

Kraków 16.06.2017

Dr hab. inż. Grzegorz Boczkal, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Metali Nieżelaznych
Katedra Nauki o Materiałach i Inżynierii Metali Nieżelaznych

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Roberta Albrechta**

p.t. „Defekty strukturalne oraz ich związek z krystalizacją monokrystalicznych łopatek silników lotniczych”

przygotowanej pod kierunkiem naukowym dr hab. Włodzimierza Bogdanowicza

1. Problematyka, której dotyczy praca

Stopy wysokotopliwe na bazie niklu znajdują zastosowanie w przemyśle lotniczym. Stanowią one kluczowy materiał do budowy silników odrzutowych, a zwłaszcza elementów komory spalania silnika i łopatek turbin. Obecne tendencje rozwoju silników lotniczych zmierzają do podnoszenia temperatury spalania paliwa, co przekłada się na zwiększenie sprawności silnika oraz obniżenie emisji produktów spalania. Stosowane na szeroką skalę nadstopy na bazie niklu zbliżają się do kresu swoich możliwości aplikacyjnych. Podniesienie szczytowej temperatury pracy o wartość na poziomie 20 stopni może polepszyć parametry silnika, jednakże stop pracujący na granicy wytrzymałości termicznej ma zdecydowanie niższą żywotność i czas pomiędzy przeglądami silników ulegnie drastycznemu skróceniu. Ponadto, na skutek zwiększonego zużycia elementów turbiny następuje szybki spadek parametrów silnika, a w szczególności jego ciągu. Dodatkowym problemem jest coraz wyższy koszt wytworzenia nowoczesnych stopów, związany z rosnącymi cenami metali ziem rzadkich. Obecnie dąży się do ograniczenia składników stopów przy zachowaniu jego parametrów eksploatacyjnych.

Analiza warunków pracy stopów pozwoliła wyodrębnić najważniejsze procesy, które oddziałują niekorzystnie na materiały stosowane na łopatki turbin. Są to przede wszystkim procesy pełzania wysokotemperaturowego oraz korozji wysokotemperaturowej. W celu przeciwdziałania korozji można stosować powłoki ceramiczne, natomiast obniżenie temperatury elementu można osiągnąć poprzez system kanałów chłodzących wewnątrz łopatek turbiny. Znacznie trudniejsze jest ograniczenie procesów pełzania. Mechanizm ten opiera się między innymi na zjawisku poślizgu po granicach ziaren. Z tego powodu łopatki turbin silników odrzutowych mają strukturę monokrystaliczną lub polikrystaliczną z granicami ziaren niskokątowych ułożonych wzdłuż kierunku działania siły odśrodkowej.

Nowoczesne nadstopy niklu takie jak np. CMSX-4 stosowane do produkcji łopatek posiadają złożoną mikrostrukturę. Zasadniczo wymagana jest postać monokrystaliczna końcowego wyrobu, jakim jest łopatka turbiny silnika odrzutowego, jednakże należy ją traktować jako wysoko uporządkowaną strukturę przestrzenną. Struktura odlewów zbudowana jest z równolegle ułożonych dendrytów o jednakowej orientacji krystalograficznej. Bezpośrednio po krystalizacji w materiale mogą także występować defekty strukturalne, takie jak granice niskokątowe, ziarna o przypadkowej orientacji czy też makroskopowe obszary naprężeń.

Na własności końcowego produktu, jakim jest np. łopatka turbiny silnika odrzutowego bardzo duży wpływ ma technologia jego wytwarzania. Decyduje ona o jakości struktury, tolerancji oraz klasie

powierzchni wyrobu. Recenzowana praca skupia się na próbie zastosowania zaawansowanych metod rtg do oceny jakości wyrobów z nadstopów niklu.

2. Opis pracy, cele i teza

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje w swej części merytorycznej przegląd literaturowy, tezę, cele i zakres pracy, metodykę, wyniki badań, dyskusję wyników oraz wnioski. Praca ma objętość 144 stron, zawiera 80 rysunków. Przegląd literatury, oparty został o 106 starannie dobranych pozycji, w którym Autor skupił się na technologii otrzymywania monokrystalicznych nadstopów niklu, ich mikro i makro strukturze oraz mikrosegregacji składników stopowych. Problemy dotyczące mikrosegregacji mają kluczowe znaczenie ze względu na dendrytyczny charakter struktury nadstopów niklu. W dalszej części przeglądu literatury opisano problemy związane z anizotropią własności monokrystalicznych nadstopów.

Tą część pracy zamyka opis metod topografii rentgenowskiej wykorzystywanych w badaniach nadstopów niklu.

