

Gdańsk, 7.01.2025

Prof. dr hab. inż. Jerzy Łabanowski
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
jerzy.labanowski@pg.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Walczyka
pt. "Optymalizacja parametrów obróbki cieplnej w kształtowaniu właściwości spoin
stali ferrytycznych"
zrealizowanej pod kierunkiem
promotora dr hab. inż. Marka Roszaka, prof. PŚ
promotora pomocniczego dr inż. Wojciecha Pakiela
opiekuna z przemysłu mgr inż. Pawła Snopka

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej Pana prof. dr hab. inż. Adama Grajcara, z dnia 22.10.2024 r. nr RDJMa.512.13.2024. Podstawę prawną wykonania recenzji stanowi ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20.07.2018 r., Dz. U. poz. 1668 z 2018 r.

1. Zakres i aktualność tematu rozprawy

Mgr inż. Grzegorz Walczyk realizował dysertację w ramach czwartej edycji programu „doktorat wdrożeniowy”, a w związku z tym w recenzji poza rozwiązaniem problemu naukowego oceniany jest również aspekt praktyczny zastosowania proponowanych rozwiązań w przemyśle.

Przedmiotem badań i analiz w recenzowanej pracy doktorskiej są procesy technologiczne spawania ferrytycznych stali nierdzewnych. Spawanie jest specjalnym procesem technologicznym, czyli takim, którego rezultat trudno jest zweryfikować w sposób nieniszczący w trakcie wytwarzania produktu. Natomiast wytworzony w wyniku procesu specjalnego produkt może ujawnić swoje wady w trakcie użytkowania. A zatem proces specjalny powinien być kontrolowany, aby nie dopuścić do ewentualnych wad produktu. Doktorant jest tego świadomy i w związku z tym w podjętych badaniach kieruje się wytycznymi normy PN-EN 15614-1 określającej zasady kwalifikowania technologii spawania

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 17.01.2025
RDJMa.11715/2025
nr zał.

łukowego stali. Spawanie stali nierdzewnych ferrytycznych jest realizowane od wielu lat, natomiast ciągle aktualny jest problem uzyskania dobrych właściwości mechanicznych złączy. Główne problemy spawalności tej grupy stali związane są przede wszystkim z niską plastycznością złączy, zarówno spoin jak i strefy wpływu ciepła (SWC). Poprawę własności mechanicznych złączy można osiągnąć poprzez stosowanie materiału dodatkowego o strukturze austenitycznej. Nie zawsze jednak takie rozwiązanie jest możliwe. Spoiny austenityczne mogą powodować zwiększoną podatność do korozji złączy spawanych ze względu na różnice w składzie chemicznym obszaru spoiny i materiału rodzimego. Ponadto wyróżniają się odmienną barwą w konstrukcji spawanej, co nie zawsze jest akceptowalne. Należy jeszcze zaznaczyć wyższy koszt spoiw austenitycznych w stosunku do ferrytycznych. Z tych względów Doktorant przyjął do badań materiał dodatkowy o składzie chemicznym odpowiadającym lub zbliżonym do materiału rodzimego. Założył, że poprawę właściwości mechanicznych i odporności korozyjnej złączy doczołowych badanej stali X2CrTiNb18 uzyska poprzez modyfikację składu chemicznego spoiwa oraz zastosowanie obróbki cieplnej po spawaniu w odpowiednim zakresie temperatury i czasu. Jasno sprecyzowane zostały zamierzenia utylitarne pracy doktorskiej wynikające ze współpracy z zakładem Staltech S.C. oraz aspekt naukowy ukierunkowany na analizę wpływu technologii spawania na właściwości złączy doczołowych blach cienkich.

Rozważane zagadnienia dotyczą wpływu procesów technologicznych spawania na kształtowanie mikrostruktury oraz właściwości złączy spawanych nierdzewnych stali ferrytycznych i z tego powodu osiągnięcia naukowe wykazane w tej pracy przyczyniają się do rozwoju dyscypliny inżynieria materiałowa.

2. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Odnosząc się do tytułu opiniowanej rozprawy „Optymalizacja parametrów obróbki cieplnej w kształtowaniu właściwości spoin stali ferrytycznych” uważam, że nie w pełni odzwierciedla zawartość merytoryczną pracy, ponieważ wskazuje spoinę jako obiekt badań, natomiast w rzeczywistości dotyczy złączy spawanych.

Rozprawa o objętości 144 stron, zawiera 58 rysunków, 39 tabel i składa się z trzech zasadniczych części. Obejmują one: analizę stanu zagadnienia w świetle literatury, opis badań własnych wraz z analizą wyników i wnioskami oraz wykaz literatury.

Wykaz literatury zawiera 96 pozycji oraz 28 odnośników do norm i stron internetowych. Większość przywołanych artykułów z czasopism jest aktualna, wydana w ostatnich 15 latach. W wykazie zostały przytoczone 2 artykuły z czasopism recenzowanych oraz dwa referaty zamieszczone w materiałach z konferencji naukowych, w których Doktorant jest współautorem. Świadczy to, że mgr inż. Grzegorz Walczyk zdobył już doświadczenie w zakresie tematyki objętej rozprawą doktorską.

Część studialna pracy jest integralnie związana z jej tematem i została oparta na przeglądzie pozycji literaturowych dotyczących charakterystyki i podziału stali stopowych nierdzewnych oraz kształtowaniu właściwości złączy spawanych stali ferrytycznych. Doktorant analizuje wpływ zastosowanej technologii spawania, warunków spawania oraz późniejszej obróbki cieplnej złączy na zmiany właściwości mechanicznych oraz odporności korozyjnej. Wskazuje zjawisko rozrostu ziaren w spoinie i SWC jako podstawowy problem pogorszenia właściwości mechanicznych złączy spawanych. Doktorant nie analizuje jednak przemian fazowych zachodzących w spoinie podczas krzepnięcia i w SWC złączy podczas spawalniczych cykli cieplnych oraz podczas późniejszej obróbki cieplnej. Taka analiza przeprowadzona z wykorzystaniem fragmentu układu równowagi Fe-Cr-C dla zawartości Cr 17% - czyli dla składu chemicznego odpowiadającego badanej stali – dałaby jednoznaczną informację dotyczącą spodziewanej mikrostruktury złącza (częściowo ferrytycznej, czy całkowicie ferrytycznej).

Wynikiem analizy literatury jest sformułowanie dwóch tez pracy:

Teza 1: Obróbka cieplna spoin z ferrytycznych stali nierdzewnych wraz z zastosowaniem materiału dodatkowego do spawania powinna ograniczać zjawisko rozrostu ziaren ferrytu w spoinie.

Teza 2: Ograniczenie zjawiska rozrostu ziarna występującego w ferrytycznych stalach nierdzewnych wynikające z zastosowania obróbki cieplnej złączy spawanych powinno polepszyć uzyskiwane właściwości mechaniczne spoin.

Tezy pracy uważam za dość ryzykowne i trudne do udowodnienia, bądź nieprecyzyjnie sformułowane. Po pierwsze odnoszą się tylko do obszaru spoin, pomijając SWC, a jak wiadomo o właściwościach złącza spawanego decydują wszystkie jego obszary. Ponadto należy wziąć pod uwagę trudności, a praktyczne brak możliwości rozdrobnienia już istniejącej gruboziarnistej struktury ferrytu w spoinie i w SWC złączy stali czysto ferrytycznych w wyniku zastosowania obróbki cieplnej po spawaniu. Jest to spowodowane brakiem przemian fazowych podczas nagrzewania i chłodzenia takich stopów. Możliwe

natomiast jest ograniczenie wielkości ziaren ferrytu w złączu podczas samego procesu spawania poprzez umiejętny dobór parametrów spawania (np. ilość wprowadzonego ciepła) oraz dobór składu chemicznego spoiwa. Obróbka cieplna po spawaniu może mieć również istotny wpływ na właściwości złączy spawanych, a zwłaszcza spoiny, powodując odpuszczenie martenzytu (jeżeli występuje w mikrostrukturze), zmniejszenie przesylenia ferrytu węglem oraz zredukowanie naprężeń wewnętrznych.

