

Forma ceramiczna do wytwarzania monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu

Przedmiotem wynalazku jest forma ceramiczna do wytwarzania monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu, zwłaszcza odlewów łopatek turbin silników lotniczych, jak również gazowych turbin energetycznych.

5 Rozwój turbinowych silników lotniczych koncentruje się na poprawie ich ekonomiczności – zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa oraz ciągu jednostkowego – mocy, związanego głównie z podwyższeniem temperatury strumienia spalin przed turbiną, także natężenia przepływu strumienia powietrza przez silnik. Maksymalna temperatura gazów spalinowych na wejściu do turbiny zależy od właściwości materiałów elementów części gorącej silnika zwłaszcza
10 łopatek turbiny wysokiego ciśnienia. Łopatki 1-go i 2-go stopnia turbiny wysokiego ciśnienia należą do grupy elementów konstrukcyjnych zapewniających bezpieczeństwo lotu. Podlegają one wyjątkowym wymaganiom dotyczącym wytwarzania i kontroli jakości. Stąd prowadzi się badania w kierunku zwiększenia wytrzymałości materiałów w wysokiej temperaturze przede wszystkim poprawy
15 ich odporności na pełzanie, zmęczenie i korozję.

 Wymagania te spełniają obecnie kierunkowo krystalizowane odlewy łopatek z nadstopów niklu, których makro- i mikrostruktura ma wpływ na właściwości mechaniczne w wysokiej temperaturze. Kształtują się podczas procesu krystalizacji kierunkowej i zależą od składu chemicznego stopu oraz jego parametrów.
20 Wynikiem kierunkowej krystalizacji jest makrostruktura składająca się z ziarn kolumnowych lub monokrystaliczna. Kształtowanie ziarn kolumnowych odbywa się przez kontrolę przepływu ciepła i mechanizm konkurencyjnego wzrostu

dendrytów wzdłuż wysokości odlewu. Monokryształ natomiast uzyskuje się najczęściej przez zastosowanie techniki startera i selektora ziarn. Wylimitowanie
25 granic średniego kąta i zastąpienie ziarn kolumnowych jednym ziarnem w całej objętości odlewu znacznie poprawia jego odporność na pełzanie. Stąd obecnie coraz częściej zastępuje się ziarna kolumnowe monokryształem.

Monokrystaliczne odlewy z nadstopów niklu dla techniki lotniczej i przemysłowych turbin gazowych wytwarzane są głównie standardową metodą
30 Bridgmana oraz LMC - chłodzenie ciekłym metalem (Kubiak K., Szeliga D., Sieniawski J., Onyszko A. *The Unidirectional Crystallization of Metals and Alloys (Turbine Blades). Handbook of Crystal Growth: Bulk Crystal Growth, Second Edition, 2015, 413–457*). Wypełniona forma ceramiczna ciekłym metalem jest wyciągana z określoną prędkością z komory pieca grzewczego do strefy
35 chłodzenia. Urządzenie do kierunkowej krystalizacji odlewów składa się z komory grzewczej i komory chłodzącej.

Prędkość wyciągania formy ceramicznej jest podstawowym parametrem wytwarzania kierunkowo krystalizowanych odlewów. Przyjmuje ona wartość w zakresie od 2 do 5 mm/min dla odlewów monokrystalicznych krystalizowanych
40 metodą Bridgmana. Wartość tej prędkości i metoda wytwarzania ma decydujący wpływ na gradient temperatury i prędkość chłodzenia odlewu. Gradient temperatury i prędkość chłodzenia determinuje kształt frontu krystalizacji i mikrostrukturę monokrystalicznych odlewów a przez to właściwości
45 mechaniczne. Wzrost prędkości chłodzenia powoduje zmniejszenie odległości między ramionami dendrytów 1. i 2. rzędu, rozdrobnienie kryształów eutektyki ($\gamma+\gamma'$) i fazy γ' . Stąd znacznie zmniejsza się czas i koszt procesu obróbki cieplnej oraz zjawisko mikrosegregacji dendrytycznej. Gradient temperatury i skład chemiczny wpływa na powstawanie wad (freckle, granice małego i średniego kąta, dodatkowe ziarna) szczególnie w dużych odlewach monokrystalicznych
50 z nadstopów niklu. Wzrost gradientu temperatury w odlewie zmniejsza wysokość strefy ciekło-stałej i tendencję tworzenia się wad w półce łopatki.

