

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

Warszawa, 20 czerwca 2019 r.

## **OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Katarzyny Łyczkowskiej**

pt. „Czynniki decydujące o spawalności odlewów precyzyjnych ze stopu  
niklu Inconel 713C”

### **Uwagi ogólne**

Opiniowana praca powstała pod opieką prof. Janusza Adamca na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach. W zespole prof. J. Adamca od wielu lat prowadzone są badania podstawowe i użytkowe nad rozwiązaniami materiałowymi i technologicznymi we współpracy z przemysłem.

Postęp jaki dokonuje się między innymi w lotnictwie jest ściśle związany z rozwojem nowoczesnych materiałów, innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz nowych technologii. Dotyczy to m. in. stopów niklu stosowanych do wytwarzania elementów silników lotniczych. Jednym z nich jest stop Inconel 713C stosowany do produkcji łopatek turbiny i segmentów sterujących wytwarzanych metodą odlewania precyzyjnego. W elementach tych, charakteryzujących się skomplikowanym kształtem i zmienną grubością ścianek, często pojawiają się wady odlewnicze. Obecnie podejmowane są próby naprawy ujawnionych wad za pomocą technologii spawalniczych. Jednakże głównym problemem związanym ze spawaniem i napawaniem stopów niklu jest ich skłonność do powstawania pęknięć gorących.

Motywacja Autorki rozprawy do pojęcia badań nad spawalnością odlewów precyzyjnych ze stopu niklu Inconel 713C wynikała z faktu, że brak jest kompleksowej wiedzy dotyczącej przyczyn i opisu mechanizmów oraz zjawisk strukturalnych decydujących o spawalności tych odlewów. Doktorantka w swojej rozprawie poddała analizie zjawiska strukturalne podczas krystalizacji napoin stopu Inconel 713C, które decydują o skłonności tego stopu do pęknięcia gorącego, a tym samym decydują o jego spawalności. Opracowała również technologię naprawy odlewów precyzyjnych ze stopów niklu stosowanych w lotnictwie.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej i przede wszystkim praktycznej. 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. Autorka wyodrębniła w niej kilka części. Pierwsza dotyczy analizy literaturowej wad odlewniczych występujących w łopatkach ze stopów niklu wykonanych w procesie odlewania precyzyjnego oraz problemu spawalności tych stopów. Po sformułowaniu tezy Autorka rozprawy przedstawiła cel i zakres pracy oraz bardzo ambitny program badań. Następnie Doktorantka poddała szczegółowej analizie wpływ czynników materiałowych i technologicznych na skłonność do pęknięcia gorącego stopu Inconel 713C oraz wpływ czynników konstrukcyjnych na spawalność tego stopu. Następnie opisała technologię naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C. Ostatnią część rozprawy Doktorantka poświęciła dyskusji i podsumowaniu otrzymanych wyników badań poddając weryfikacji tezę pracy dotyczącą możliwości naprawy metodami spawalniczym odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C.

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

## Teza, cel i zakres pracy

Autorka pracy bazując na analizie danych literaturowych sformułowała następującą tezę:

„O możliwości naprawy metodami spawalniczymi odlewów precyzyjnych ze stopu niklu Inconel 713 C decyduje skłonność do pęknięcia gorącego, która jest wynikiem zjawisk strukturalnych zachodzących podczas krystalizacji napoiny”.

Doktorantka dla potwierdzenia tej tezy postawiła trzy cele:

- metodyczny (opracowanie procedury jakościowej oceny struktury napoimy odlewu precyzyjnego oraz metodyki oceny i ustalenie kryteriów odporności na pęknięcie gorące),
- poznawczy (ocena zakresu kruchości wysokotemperaturowej i spawalności stopu oraz określenie wpływu technologii napawania na strukturę i właściwości napoin),
- użytkowy (opracowanie wytycznych technologicznych naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C).

Autorka pracy poprawnie dobierając techniki badawcze zrealizowała bardzo ambitny program badań obejmujący trzy etapy:

- ocenę skłonności do pęknięcia gorącego stopu odlewniczego,
- ocenę skłonności do pęknięcia złączy,
- opracowanie i kwalifikowanie technologii spawania i napawania odlewów precyzyjnych.

Doktorantka do realizacji tych badań wykorzystwała nowoczesne metody badań składu chemicznego i struktury stopu (m. in. XRF, mikroskopia optyczna i elektronowa) oraz właściwości materiałowych (np. DTA) i technologicznych (symulator ciepłomechaniczny Gleeble, próby nadawania metodami TIG, MIG, PTA i LMD).

