

Prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera
Wydział Inżynierii Materiałowej
Politechnika Warszawska

Warszawa, 8 lutego 2021 r.

OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Kamila GANCARCZYKA

„Doskonałość struktury krystalicznej monokryształów nadstopu niklu CSMX-4 i jej wpływ na właściwości mechaniczne w wysokiej temperaturze”

Uwagi ogólne

Opiniowana praca powstała pod opieką prof. hab. inż. Jan Sieniawskiego w Uczelnianym Laboratorium Badań Materiałowych dla Przemysłu Lotniczego w Katedrze Materiałoznawstwa na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. W Katedrze tej od wielu lat prowadzone są badania podstawowe i użytkowe nad rozwiązaniami materiałowymi we współpracy z przemysłem. Postęp jaki dokonuje się szczególnie w lotnictwie jest ściśle związany z rozwojem nowoczesnych materiałów, innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz nowych technologii. Dotyczy to w szczególności elementów składowych silników lotniczych. Ciągły rozwój silników lotniczych związany z poprawą ich sprawności i obniżeniem emisji szkodliwych substancji, także hałasu, wymaga stosowania łopatek pierwszego i drugiego stopnia turbiny wysokiego ciśnienia z monokrystalicznych nadstopów niklu o wysokiej wytrzymałości na pełzanie w temperaturze powyżej 900°C. Dotychczasowe prace wykazały, że łopatki wykonane z nadstopu niklu w postaci monokryształów mogą pracować efektywnie na pierwszym i drugim stopniu turbiny wysokiego ciśnienia. Jednakże problemem pozostaje wciąż optymalizacja warunków procesu ich wytwarzania celem uzyskania wyrobu o możliwie wysokim stopniu doskonałości struktury krystalicznej. Przede wszystkim związane jest to ze zmniejszeniem liczby defektów struktury

w materiale monokrystalicznym w porównaniu do polikrystalicznego, co czyni tę technologię bardziej skomplikowaną.

Motywacją Autora rozprawy do pojęcia badań było ustalenie wpływu warunków procesu krystalizacji kierunkowej, przede wszystkim prędkości wyciągania i obróbki cieplnej monokrystalicznych odlewów z nadstopu niklu CMSX-4 na ich skład fazowy, jednorodność struktury krystalicznej i mikrostruktury oraz wytrzymałość na pełzanie.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej i przede wszystkim aplikacyjnej. Podjęto w niej bardzo aktualny wątek badawczy w inżynierii materiałowej – doskonalenie dotychczas stosowanych materiałów oraz procesów technologicznych.

Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Rozprawa ma klasyczny układ. Należy pokreślić niezwykłą staranność redakcyjną z jaką przygotowano dysertację.

W ramach pracy Doktorant dokonał przeglądu literatury z zakresu wytwarzania łopatek z nadstopu niklu CMSX-4, opisu ich struktury krystalicznej i właściwości mechanicznych. Następnie przedstawił cel i szczegółowy zakres badawczy pracy. W kolejnych rozdziałach scharakteryzował przyjęty materiał do badań i metodykę badań oraz wyniki badań własnych. Ostatnie rozdziały Autor dysertacji poświęcił dyskusji otrzymanych wyników badań i wnioskom jakie wypływają z uzyskanych wyników realizacji eksperymentów.

Pracę czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest ona napisana bardzo dobrym językiem i nie zawiera błędów redakcyjnych. Na uwagę zasługują liczne, trafnie dobrane i aktualne powołania literaturowe.

Teza i cel pracy

Autor pracy bazując na analizie dotychczasowych danych literaturowych i wynikach własnych badań doświadczalnych, podjął w pracy próbę opracowania warunków procesu krystalizacji monokrystalicznych odlewów łopatek z nadstopów niklu formułując tezę, że:

„dobór warunków procesu krystalizacji monokrystalicznych odlewów łopatek z nadstopu niklu CMSX-4 oraz prawidłowe wykorzystanie efektów przemian fazowych, zachodzących podczas ich obróbki cieplnej, umożliwi podniesienie stopnia doskonałości struktury krystalicznej i jednocześnie zwiększenie wytrzymałości na pełzanie”.

Koncepcja dowodzenia tej tezy przyjęta przez Doktoranta zakłada, że obszarem analizy będzie badanie wpływu prędkości wyciągania monokrystalicznych łopatek z nadstopu niklu CMSX-4 oraz wpływu ich obróbki cieplnej na wybrane parametry struktury krystalicznej.

Jako cel badań Doktorant wyznaczył zatem ustalenie wpływu warunków procesu krystalizacji kierunkowej, przede wszystkim prędkości wyciągania i obróbki cieplnej monokrystalicznych odlewów z nadstopu niklu CMSX-4 na ich skład fazowy, jednorodność struktury krystalicznej i mikrostruktury oraz wytrzymałość na pełzanie.