Odlewy monokrystaliczne łopatek w skali przemysłowej wytwarzane są w formach ceramicznych. W zestawie modelowym na obwodzie formy znajduje się od kilku do kilkunastu pojedynczych łopatek – w zależności od rozmiarów pieca i odlewów. Natomiast w osi symetrii formy jest trzpień pełniący rolę nośną lub
55 wlewu głównego (Szeliga D., Kubiak K., Burbelko A., Motyka M., Sieniawski J.:

Modeling of directional solidification of columnar grains structure in CMSX-4 nickel based superalloy castings. Journal of Materials Engineering and Performance, 23, 2014, 3, 1088-1095). Walcowy kształt grzejników, pierścieni chłodzących i formy ceramicznej w piecu odlewniczym oraz sposób ich umieszczenia w zestawie modelowym zapewnia jednakowy rozkład temperatury w każdym odlewie. Najczęściej izotermy przyjmują niesymetryczny wklęsły kształt podczas krystalizacji odlewów monokrystalicznych ze stałą prędkością wyciągania 3mm/min metodą Bridgmana. Niesymetryczny i zakrzywiony kształt izoterm jest spowodowany umieszczeniem kilku odlewów w zestawie i nierównomiernym odprowadzeniem ciepła od powierzchni formy ceramicznej. Zewnętrzna strona zestawu modelowego skierowana w kierunku grzejników i pierścieni chłodzących jest chłodzona intensywniej w porównaniu ze strefą formy ukierunkowaną w stronę trzpienia formy. Izoterma likwidus dla takich warunków procesu jest nachylona w kierunku pierścieni chłodzących. Stopień ich krzywizny jest determinowany głównie prędkością wyciągania formy ceramicznej, temperaturą strefy grzewczej i chłodzącej, właściwościami cieplnymi i fizycznymi stopu oraz geometrią otoczenia formy.

Monokrystaliczne odlewy łopatek mają zazwyczaj złożony kształt o zmiennym przekroju wzdłużnym i poprzecznym pióra łopatki (*Bogdanowicz W., Albrecht R., Sieniawski J., Kubiak K.: The subgrain structure in turbine blade roots of CMSX-4 superalloy. Journal of Crystal Growth 401, 2014, 418-422*). Pióro przechodzi w zamek i półkę o znacznie większym i również zmiennym przekroju. W tej części zwiększa się pole przekroju poprzecznego oraz zmieniają się warunki przepływu ciepła i procesu krystalizacji.

Wklęsły kształt izoterm może powodować zarodkowanie i wzrost dodatkowego ziarna w półce odlewu monokrystalicznej łopatki (*Yang X.L., Dong H.B., Wang W., Lee P.D.: Microscale simulation of stray grain formation in investment cast turbine blades. Materials Science and Engineering: A, 386, 2004, 1-2, 129-139*). Utworzone ziarno ma inną orientację krystaliczną w porównaniu z pozostałą objętością odlewu monokrystalicznego. Stąd tworzy się granica dużego kąta pomiędzy ziarnem o prawidłowej orientacji i ziarnem dodatkowym. Dotyczy to szczególnie strefy o znacznym wzroście pola przekroju względem pióra odlewu łopatki. Ziarno takie najczęściej tworzy się w dolnym narożu półki i zamku. Skomplikowany kształt półki oraz wzrost jej rozmiarów zwiększa

prawdopodobieństwo jego utworzenia. Mechanizm tworzenia dodatkowego ziarna jest powiązany z warunkami przepływu ciepła i zależy od wartości przechłodzenia ciekłego stopu w strefie zmiany przekroju.

