

Dr hab. inż. Marek St. Węglowski
Sieć Badawcza Łukasiewicz –
Górnośląski Instytut Technologiczny
Centrum Spawalnictwa
ul. Karola Miarki 12-14
44-100 Gliwice

Gliwice, 27 grudnia 2024 r.

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Grzegorza Walczyka

**pt.: „Optymalizacja parametrów obróbki cieplnej w kształtowaniu właściwości spoin
stali ferrytycznych”**

Promotor: dr hab. inż. Marek T. Roszak, Prof. PŚ.

Promotor pomocniczy: dr inż. Wojciech Pakiela

Opiekun z przemysłu: mgr inż. Paweł Snopek

I. Podstawa opracowania

Recenzja została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.).

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

1. Ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
2. Ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
3. Ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

II. Informacja o rozprawie

Ferrytyczne stale nierdzewne są głównie przeznaczone do pracy w środowisku korozyjnym. Stosowane są w przemyśle motoryzacyjnym, spożywczym i gastronomicznym. Stale te w przeciwieństwie do stali austenitycznych cechuje się własnościami magnetycznymi. Ponadto charakteryzują się lepszą przewodnością cieplną i mniejszą rozszerzalnością cieplną. Stale ferrytyczne są również bardziej odporne na korozję naprężeniową i wżerową. Zastosowana w pracy doktorskiej stal w gatunku X2CrTiNb18 jest stabilizowana tytanem i niobem, co poprawia jej własności mechaniczne i odporność na korozję międzykrystaliczną. Stal stosowana jest przy budowie wymienników ciepła pracujących do temperatury 800°C,

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 02.01.2025
RDJMa/6151/2025
nr zał.

urządzeń pracujących w środowisku chlorków, roztworów soli, pary wodnej lub kwasu octowego, azotowego lub fosforowego.

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Walczyka, pt. „Optymalizacja parametrów obróbki cieplnej w kształtowaniu właściwości spoin stali ferrytycznych” oraz podjęta przez niego tematyka badawcza jest w pełni uzasadniona. **Tematyka rozprawy wpisuje się w zakres dyscypliny inżynieria materiałowa. Podjęta praca badawcza ma aspekt poznawczy oraz wdrożeniowy. Ma ścisły związek z potrzebami przemysłu w zakresie stosowania technologii spawania łukowego stali ferrytycznych nierdzewnych.**

Praca została zrealizowana w ramach programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Doktorat Wdrożeniowy IV”, liczy 135 stron w formacie A4, jest napisana w języku polskim i została podzielona na pięć części, tj.: wstęp, przegląd piśmiennictwa, badania własne, podsumowanie – analiza wyników badań oraz wnioski. Przegląd literatury obejmuje trzy rozdziały dotyczące charakterystyki operacji obróbki cieplnej ferrytycznych stali nierdzewnych, charakterystyki ferrytycznych stali nierdzewnych oraz kształtowania własności złączy spawanych ferrytycznych stali nierdzewnych. W ramach części eksperymentalnej w rozdziale trzecim przybliżono: plan badań, metodykę badawczą, przygotowanie próbek do badań i wyniki badań. Praca zawiera również załączniki: Załącznik C - Wstępna Instrukcja Technologiczna Spawania (pWPS) nr p T2P4-23, Załącznik B - Instrukcja obróbki cieplnej nr OC2 dla próbek T2P4 i T2P9, Załącznik C - Sprawozdanie z badań wizualnych nr 479/BLN/2023/09, Załącznik D - Sprawozdanie z badań radiograficznych nr 479LN/2023/09, Załącznik E - Sprawozdanie z badań penetracyjnych nr 479ALN/2023/09, Załącznik F – Protokół Kwalifikowania Technologii Spawania (WPQR) nr PL09/313803/24, który został wystawiony przez jednostkę notyfikowaną TÜV THÜRINGEN.

Autor w przeglądzie literatury odnosi się do 96 pozycji literaturowych, głównie są to najnowsze prace w języku angielskim. Przybliżono charakterystykę obróbki cieplnej stosowanej w procesach spawania, w tym podgrzewanie wstępne i obróbkę cieplną po spawaniu. Zdefiniowano temperaturę międzyściogową oraz opisano wpływ chłodzenia podczas spawania na rozrost ziaren ferrytu. W oparciu o cytowaną literaturę Autor przybliżył również charakterystykę ferrytycznych stali nierdzewnych. Opisał stale I, II i III generacji wraz z ich zastosowaniem oraz przedstawił wpływ poszczególnych pierwiastków stopowych na własności stali. Opisano również metody kształtowania własności złączy spawanych ferrytycznych stali nierdzewnych, w tym przybliżono wpływ: metody spawania, gatunku materiału dodatkowego do spawania, rodzaju gazu osłonowego, zakresu parametrów technologicznych spawania oraz parametrów obróbki cieplnej po spawaniu. Omówiono główne problemy jakie mogą wystąpić w trakcie spawania, tj.: rozrost ziaren ferrytu w strefie wpływu ciepła (SWC) oraz w spoinie, spadek własności wytrzymałościowych oraz odporności na korozję. Przedstawiono zalecenia technologiczne umożliwiające uzyskanie poprawnych złączy spawanych.