Wykorzystując symulację MES i próby SICO analizowała również wpływ warunków konstrukcyjnych napawania na możliwość naprawy odlewów precyzyjnych.

Raz jeszcze chciałbym podkreślić duże znaczenie zarówno poznawcze jak i przede wszystkim praktyczne tak sformułowanej tezy i celów pracy. Przeprowadzone

badania dostarczyły spójnych informacji, które pozwoliły na rzetelne zweryfikowanie postawionej w pracy tezy.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będących podstawą rozpraw doktorskich.

### **Najważniejsze wyniki badań**

Bardzo ważne z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego jest, moim zdaniem, wykazanie przez Doktorantkę, że pęknięcia gorące pojawiające się podczas przetapiania stopu w warunkach wymuszonego odkształcenia powstają w zakresie kruchości wysokotemperaturowej. Związane jest to z powstawaniem pustek tworzących się w wyniku utraty spójności cieczy międzydendrytycznej oraz rozerwaniem siatki ciała stałego tworzonej przez dendryty kolumnowe. Miejscami uprzywilejowanymi dla rozwoju pęknięć gorących są obszary z węglnikami.

Autorka rozprawy wykazała, że pęknięcia gorące w strefie wpływu ciepła i strefie niepełnego stopienia są wynikiem przekroczenia krytycznych odkształceń plastycznych podczas krystalizacji przetopień lub napoin.

Niewątpliwie wymiernym osiągnięciem Doktorantki jest wykazanie, że główną trudnością podczas naprawy odlewów ze stopu Inconel 713C ujawnioną podczas prób technologicznych metodami TIG, MIG, PAW i LBW są mikropęknięcia powstające w strefie częściowego stopienia i rozwijające się do strefy wpływu ciepła (pęknięcia te są bardzo trudne do ujawnienia metodami badań nieniszczących ze względu na ich lokalizację i wymiary).

Podkreślając walory praktyczne recenzowanej pracy warto również zauważyć, że Doktorantka wykazała, że naprawę powstałych wad odlewów ze stopu Inconel 713C należy prowadzić metodą proszkowego napawania plazmowego w osłonie argonu. Poprawne rezultaty napawania uzyskała również stosując technologię laserowego napawania proszkowego.

## **Uwagi**

Doktorantka w rozdziale „Opracowanie technologii naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C” zaleca, aby „proces naprawy odlewu ... rozpocząć od jednoznacznej identyfikacji miejsca wady” i następnie „po ustaleniu położenia i rozmiaru niezgodności należy podjąć decyzję o zasadności i opłacalności naprawy”. W oparciu o jakie badania (analizy) „jednoznacznie” identyfikuje się wady? Jakie są kryteria opłacalności naprawy?

Jaka jest szansa wdrożenia opracowanej technologii naprawy odlewów precyzyjnych ze stopów 713C w zakładach produkujących te odlewy na potrzeby lotnictwa (np. Consolidated Precision Products Poland Sp z o. o.)?

Czy opracowaną technologią naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C można adaptować (i ewentualnie w jakim zakresie) do naprawy elementów odlewanych precyzyjnie z innych odlewniczych stopów niklu?

## **Opinia końcowa**

Wysoko oceniam pracę doktorską mgr inż. Katarzyny Łyczkowskiej. Autorka pracy trafnie wybrała nie tylko tematykę badań, ale również umiejętnie sformułowała tezę i cel pracy oraz wnikliwie przeprowadziła analizę otrzymanych wyników badań. Należy podkreślić, że przeprowadzone przez Doktorantkę badania mają bardzo istotną wartość nie tylko poznawczą ale również użyteczną – pozwoliły na opracowanie technologii naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C.

Na podstawie przeprowadzonej oceny pracy doktorskiej pt. „Czynniki decydujące o spawalności odlewów precyzyjnych ze stopu niklu Inconel 713C” przedłożonej przez mgr inż. Katarzynę Łyczkowską stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w obowiązujących przepisach i wytycznych Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów Naukowych.

Wnioskuje zatem o dopuszczenie do publicznej obrony tej pracy przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach.

Chciałbym podkreślić, że uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki badań wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy w obszarze inżynierii materiałowej. W związku z powyższym wnioskuje do Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Katarzyny Łyczkowskiej.

*Jarosław Mizeva*