Podsumowanie części literaturowej stanowi punkt wyjścia do postawienia tezy pracy. Autor zwrócił uwagę na zbyt małe znaczenie przywiązywane do oceny jakości mikrostruktury nadstopów niklu w procesie otrzymywania wyrobu końcowego. Przyczyną jest brak szybkich metod możliwych do zastosowania w warunkach przemysłowych. Jako jedną z obiecujących technik badawczo-pomiarowych Autor wymienia topografię rentgenowską w geometrii Auleytnera z szeroką rozbieżną wiązką.

We wprowadzeniu do tezy pracy Autor postuluje, że stosowane obecnie metody topografii rentgenowskiej wykorzystywane w badaniach typowych monokryształów nie są dostosowane do oceny doskonałości struktur dendrytycznych, charakterystycznych dla dwufazowych odlewów nadstopów w postaci monokrystalicznej.

W dalszej części tekstu Autor stawia tezę, że

„z uwagi na występowanie cech wspólnych monokrystalicznych odlewów nadstopów niklu oraz stricte monokryształów, istnieje możliwość dostosowania dotychczasowych metod badawczych, w szczególności metod otrzymywania dyfrakcyjnych topogramów rentgenowskich, oraz interpretacji wyników badań dla monokrystalicznych odlewów nadstopów niklu”.

Przyjmuje także założenie, że

„kształt poszczególnych fragmentów łopatek lotniczych oraz ich orientacja krystalograficzna wpływają na mechanizmy kształtowania defektów i na specyfikę ich przestrzennego rozkładu”.

Tezy tej Autor broni w dalszej części pracy.

Jednym z celów pracy przyjętych do realizacji przez Autora dla udowodnienia postawionej tezy była wnikliwa analiza mechanizmów kształtowania się defektów struktury dendrytycznej w procesie krystalizacji kierunkowej łopatek turbin o złożonym kształcie. Ustalenie związków pomiędzy strukturą dendrytyczną oraz mikrostrukturą faz γ i γ' , a następnie określenie możliwych mechanizmów powstawania defektów w procesie krystalizacji wymagało zastosowania zaawansowanych technik badawczych, takich jak:

- dyfrakcyjna topografia rentgenowska oraz mapowanie orientacji metodą Ω -scan do badań defektów strukturalnych nadstopów niklu,

- transmisyjna mikroskopia elektronowa do badań budowy granic nisko-kątowych.

Jako główną metodę badawczą w pracy wykorzystano dyfrakcyjną odbiciową topografię rentgenowską z zastosowaniem mikro-ogniskowego źródła promieniowania i rozbieżnej wiązki rentgenowskiej. Metoda ta stanowi modyfikację klasycznej metody Auleytnera dostosowaną do badań defektów strukturalnych na stosunkowo dużych analizowanych powierzchniach.

Nowatorskim aspektem badawczym zastosowanym w pracy było użycie dyfraktometrycznej techniki mapowania orientacji krystalograficznej i rozkładu parametru sieci metodą Ω -scan, po raz

pierwszy wykorzystaną w nadstopach niklu. Do badań wykorzystano prototypowy dyfraktometr firmy EFG z autorskim oprogramowaniem.

Oprócz tych metod Autor korzystał także z szeregu klasycznych technik mikroskopii elektronowej, takich jak SEM+EBSD, mapowanie powierzchni próbek oraz przetwarzanie komputerowe obrazu w celu wyeksponowania konkretnych elementów strukturalnych – np. ramion dendrytów o określonej orientacji.

3. Uwagi do pracy

Wskazane byłoby wykonanie mikroanalizy składu chemicznego w obszarze pojedynczego dendrytu. Bezpośrednio po procesie monokryształizacji, gdzie szybkość wzrostu jest rzędu 3-5 mm/min dendryty powinny wykazywać mikrosegregację składników w obrębie ramion. Problem ten prawdopodobnie dotyczy także faz γ i γ' . Późniejsza obróbka cieplna oraz eksploatacja w podwyższonych temperaturach powinny przyczynić się do ujednorodnienia składu chemicznego. W pracy analizowany jest wpływ granicy niskiego kąta na zmianę morfologii dendrytów w jej pobliżu.

- Czy jest możliwe, że proces ujednorodniania składu chemicznego wpłynie na przebudowę tej granicy?

- Jaki to może mieć wpływ na mechanizmy odkształcenia wysokotemperaturowego i procesy pełzania zachodzące podczas eksploatacji stopu?

Badania przeprowadzone przez Autora pracy wykazały, że mikrostruktura dendrytyczna jest bardzo wrażliwa na nawet niewielkie odchylenia płaszczyzny frontu krystalizacji od osi łopatki.