Praca łączy zagadnienia związane z technologią spawania łukowego stali i obróbką cieplną złączy spawanych. W pracy do oceny jakości złączy spawanych zastosowano badania nieniszczące (wizualne, penetracyjne i radiograficzne) oraz badania niszczące (próbę rozciągania, badanie na zginanie, pomiary twardości, badania udarność, badania korozyjne oraz badania metalograficzne). Takie połączenie zagadnień oraz metodyki badawczej wskazuje na dobre przygotowanie Doktoranta i jego szeroką wiedzę w obszarze podjętej w ramach pracy tematyki badawczej.

Można zatem stwierdzić, iż przedstawiona do oceny rozprawa doktorska potwierdza bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

III. Ocena rozprawy

Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnej literatury, związanej ze spadkiem własności wytrzymałościowych obszaru spoin ferrytycznych stali nierdzewnych, został określony cel prac doktorskiej, tj.: „Dobór parametrów obróbki cieplnej i ocena ich wpływu na wybrane własności spoin stali ferrytycznych nierdzewnych”. Ponadto przeprowadzone wstępne założenia umożliwiły przyjęcie tez:

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

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

W ramach recenzowanej pracy, w celu udowodnienia tez, Doktorant wykonał badania doświadczalne obejmujące:

- opracowanie wstępnej technologii spawania metodą TIG złączy doczołowych,
- opracowanie metody wprowadzania proszku tytanu do rowka spawalniczego,
- wykonanie złączy spawanych ze stali nierdzewnej ferrytycznej w gatunku X2CrTiNb18,
- przeprowadzenie badań nieniszczących, w tym badań wizualnych, penetracyjnych, radiograficznych,
- przeprowadzenie badań niszczących złączy, w tym próby rozciągania, badań na zginanie, badań udarności, pomiarów twardości,
- przeprowadzenie badań metalograficznych,
- przeprowadzenie badań odporności na korozję międzykrystaliczną,
- kwalifikowanie technologii spawania,
- analizę wyników badań.

Przeprowadzony przez Doktoranta zakres prac należy uznać za prawidłowo dobrany. Badania umożliwiły pełną charakterystykę uzyskanych złączy spawanych łukowo pod względem jakości wykonania, własności mechanicznych oraz mikrostruktury. Zaplanowane i przeprowadzone badania doświadczalne przy użyciu technik badawczych oraz analiza wyników potwierdza, że **rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora.**

W celu opracowania finalnych parametrów obróbki cieplnej złączy spawanych w pierwszej kolejności przygotowano wstępną Instrukcję Technologiczną Spawania (pWPS), którą zamieszczono w pracy w postaci Załącznika A. Doktorant jako materiał dodatkowy zastosował materiał o takim samym składzie chemicznym jak materiał spawany. Dodatkowo

dla wytypowanych złączy spawanych do rowka spawalniczego został wprowadzony proszek tytanu w ilości 1 lub 2 g/ 350 mm złącza. Jako gaz osłonowy zastosowano Ar (99,99 %). Złącza wykonano dwoma ściegami. Wytypowane złącza były następnie poddane obróbce cieplnej w piecu muflowym. Minimalna temperatura wyżarzania normalizującego dla ferrytycznych stali nierdzewnych została określona przez jej producenta i wynosiła 880°C. Nagrzewanie próbek do temperatury 300°C odbywało się bez określonej technologicznie szybkości nagrzewania. Po osiągnięciu temperatury 300°C przez nagrzewany wsad, nagrzewanie odbywało się z szybkością wynoszącą 200°C/h. Natomiast chłodzenie po wygrzewaniu realizowano z szybkością wynoszącą 200°C/h do temperatury 300°C, po osiągnięciu tej temperatury następowało swobodne chłodzenie z piecem. W ramach pracy wyżarzanie przeprowadzono w temperaturze: 880, 900, 920 i 940°C.

Następnie w pracy przedstawiono wyniki badań wstępnych, których celem było potwierdzenie założonych w pracy tez. Doktorant przedstawił wyniki pomiarów twardości w złączach spawanych (str. 56÷61). Uzyskane wyniki badań wykazały, że dodatek tytanu wpłynął na wzrost twardości w spoinie oraz w SWC. Zastosowanie proszku tytanu umożliwiło wzrost twardości o ok. 34% dla spoiny oraz ok. 8% dla SWC (rys. 23, próbka P1 i P4). Natomiast wzrost temperatury w trakcie obróbki cieplnej spowodował spadek twardości w spoinie z 210 HV do 177 HV (rys. 23, próbka P4 i P6). W następnej części rozprawy zostały przedstawione wyniki prób rozciągania złączy spawanych. Doktorant wykazał, że wzrost temperatury obróbki cieplnej powoduje wzrost wytrzymałości złączy spawanych. Jest to zwłaszcza widoczne dla złączy spawanych z dodatkiem proszku tytanu. Uzyskano wzrost R_m o 30% (rys. 24, próbka P4 i P6). W kolejnym etapie pracy przedstawiono wyniki pomiarów wielkości ziarna (liczba ziaren) w zależności od zastosowanej obróbki cieplnej oraz proszku tytanu. Najmniejsze ziarna (największa liczba ziaren) zaobserwowano w spoinie w złączu spawanym z dodatkiem proszku tytanu obrobionym cieplnie w temperaturze 880°C. Natomiast największe ziarna (najmniejsza liczba ziaren) występowała w spoinie złącza nie obrobionego cieplnie, w którym nie zastosowano proszku tytanu (rys. 27, próbka P1 i P5). Uzyskane wyniki potwierdziły, że zastosowanie proszku tytanu umożliwia rozdrobnienie mikrostruktury (zwiększenie liczby ziaren) w spoinie złącza spawanego. Jednak moim zdaniem Doktorant zbyt pobieżnie opisał uzyskane wyniki, nie podjął się wyjaśnienia przyczyn przedstawionych zmian twardości, wytrzymałości i wielkości ziarna w złączach spawanych w odniesieniu do przeprowadzonej obróbki cieplnej oraz wprowadzanego proszku tytanu.