Wskazany cel pracy to: *dobór parametrów obróbki cieplnej i ocena ich wpływu na wybrane własności spoin stali ferrytycznych nierdzewnych.*

Cel pracy jest jasno sprecyzowany, lecz powinien odnosić się do złączy spawanych, które są poddane badaniom w recenzowanej pracy, a nie spoin.

Dla realizacji celów pracy Doktorant przyjął program przedstawiony na rys. 6 w pracy doktorskiej składający się z dwóch zasadniczych etapów. Badania wstępne realizowane były na jednościgowych złączach doczołowych blach ze stali X2CrTiNb18 o grubości 2,0 mm. Badania właściwe realizowano na złączach dwuścigowych blach z tej samej stali o grubości 3,0 mm. Badania wstępne przeprowadzone były w celu ustalenia parametrów spawania przy użyciu metody TIG. Złącza spawano z użyciem materiału dodatkowego w postaci odcinków o przekroju prostokątnym pobranych ze spawanych blach, a zatem o składzie chemicznym identycznym jak materiał spawany. Założono stosowanie niskich energii liniowych spawania, których wartości nie przekraczały 0,7 kJ/mm dla blach o grubości 2,0 mm i 0,97 kJ/mm dla złączy blach o grubości 3,0 mm. Zmiennymi procesu technologicznego spawania było zastosowanie stopiwa wzbogaconego w tytan oraz obróbka cieplna złączy po spawaniu w granicach temperatur od 880°C do 940°C. Wzbogacenie stopiwa w tytan realizowano poprzez przetopienie podczas spawania proszku tytanu wcześniej zasypanego w rowku spawalniczym. Przyjęto masę proszku ok 1g lub 2g na długości 350 mm złącza. Wykonano 6 złączy do badań wstępnych i 10 złączy do badań właściwych. Metodykę i zakres badań przyjęto zgodnie z wskazaniem normy PN-EN-ISO 15614-1 dotyczącej kwalifikowania technologii spawania. Zasadnicze badania złączy obejmowały badania nieniszczące VT, PT, RT, a następnie statyczne próby rozciągania, próby twardości, statyczne próby zginania, badania udarności oraz badania korozyjne w zakresie podatności złączy do korozji międzykrystalicznej. Badania te uzupełniono mikrograficzną analizą wielkości ziaren.

Przyjęte metody badań uznaję za właściwie ze względu na aspekt użytkowy pracy, natomiast moim zdaniem wyjaśnienie rejestrowanych zmian właściwości złączy powinno być

poparte wynikami badań metalograficznych mikroskopowych, które Doktorant przedstawił tylko fragmentarycznie. Badania metalograficzne pomocne były by m. in. w jednoznacznym określeniu mikrostruktury spoin i SWC złączy, wskazaniu wielkości ziaren spoiny, SWC i materiału rodzimego, szerokości SWC oraz wskazaniu różnic po poszczególnych zabiegach technologicznych.

Wpływ wyżarzania po spawaniu oraz modyfikacji składu chemicznego spoin na właściwości mechaniczne złączy przedstawione są w oparciu o próby twardości, statyczne próby rozciągania i zginania oraz próby udarności. Wyniki prób wskazały najlepsze właściwości złącza w stanie po obróbce cieplnej w temperaturze 920°C. Złącza ze spoinami wzbogaconymi w tytan prezentowały niższe wartości własności wytrzymałościowych oraz plastycznych.

W przeprowadzonych statycznych próbach rozciągania Doktorant rejestrował i analizował zmiany wytrzymałości na rozciąganie (R_m), umownej granicy plastyczności ($R_{p0,2}$) oraz wydłużenia (A). Nie jest to właściwe, ponieważ złącza spawane nie są homogeniczne i składają się z obszarów o różnych właściwościach, dodatkowo mogą zawierać niezgodności spawalnicze. Dlatego normy oraz przepisy okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych nakazują określenie tylko R_m oraz miejsca zerwania próbki. Analiza zmian umownej granicy plastyczności ($R_{p0,2}$) oraz wydłużenia (A) takich próbek nie wnosi wiarygodnych informacji charakteryzujących właściwości doczołowych złączy spawanych.