Dezorientacje występujące w badanych odlewach są obecne w skali makro, mikro i nanometrycznej. Problem dotyczy zarówno dezorientacji pomiędzy całymi blokami dendrytów, jak również pomiędzy pojedynczymi dendrytami. Dodatkowo dezorientacje zachodzą dla cząstek fazy γ' . Badania w pracy prowadzono na materiale o relatywnie prostej geometrii. Problem będzie narastał przy wzroście komplikacji kształtu formy oraz szybkości wyciągania. Skuteczność topografii rentgenowskiej wykonywanej metodą Auleytnera może być wówczas niewystarczająca.

- Jak Autor widzi wykorzystanie tej metody w praktyce przemysłowej?

- Struktury badane w pracy są bardzo złożone, zachowując równocześnie wysoki stopień uporządkowania i symetrii, analogiczny do struktury monokryształicznej. Autor proponuje stosowanie do ich opisu terminu „struktura orientacyjna”. Wydaje mi się, że temat nazewnictwa wymaga w tym przypadku przeprowadzenia odrębnej dyskusji. Osobiście bardziej przekonywałby mnie termin „struktura o stałej relacji krystalograficznej”.

4. Ocena pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska porusza jeden z kluczowych problemów dotyczących współczesnej techniki lotniczej. Coraz większe wykorzystanie transportu lotniczego wymaga silników odrzutowych o większej sprawności i mniejszej emisji spalin. To z kolei jest połączone z podniesieniem temperatury w komorze spalania, co z kolei wymaga coraz lepszych materiałów. Jednym z kluczowych elementów decydujących o jakości materiału na łopatki turbin silnika odrzutowego jest jego mikrostruktura. Bezpieczeństwo wymaga sprawdzania każdego elementu. Opracowanie metody pozwalającej wykonywać testy strukturalne w warunkach przemysłowych ma kluczowe znaczenie dla przemysłu lotniczego. Recenzowana praca jest próbą rozwiązania tego problemu. Autor pracy bazując na stopie CMSX-4 i wykonanych z niego łopatkach turbin przeprowadził wnikliwe badania, będące zarazem próbą adaptacji wybranych technik rentgenowskich dla potrzeb oceny jakości strukturalnej łopatek otrzymanych na drodze selektywnego wzrostu.

Autor pracy projektując swoje badania stanął przed ambitnym zadaniem. Badane nadstopy niklu, a zwłaszcza CMSX-4 odznaczają się bardzo złożoną strukturą dendrytyczną, jak również zawierają liczne fazy. Zastosowany proces hodowli z wyselekcjonowanego zarodka powoduje, że uzyskiwana

struktura cechuje się wysokim stopniem uporządkowania przy zachowaniu stałych relacji krystalograficznych pomiędzy poszczególnymi elementami struktury. Największym zaburzeniem tej struktury są granice niskiego kąta występujące w otrzymywanym materiale. Struktura zawierająca elementy o skali nano, mikro i makrometrycznej wymaga przeprowadzenia badań na aparaturze dostosowanej do skali badanych elementów. Z tego powodu Autor musiał posługiwać się technikami transmisyjnej mikroskopii elektronowej (STEM, HAADF) do badania budowy granic niskokątowych w materiale, poprzez skaningową mikroskopię elektronową (EBSD) do badania orientacji wydzieleni i dendrytów, a także licznymi technikami rentgenowskimi. Opracowanie wyników wymagało także opanowania technik analizy obrazu. Większość zaprezentowanych w pracy wyników jest efektem połączenia kilku technik badawczych, które w konsekwencji dają pożądany rezultat.

Praca jest napisana starannie, z dbałością o szczegóły. Metody badawcze zostały precyzyjnie opisane, ilustrowane są przejrzystymi rysunkami. Praca zawiera dużą ilość szczegółowych informacji dotyczących technik rentgenowskich stosowanych w odniesieniu do materiałów o złożonej, wielofazowej strukturze.

Opracowanie to stanowi istotny i cenny wkład stan wiedzy w zakresie badań struktur monokrystalicznych i analiz strukturalnych z wykorzystaniem technik rentgenowskich.

Dokonując oceny całości pracy pragnę jednoznacznie wyrazić opinię, iż stanowi ona oryginalne rozwiązanie postawionego w tezie problemu naukowego, wskazując na odpowiedni poziom wiedzy teoretycznej jej Autora, wysoki poziom umiejętności eksperymentatorskich oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy badawczo-naukowej.

Uwzględniając wszystkie kryteria przyjęte w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki stwierdzam, że recenzowana przeze mnie praca autorstwa mgr inż. Roberta Albrechta pt. „Defekty strukturalne oraz ich związek z krystalizacją monokrystalicznych łopatek silników lotniczych” odpowiada warunkom stawianym tego typu opracowaniom i wnoszę do Rady Wydziału Informatyki i Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny ocenianej pracy wnioskuję do Rady Wydziału Informatyki i Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego o przyznanie jej wyróżnienia.

