

Katowice, 28.08.2015r.

dr hab. inż. Maria Sozańska, prof. nzw. w Pol. Śl.
Instytut Nauki o Materiałach
Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii
Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8
40-019 Katowice

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **Pana mgr. inż. Dariusza Szeligi**
p.t.: „**Wpływ gradientu temperatury na kształtowanie frontu krystalizacji
monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu stosowanych w silnikach
lotniczych**”

wykonanej na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechniki Rzeszowskiej
pod kierunkiem **dr hab. inż. Krzysztofa Kubiaka, prof. nzw. w Pol. Rz.**

1. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Wytwarzanie nowych materiałów o określonych właściwościach fizykochemicznych do zastosowań w silnikach lotniczych, mimo ogromnego rozwoju nowoczesnych technologii w XX i XXI wieku, stanowi wciąż wyzwanie badawcze dla współczesnej chemii i fizyki oraz materiałoznawstwa. Wynika to z faktu, że żarowytrzymałość i żaroodporność oraz poziom pozostałych właściwości fizycznych i chemicznych charakteryzujących materiały pracujące w silnikach lotniczych zależy od wielu czynników i umiejętne ich wykorzystanie w praktyce stanowi ogromne wyzwanie. Wyzwanie to dotyczy nie tylko gruntownej znajomości zagadnień chemii i fizyki, które opisują zjawiska towarzyszące procesom technologicznym otrzymywania materiałów, przede wszystkim doboru składu chemicznego, krystalizacji i odlewania ale także procesów zapewniających stabilność i degradację właściwości fizykochemicznych podczas eksploatacji. Na pozytywny wynik końcowy w postaci otrzymania materiału o zaprojektowanych właściwościach fizykochemicznych do zastosowań

w silnikach lotniczych składają się dwa podstawowe aspekty, z jednej strony jest to gruntowana znajomość zagadnień teoretycznych, a z drugiej - opracowanie i wdrożenie technologii.

Temat pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Dariusza Szeligi wpisuje się w główny nurt światowych badań nad nadstopami niklu na łopatki turbin silników lotniczych, dotyczącymi technologii otrzymywania monokrystalicznych nadstopów niklu. Technologia otrzymywania monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu na łopatki silników lotniczych, a w szczególności kształtowania frontu krystalizacji, jest złożona i niewiele ośrodków naukowych może pochwalić się znaczącymi sukcesami w tej dziedzinie. Tematyka rozprawy doktorskiej znakomicie wpisuje się w główny nurt wytwarzania i badań materiałów dla lotnictwa oraz jednocześnie w krąg problematyki wytwarzania nowych materiałów rozwijanej od wielu lat z powodzeniem w Katedrze Materiałoznawstwa i Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego od kierunkiem Pana Prof. Jana Sieniawskiego.

2. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Praca napisana jest jasno i wyraźnie rozdzielona na dwie części: przegląd piśmiennictwa zakończony określeniem tezy i celu pracy (rozdziały 1- 3, strony od 4 do 51) oraz badań własnych zakończonych analizą wyników i wnioskami (rozdziały 4 -7, strony od 52 do 181). Rozdział 8 pracy zawiera spis literatury. Ogólnie praca liczy 191 stron. Autor powołuje się na 142 pozycje literaturowe, w tym 7 jest współautorem. Wskazuje to na dobre rozeznanie w literaturze przedmiotu, w tym co jest godne również uwagi, w pracach autorów polskich. Klasyczny układ pracy pozwala jednoznacznie wyodrębnić osiągnięcia własne Pana mgr. inż. Dariusza Szeligi.

Cześć studialna pracy jest integralnie związana z jej tematem i została oparta na szerokim przeglądzie najnowszych pozycji literaturowych i monograficznych, dotyczących charakterystyki metod otrzymywania kierunkowo krystalizowanych i monokrystalicznych nadstopów niklu (rozdział 2.1) oraz wytwarzania odlewów z monokrystalicznych nadstopów niklu (rozdział 2.2) stosowanych na elementy turbin w silnikach lotniczych, analizy przepływu ciepła z kierunkowo krystalizowanych odlewach (rozdział 2.3), przedstawienia podstaw krystalizacji kierunkowej odlewów z nadstopów niklu (rozdział 2.4) oraz charakterystyki wpływu parametrów krystalizacji na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu (rozdział 2.5). Część literaturowa pracy kończy się krótkim ale szczegółowym opisem wpływu poprzecznego

gradientu temperatury i zakrzywienia izotermy likwidus na proces krystalizacji monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu (rozdział 2.6).

