doskonałej i zasługującej na wyróżnienie. Tym samym wnioskuję o uznanie rozprawy doktorskiej Pani **Mgr inż. Anna PYTEL za wyróżniającą się (o ile spełnia wymagania formalne jednostki macierzystej w tym zakresie).**

.....
(podpis recenzenta)