W drugiej części rozprawy doktorskiej Doktorant przedstawił wyniki badań docelowych złączy spawanych. Przeprowadzone badania nieniszczące, tj. wizualne, penetracyjne oraz radiograficzne potwierdziły wysoką jakość złączy spawanych metodą TIG. Doktorant zamieścił w pracy, w postaci załączników, raporty z przeprowadzonych badań w akredytowanym laboratorium STALTECH S.C. w Łazach (nr uznania LBU-303/05-20). Dla badanych złączy uzyskano poziom jakości B zgodnie z normą PN-EN ISO 5817. Następnie Doktorant przeprowadził badania twardości w złączach spawanych (str. 70-80). Pewną niedogodnością w interpretacji przedstawianych wyników jest brak rysunku przedstawiającego zbiorcze wyniki pomiarów twardości dla złączy spawanych oznaczonych T2P1÷T2P10. Przeprowadzone badania wykazały (dla złączy spawanych bez użycia proszku tytanu), iż zastosowanie obróbki cieplnej w temperaturze 880°C spowodowało wzrost twardości w spoinie o 6%, natomiast wzrost temperatury obróbki do 920°C spowodował spadek twardości o 6%, a dla temperatury 940°C spadek o 8%, w odniesieniu do złącza referencyjnego (oznaczonego T2P1). Zastosowanie proszku tytanu w ilości 2 g/350 mm umożliwiło natomiast uzyskanie wyższych

twierdności w spoinie. Przy zastosowaniu obróbki cieplnej w temperaturze 880°C nastąpił wzrost twierdności w spoinie o 16%, dla temperatury 900°C o 20%, dla temperatury 920°C o 44%, natomiast dla temperatury 940°C o 29% w odniesieniu do złącza referencyjnego oznaczonego jako T2P1 nie poddanego obróbce cieplnej i spawanego przy użyciu proszku tytanu. W kolejnym podrozdziale przedstawiono wyniki próby rozciągania złączy spawanych. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant wykazał, że obróbka cieplna po spawaniu spowodowała spadek wytrzymałości na rozciąganie złączy spawanych względem złącza referencyjnego T2P6 (złącze spawane z dodatkiem proszku tytanu). Wytrzymałość na rozciąganie złącza spawanego poddanego obróbce cieplnej w temperaturze 880°C spadła o 25%, w temperaturze 900°C o 14%, w temperaturze 920°C o 29%, a w temperaturze 940°C o 49%. Równocześnie nie stwierdzono istotnych zmian wytrzymałości złączy spawanych bez dodatku proszku tytanu poddanych obróbce cieplnej w różnych temperaturach.

W kolejnym rozdziale Doktorant przedstawił wyniki badań wytrzymałości na zginanie złączy spawanych i potwierdził, że samo wprowadzenie dodatku stopowego podczas spawania nie wpłynęło zasadniczo na wytrzymałość złączy nie podanych obróbce cieplnej. Natomiast wytrzymałość na zginanie złączy spawanych bez dodatku stopowego uległa zmniejszeniu przy wzroście temperatury wyżarzania, nawet o 35% od strony lica oraz o 28% od strony grani względem złącza referencyjnego (T2P1). Doktorant również wykazał, że wzrost temperatury wyżarzania spowodował spadek wytrzymałości na zginanie nawet o 27% od strony spoiny i o 32% od strony grani względem złącza spawanego nie obrobionego cieplnie i spawanego z dodatkiem proszku tytanu. Należy jednak zauważyć, iż zgodnie z normą PN-EN ISO 5173 pkt. 7.5. badanie na zginanie złączy spawanych jest realizowane do uzyskania kąta gięcia 180°, a wystąpienie ewentualnych pęknięć jest analizowane zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-1 pkt. 7.4. Doktorant nie odnosi się jednak w pracy do tych wymagań. Nie umniejsza to oczywiście wartości przedstawionych wyników badań na zginanie, które mają wysoką wartość naukową i poznawczą. W pracy przedstawiono również wyniki badań udarności złączy spawanych. Wykazano, że obróbka cieplna wpływa na spadek udarności w spoinie złączy spawanych. Największy spadek o 98% względem materiału rodzimego zaobserwowano dla złącza wykonanego z dodatkiem proszku tytanu i wyżarzanego w temperaturze 880°C (3 J/cm²). Natomiast najwyższą udarność uzyskano dla złącza spawanego bez dodatku proszku tytanu i nie poddanego obróbce cieplnej – 113 J/cm², tj. spadek o 33% względem materiału rodzimego (173 J/cm²). Moim zdaniem Doktorant jednak zbyt pobieżnie przedstawił uzyskane wyniki, nie podjął się wyjaśnienia przyczyn przedstawionych zmian twierdności, wytrzymałości i udarności w odniesieniu do wymagań dla złączy spawanych i docelowego kwalifikowania finalnej technologii spawania. Zwłaszcza uzyskanie niskich udarności dla niektórych zastosowań praktycznych może być problematyczne, biorąc pod uwagę wysoką udarność materiału rodzimego.