Oprócz ziarn granic małego kąta i ziarn dodatkowych w półkach odlewów łopatek występują również inne wady (*Ma D., Bührig-Polaczek A.: Application of a heat conductor technique in the production of single-crystal turbine blades. Metallurgical and Materials Transactions B, 40, 2009, 5, 738–748*). Ich zarodkowanie i krystalizacja również zależy od kształtu izoterm oraz gradientu temperatury. Tworzą się równoosiowe ziarna pomiędzy ramionami dendrytów 1. rzędu o rozmiarach zbliżonych do rozmiaru ramion 2. rzędu i znacznie mniejszych rozmiarach niż dodatkowe ziarno. Charakteryzują się one przypadkową orientacją krystaliczną. Prawdopodobną przyczyną tworzenia się błędnie zorientowanych ziarn jest oddziaływanie dużego przechłodzenia i utajonego ciepła krystalizacji w procesie krystalizacji ramion dendrytów. Wydzielające się ciepło krystalizacji powoduje częściowe topienie i łamanie się dendrytów oraz przemieszczanie się stworzonych ich fragmentów. Stąd fragmenty dendrytów krystalizują w postaci ziarn o małych rozmiarach i przypadkowej orientacji krystalicznej.

Znajomość procesu krystalizacji w krytycznych obszarach odlewów pozwoliła na rozwój różnych metod zapobiegających tworzeniu niedoskonałości mikrostruktury lub zachowanie jej orientacji krystalicznej analogicznej do pozostałej objętości monokryształu. Stosuje się różne zabiegi technologiczne celem zapobiegnięcia tworzenia się wad w półce, między innymi kontrolę prędkości wyciągania odlewu, zastosowanie kontynuatorów ziarn lub ochładzalników a także izolacji cieplnej formy. Wszystkie te proponowane zabiegi mają na celu zmniejszenie stopnia zakrzywienia izotermi likwidus oraz przechłodzenia.

Kontrolę procesu krystalizacji i zakrzywienie frontu najczęściej prowadzi się przez dobór odpowiedniej prędkości wyciągania formy oraz ustawienie odlewów względem grzejników (*Goldschmidt D., Paul U., Sahm P.R.: Porosity clusters and recrystallization in single-crystal components. Superalloys 1992, The Mineral Metals and Materials Society, 1992, 155–164*). Zmniejszenie prędkości wyciągania odlewu dla czasu położenia izotermi likwidus nieznacznie poniżej półki jest najmniej skomplikowanym zabiegiem. Stąd zakrzywienie izotermi zmniejsza się przed strefą zmiany przekroju i w samej półce. Również odpowiednie ustawienie krytycznych obszarów łopatek zwłaszcza półki w zestawie modelowym względem

125 grzejników umożliwia zmniejszenie tendencji tworzenia się wad podczas dużego zwiększenia się przekroju odlewu.

Również stosuje się metodę z użyciem tak zwanych kontynuatorów wzrostu ziarn w przypadku gdy niewystarczające jest zastosowanie odpowiedniego ustawienia odlewów lub zmiany prędkości wyciągania formy. (Meyer ter Vehn M.,
 130 Dedecke D., Paul U., Sahn P.R.: *Undercooling related casting defects in single crystal turbine blades. Superalloys 2000, The Mineral, Metals and materials Society, 1996, 471–480*). W metodzie tej koniec półki jest połączony kanałem z dolnym - powyżej selektora ziarn - lub górnym - powyżej półki - obszarem odlewu. W przypadku dwóch półek często ich końce połączone są ze sobą.
 135 Utworzone kanały i wnęka odlewu formy ceramicznej wypełnione są ciekłym stopem. Wyciąganie formy ceramicznej z pieca powoduje przemieszczenie się frontu krystalizacji w odlewie i kanale łączącym półkę - równocześnie krystalizuje wnęka odlewu łopatki i kanał. Zasada oddziaływania kontynuatorów ziarn na proces krystalizacji półki oraz zapobieganiu tworzeniu w tych obszarach wad jest
 140 przedstawiona w niewielu pozycjach literaturowych.