Podobne uwagi mam do przedstawionej oceny wyników prób zginania złączy spawanych. Doktorant analizuje maksymalne naprężenia zginające uzyskane podczas próby. Natomiast normy, w tym wcześniej przywołana PN-EN-ISO15614-1, wskazuje jako kryterium oceny plastyczności złączy obecność lub brak pęknięć po stronie rozciąganej próbek – od strony lica bądź grani spoiny. Ponadto doktorant nie przedstawił warunków przeprowadzenia prób, tzn. średnicy trzpienia gnącego oraz kąta zginania próbek.

Na uwagę zasługują przedstawione przez Doktoranta wyniki prób udarności badanych złączy. Rejestrowane był niskie wartości pracy łamania (udarności) obszaru SWC wszystkich badanych złączy, natomiast interesujące jest spadek udarności w spoinach wzbogaconych w tytan. Doktorant wyjaśnia to zjawisko ujawniając na rys. 50 i 52 granice ziaren w obszarze spoin silnie obsadzonych niemal ciągłą siatką wydzielen, prawdopodobnie węglików, natomiast Doktorant nie przedstawił analizy składu chemicznego tych wydzielen.

Doktorant wiąże poprawę właściwości mechanicznych złączy spawanych ze zjawiskiem rozdrobnienia ziaren zachodzącego w czasie wyżarzania po spawaniu. Wielkość ziaren

określił na podstawie metody przecięć i zliczania ziaren wg PN-EN ISO 643. Jest to wiarygodna porównawcza metoda oceny wielkości ziarna w stali o ile odcinki pomiarowe są usytuowane w jednorodnym obszarze materiału rodzimego (MR), SWC bądź spoiny. Na rys. 26b pokazany jest odcinek pomiarowy przebiegający od MR do spoiny poprzez gruboziarnisty obszar SWC. Uważam, że taki pomiar nie może być uwzględniony do analizy.

Doktorant przeprowadził badania odporności na korozję międzykrystaliczną wg PN-ISO 3651-2 (próba Monypenny Straussa). Udowodnił, niską odporność korozyjną złączy w ze spoinami wzbogaconymi w tytan, gdzie granice ziaren pokryte były ciągłą siatką wydzielen. Moje zastrzeżenia budzi sposób wykonania próby po ekspozycji w roztworze korozyjnym. Norma wymaga zginania próbek do kąta 90 stopni i oceny obecności lub braku pęknięć. Na rys 49 a, b, c widać próbki T2P1, T2P3 i T2P4, w których nie wykryto pęknięć, ale nie zostały one zgięte do kąta 90°.

W podsumowaniu Autor przedstawia zmiany właściwości mechanicznych w zależności od wielkości ziarna w spoinach złączy. Wskazuje na efektywność oddziaływania obróbki cieplnej po spawaniu na rozdrobnienie ziaren w spoinach. Stwierdza również, że nie udało się w pełni udowodnić drugiej tezy pracy zakładającej polepszenie wszystkich właściwości mechanicznych spoin.

Bazując na wynikach badań Doktorant wskazał optymalną technologię spawania złączy doczołowych ze stali X2CrTiNb18 z uwzględnieniem obróbki cieplnej po spawaniu. Sporządził protokół kwalifikowania technologii spawania (WPQR) pozwalający na zatwierdzenie instrukcji technologii spawania złączy WPS.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

W pracy można wyróżnić osiągnięcia naukowe i wdrożeniowe, do których zaliczam:

- Wykazanie zmian właściwości mechanicznych złączy stali ferrytycznej w wyniku wyżarzania po spawaniu w szerokim zakresie temperatur od 880 do 940°C.
- Określenie wpływu modyfikacji składu chemicznego stopiwa, poprzez wzbogacenie w tytan, na wielkość ziarna uzyskanego w spoinie i właściwości mechaniczne doczołowych złączy spawanych stali ferrytycznej.
- Określenie wpływu warunków spawania i zastosowania obróbki cieplnej po spawaniu na podatność złączy na korozję międzykrystaliczną.