W rozprawie w kolejnym rozdziale (str. 95÷104) przedstawiono wyniki pomiarów wielkości ziarna w spoinie i w SWC złączy spawanych. Doktorant wykazał, że obróbka cieplna złączy spawanych bez dodatku proszku tytanu w temperaturze 920°C i 940°C umożliwiła rozdrobnienie ziaren w spoinie. Natomiast nie zaobserwowano istotnych zmian w wielkości ziaren po wyżarzeniu w temperaturze 880°C lub 900°C, w porównaniu do złącza nie obrobionego cieplnie. Ponadto wykazano, że zastosowanie tytanu jako dodatku stopowego spowodowało wzrost liczby ziaren o 31% w odniesieniu do złącza spawanego bez dodatku stopowego i nie poddanego obróbce cieplnej. Wykazano również, że zastosowanie obróbki cieplnej złączy spawanych z dodatkiem tytanu umożliwiło zmniejszenie wielkości ziaren spoinie – wzrost liczby ziaren o 43% przy temperaturze wyżarzania 880°C.

W ramach zrealizowanej pracy Doktorant przeprowadził również badania odporności na korozję międzykrystaliczną zgodnie z normą PN-EN ISO 3651-2. Wykazano, że złącza spawane bez dodatku tytanu oznaczone numerami T2P1÷T2P5 oraz złącze spawane z dodatkiem tytanu i wyżarzane w temperaturze 900°C nie wykazały pęknięć. Natomiast złącze z dodatkiem tytanu i wyżarzone w temperaturze 880°C uległo zerwaniu. Pozostałe złącza uległy pęknięciu w SWC.

Rozdział badania własne Doktorant kończy przedstawiając wyniki rozkładu pierwiastków stopowych w spoinie (str. 107÷112). Zwrócono uwagę na rozmieszczenie tytanu, chromu, krzemu oraz węgla. Wykazano, wyraźne przesycenie tytanem na granicach ziaren w spoinie w złączach spawanych z dodatkiem tytanu (T2P6÷T2P10). Ponadto zaobserwowano, równomierne rozmieszczenie chromu zarówno w ziarnach jak i na granicach ziaren w spoinach złączy spawanych bez dodatku stopowego tytanu. Równomierne rozmieszczenie krzemu zarówno w ziarnach jak i na granicy ziaren przedstawiono dla spoin w złączach T2P1 oraz T2P2, które były spawane bez dodatku tytanu.

W rozdziałach podsumowanie – analiza wyników badań oraz wnioski Doktorant przedstawił w syntetyczny sposób uzyskane wyniki badań. Potwierdził również postawioną tezę nr 1, że „Obróbka cieplna spoin z ferrytycznych stali nierdzewnych wraz z zastosowaniem materiału dodatkowego do spawania powinna ograniczyć zjawisko rozrostu ziaren ferrytu w spoinie”. Równocześnie wskazał, że druga teza „Ograniczenie zjawiska rozrostu ziarna występującego w ferrytycznych stalach nierdzewnych wynikających z zastosowania obróbki cieplnej złączy spawanych powinno polepszyć uzyskiwane własności mechaniczne spoin” została potwierdzona częściowo.

Do najważniejszych osiągnięć wynikających z realizacji pracy doktorskiej można zaliczyć:

- wykazanie korelacji pomiędzy temperaturą obróbki cieplnej a własnościami złącza spawanego metodą TIG ze stali ferrytycznej nierdzewnej,
- wykazanie, że wprowadzenie dodatku tytanu do spoiny wpływa na własności (wytrzymałość na rozciąganie, twardość, udarność) spoiny w złączu spawanym ze stali ferrytycznych,
- wykazanie wpływu obróbki cieplnej oraz wprowadzenia dodatku tytanu na rozkład pierwiastków (Ti, Cr, Si, C) w spoinie,
- wykazanie wpływu obróbki cieplnej oraz wprowadzenia dodatku tytanu na odporność na korozję międzykrystaliczną,
- opracowanie finalnej technologii spawania metodą TIG złączy doczołowych ze stali ferrytycznej nierdzewnej.

Uwagi

Przedstawiona do recenzji rozprawa jest napisana poprawnie pod względem technicznym oraz językowym. Również stosowana terminologia, co do zasady jest właściwa. Niektóre kwestie w pracy budzą jednak wątpliwości i wymagają dodatkowych wyjaśnień. Poniżej przedstawiam uwagi ogólne oraz pytania do dyskusji.

