

dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. nadzw. PG
Katedra Inżynierii Materiałowej i Spajania
Wydział Mechaniczny
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 24 czerwca 2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalii Koniecznej pt.:

„Spawalność stopu Inconel 617”

wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dr. hab. inż. Janusza Adamca
opracowana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii
Politechniki Śląskiej
z dnia 21 maja 2019 r.

Wprowadzenie

Spawalność metali w praktyce przemysłowej bardzo często sprowadzana jest do ich skłonności do formowania się pęknięć technologicznych: gorących, zimnych, lamelarnych i wyżarzeniowych, a więc tych, które formują się na etapie wytwarzania złączy spawanych. Jest to jednocześnie zgodne z narzucanym przez większość definicji spawalności warunkiem zachowania ciągłości metalicznej złączy i traktowaniem przez różne przepisy pęknięć spawalniczych jako niezgodności niedopuszczalnych, eliminujących złącze z eksploatacji.

W przypadku niklu i jego stopów podstawowym ograniczeniem ich spawalności jest tendencja do tworzenia pęknięć gorących, co determinuje konieczność utrzymywania ścisłego reżimu technologicznego polegającego na właściwym doborze procesu, spoiwa i gazów osłonowych i formujących, czyszczeniu elementów przed spawaniem i kontrolowaniu parametrów spawania. Obszar zastosowania stopów niklu obejmuje wiele dziedzin przemysłu elektroenergetycznego, chemicznego, morskiego, spożywczego, papierniczego itd., w których wykorzystywane są specyficzne właściwości różnych stopów niklu.

Przedstawiona do recenzji rozprawa autorstwa Pani mgr inż. Natalii Koniecznej dotyczy bardzo ważnego zagadnienia, jakim jest ocena spawalności wybranego stopu niklu i wpisuje się w szkołę naukową Pana prof. dr. hab. inż. Janusza Adamca. W świetle analizy literatury przedmiotu podjęcie przez Doktorantkę poruszonej w pracy tematyki uważam za w pełni uzasadnione, ponieważ jest ona aktualna i istotna z praktycznego punktu widzenia oraz niezwykle interesująca z perspektywy naukowej.

Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Natalii Koniecznej jest bardzo obszerna: składa się ze spisu treści, 6 rozdziałów przedstawionych na 178 stronach (158 stron tekstu

właściwego), które obejmują wprowadzenie, dwurozdziałowy aktualny stan wiedzy, badania własne, analizę wyników i wnioski, a także spisu literatury. Praca nie zawiera załączników.

W bogatym merytorycznie wprowadzeniu Autorka opisuje zagadnienia związane ze stanem światowego sektora elektroenergetycznego, a następnie ze stopami niklu jako materiałów mających zastosowanie w tym sektorze przemysłu oraz szczególnym aspektem ich spawalności, jakim jest skłonność do pęknięcia krystalizacyjnego.

Kolejny rozdział zatytułowany „Aktualny stan wiedzy” zawiera informacje wstępne do poruszanych w badawczej części pracy zagadnień: charakterystykę niklu i jego stopów oraz badanego stopu Inconel 617, informacje o spawalności i technologii spawania stopów niklu oraz podsumowanie stanu zagadnienia w świetle literatury stanowiące jednocześnie uzasadnienie podjęcia tematu. Doktorantka skupia się nie tylko na ogólnej charakterystyce spawalności stopów niklu, ale również szczegółowo omawia teorie kruchości i mechanizmy odpowiedzialne za formowanie się pęknięć.

W tym zakresie praca zasługuje, moim zdaniem, na wysoka ocenę, ponieważ oryginalność tematu wymagała od Doktorantki wyjątkowo syntetycznego przeanalizowania licznych źródeł.

