

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Łyczkowskiej pt:

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

wykonana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki
Śląskiej

na podstawie uchwały z dnia 21 maja 2019 r.

Wprowadzenie

Wysokie wymagania dotyczące właściwości eksploatacyjnych części i wyposażenia maszyn powodują konieczność stosowania do ich wytwarzania nowoczesnych technologii. Jednymi z najnowocześniejszych i równocześnie najbardziej powszechnie stosowanymi w przemyśle technologiami są technologie spawalnicze. Technologie te są ważnym elementem wytwarzania części maszyn o specjalnych właściwościach użytkowych, wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych. Coraz szersze zastosowanie w budowie maszyn znajdują stopy niklu. Zagadnienie zastosowania technologii spawalniczych do napraw odlewów ze stopów niklu jest szczególnie ważne ze względu na ich nietypowy skład chemiczny, skomplikowaną postać konstrukcyjną oraz wymaganą wysoką trwałość i niezawodność w czasie eksploatacji. Przy spawaniu odlewniczych stopów niklu istotnym problemem jest możliwość wystąpienia pęknięć gorących. O skłonności do pęknięcia gorącego decydują czynniki metalurgiczne, technologiczne i konstrukcyjne. Czynniki te określają spawalność tych stopów, czyli możliwość wykonania napoin (najczęściej naprawczych) o wymaganych właściwościach. Należy podkreślić, że problem spawalności odlewniczych stopów niklu jest dotychczas mało zbadany i niezbyt obszernie opisany.

Procesy spawalnicze, w tym spawanie łukowe stopów niklu są procesami specjalnymi, to jest takimi, których wyniku nie można ocenić w trakcie ich trwania, a ewentualne niezgodności mogą się ujawnić dopiero po ich zakończeniu. Z tego względu zasadne i konieczne jest szczegółowe zbadanie tego procesu w celu jego wykorzystania do precyzyjnego doboru parametrów i ustalenia warunków spawania (w tym spawania w naprawach) odlewów ze stopów niklu.

Podjęcie przez mgr inż. Katarzynę Łyczkowską pracy doktorskiej o charakterze teoretycznym – doświadczalnym pt: **„Czynniki decydujące o spawalności odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C”** należy uznać za wybór trafny ze względu na znaczenie tematyki w zakresie poznawczym, jak również możliwość technicznego zastosowania wyników badań. Problematyka, którą Doktorantka podjęła jest mało zbadana, a

przy tym bardzo istotna z naukowego i użytkowego punktu widzenia. Dlatego uważam, że temat pracy jest uzasadniony, interesujący i aktualny.

Treść rozprawy

Praca doktorska pt: „**Czynniki decydujące o spawalności odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C**” składa się z dwóch podstawowych części, to jest części literaturowej oraz części badawczej i zawiera 155 stron tekstu, 18 tablic, 94 rysunki oraz 144 pozycje bibliograficzne.

W części literaturowej Doktorantka przedstawiła w dokładny sposób zagadnienia dotyczące stopów niklu, w tym ich podział, skład chemiczny, strukturę fazową oraz zastosowanie. Następnie szczegółowo zaprezentowała technologie wytwarzania odlewów ze stopów niklu, uwzględniając wady, jakie mogą w nich powstawać oraz wskazując na zastosowanie technologii spawalniczych w ich naprawach. Omówiła wymagania stawiane materiałom na elementy silników lotniczych oraz stopy niklu stosowane w tych silnikach, szczególnie dokładnie skupiając się na strukturze fazowej tych materiałów. Przedstawiła wady odlewnicze występujące w łopatkach ze stopów niklu wykonanych w procesie odlewania precyzyjnego. Doktorantka przedstawiła zagadnienie spawalności odlewniczych stopów niklu w tym czynniki materiałowe decydujące o spawalności metalurgicznej a także wpływ warunków spawania oraz czynników konstrukcyjnych na ich spawalność oraz metody oceny spawalności. Szeroko scharakteryzowała procesy spawania stopów niklu w tym spawanie elektrodami otulonymi (111), łukiem krytym (121), elektrodą topliwą drutem litym w osłonie gazu obojętnego (131), elektrodą wolframową nietopliwą z materiałem dodatkowym (141), spawanie plazmowe (15), spawanie elektronowe (51) i spawanie laserowe (52). Część literaturową Doktorantka zakończyła szczegółowym i przejrzystym podsumowaniem. Na podkreślenie zasługuje trafny wybór zagadnień przedstawionych w części literaturowej oraz stosowny do tematu pracy zakres ich omówienia.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego Doktorantka sformułowała cele metodyczne, poznawcze oraz cel użytkowy pracy, których istota sprowadza się do określenia wpływu parametrów oraz warunków spawania na uzyskanie napoju naprawczych o właściwościach pozwalających na niezawodną i bezpieczną eksploatację odlewów przeznaczonych dla przemysłu lotniczego.