Uwagi ogólne:

- Literatura powinna być jednolicie sformatowana (str. 126÷133). Doktorant powinien zastosować jednolity system przedstawienia danych literaturowych na jaką powołuje się w pracy. Przy niektórych pozycjach brak jest roku wydania, woluminu, numeru stron.

Ponadto w pracy literatura powinna być cytowana wg kolejności powoływania lub alfabetycznie.

- W pracy należy stosować jednolite nazwy procesów spawania. Zgodnie z normą PN-EN ISO 4063:2023-10 „Spawanie, zgrzewanie, lutowanie i cięcie. Nazwy procesów i numery referencyjne” wyróżniamy proces spawania TIG oraz MIG/MAG. Doktorant stosuje natomiast w pracy zamiennie określenia TIG oraz GTA dla tego samego procesu spawania.
- W pracy Doktorant stosuje nazwę „statystyczna próba rozciągania”, jednak zgodnie z normą na jaką się sam powołuje tj. PN-EN ISO 4136:2022-12, prawidłowe określenie to próba rozciągania.
- W pracy Doktorant stosuje nazwę „statystyczna próba zginania”, jednak zgodnie z normą na jaką się sam powołuje tj. PN-EN ISO 5173:2023-06, prawidłowe określenie to badanie na zginanie.
- W pracy nie przedstawiono wyników badań metalograficznych makroskopowych złączy spawanych. Badanie takie są niezbędne na etapie kwalifikowania technologii spawania zgodnie z normą PN-EN ISO 15614, którą również stosuje Doktorant.

Uwagi do dyskusji

1. Doktorant w rozprawie często posługuje się określeniem *spoina* zamiast *złącze spawane*. Należy zaznaczyć, że złącze spawane składa się ze spoiny, strefy wpływu ciepła oraz materiału rodzimego. Również w tytule, w celu głównym oraz w tezie nr 1 wyszczególniona jest spoina jako obiekt badań. Równocześnie proces obróbki cieplnej był prowadzony dla całego złącza, a próba rozciągania i badanie na zginanie dotyczyły złącza spawanego, a nie samej spoiny (stopiwa). Wobec powyższego proszę o wyjaśnienie zaistniałych nieścisłości występujących w pracy. Czy obiektem badań było złącze spawane czy też sama spoina, czy uzyskane wyniki badań dotyczyły spoin czy złączy spawanych?
2. W pracy Doktorant przedstawił wyniki badań nieniszczących oraz niszczących, przeprowadzonych zgodnie z normami. Część badań została jednak wykonana na podstawie norm, które mają nowsze wydania, jak np.: PN-EN ISO 6507, PN-EN ISO 4136, PN-EN ISO 643, PN-EN ISO 17637, PN-EN ISO 9016, PN-EN ISO 3452, PN-EN ISO 3651, PN-EN ISO 23277, PN-EN ISO 5817, PN-EN ISO 15613. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego nie stosowano najnowszych wydań norm w trakcie realizacji badań i opracowywania technologii spawania?
3. Na str. 5 Doktorant wskazał, iż zastosowanie dodatkowego procesu obróbki cieplnej ma na celu relaksację powstałych naprężeń. Proszę o udzielenie informacji czy naprężenia pozostające były mierzone, a jeśli tak to jakie wyniki uzyskano przed i po obróbce cieplnej?
4. Na str. 10 Doktorant wskazał, iż występuje zjawisko wysokiego utwardzenia poprzez zahartowanie strefy wpływu ciepła i obszaru spoiny w wyniku pojawienia się naprężeń spawalniczych, powstających podczas krzepnięcia ciekłego jeziora spawalniczego. Proszę o wyjaśnienie wpływu naprężeń spawalniczych na zjawisko wysokiego utwardzania.
5. Na str. 11 napisano, iż w przypadku ferrytycznych stali nierdzewnych trzeciej generacji stosowanie podgrzewania wstępnego oraz utrzymywanie odpowiedniej temperatury międzyścięgowej może być wręcz szkodliwe ze względu na podatność do niekontrolowanego rozrostu ziaren ferrytu w wyniku wprowadzenia ciepła podczas wszelkich procesów cieplnych. Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób utrzymywanie odpowiedniej temperatury międzyścięgowej może być szkodliwe?