Raport z badań własnych Autorka rozpoczyna od przedstawienia tezy, celów i zakresu pracy (str. 69). Teza brzmi: „Spawalność stopu niklu Inconel 617 określona jako odporność na pęknięcie gorące, zależy od zjawisk strukturalnych podczas krystalizacji spoiny w zakresie kruchości wysokotemperaturowej (ZKW), o której decydują czynniki metalurgiczne, konstrukcyjne oraz technologiczne” i, moim zdaniem, jest sformułowana prawidłowo. Cele pracy również są postawione jasno i poprawnie. Na podkreślenie zasługuje fakt bardzo starannego zaplanowania i przedstawienia prac zakresu badawczych w postaci schematu na str. 70. Dodatkowo Autorka uzupełniła ten obszar pracy o procedurę oceny struktury badanego stopu (rys. 4.2.2).

W następnych rozdziałach Pani mgr inż. Natalia Konieczna przedstawiła wyniki badań materiału rodzimego (podrozdział 4.4), określenie zakresu kruchości wysokotemperaturowej (podrozdział 4.5), ocenę skłonności do pęknięcia gorącego złączy spawanych metodą TIG oraz wpływ czynników technologicznych na jakość złączy. Tę część pracy zakończono przedstawieniem opracowanych na podstawie przeprowadzonych prac badawczych i analitycznych zaleceń technologicznych spawania stopu Inconel 617.

Praca została zakończona podsumowaniem (rozdział 5. zatytułowany „Analiza wyników”) oraz prawidłowo sformułowanymi wnioskami. Obie te części oceniam bardzo wysoko. Pani mgr inż. Natalia Konieczna nie ograniczyła się tylko do wyciągnięcia podstawowych informacji z otrzymanych wyników, ale podjęła również próbę opisu mechanizmu formowania się pęknięć gorących wynikającą z otrzymanych danych oraz skonfrontowała uzyskane informacje ze źródłami literaturowymi. Świadczy to o dojrzałości naukowo-badawczej Doktorantki.

Spis literatury obejmuje 236 pozycji literaturowych, w tym 4 artykuły naukowe autorskie Doktorantki i 2, których jest współautorką. Przytaczane źródła są różnorodne i tematycznie

uzasadnione, spis obejmuje aktualne artykuły z czasopism naukowych, normy, materiały konferencyjne i podręczniki z całego świata.

Praca napisana jest językiem przystępnym i z zastosowaniem prawidłowej terminologii technicznej. Podczas oceny formalnej pracy nasunęły mi się następujące uwagi edycyjne:

- Rys. 1.7: angielski opis wykresu powinien zostać przetłumaczony na j. polski.
- Str. 13: zapis liczebnika porządkowego „10-tej” powinien wyglądać następująco: 10. (z kropką).
- Rys. 2.1.1: rysunek faktycznie składa się z dwóch części, które powinny być oznaczone jako a) i b).
- Słownictwo nietechniczne: zamiast „błonka” lepiej byłoby napisać: „warstwa pasywna” (str. 27). Podobnie: „tempo odkształcania” powinno być zastąpione przez „prędkość odkształcania” (str. 54), a „zanurzeniowa” (metoda przenoszenia metalu w łuku) przez „zwarciowa” (str. 63 i 64).
- Rys. 4.2.1 niewiele mówi o miejscu wycięcia próbki do badań metalograficznych, ponieważ nie podano na nim wymiarów.
- Rys. 4.4.3 opisany jest w tekście hermetycznym zwrotem: „Analiza przełomu ujawniła gładką powierzchnię ziaren z widocznymi natopionymi granicami poligonalnych ziaren osnowy γ ”. Dla ułatwienia zidentyfikowania tak określonej budowy przełomu należałoby zaznaczyć na rysunku przykładowe miejsce strzałką.
- W tabeli 4.6 jedna z kolumn jest opisana: „średnica stopiwa”, a powinno być: „średnica spoiwa”.
- Badania radiograficzne oznaczone są skrótem RTG zamiast RT (str. 82 i 130).
- Zamiast zwrotu „próba gięcia” w przyszłości proponuję stosować zalecany przez normę PN-EN ISO 5173:2010 termin „badanie na zginanie”.

