

ROZPRAWA DOKTORSKA

Defekty strukturalne oraz ich związek z krystalizacją monokrystalicznych łopatek silników lotniczych

mgr inż. Robert Albrecht

Streszczenie

Stosowane obecnie w przemyśle lotniczym oraz energetyce elementy wirników turbin gazowych pracują pod dużymi obciążeniami mechanicznymi w temperaturach bliskich ich temperaturze topnienia oraz agresywnym środowisku korozyjnym. Elementy te, jak na przykład łopatki turbiny wysokiego ciśnienia, otrzymuje się w postaci monokrystalicznej poprzez kierunkową krystalizację z nadstopów niklu, wśród których szeroko stosowany jest stop CMSX-4. Uzyskane w ten sposób odlewy są utworzone z zespołu równoległych dendrytów o jednakowej orientacji krystalograficznej. Materiał tego typu bezpośrednio po krystalizacji może posiadać defekty strukturalne, takie jak: granice niskiego kąta, ziarna o przypadkowej orientacji czy makroskopowe obszary naprężeń. Defekty te nie mogą być usunięte podczas obróbki cieplnej, a ich obecność prowadzi do obniżenia właściwości mechanicznych odlewów. Dlatego też niezwykle ważną rolę przykłada się do poznania mechanizmów tworzenia się defektów strukturalnych elementów silników lotniczych i turbin energetycznych podczas procesu krystalizacji.

W dysertacji przedstawiono charakterystykę defektów strukturalnych odlewów nadstopu CMSX-4 łopatek turbiny oraz określono mechanizmy ich tworzenia w procesie krystalizacji kierunkowej. Wykazano, iż podczas krystalizacji łopatek mogą tworzyć się makroskopowe granice nisko-kątowe przebiegające przez cały odlew, wzdłuż osi wzrostu dendrytów. Na skutek

tworzenia się tych granic w łopatkach powstaje makroskopowa struktura blokowa. Bloki składają się z zespołu dendrytów o bardzo zbliżonej orientacji krystalograficznej. Stwierdzono, że znaczne rozszerzenie frontu krystalizacji sprzyja tworzeniu się granic niskiego kąta. Przebiegają one w obszarze międzydendrytycznym w fazie γ i składają się z siatki dyslokacji ulokowanej w pobliżu wydzieleni fazy γ' . Obecność granicy bloków powoduje dodatkowo zaburzenie rozkładu przestrzennego struktury dendrytycznej w jej pobliżu. Ponadto, wykazano, iż zatrzymanie wzrostu dendrytów na ściankach formy może powodować występowanie lokalnych odkształceń dendrytów. W cienkościennym obszarze pióra krystalizacja przebiega z udziałem ramion kolejnych rzędów z powodu ciągłego zatrzymywania wzrostu dendrytów na ściankach formy. Taki mechanizm wzrostu dendrytów powoduje stopniowe zwiększanie zdefektowania i stopniową zmianę orientacji krystalograficznej wzdłuż kierunku krystalizacji pióra łopatki.

Obecnie w przemyśle do badania doskonałości strukturalnej elementów wykonanych z nadstopu niklu CMSX-4 wykorzystuje się techniki kontroli jakości stosowane w przypadku odlewów wcześniejszych generacji, takie jak trawienie całych powierzchni łopatek wspomagane badaniem orientacji krystalograficznej w kilku punktach na powierzchni odlanego elementu. Jednakże w ostatnich latach opisano szereg defektów struktury związanych z lokalnymi zmianami orientacji krystalograficznej mających znaczny wpływ na wytrzymałość, które w warunkach przemysłowych nie są możliwe do zaobserwowania stosowanymi do tej pory metodami. Z tego względu wciąż poszukuje się nowych metod badawczych pozwalających na bardziej precyzyjną i kompleksową ocenę jakości monokrystalicznych odlewów z nadstopów niklu, a w szczególności ze stopu CMSX-4.

Metoda dyfrakcyjnej topografii rentgenowskiej Auleytnera z rozbieżną wiązką, jako jedna z nielicznych metod wykorzystujących konwencjonalne źródła promieniowania rentgenowskiego, została z powodzeniem zastosowana do badania monokrystalicznych dendrytycznych odlewów nadstopów niklu. Wykazano, iż metoda ta z powodzeniem może wykrywać nawet subtelne defekty struktury krystalicznej takich odlewów.

Jednym z celów pracy było także wykorzystanie autorskiego dyfraktometru firmy EFG w celu scharakteryzowania monokrystalicznych łopatek oraz porównanie otrzymanych wyników z wynikami uzyskanymi metodą Auleytnera z rozbieżną wiązką. Dodatkowo, zastosowanie metod mikroskopii elektronowej pozwoliło na poprawną interpretację uzyskanych wyników rentgenowskich oraz na charakteryzację w mikro skali granic niskiego kąta. Opracowano nowe

sposoby wizualizacji defektów dla poszczególnych metod dyfrakcyjnych pozwalających ujawnić związek pomiędzy defektami, a obrazami struktury dendrytycznej.

Praca przedstawia nowe sposoby zastosowania dyfrakcyjnych metod rentgenowskich, dostosowanych do badań monokrystalicznych dendrytycznych nadstopów niklu, które mogą być z powodzeniem zastosowane w przyszłości w przemyśle.