Autor pracy wytworzył odlewy modelowe monokrystalicznych łopatek z nadstopu CMSX-4, dla różnej prędkości wyciągania oraz przeprowadził ich obróbkę cieplną: przesycanie i starzenie. Poprawnie dobierając techniki badawcze zrealizował bardzo ambitny program badań obejmujący:

- określenie rozmiarów obszarów i dezorientacji struktury monokrystalicznej,
- wyznaczenie stopnia uporządkowania dalekiego zasięgu fazy γ' ,
- analizę morfologii faz γ i γ' oraz ich składu chemicznego,
- określenie stałej sieciową tych faz,
- wyznaczenie porowatości i odporności na pełzanie wytworzonych monokrystalicznych odlewów,
- analizę porównawczą parametrów struktury krystalicznej monokryształów oraz ich odporności na pełzanie z uwzględnieniem stopnia porowatości.

Charakteryzację struktury krystalicznej łopatek Doktorant wykonał przy zastosowaniu współczesnych metod badawczych – mikroskopii świetlnej, elektronowej mikroskopii skaningowej i transmisyjnej, rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej i spektralnej, topografii rentgenowskiej i spektroskopii Mössbauera. Właściwości wytrzymałościowe odlewów monokrystalicznych charakteryzował w próbie pełzania.

Przeprowadzone badania dostarczyły spójnych informacji, które pozwoliły na realizację celu pracy i rzetelne zweryfikowanie postawionej tezy. Raz jeszcze chciałbym podkreślić duże znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne uzyskanych wyników badań.

W podsumowaniu stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będącym podstawą rozpraw doktorskich.

Najważniejsze wyniki badań

Bardzo ważne z punktu widzenia zarówno poznawczego jak i aplikacyjnego jest, moim zdaniem, wykazanie przez Doktoranta, że w określonych warunkach procesu krystalizacji kierunkowej metodą Bridgmana-Stockbargera nadstopu niklu CMSX-4 (temperatura ciekłego metalu - 1520°C i prędkość wyciągania w zakresie $v_w = 1 \div 7$ mm/min) możliwe jest wytworzenie monokrystalicznych odlewów łopatek o budowie dendrytycznej. Składają się one z krystalitów fazy γ i częściowo uporządkowanego roztworu stałego na osnowie związku międzymetalicznego $Ni_3(Al, Ti, Ta)$, cechującego się uporządkowaniem dalekiego zasięgu - fazy γ' . Stałe sieciowe struktury krystalicznej fazy γ i γ' wykazują różnicę wartości $2,4 \cdot 10^{-3}$ nm - stąd duża koherencja ich granicy międzyfazowej i możliwość wytworzenia monokrystalicznego odlewu nadstopu niklu CMSX-4.

Autor pracy wykazał ponadto, że obróbka cieplna wytworzonych monokrystalicznych odlewów powoduje przejście od ich budowy monokrystalicznej typu dendrytycznego do monokrystalicznej typu kolumnowego.

Niezwykle ważne z punktu widzenia kształtowania właściwości użytkowych monokrystalicznych łopatek jest wykazanie przez Doktoranta, że osie dendrytów, jak również kolumn, charakteryzujące monokrystaliczne odlewy nadstopu niklu CMSX-4 są równoległe względem siebie i względem kierunku [001] lub też tworzą z kierunkiem wyciągania kąt odchylenia $\alpha_z < 10^\circ$ i spełniają kryterium przydatności do ich stosowania jako elementy części gorącej silników lotniczych ($\alpha_z < 15^\circ$).

Niezwykle istotnym z punktu widzenia praktycznego jest wykazanie przez Doktoranta, że wytworzone monokrystaliczne odlewy nadstopu niklu CMSX-4 o budowie kolumnowej mają dobrą odporność na pełzanie - zbliżoną do wytrzymałości na pełzanie innych gatunków nadstopów niklu.

Podkreślając walory praktyczne recenzowanej pracy warto zauważyć, że Autor rozprawy wskazuje, że podwyższenie stopnia doskonałości struktury monokrystalicznych odlewów

łopatek można uzyskać w procesie krystalizacji kierunkowej przez modyfikację lub opracowanie nowego kształtu startera i selektora, wprowadzenie różnej prędkości wyciągania od strefy grzewczej do strefy chłodzącej oraz zmianę położenia formy w piecu.

Uważam, że uzyskane rezultaty przeprowadzonych przez Doktoranta badań mogą stanowić podstawę do modyfikacji warunków procesu krystalizacji kierunkowej, realizowanego w warunkach przemysłowych.