Studia literatury i jej krytyka pozwoliły Doktorantce na postawienie tezy pracy: „**O możliwości naprawy metodami spawalniczymi odlewów precyzyjnych ze stopów niklu Inconel 713C decyduje skłonność do pęknięcia gorącego, która jest wynikiem zjawisk strukturalnych zachodzących podczas krystalizacji spoiny.**”

Z celów oraz postawionej tezy wynikał zakres i metodyka badań przedstawionych w drugiej, doświadczalnej części pracy.

W tej części pracy Doktorantka omówiła wyniki badań materiału wykorzystanego do badań spawalności – analizy ilościowej składu chemicznego, badań strukturalnych, mikroanalizy składu chemicznego oraz analizy składu fazowego. Przedstawiła metodykę badań, którą konsekwentnie zastosowała w realizowanej pracy. Przeprowadziła weryfikację

składu chemicznego materiału napawanego stosując analizę widma fluorescencyjnego promieniowania rentgenowskiego, wyznaczyła temperaturę likwidus i solidus stopu Inconel 713C stosując analizę termiczną, obszerne badania metalograficzne, to jest obserwację mikro- i makrostruktury złączy z wykorzystaniem między innymi mikroskopu stereoskopowego i elektronowego mikroskopu skaningowego oraz mikroanalizę składu chemicznego metodą EDS. Doktorantka przeprowadziła próby technologiczne oceny skłonności do pękania gorącego wykorzystując do tego symulator ciepłno-mechaniczny Gleeble 3500. Do oceny wpływu czynników konstrukcyjnych decydujących o możliwości napawania odlewów zastosowała symulację MES. Wpływ parametrów napawania na spawalność stopu Inconel 713C określiła wykonując próby napawania i przetapiania odlewów stosując spawanie elektrodami otulonymi (111), łukiem krytym (121), elektrodą topliwą drutem litym w osłonie gazu obojętnego (131), elektrodą wolframową nietopliwą z materiałem dodatkowym (141), plazmowe (15), elektronowe (51) i laserowe (52).

Wyniki obszernych badań struktury i właściwości złączy spawanych odlewniczego stopu niklu Inconel 713C Doktorantka poddała szczegółowej i obszernej analizie, w której określiła warunki spawalności tego stopu, ze szczególnym uwzględnieniem skłonności do pękania gorącego, jako jednego z kryteriów spawalności. Uzyskane wyniki oraz ich staranna analiza umożliwiły sformułowanie dziewięciu wniosków dotyczących odporności na pęknięcie badanego stopu, zakresu kruchości wysokotemperaturowej, struktury fazowej oraz technologii napawania.