6. Na str. 15 napisano łatwa dyfuzja pierwiastków stopowych. Czy Doktorant mógłby wyjaśnić co ma na myśli pisząc łatwa dyfuzja i jakie pierwiastki są brane pod uwagę?
7. Na str. 16 napisano, że stale ferrytyczne nierdzewne charakteryzują się mniejszą podatnością na odkształcenie wsteczne. Proszę o wyjaśnienie, co Doktorant ma na myśli w aspekcie odkształcenia wstecznego?
8. Na str. 16 napisano, że stale ferrytyczne nierdzewne charakteryzują się wyższą granicą plastyczności niż popularne austenityczne stale 304. Natomiast na str. 17 na rysunku 2 wskazano podobny poziom granicy plastyczności, a na str. 18 napisano, że stale te charakteryzują się niską granicą plastyczności. Proszę o doprecyzowanie przedstawionych informacji.
9. Na str. 17 napisano, że stale ferrytyczne nierdzewne charakteryzują się minimalizacją odpadów. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
10. Na str. 24 napisano, że najczęstszą metodą wzbogacania ferrytycznych stali nierdzewnych w nikiel jest dodawanie go poprzez materiał dodatkowy podczas spawania. Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób materiał podstawowy może być wzbogacany pierwiastkami w trakcie spawania?
11. Na stronie 31 napisano, że molibden oraz nikiel podczas chłodzenia przemieniają austenit w martenzyt usytuowany na granicach ziaren, hamując w ten sposób szybkość rozrostu ziaren. Proszę o wyjaśnienie tego zjawiska.
12. Na str. 33 napisano, że w celu wyboru metody spawania charakteryzującej się jak najmniejszą ilością wprowadzanego ciepła podczas spawania, należy dokonać wyboru na podstawie współczynnika „k”. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób wartość współczynnika sprawności cieplnej może być brana pod uwagę przy wyborze technologii spawania przy kryterium ograniczonej ilości ciepła?
13. Na str. 49 opisano badanie na zginanie zgodnie z normą PN-EN ISO 5173. Proszę o doprecyzowanie jaki trzpień gnący został zastosowany w trakcie badań?
14. Na str. 52 napisano, iż wybór metody spawania 141, podyktowany jest niższą ilością wprowadzonego ciepła podczas spawania w porównaniu do innych popularnych metod spawania takich jak np. metoda MIG (131), czyli spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego. Proszę o wyjaśnienie na podstawie jakich danych Doktorant stwierdził, że metoda 141 charakteryzuje się niższą ilością wprowadzonego ciepła podczas spawania niż metoda 131? Proszę o wyjaśnienie czy jakieś inne kryteria były brane pod uwagę przy wyborze technologii spawania?
15. Na str. 53 napisano, iż proszek tytanu dodawano metodą zasypową polegającą na zasypywaniu rowka spawalniczego przed spawaniem odmierzoną wcześniej odpowiednią ilość proszku zgodnie z tabelami 10a i 10b. Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób zapewniono równomierność wprowadzania proszku do rowka spawalniczego na jego długości? Ponadto, proszę o przedstawienie informacji na jakie podstawie dobrano ilość proszku 1 lub 2 g?
16. Na str. 54 wskazano, że obróbkę cieplną prowadzono w temperaturze 880, 900, 920 i 940°C przez 20 min. Proszę o wyjaśnienie, na jakiej podstawie dobrano temperaturę obróbki i czas?
17. Na str. 61, wskazano, że złącza próbne spoin zostały poddane statycznej próbie rozciągania, uzyskane wartości naprężenia rozciągającego, granicy plastyczności i wydłużenia zestawiono w tabeli 18 oraz na rysunku 24, wykresy naprężenie - odkształcenie dla poszczególnych próbek przedstawiono na rysunku 25. Proszę o wyjaśnienie, czy w trakcie próby rozciągania był stosowany ekstensometr? Proszę o wyjaśnienie, w jakim celu

- wyznaczono granicę plastyczności i wydłużenie dla złącza spawanego? W jaki sposób Doktorant odnosi wartości R_e i A do złącza spawanego, które nie jest jednorodnym materiałem pod względem własności mechanicznych? Proszę również o wyjaśnienie, dlaczego na rysunku 25 przedstawiono wartość siły standardowej [N]?
18. Na str. 75÷78 przedstawiono wyniki pomiarów twardości w złączach spawanych w postaci graficznej. Proszę o wyjaśnienie przyczyny spadku twardości w spoinie biorąc pod uwagę gatunek zastosowanego materiału dodatkowego do spawania oraz rodzaj zastosowanej obróbki cieplnej.
 19. Na str. 81 w tabeli 29a przedstawiono wyniki próby rozciągania złączy spawanych. Proszę o wyjaśnienie uzyskanych wyników, biorąc pod uwagę gatunek zastosowanego materiału dodatkowego do spawania oraz rodzaj zastosowanej obróbki cieplnej.
 20. Na str. 92 tabeli 34 oraz str. 93 tabela 35, przedstawiono wyniki pomiarów uderowości złączy spawanych. Proszę o wyjaśnienie uzyskanych wyników, biorąc pod uwagę gatunek zastosowanego materiału dodatkowego do spawania oraz rodzaj zastosowanej obróbki cieplnej.
 21. Na str. 119 napisano, iż dodatek proszku tytanu podczas spawania spowodował rozdrobnienie ziaren zarówno w SWC jak i w spoinie. Proszę o doprecyzowanie, w jaki sposób nastąpiło rozdrobnienie ziarna w SWC?
 22. Na stronie 119 napisano, iż rozdrobnienie ziarna poprzez wprowadzenie proszku tytanu do spoiny podczas spawania zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie R_m niezależnie od temperatury przeprowadzonej obróbki cieplnej. Proszę o wyjaśnienie tego efektu.
 23. Na stronie 125 napisano, że w wyniku przeprowadzonych badań uzyskano uznanie technologii spawania WPQR. Doktorant nie zamieścił jednak w pracy finalnych parametrów technologicznych spawania (WPS), a jedynie wstępną instrukcję technologiczną spawania pWPS. Proszę o przedstawienie finalnej instrukcji technologicznej spawania.
 24. Jakie aspekty wdrożeniowe zostały osiągnięte w wyniku realizacji pracy. Czy technologia spawania zgodnie z protokołem kwalifikowania WPQR nr PL09/313803/24 oraz obróbka cieplna zgodnie z instrukcją nr OC2 są stosowane w praktyce lub będą stosowane. Jeśli tak proszę o doprecyzowanie jakie elementy będą wykonywane?