Innym zabiegiem jest umieszczenie ochładzalników w strefie zmiany przekroju odlewu. Zwiększa się przepływ ciepła w strefie zmiany przekroju w porównaniu z końcem półki. Stąd rozkład wartości temperatury jest równomierny – izotermy przyjmują kształt zbliżony do płaskiego (Ma D., Bührig-Polaczek A.: *Application of a heat conductor technique in the production of single-*
 145 *crystal turbine blades. Metallurgical and Materials Transactions B, 40, 2009, 5, 738–748*).

Dla zmniejszenia straty ciepła pomiędzy komorą grzewczą i chłodzenia oraz zwiększenia gradientu temperatury stosuje się zewnętrzną przegrodę cieplną
 150 (Szeliga D., Kubiak K., Jarczyk G.: *The influence of the radiation baffle on predicted temperature gradient in single crystal CMSX-4 castings. International Journal of Metalcasting, 7, 2013, 3, 17-23*). Zwykle jest to płyta grafitowa w kształcie pierścienia, umieszczona na płycie izolacji cieplnej. Wpływa ona znacząco na rozkład wartości temperatury w formie ceramicznej podczas jej
 155 nagrzewania i wygrzewania. Umożliwia uzyskanie równomiernego rozkładu wartości temperatury, kształtu strefy ciekło-stałej podczas krystalizacji odlewu oraz większej prędkości chłodzenia odlewu i formy ceramicznej.

Przedstawione metody zapobiegające tworzeniu się nieprawidłowej

mikrostruktury w strefie dużej zmiany przekroju odlewu mają także swoje wady.

160 Zastosowanie kontynuatorów ziarn powoduje ingerencję w kształt odlewu łopatki. Koniczne jest odcinanie kontynuatorów od łopatki oraz późniejszą obróbkę zniekształconej powierzchni. Również zwiększa się zużycie stopu na ich wykonanie. W przypadku stopów nowej generacji może powodować znaczne zwiększenie kosztów wytworzenia łopatek. Zastosowanie ochładzalników

165 grafitowych lub z węgla krzemu znacząco komplikuje proces i zwiększa czas wykonania formy ceramicznej. Mocowanie ochładzalników staje się kłopotliwe oraz czasochłonne. Zmniejszenie prędkości wyciągania formy powoduje zwiększenie czasu trwania procesu wytwarzania odlewów oraz zwiększa jego koszty. Kontrola ustawienia dużych i skomplikowanych odlewów łopatek

170 w zestawie modelowym oraz zastosowanie zewnętrznej przegrody cieplnej często może być niewystarczające w celu zapewnienia odpowiedniej kontroli przepływu ciepła i kształtu izotermi likwidus.

Forma ceramiczna do wytwarzania monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu, którą stanowi zespół pojedynczych oddzielnych form

175 rozłożonych na jej obwodzie zgodnie z wynalazkiem charakteryzuje się tym, że w odległości wynoszącej od 20 do 45 mm od strefy skokowej zmiany przekroju wykonywanych odlewów usytuowana jest przegroda cieplna ceramiczna integralnie sprzężona z trzpieniem nośnym formy usytuowanym w jej osi, której grubość wynosi od 20 do 35 mm a średnica zewnętrzna powinna zapewnić nie

180 większą niż 20 mm szczelinę pomiędzy zespołem oddzielnych formam a jej obrzeżem.

Korzystnie forma ceramiczna zgodnie z wynalazkiem charakteryzuje się tym, że na górnej powierzchni przegrody ceramicznej usytuowana jest przegroda grafitowa, którą stanowi pierścień o grubości od 2 do 10 mm i średnicy

185 zewnętrznej stykającej się z zespołem pojedynczych oddzielnych form.

Zastosowanie nowego rozwiązania ma na celu lepszą kontrolę przepływu ciepła i zmniejszenie stopnia zakrzywienia izotermi likwidus w strefie zmiany przekroju odlewu na przykład półka łopatki turbiny. Uzyskanie kształtu izotermi likwidus jak najbardziej zbliżonego do płaskiego zapobiega tworzeniu się nie

190 akceptowanych wad odlewniczych w tej strefie łopatki - np. niebezpiecznych dodatkowych ziarn w części odlewu przede wszystkim znajdującego się w górnej części zestawu. W ten sposób istnieje możliwość obniżenia kosztów produkcji

odlewów monokrystalicznych z nadstopów niklu. Grafitowa przegroda cieplna umożliwia lepszą kontrolę przepływu ciepła przez możliwość jej łatwego
195 kształtowania i dopasowania do kształtu na przykład monokrystalicznych łopatek.