W tej części pracy, na uwagę zasługuje dobra, chociaż czasami zbyt ogólnikowa, charakterystyka metod wytwarzania nadstopów niklu z przeznaczeniem na elementy turbin silników lotniczych. Interesujące i wartościowe jest zestawienie właściwości i technologii otrzymywania warstw żarowytrzymałych, szczególnie ze względu na szeroki i właściwy dobór źródeł literaturowych.

Pan mgr inż. Dariusz Szeliga opisał szczegółowo proces krystalizacji odlewów z nadstopów niklu, dokonując szczegółowej analizy przepływu ciepła w odlewach oraz analizując wpływ parametrów krystalizacji na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne odlewów. Autor słusznie stwierdza, że proces wytwarzania monokrystalicznych odlewów łopatek jest zastrzeżony przez światowe wytwórnie silników lotniczych i tylko w bardzo ograniczonym zakresie można uzyskać dane dotyczące warunków technologicznych procesu monokrystalizacji i zazwyczaj są to tylko ogólne informacje dotyczące prędkości wyciągania temperatury formy ceramicznej, czasami także gradientu temperatury w odlewie. Z praktycznego i naukowego punktu widzenia to jest zdecydowanie za mało danych aby móc precyzyjnie scharakteryzować warunki procesu krystalizacji bez wad odlewniczych, np. typu *freckle*, dodatkowe ziarna kolumnowe, ziarna równoosiowe lub wady typu *slivers*. Analizując dostępne dane literaturowe oraz trudności związane z ich pozyskaniem na drodze doświadczalnej, Autor wskazuje również na możliwości rozwiązania tego problemu poprzez własne badania doświadczalne umożliwiające uzyskanie danych dotyczących gradientu temperatury w strefie ciekł-stałej i na froncie krystalizacji, prędkości krystalizacji oraz chłodzenia, wysokości strefy ciekło-stałej wzdłuż wysokości odlewów monokrystalicznych łopatek turbiny wyciąganych z różną prędkością i wytwarzanych metodą Bidgmana.

Wynikiem krytycznej analizy literatury i jej podsumowania jest klarowne sformułowanie przez Pana mgr. inż. Dariusza Szeligi tezy pracy:

„Gradient temperatury i prędkość krystalizacji zależy od kształtu odlewu i prędkości wyciągania z formy – determinują jednocześnie kształt frontu krystalizacji i oddziałują na morfologię składników fazowych mikrostruktury oraz tworzenie się wad odlewniczych w monokrystalicznych odlewach z nadstopów niklu wytwarzanych metodą Bridgmana. Stąd określenie krytycznych wartości tych parametrów procesu krystalizacji oraz kształtu frontu krystalizacji zapewnia uzyskanie odlewów monokrystalicznych bez wad odlewniczych”.

Tezę pracy uważam za poprawną pod względem naukowym, jasno sformułowaną i jednocześnie na tyle ogólną, że można oczekiwać różnych dróg jej udowodnienia. Pan mgr

inż. Dariusz Szeliga postawione zadania rozwiązał w sposób poprawny, wykazał tym samym dobre przygotowanie do samodzielnego rozwiązywania zagadnień zarówno teoretycznych, jak też związanych z praktyczną realizacją eksperymentu. Program badań i zastosowane metody badań są całkowicie adekwatne do postawionych zadań.

Główny problem rozprawy doktorskiej związany z określeniem krytycznej prędkości wyciągania z formy w procesie krystalizacji kierunkowej metodą Bridgmana na podstawie ustalonej doświadczalnie wartości gradientu temperatury i prędkości krystalizacji oraz chłodzenia wraz z wyznaczeniem zależności tych parametrów od wielkości prognozowanego frontu krystalizacji, morfologii mikrostruktury i tworzonych wad, został zrealizowany w pełni dla odlewów z monokrystalicznego nadstopu niklu CMSX-4. Na szczególną uwagę w pracy zasługują bogate wyniki badań doświadczalnych dotyczących procesu krystalizacji wraz z ich analizą i konfrontacją z wynikami symulacji numerycznych: pomiary wartości temperatury w odlewie łopatek i płyty, prędkości wyciągania formy w procesie krystalizacji oraz określenie parametrów krystalizacji (gradientu temperatury, prędkości chłodzenia, prędkości przemieszczania izotermi likwidus, określenia wysokości strefy ciekło-stałej i czasu lokalnego krystalizacji, kształtu strefy ciekło-stałej) (rozdziały 5.1 i 5.2). W pracy na uwagę zasługują też badania mikroskopowe z dobrej jakości obrazami mikrostruktury z mikroskopu świetlnego (podrozdział 5.2.2.) z wyznaczonymi parametrami morfologii ramion dendrytów 1 i 2 rzędu na przekroju poprzecznym łopatek oraz parametrami porów gazowych i skurczowych. Interesujący jest również rozdział 5.4 zawierający charakterystykę wad odlewniczych (typu *freckle*, dodatkowe ziarna kolumnowe, ziarna równoosiowe, wady typu *slivers*, granice małego i średniego kąta) stanowiący szczegółową ich dokumentację zarówno od strony makroskopowej, jak i zmierzonych parametrów krystalizacji. Wyniki te stanowią niezwykle cenne źródło informacji na temat warunków powstawania wad w odlewach łopatek. Na uwagę w pracy zasługuje również rozdział 5.5 z opisem wyników badań procesu krystalizacji w strefie zmiany przekroju odlewu z uwzględnieniem kształtu izotermi likwidus. Charakterystyce zmian wartości temperatury w różnych strefach zestawu modelowego towarzyszą badania kształtu izoterm w strefie ciekło-stałej oraz badania mikrostruktury. Osobny rozdział w pracy został poświęcony wynikom badań doskonałości struktury odlewów monokrystalicznych (rozdział 5.6).

