

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. Jacka Nawrockiego

p.t. „Kształtowanie polikrystalicznej mikrostruktury nadstopu Inconel 713C w cienkościennych elementach części gorącej silników lotniczych”

przygotowanej pod kierunkiem naukowym prof. dr hab. inż. Jana Sieniawskiego oraz dr inż. Dariusza Szeligi

1. Problematyka, której dotyczy praca

Nadstopy na bazie niklu stanowią podstawową obecnie grupę materiałów szeroko wykorzystywanych w aplikacjach wysokotemperaturowych. Stanowią kompromis pomiędzy wysokimi parametrami użytkowymi, a dostępnością i ceną. Nadstop Inconel 713C jest szeroko wykorzystywanym przedstawicielem tej rodziny stopów.

Wykorzystanie superstopów w przemyśle lotniczym wykazuje silną tendencję wzrostową. Jednocześnie na rynku istnieje ograniczona ilość metali ziem rzadkich stanowiących składniki nadstopów. Powoduje to tendencję do optymalizacji wykorzystania nadstopów w konstrukcjach lotniczych.

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



przebiegami 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. Inna, równoległa droga to wytwarzanie elementów cienkościennych, gdzie mała ilość materiału idzie w parze z dobrymi parametrami odprowadzania ciepła.

Oprócz kwestii składu chemicznego stopu oraz geometrii wytworzonego elementu istotną kwestią jest wewnętrzna struktura materiału. Ma ona szczególne znaczenie przy materiałach poddanych długotrwałej ekspozycji na wysoką temperaturę. W zależności od zakładanych obciążeń kierunkowych należy ograniczyć poślizg po granicach ziaren, który jest jednym z najważniejszych mechanizmów przenoszenia odkształceń w wysokiej temperaturze oraz mechanizmy pełzania wysokotemperaturowego.

Nadstopy niklu, takie jak badany w pracy Inconel 713C jak i najnowszy CMSX-4 stosowane do produkcji łopatek posiadają złożoną mikrostrukturę. Struktura odlewów zbudowana jest z równoległe 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.

Autor podjął się w pracy przeprowadzenia analizy wpływu warunków odlewania na parametry mikrostrukturalne finalnego produktu, jaki stanowi cienkościenny profil odlewu.

2. Opis pracy, cele i teza

Praca zawiera 102 strony, 103 pozycje literatury, 80 rysunków oraz 20 tabel. We wstępie pracy Autor przedstawił motywację podjęcia badań w zamierzonym kierunku oraz przeanalizował rozwój i perspektywy technologii odlewania nadstopów niklu. Biorąc pod uwagę rozwój technologii silników lotniczych i rosnące wymagania dotyczące temperatury pracy materiałów, wskazane jest zmniejszenie grubości ścianek odlewów, co zapewni lepsze możliwości odprowadzania ciepła oraz oszczędność materiałów. Lepsze odprowadzanie ciepła przekłada się na możliwość podniesienia temperatury pracy turbiny silnika odrzutowego. W praktyce oznacza to zwiększoną sprawność układu spalania i oszczędności na paliwie. Biorąc pod uwagę fizyczne ograniczenia nadstopów niklu, jest to jedyna obecnie droga dla polepszenia ich parametrów eksploatacyjnych.



Część badawcza pracy została poprzedzona teoretyczną analizą mikrostruktury nadstopów niklu, mechanizmów zarodkowania i wzrostu kryształów, a także rozważaniami dotyczącymi przepływu ciepła w układzie odlew-forma-otoczenie.

Celem przedstawionej do recenzji pracy było określenie zależności prędkości chłodzenia ciekłego metalu od czynników technologicznych takich jak grubość ścianki odlewu, współczynnik przewodnictwa cieplnego materiału formy, jej emisyjność, a także kompleksowa ocena ich wpływu na objętość względną i morfologię składników fazowych mikrostruktury nadstopu niklu Inconel 713C.

Do wstępnych badań stosowano próbki modelowe o dwóch grubościach ścianek – 10 mm oraz 20 mm. Pozwoliło to określić wpływ grubości ścianki odlewu na odległości ramion 2 rzędu dendrytów. Do analizy wpływu szybkości chłodzenia wykorzystano próbki o zmiennym przekroju, od 20 do 1 mm średnicy. Informacje te stanowiły punkt wyjścia do opracowania matematycznego modelu prędkości chłodzenia ciekłego nadstopu w formie ceramicznej. Model ten został następnie użyty do opracowania warunków odlewania próbek cienkościennych o grubościach ścianek 5, 3 oraz 1 mm.

Autor postawił następującą tezę pracy:

„Morfologia i objętość względna składników fazowych mikrostruktury nadstopu niklu zależy od prędkości chłodzenia ciekłego metalu. Określenie zależności pomiędzy czynnikami technologicznymi odlewania i morfologią składników mikrostruktury umożliwi prognozowanie odporności na pełzanie polikrystalicznych odlewów cienkościennych z nadstopu niklu Inconel 713C”.

Dla udowodnienia postawionej tezy Autor przeprowadził szerokie badania własne. Obejmowały one wpływ prędkości chłodzenia na mikrostrukturę odlewów cienkościennych, a także badania porowatości i własności mechanicznych, w tym odporności na pełzanie w wysokiej temperaturze.