- Opracowanie technologii i jej zatwierdzenie na potrzeby spawania doczołowych złączy blach cienkich z ferrytycznej stali nierdzewnej X2CrTiNb18 (grupa 7.1 wg ISO/TR 15608)

Oceniając pozytywnie rozprawę doktorską kieruję do Doktoranta pytania i uwagi do dyskusji.

- Autor stwierdza rozdrobnienie ziaren ferrytu w SWC oraz spoinach złączy spawanych stali X2CrTiNb18 następujące w wyniku wyżarzania po spawaniu. Proszę wskazać mechanizmy, które są odpowiedzialne za to zjawisko.
- Proszę przybliżyć metodykę pomiaru wielkości ziaren w obszarze SWC złączy. Pytanie to kieruję ze względu na małą szerokość tej strefy.
- Czy oceniony został rozrzut wielkości ziaren w obrębie spoin badanych złączy?
- Czy określono zawartość tytanu rozpuszczonego w osnowie ferrytycznej oraz całkowitą zawartość Ti w spoinach wzbogaconych w ten pierwiastek? Jaki był skład chemiczny wydzieleni tworzących siatkę na granicach ziaren ferrytu?
- Czy Doktorant badał złącza ze spoinami wzbogaconymi w Ti pod kątem obecności pęknięć gorących?
- Proszę przybliżyć technikę przetapiania proszku Ti podczas spawania złączy TP6-TP10. W jaki sposób określono masę proszku Ti przeznaczonego do przetopienia w badanych złączach?
- Jaka zdaniem Doktoranta była przyczyna uzyskania niskich wartości pracy łamania w SWC wszystkich badanych złączy T2P1-T2P10?
- Str. 8, 6w. góra – błędne stwierdzenie dotyczące wyżarzania normalizującego stali nierdzewnych o strukturze ferrytycznej w temperaturze 30-50°C powyżej Ac3. Podobnie na str. 15. Nawiązanie do układu Fe-Fe-3C jest nieuzasadnione.
- Str. 19 – „*Korozja międzykrystaliczna zwana inaczej uczuleniem lub uwrażliwieniem*” Uczulenie jest to zjawisko występujące w mikrostrukturze stali nierdzewnych, które może powodować podatność do korozji międzykrystalicznej.
- Str. 43 – Tabele 6 i 7 - brak informacji dotyczącej wymaganego składu chemicznego i właściwości mechanicznych stali X2CrTiNb18 zgodnie z PN EN 10088.
- Str. 49 W próbie Monypenny Straussa używa się kwasu siarkowego, a nie siarczanowego.

- Str. 81– w tabeli 29 nie podano miejsca zerwania próbek w statycznych próbach rozciągania.
- Str. 91 – Jaki młot udarnościowy (o jakiej maksymalnej energii), użyto w próbach udarności?

Pod względem edytorskim rozprawę oceniam dobrze. Jest napisana poprawnym i jasnym językiem. Znalazłem niewielką liczbę błędów stylistycznych i edycyjnych. Dokumentacja wyników badań przedstawiona w postaci tabel i rysunków jest szczegółowa i starannie opracowana.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną rozprawę doktorską uważam za interesującą i wartościową. Pan mgr inż. Grzegorz Walczyk zrealizował zadanie badawcze oraz wdrożeniowe będące przedmiotem rozprawy. Wykazał umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz opracowania i analizy uzyskanych wyników. Przedstawione w rozprawie wnioski są udokumentowane. Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy, klarowne sformułowanie celów pracy oraz ich osiągnięcie na drodze dobrze zaplanowanych i przeprowadzonych badań pozytywnie oceniam przedstawioną rozprawę doktorską.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że przedstawiona przez mgr inż. Grzegorza Walczyka praca pt. "Optymalizacja parametrów obróbki cieplnej w kształtowaniu właściwości spoin stali ferrytycznych" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20.07.2018 r. i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. J. Łabanowski

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)