Uwagi szczegółowe

Moja ogólna ocena rozprawy doktorskiej jest bardzo dobra, jednak przy wnikliwej lekturze ciekawego tekstu nasunęły się uwagi szczegółowe, które przedstawiam. Wskazane uwagi powinny być uwzględnione przy ewentualnym publikowaniu wyników rozprawy. Poniższe uwagi nie mają wpływu na końcową pozytywną ocenę pracy.

str. 5, 5 w. od góry: jest „na częściach maszyn”, powinno być „na części maszyn”,

str. 5, 16 w. od góry: jest „dodatków spawalniczych”, powinno być „dodatków stopowych”,

str. 7, 11 w. od dołu: jest „maleją najważniejsze parametry dla własności wytrzymałościowych takich jak: uderowość oraz wytrzymałość na rozciąganie”, powinno być „maleje uderowość oraz wytrzymałość na rozciąganie”,

str. 7, 4 w. od dołu: jest „połączeń spawalniczych”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 7, 4 w. od dołu: jest „wykonanych spoin”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 8, 4 w. od góry: jest „jedną z metod polepszenia własności wytrzymałościowych spoin jest zwiększenie ich udarność”, należy zaznaczyć, iż udarność nie jest cechą wytrzymałościową, a ponadto istotna jest nie tylko udarność w spoinie, ale również w SWC,

str. 8, 6 w. od góry: jest „połączenia”, powinno być „złącza spawane”,

str. 8, 7 w. od góry: jest „wygrzaniu połączenia spawanego”, powinno być „wytrzymaniu ich”,

str. 8, 10 w. od góry: jest „metodach spawania takich jak Friction Stir Welding”, jednak metoda Friction Stir Welding jest metodą zgrzewania, a nie spawania,

str. 8, 14 w. od góry: jest „minimalne możliwe wprowadzenie ciepła”, powinno być „ograniczenia ilości ciepła wprowadzonego”,

str. 8, 11 w. od dołu: jest „spoin”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 8, 3 w. od dołu: jest „spoin”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 9, 11 w. od góry: jest „łączenia”, powinno być „spawania”,

str. 9, rys. 1: jest „szybkość”, powinno być „szybkością”,

str. 12, w. 2 od góry: jest „chłodzenie kriogeniczne odniosło żądany efekt, czyli ograniczenie rozrostu ziaren ferrytu podczas procesów cieplnych jest odpowiedni przepływ ciekłego azotu”, powinno być „chłodzenie kriogeniczne umożliwiło ograniczenie rozrostu ziaren ferrytu podczas procesów cieplnych niezbędnym jest, zapewnienie odpowiedniego przepływu ciekłego azotu”

str. 12, w. 10 od góry: jest „próbki spawalnicze”, powinno być „złącza spawane”,

str. 12, w. 19 od góry: jest „po spawaniu nastąpił wzrost wielkości ziaren ferrytu, wytrzymałość na rozciąganie oraz obniżenie wartości parametru granicy plastyczności a także twardość”, powinno być „po spawaniu nastąpił wzrost wielkości ziaren ferrytu, wytrzymałości na rozciąganie oraz obniżenie granicy plastyczności, a także twardości”,

str. 12, w. 7 od dołu: jest „połączeń spawanych”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 13, w. 8 od góry: jest „Operacja wyżarzania”, powinno być „Proces wyżarzania”,

str. 14, w. 11 od góry: jest „połączeń”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 15, w. 9 od góry: jest „spoin”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 16, w. 3 od góry: jest „minimalizację”, powinno być „ograniczenie”,

str. 16, w. 10 od dołu: jest „wand”, powinno być „wanad”,

str. 18, w. 5 od góry: jest „wykazuje własnościami magnetyczne”, powinno być „wykazują własności magnetyczne”,

str. 21, w. 2 od góry: jest „ze wzrostem tytanu zmniejsza się spawalność ferrytycznych stali nierdzewnych”, powinno być „ze wzrostem zawartości tytanu spawalność ferrytycznych stali nierdzewnych ulega pogorszeniu”,

str. 21, w. 2 od dołu: jest „Podczas stosowania tytanu jako dodatku stopowego do spawania ferrytycznych stali nierdzewnych należy zwrócić uwagę na jego brak skuteczności w zwalczaniu zjawiska uczulenia podczas ciągłego chłodzenia przy małym dopływie energii spawania”, powinno być „Zastosowanie tytanu jako dodatku stopowego przy spawaniu ferrytycznych stali nierdzewnych nie wpływa zasadniczo na zjawisko uczulenia podczas ciągłego chłodzenia przy małej ilości ciepła wprowadzanego w trakcie spawania”,

str. 22, w. 15 od dołu: jest „wpływ”, powinno być „wpływu”,

str. 24, w. 8 od góry: jest „temperaturę”, powinno być „temperatury”,

str. 28, w. 5, od góry: jest „Opracowanie coraz to nowszych generacji miało głównie na celu opracowanie stali charakteryzującej się”, powinno być „Celem opracowania nowszej generacji stali miało na celu wprowadzenie na rynek stopu charakteryzującego się”,