Ocena rozprawy oraz uwagi ogólne

Wybór tematu rozprawy doktorskiej należy uznać za bardzo trafny i aktualny, mieszczący się we współczesnych tendencjach rozwojowych zastosowania nowoczesnych technologii spawania. Doktorantka przeprowadziła bardzo obszerne badania doświadczalne mające na celu sprawdzenie składu chemicznego, struktury fazowej, właściwości mechanicznych oraz skłonności do pęknięcia gorącego napoin naprawczych odlewów ze stopu Inconel 713C. Szczególnie cenne jest przeprowadzenie szerokiego zakresu badań napoin i samych odlewów z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych. Stanowi to znaczący, nowatorski wkład Doktorantki w rozwój badań nad spawaniem naprawczym odlewów ze stopów niklu.

W pierwszej części rozprawy Doktorantka dokonała przeglądu stu czterdziestu czterech pozycji literatury dotyczącej badanego zagadnienia, uwzględniając ważne publikacje ostatniej dekady. W tym zakresie Doktorantka wykazała się dobrą znajomością zagadnienia i prawidłową oceną zjawisk zachodzących w napoinach naprawczych oraz samym stopie Inconel 713C.

Ogólna koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana poprawnie, a jej realizację oceniam pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest obszerna i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Dotyczy to zwłaszcza kompleksowego podejścia do sposobu oceny spawalności stopu Inconel 713C. Doktorantka skutecznie zastosowała nowoczesne, doświadczalne metody badań, w tym spektrometrię dyspersji energii, mikroskopię elektronową, analizę termiczną, symulację zjawisk cieplnych i

mechanicznych oraz symulację MES. Na podkreślenie zasługuje wykorzystanie w symulacji MES danych wejściowych uzyskanych na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktorantkę. W wyniku przeprowadzonych obszernych i różnorodnych badań uzyskała interesujące i wartościowe wyniki, które następnie poprawnie zinterpretowała. Obszerna i wyczerpująca analiza uzyskanych wyników znacznie podnosi wartość przedstawionej pracy i potwierdza umiejętność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Szczególnie cenne ze względów użytkowych jest opracowanie i zamieszczenie w pracy technologii naprawy odlewów precyzyjnych ze stopu Inconel 713C.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że zaplanowane cele i zakres pracy zostały osiągnięte i dlatego całość rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Łyczkowskiej oceniam pozytywnie. Doceniam zwłaszcza trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, rzeczowy sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktorantki. Na podkreślenie zasługuje sposób przygotowania rozprawy i jej szata graficzna.

W trakcie szczegółowej analizy rozprawy nasunęło mi się jednak kilka uwag ogólnych dotyczących jej treści, warunków prowadzenia badań oraz zakresu eksperymentu.

1. Na stronie 38 Doktorantka pisze: „Zalecana temperatura podgrzewania, w przypadku stopów niklu wynosi 10 °C”. Proszę o wyjaśnienie tej dosyć dziwnej wartości temperatury.
2. Na stronie 38 Doktorantka pisze: „Wyjątkiem są łopatki turbin silników lotniczych, które mogą być spawane bez obróbki cieplnej, jednak wymaga to opracowania specjalnych instrukcji dla każdego odlewu”. Proszę o rozwinięcie tej myśli.
3. Na stronie 41 Doktorantka przedstawiła bardzo nietypowy podział sposobów przenoszenia metalu w łuku spawalniczym. Jest on sprzeczny z ogólnie stosowanym podziałem według Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa. Proszę o wyjaśnienie.
4. Jednym z celów metodycznych przedstawionych na stronie 52 jest opracowanie procedury jakościowej i ilościowej oceny struktury napoiny odlewu precyzyjnego ze stopu Inconel 713C. Jednak wyniki realizacji tego celu są mało widoczne w pracy.
5. Jednym z celów poznawczych przedstawionych na stronie 52 jest ocena spawalności stopu Inconel 713C. To zagadnienie zostało omówione w rozdziale 11 Analiza wyników badań, jednak ze względu na tytuł pracy uważam, że powinno być zdecydowanie bardziej wyeksponowane, między innymi w wnioskach.
6. Zakres badań przedstawiony na stronie 54 różni się od zakresu badań przedstawionego na rysunku 4.1 ze strony 53, w którym pominięto symulację MES.
7. W rozdziale 9 Wpływ parametrów technologicznych na skłonność do pęknięcia gorącego stopu Inconel 713C Doktorantka opisuje próby technologiczne przetapiania i napawania różnymi procesami spawania, w tym ręcznymi. Nie podaje jednak jakie uprawnienia posiadał spawacz wykonujący płyty próbne. Nie podaje również ile prób przeprowadzono i ilu spawaczy te próby prowadziło. W przypadku badań właściwości spawalniczych źródeł prądu spawania lub materiałów dodatkowych do spawania próby spawania wykonywane są przez kilku spawaczy-klasyfikatorów, a wynik jest średnią arytmetyczną uzyskanych przez nich wyników. Taki sposób postępowania