W „Analizie wyników” (rozdział 6, strony 153-177) stanowiącej 25 stron przedstawionej rozprawy doktorskiej Pan mgr inż. Dariusz Szeliga dokonał analizy wszystkich otrzymanych wyników badań własnych. Tą część pracy uważam za szczególnie interesującą zarówno z punktu widzenia praktycznego jak i naukowego. Szczególnie w tej

części pracy Autor w pełni wykazał umiejętność syntetycznego i zarazem pogłębionego w stosunku do wcześniejszych opracowań, ujęcia teoretycznych i praktycznych aspektów badań własnych. Widać tu wyraźne starania Autora o uogólnienia i usystematyzowanie współzależności oddziaływania i interakcji różnorodnych czynników w procesie krystalizacji odlewów łopatek. Jest to bardzo pogładowa i komunikatywna forma przekazu analizy otrzymanych wyników.

Wnioski sformułowane na podstawie otrzymanych wyników badań i ich dyskusja są przedstawione w sposób jasny i wykazujący, że postawiona przez Pana mgr. inż. Dariusza Szeligę teza została w pełni udowodniona.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Za największe zalety pracy uważam:

1. Określenie parametrów procesu krystalizacji w odlewach łopatek turbin silników lotniczych.
2. Wskazanie warunków wpływu izotermi likwidus na warunki procesu odlewania łopatek turbin silników lotniczych.
3. Określenie interesujących zależności pomiędzy ilościowymi parametrami charakteryzującymi makro- i mikrostrukturę oraz orientację krystalograficzną a wielkościami charakteryzującymi proces krystalizacji w odlewach łopatek silników lotniczych.
4. Szczegółowy opis metodyki badań własnych Autora.

Oceniając pozytywnie rozprawę doktorską, pozwolę sobie na kilka uwag do dyskusji, a w szczególności:

1. Uważam za mało wyczerpujące uzasadnienie sposobu doboru warunków modelowania procesu krystalizacji. Proszę o wyjaśnienie, czym kierowano się w doborze zaproponowanych warunków brzegowych tego procesu.
2. Przedstawiony zestaw badań mikrostruktury w celu charakterystyki procesu krystalizacji jest właściwie dobrany, ale można by go rozszerzyć o inne jeszcze badania w przyszłości. Jakie i dlaczego?

3. W pracy przedstawiono interesując wyniki badań dotyczące powstawania wad w odlewach łopatek silników lotniczych. Proszę o informacje ile przypadków wad każdego typu było przedmiotem tych badań.

Stwierdzam, że pod względem edytorskim praca jest wykonana poprawnie, napisana jest prostym i jasnym językiem. Zauważone drobne nieścisłości stylistyczne nie są warte umieszczenia w recenzji.

W ogólnej ocenie stwierdzam, że Pan mgr inż. Dariusz Szeliga zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy. Zawarte w rozprawie wnioski są udokumentowane. Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy w świetle prowadzonych na świecie badań, potrzeb praktycznych rozwiązań inżynierskich, klarowne sformułowanie tezy i celu pracy oraz ich osiągnięcie na drodze dobrze zaplanowanych i przeprowadzonych badań, a w końcu szeroką dyskusję otrzymanych wyników badań, oceniam przedstawioną rozprawę doktorską bardzo wysoko, stwierdzam że spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przewidziane odpowiednimi ustawami i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Dariusza Szeliği do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie proponuję wyróżnienie pracy Pana mgr. inż. Dariusza Szeliği p.t.: *„Wpływ gradientu temperatury na kształtowanie frontu krystalizacji monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu stosowanych w silnikach lotniczych”*.

Katowice, 28.08.2015r.

Marie Dzwisła