str. 31, w. 5, od góry: jest „złącza spawanego pozbawionego negatywnych skutków takich jak spadek własności wytrzymałościowych”, powinno być „złącza spawanego charakteryzującego się obniżonymi własnościami mechanicznymi”,

str. 32, w. 13 od dołu: jest „Uzyskaną poprawę ciągliwości oraz plastyczności uzyskano prawdopodobnie”, powinno być „Wzrost ciągliwości oraz plastyczności złącza spawanego uzyskano prawdopodobnie”,

str. 37, w. 4 od dołu: jest „Podczas korozji międzykrystalicznej następuje pobranie chromu z obszarów przygranicznych, węgiel natomiast dyfunduje z całej objętości ziaren w efekcie czego następuje zubożenie na granicach ziaren w chrom efektem czego jest spadek odporności na korozję”, powinno być „Podczas korozji międzykrystalicznej w temperaturze powyżej 500°C szybkość dyfuzji chromu jest znacznie mniejsza od szybkości dyfuzji węgla. Węgiel tworzący węgliki pochodzi z obszaru całego ziarna, natomiast chrom z obszarów przyległych do jego granic, co w efekcie prowadzi do zmniejszenia zawartości chromu i spadku odporności na korozję”,

str. 38, w. 9 od dołu: jest „glinu”, powinno być „aluminium”,

str. 40, rysunek nr 5, opisy powinny być przedstawione w języku polskim,

str. 40, w. 4 od dołu: jest „szybki chłodzeniu”, powinno być „szybkim chłodzeniem”,

str. 41, w. 6 od dołu: jest „Jedną z konieczności zmniejszenia”, powinno być „W celu zmniejszenia”,

str. 42, w. 6 od góry: jest „spoiny”, powinno być „złącza spawanego”,

str. 42, w. 13 od dołu: jest „spoin”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 42, w. 10 od dołu: jest „spoin”, powinno być „złączy spawanych”,

str. 42, w. 2 od dołu: jest „instrukcji spawania”, powinno być „instrukcji technologicznej spawania”,

str. 43, w. 5 od góry: oznaczenie stali powinno mieć odwołanie do normy PN-EN 100088 w której opisane są własności stali,

str. 43, tabele od 6a i 7b: jest „[1Z]”, powinno być „[1c]”,

str. 43, tabele 6b i 7b: jest „[2Z]”, powinno być „[2c]”,

str. 45, w. 9 od dołu: jest „Badania wstępne pomiaru twardości wykonano metodą HV”, nie przedstawiono przy jakim obciążeniu wykonano pomiary,

str. 47, w. 6 od góry: jest „PN-EN ISO 4136”, nie podano odnośnika literaturowego,

str. 48, w. 2 od góry: jest „PN-88/M-69710”, nie podano odnośnika literaturowego,

str. 49, w. 8 od góry: jest „od strony przetopu spoiny”, powinno być „od strony grani”,

str. 49, w. 12 od dołu: jest wynoszącej $t=2,5$ mm, jednak na str. 43 podana jest grubość 2,0 mm (w 6 od góry),

str. 50, w. 2 od dołu: jest „złącza spawalnicze”, powinno być „złącza spawane”,

str. 51, w. 1 od góry: jest „złącza spawalnicze”, powinno być „złącza spawane”,

str. 51, w. 7 od dołu: jest „złącza spawalnicze”, powinno być „złącza spawane”,

str. 51, w. 5 od dołu: jest „złącza spawalnicze”, powinno być „złącza spawane”,

str. od 56 do 61 nie podano przy jakim obciążeniu HV przeprowadzono pomiary twardości złączy spawanych,

str. 87, na rysunku 41 oraz str. 89, na rysunku 42, przedstawiono wykresy zależności siła standardowa – odkształcenie. Jednak jednostką siły jest „N”. Doktorant podał „MPa”,

Przedstawione przeze mnie uwagi krytyczne nie wpływają na pozytywną ocenę całej pracy Pana mgr inż. Grzegorza Walczyka. Moim **zdaniem przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Ma również

ważny aspekt praktyczny w zakresie technologii spawania i obróbki cieplnej złączy spawanych z ferrytycznych stali nierdzewnych.

IV. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa Pana mgr inż. Grzegorza Walczyka, zatytułowana „Optymalizacja parametrów obróbki cieplnej w kształtowaniu właściwości spoin stali ferrytycznych” dotyczy aktualnych zagadnień związanych z technologiami spawania i obróbki cieplnej stali nierdzewnych stosowanych w przemyśle. Rozprawa stanowi rozwiązanie założonego problemu naukowego, umożliwiając opracowanie zestawu parametrów technologicznych spawania łukowego i obróbki cieplnej. Prawidłowy jest ogólny układ rozprawy doktorskiej, a liczne uwagi szczegółowe nie wpłynęły zasadniczo na ocenę ogólną rozprawy.

Po zapoznaniu się z rozprawą Pana mgr inż. Grzegorza Walczyka stwierdzam, że spełnia ona wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Prof. M. Węglowski

/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)