Ocena merytoryczna rozprawy

Pracę uważam za interesującą i wartościową pod względem merytorycznym i praktycznym. Doktorantka prawidłowo zrealizowała zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy: zaplanowała i przeprowadziła złożone i komplementarne badania doświadczalne zmierzające do oceny spawalności badanego stopu i opracowała wytyczne technologiczne procesu spawania metodą TIG. Wykorzystała w tym celu szereg nowoczesnych metod badawczych służących ocenie budowy materiału wyjściowego i poddanego oddziaływaniu różnych cykli cieplnych, kilka metod określających skłonność do pęknięcia w różnych warunkach utwardzenia oraz badania technologiczne obejmujące zarówno badania podstawowe (wyznaczenie cyklu cieplnego), jak i ocenę właściwości złączy spawanych. Na podkreślenie zasługuje fakt takiego zaplanowania badań, które umożliwiło ocenę wpływu spawalności badanego stopu z uwzględnieniem czynników metalurgicznych, technologicznych oraz konstrukcyjnych. Na koniec Autorka prawidłowo zinterpretowała wyniki badań.

Dobre przygotowanie Pani mgr inż. Natalii Koniecznej do prac badawczych i Jej staranność w realizacji eksperymentów potwierdziła m.in. poprzez opracowanie metodyki badań metalograficznych, które poprzedziła weryfikacją skuteczności ujawniania struktury zgrądałów przez sześć odczynników do trawienia (tablica 4.2.3.).

Do najważniejszych dokonań Doktorantki zaliczam:

- opisanie na podstawie uzyskanych wyników badań mechanizmu pęknięcia stopu Inconel 617,
- sformułowanie zaleceń technologicznych do spawania metodą TIG badanego stopu.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że wszystkie te osiągnięcia techniczne zostały poparte bardzo wnikliwą analizą strukturalną badanych złączy, co potwierdza bardzo dobre przygotowanie metodologiczne Doktorantki oraz Jej duży potencjał jako pracownika naukowego. Również na wyróżnienie zasługuje staranne przygotowanie pracy od strony graficznej, a zwłaszcza wysoka jakość zdjęć metalograficznych. W zakresie oceny merytorycznej stwierdziłem następujące drobne uchybienia:

- Rys. 2.3.2 pokazuje pęknięcia, a nie „zjawisko pęknięcia”.
- W rozdziale 2.3 Autorka opisuje problemy ograniczające spawalność stopów niklu koncentrując się jedynie na aspektach metalurgicznych: wymienia wpływ poszczególnych pierwiastków stopowych i zanieczyszczeń na formowanie się niezgodności spawalniczych oraz wskazuje jako podstawowy problem skłonność do tworzenia pęknięć gorących. Z punktu widzenia praktycznego pierwszym wyzwaniem jest pokonanie trudności technologicznych i konstrukcyjnych. Myślę, że zakończenie tej części pracy krótkim opisem wpływu czynników technologicznych i konstrukcyjnych: zabiegów i przygotowania elementów do spawania niklu i jego stopów pozwoliłoby na płynne przejście do kolejnego rozdziału traktującego o technologii spawania stopu Inconel 617.
- W technologii spawania badanego stopu metodami TIG (str. 60-62) Autorka pomija konieczność stosowania osłony grani w postaci gazu formującego.
- Str. 64: przy opisie obróbki cieplnej stopu Inconel 617 Autorka nie podaje nazwy tego procesu oraz przykładowych parametrów: czasu i temperatury.
- Autorka stosuje zamiennie zwroty opisujące ilość wprowadzonego ciepła: energia liniowa, energia liniowa wprowadzana do złącza, ilość wprowadzonej energii do materiału podczas spawania, ilość ciepła wprowadzonego do złącza, ilość wprowadzonej energii cieplnej do materiału (energia liniowa łuku spawalniczego), energia procesu. Tymczasem pojęcia energii liniowej i ilości wprowadzonego ciepła są ściśle zdefiniowane. Zgodnie z PN-EN 1011-21 powinno się stosować pojęcie: „ilość wprowadzonego ciepła”.
- W tabelicy 4.5.4 nie podano wartości napięcia łuku, co umożliwiłoby weryfikację poprawności obliczenia ilości wprowadzonego ciepła.