Wykonana została analiza kalorymetryczna DSC, mająca na celu określenie parametrów temperaturowych procesu odlewania. Kształt i rozmiary próbek odlewanych poddawano analizie numerycznej w programie ProCast.

Praca zawiera także rozbudowaną analizę statystyczną uzyskanych wyników.

3. Uwagi do pracy

- Na rysunku 9 przedstawiona została krzywa kalorymetryczna chłodzenia-kryształizacji nadstopu Inconel 713C. Na osi pionowej zamieszczono opis „Zmiana przepływu ciepła, mW/mg”. Prawidłowy opis powinien być „Moc wydzielona, mW/mg”.



- Na stronie 16 pracy Autor używa pojęcia „idealne dopasowanie obu sieci” w odniesieniu do zależności pomiędzy fazami γ oraz γ' . Stopień koherencji jest związany z morfologią (kształtem) wydzieleni odznaczających się różnym składem chemicznym. Kształt wydzieleni zmienia się od sferoidalnego, poprzez sześcienny do płytkowego. Użycie pojęcia „idealne dopasowanie obu sieci” oznacza brak rozpoznawalnej granicy międzyfazowej. Tego typu stwierdzenie wymagałoby wykonania analizy granicy międzyfazowej przy użyciu wysoko rozdzielczej transmisyjnej mikroskopii elektronowej.
- W rozdziale 4.2.6. Planowanie eksperymentu, Autor podaje zależność, na podstawie której ustalił temperaturę ciekłego stopu dla warunków odlewniczych jako $T = \text{likwidus} + 100$ stopni. Następnie dodał jeszcze 10 stopni ze względu na minimalną średnicę odlewu wynoszącą 1 mm. Ostatecznie przyjął minimalny poziom temperatury stopu do odlewania równy 1450 C. Czy poza zwyczajowo przyjętą w praktyce odlewniczej wartością +100 stopni były przeprowadzone własne badania lejności stopu Inconel 713C lub też odwołano się do wyników z literatury?
- Na stronach 34 i 85 pracy Autor opisuje metodykę i wyniki pomiarów porowatości. Podaje pole jednostkowej analizy, natomiast brak jest informacji, jaki procent powierzchni na danym przekroju został poddany badaniom. Czy był to jeden pomiar (pole pomiarowe 1,43 mm²) na przekrój czy też więcej. Biorąc pod uwagę niejednorodność kształtu porów pokazaną na rysunku 24, wskazana byłaby większa statystyka. Powinna zostać przedstawiona również mapa badanego przekroju z zaznaczonymi obszarami analizy.
- W rozdziale 4.2.5. Autor przeprowadza analizę zależności odległości ramion 2 rzędu dendrytów od lokalnej szybkości chłodzenia. Rysunek 28 w tym rozdziale przedstawia zmianę odległości w przypadku pomiarów wykonanych na krawędzi oraz w środku próbek o średnicach 10 i 20 mm. Na wykresie oś rzędnych opisana jest jako „Pomiar kolejny”. Wykres przedstawia wyraźną zależność odległości ramion dendrytów od numeru pomiaru. W jakich miejscach dokonywano pomiarów? Brak jest także informacji o ilości pomiarów przypadających na poszczególne punkty, na podstawie której obliczano odchylenie standardowe. Ta sama sytuacja dotyczy zakresu błędów zaznaczonych na rysunku 29.
- W rozdziale 5.4. Autor prezentuje wpływ szybkości chłodzenia na mikrostrukturę uzyskanych odlewów. Wykonał analizę parametrów stereologicznych przedstawioną na rysunku 61. Wynika z niej, że dla odlewów o średnicy 10 i 20 mm rozrzut wyników



wielkości ziarna jest znaczący, natomiast dla małych średnic jest praktycznie niemierzalny. W tej sytuacji oprócz podania wartości średniej powinien zostać sporządzony rozkład wielkości w zależności od położenia ziarna na przekroju próbki. Brakuje również informacji o ilości wykonanych pomiarów. Autor wspomina także o wpływie modyfikatora (glinianu kobaltu zawartego w ściance formy) i jego różnego działania w zależności od średnicy odlewu. Dla pełnej informacji i porównania należałoby przeprowadzić krystalizację w formie o składzie pozbawionym modyfikatora.

- W jaki sposób Autor wyznaczył objętość względną węglików pierwotnych w próbce (rysunek 66). Co może być przyczyną obserwowanego tak dużego rozrzutu wyników?
- Oprócz uwag o charakterze merytorycznym praca zawiera niewielką ilość błędów stylistycznych, np. nieprawidłowy szyk zdania.

4. Ocena pracy

Przedstawiona do recenzji praca posiada logiczny i konsekwentny układ rozdziałów. Dobór metod badawczych został przeprowadzony prawidłowo. Jest to praca o charakterze technologicznym, a jej konsekwencją powinny być konkretne aplikacje przemysłowe. Zakres badań wykonanych w pracy jest wystarczający do udowodnienia postawionej przez Autora tezy, natomiast z poznawczego punktu widzenia wskazane byłoby przeprowadzenie w niektórych przypadkach dodatkowych badań, np. na transmisyjnym mikroskopie elektronowym, a także rozbudowanie ilości badanych wariantów materiałów na formy odlewnicze – zwłaszcza w aspekcie użycia modyfikatorów mikrostruktury.

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. Jacka Nawrockiego odpowiada warunkom stawianym tego typu opracowaniom i wnoszę do Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