Uwagi

Na podstawie dogłębnej analizy stanu wiedzy oraz własnych badań wstępnych Doktorant sformułował tezę stwierdzając, że

„dobór warunków procesu krystalizacji monokrystalicznych odlewów łopatek z nadstopu niklu CMSX-4 oraz prawidłowe wykorzystanie efektów przemian fazowych, zachodzących podczas ich obróbki cieplnej, umożliwi podniesienie stopnia doskonałości struktury krystalicznej i jednocześnie zwiększenie wytrzymałości na pełzanie”.

Uważam, że tak postawiona teza jest truizmem dlatego, że należało się spodziewać, że każde podniesienie stopnia doskonałości struktury krystalicznej materiału monokrystalicznego prowadzi do jednoczesnego zwiększenia jego wytrzymałości, w tym na pełzanie.

Moim zdaniem wystarczyło poprzestać na sformułowaniu celu pracy, który ma charakter naukowy oraz w sposób dostateczny i ambitny określa zakres badań będący podstawą rozpraw doktorskich.

W rozdziale 4.2.4. „Rentgenowska analiza dyfrakcyjna” Doktorant wskazuje, że „orientację krystalograficzną monokryształu nadstopu niklu względem osi referencyjnych charakteryzuje się przez określenie wartości trzech kątów: α_z – odchylenia kierunku [001] od kierunku wyciągania odlewu, β_z – obrotu kierunku [001] wokół osi z oraz γ_z – odchylenia linii rzutu wektora kierunku prostopadłego do kierunku [001] np. [010] od drugiej osi referencyjnej y. Najczęściej w analizie doskonałości struktury monokrystalicznych łopatek wyznacza się rozkład wartości odchylenia kąta α_z dla różnych obszarów powierzchni ich zamka i pióra...” co związane jest z uwzględnieniem głównego kryterium oceny doskonałości struktury krystalicznej, przyjętego przez światowe wytwórnie monokrystalicznych odlewów.

W tym kontekście należy więc uznać, że praktycznie bierze się pod uwagę wartość kąta α_z będącego miarą odchylenia kierunku [001] od kierunku wyciągania odlewu. Zachodzi jednak pytanie – czy i w jakim stopniu ma wpływ wartość kąta β_z (obrotu kierunku [001] wokół osi z) na kształtowanie właściwości użytkowych odlewu?

W podsumowaniu pracy Autor stwierdza, że „podwyższenie stopnia doskonałości struktury monokrystalicznych odlewów łopatek można uzyskać w procesie krystalizacji kierunkowej przez modyfikację lub opracowanie nowego kształtu startera i selektora, wprowadzenie różnej prędkości wyciągania od strefy grzewczej do strefy chłodzącej, w zależności od kształtu profilu pióra łopatki i grubości jej zamka, także zmianę położenia formy w piecu”.

W jakim stopniu, aby zoptymalizować ten proces, można by wykorzystać symulację numeryczną? Jakie należałoby przyjąć założenia i strategię rozwiązania problemu optymalizacji?

Opinia końcowa

Wysoko oceniam pracę doktorską mgr inż. Kamila Gancarczyka. Autor pracy wybrał bardzo ambitny i aktualny z punktu widzenia aplikacyjnego problem badawczy. Umiejętnie sformułował cel i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadził analizę otrzymanych wyników badań. Należy podkreślić, że przeprowadzone przez Doktoranta badania dostarczają wiedzę umożliwiającą modyfikację warunków procesu krystalizacji kierunkowej, realizowanego w warunkach przemysłowych.

Na podstawie przeprowadzonej oceny pracy doktorskiej pt. „Doskonałość struktury krystalicznej monokryształów nadstopu niklu CSMX-4 i jej wpływ na właściwości mechaniczne w wysokiej temperaturze” przedłożonej przez mgr inż. Kamila Gancarczyka stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w obowiązujących przepisach.

Wnioskuje zatem o dopuszczenie tej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej.

Chciałbym podkreślić, że uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny wkład do wiedzy pozwalający na głębsze poznanie wpływu warunków procesu krystalizacji kierunkowej monokrystalicznych odlewów z nadstopu niklu CMSX-4 na ich skład fazowy, jednorodność struktury krystalicznej i mikrostruktury oraz wytrzymałość na pełzanie. Uważam, że Doktorant wykazał nieprzeciętną zdolność do zidentyfikowania i realizacji bardzo ambitnego celu badawczego. W sposób wnikliwy przeprowadził eksperyment i dogłębną analizę otrzymanych wyników badań. Wskazał również dalsze kierunki badań w obszarze doskonalenia materiałowego i procesowego wytwarzania monokrystalicznych odlewów łopatek.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Kamila Gancarczyka pt. „Doskonałość struktury krystalicznej monokryształów nadstopu niklu CSMX-4 i jej wpływ na właściwości mechaniczne w wysokiej temperaturze”.

Jarosław Miżewski