wynika z konieczności zminimalizowania wpływu umiejętności spawacza na wynik spawania lub napawania. Nie można więc wykluczyć, że wykryte niezgodności zostały w niektórych przypadkach spowodowane przez spawacza.

8. Po próbach napawania przeprowadzono badania wizualne i zgodnie z normą PN-EN ISO 5817 dokonano ich klasyfikacji do odpowiedniego poziomu jakości – tablica 9.1 ze strony 100, tablica 9.2 ze strony 106, tablica 9.3 ze strony 111, tablica 9.4 ze strony 115, tablica 9.5 ze strony 121. Nie podano jednak wielkości niezgodności, które zdecydowały o zakwalifikowaniu do odpowiedniego poziomu jakości.

Najważniejsze uwagi szczegółowe

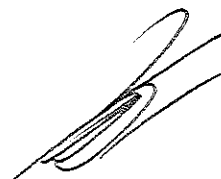
1. W spisie treści, w podrozdziale 9.1 Doktorantka podaje tytuł podrozdziału „Przetapianie i napawanie metodą TIG w osłonie gazów obojętnych”. Część zdania „w osłonie gazów obojętnych” jest zbędna, gdyż mieści się już w samej definicji procesu TIG.
2. Na stronie 13 Doktorantka podaje: „Eliminacja granic ziaren w odlewanych stopach zwiększyła nie tylko ich odporność na pełzanie w wysokiej temperaturze, ale także odporność na pełzanie w wysokiej temperaturze”. Proszę o wyjaśnienie sensu zdania.
3. Na stronach 15, 31, 63, 66 Doktorantka stosuje termin „krzepnięcie” podczas, gdy w pozostałych przypadkach stosuje prawidłowy termin „krystalizacja”.
4. Na stronie 103, 104, 110 Doktorantka używa terminu „pęknięcie” podczas, gdy moim zdaniem, ze względu na wymiar nieciągłości prawidłowy termin to „mikropęknięcie”.
5. W zestawieniu wielkości zamieszczonych w wzorze 8.3 ze strony 84 nie podano jednostek miary.
6. Uważam, że wnioski (strona 142 i 143) powinny być dla ułatwienia ich identyfikacji numerowane cyframi arabskimi, a nie znakami interpunkcyjnymi.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomimo wymienionych uwag ogólnych i szczegółowych stwierdzam, że Autorka osiągnęła cele postawione w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale również szczególnie istotnych dla praktyki spawania odlewniczych stopów niklu. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktorantki oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej – badawczej.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym. Na tej podstawie składam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Katarzyny Łyczkowskiej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej.

Ze względu na podjęcie badań w obszarze o szczególnych wymaganiach technologicznych, wymaganej wysokiej jakości wyrobu, wyjątkowo szeroki zakres eksperymentu uwzględniający różnorodne metody badawcze, dużą wartość praktyczną prowadzonych badań i uzyskanych w nich wyników oraz kompleksowe podejście przez Doktorantkę do badanego zagadnienia wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping, fluid strokes that form a stylized, somewhat abstract shape.