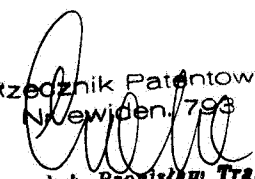
Przedmiot wynalazku przedstawiono w przykładowym wykonaniu
zobrazowanym na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia w ujęciu schematycznym
nową formę do odlewania łopatek turbiny silnika lotniczego, natomiast fig. 2 i fig.
3 przedstawia schemat kształtowania izotermy likwidus podczas procesu
200 wyciągania i chłodzenia odlewów wraz z mieszczącą je formą.

Jak to uwidoczniło na fig. 1 wykonana zgodnie z dotychczas znaną
technologią forma ceramiczna 1 składa się z sześciu pojedynczych form 2 na
odlewy 9 łopatek, które są sprzężone z układem wlewowym 3 oraz z trzpieniem
konstrukcyjnym 4. Na trzpieniu konstrukcyjnym 4 usytuowano ceramiczną
205 przegrodę cieplną 5 o średnicy zewnętrznej d_c gwarantującej nie większą niż 20
mm szczelinę s między obrzeżem 6 tej przegrody a zespołem pojedynczych form 2,
natomiast jej grubość g_c ustalono na 25 mm. W celu korzystniejszego efektu
wyrównywania izotermy likwidus 13 na górną powierzchnię 14 przegrody
ceramicznej 5 nałożono grafitową przegrodę cieplną 7, którą stanowi grafitowy
210 pierścień o grubości g_g wynoszącej 2,5 mm i średnicy zewnętrznej d_g stykającej do
zespołu pojedynczych form 2. Przegrody cieplne 5 i 7 są usytuowane w odległości
 h wynoszącej 45 mm poniżej strefy 8 dużej zmiany przekroju odlewów 9
mieszczących się w formach 2.

Kierunkową krystalizację monokrystalicznych odlewów 9 prowadzono
215 zgodnie z fazami tego procesu przedstawionymi na fig. 2 i fig. 3. Formę
ceramiczną 1 umieszcza się w komorze grzewczej 11 pieca próżniowego 10
i nagrzewa się do temperatury 1500°C. W czasie nagrzewania formy 1
równocześnie prowadzi się topienie wsadu z nadstopu niklu CMSX-4 metodą
indukcyjną. Po osiągnięciu wymaganej temperatury formy ceramicznej 1 prowadzi
220 się zalewanie jej przestrzeni wewnętrznej ciekłym stopem o temperaturze 1520°C.
Wypełnioną formę 1 przemieszcza się z komory grzewczej 11 do strefy chłodzącej
12 pieca z prędkością 3mm/min. Po zakończeniu procesu przemieszczania formy
strefę chłodzącą zapowietrza się. Schłodzoną formę 1 do temperatury otoczenia
wyciąga się z urządzenia i wybija z niej odlewy 9 łopatek oraz odcina się je od
255 układu wlewowego 3. W czasie schładzania formy 1 przeprowadzono pomiar
wartości temperatury w celu określenia stopnia krzywizny izotermy likwidus 13 w

strefie 8 dużej zmiany przekroju monokrystalicznego odlewu 9. Stwierdzono, że izoterma likwidus 13 przyjmuje kształt zbliżony do płaskiego. Wykonane odlewy łopatek poddano ocenie makro- i mikrostruktury na powierzchni zewnętrznej i 230 przekroju podłużnym w celu ustalenia wad odlewniczych nieakceptowalnych przez producentów silników lotniczych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono poprawny proces krystalizacji oraz brak wad w strefie 8 monokrystalicznych odlewów 9 o dużej zmianie przekroju.

000001749
POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. Ignacego Łukasiewicza
35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12
tel. 17 865-11-00
NIP 8130266999


Inżynier Patentowy
N/Wewid. 793
mgr inż. Bronisław Trajda