Podsumowując, pomimo przedstawionych uwag, rozprawę oceniam jednoznacznie pozytywnie pod względem formalnym i merytorycznym. Wszystkie powyższe uwagi omówiłem bezpośrednio z Autorką rozprawy. Doktorantka udowodniła, że jest bardzo dobrze przygotowana metodologicznie do prowadzenia badań naukowych.

Uwagi dyskusyjne

Poniżej wyszczególniam pytania, które nasunęły mi się podczas lektury rozprawy. Bardzo proszę o odpowiedzi i komentarze do wymienionych zagadnień.

1. Na str. 66. spawalność stopów niklu określona jest jako „dobra”, natomiast na str. 48 zaliczono je do: „materiałów trudnospawalnych”. Na str. 126. Autorka pisze, że na podstawie wyników prób Fisco „można uznać stop Inconel 617 za dobrze spawalny”. Czy to stwierdzenie nie stoi w sprzeczności z wynikami pokazanymi na rys. 4.5.22, na którym widać pęknięcie przebiegające przez całą grubość spoiny?
2. Wg jakich wytycznych przeprowadzono próby Transvarestraint, Houldrofta i Fisco?
3. Na rys. 4.5.20 pokazano schematy przygotowania brzegów próbek do próby Fisco w obu przypadkach opisując grubość symbolem g. Czy zastosowano obydwa warianty ukosowania dla obu grubości, jak wynika z podpisów rysunków 4.5.21 i 4.5.22?
4. Rozdział 4.6.2: Jakie termoelementy zastosowano? Jaka była częstotliwość pomiaru temperatury? Czy układ pomiarowy był kalibrowany? Jak mocowano termoelementy? Czy układ posiadał kompensację temperatury zimnych końców?
5. W instrukcjach WPS (rys. 4.7.1.-4.7.3) brakuje następujących danych: numeru procesu spawania, informacji o rodzaju szczotki do metalu (nierdzewna), grupy materiałowej wg ISO/TR 15608 (46), na rysunku nie podano numeru ściegu (w przypadku, gdy jest jeden, też się podaje numer), oznaczenia gazu wg ISO 14175 oraz uwag dodatkowych, np. stosować ściegi proste, odciąć utlenioną końcówkę pręta, w przypadku spawania na otwartym terenie stosować parawany. Arkusz nie jest zgodny z PN-EN ISO 15609-1. Niepotrzebne jest podawanie temperatury podgrzewania wstępnego niższej niż (w zależności od materiału) 70-100 °C i temperatury międzyściegowej dla spawania jednościegowego.

Wymienione usterki nie umniejszają bardzo wysokiej oceny, na którą w moim głębokim przekonaniu, zasługuje rozprawa autorstwa Pani mgr inż. Natalii Koniecznej. Wyrażam nadzieję, że uwagi będą stanowiły przyczynek do dyskusji i okażą się pomocne w dalszych pracach Doktorantki. Analizując cel, zakres i treść pracy stwierdzam, że wpisuje się ona jednoznacznie w dyscyplinę naukową: Inżynieria Materiałowa.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca jest oryginalnym osiągnięciem naukowym Pani mgr inż. Natalii Koniecznej, która wykazała się samodzielnością w planowaniu, realizacji i interpretacji wyników badań. Doktorantka przedstawiła w rozprawie uzupełniające się wyniki badań i analiz uzyskane nowoczesnymi metodami określając, zgodnie z tytułem pracy, spawalność stopu niklu Inconel 617.

Opiniowana praca doktorska pod tytułem „Spawalność stopu Inconel 617” spełnia w pełni wymagania określone w Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule Naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z dnia 16 kwietnia 2003 roku poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Natalii Koniecznej do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Jednocześnie podkreślając bardzo wysoki poziom zaprezentowanej rozprawy, szeroki zakres prac badawczych i analitycznych zrealizowanych z wykorzystaniem nowoczesnych

metod badawczych oraz przedstawienie perspektywicznych wyników **wniosuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalii Koniecznej.**

Sporządził:

Dariusz Fydyga