

Prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki

Szczecin, 23 kwietnia 2019

Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie
Instytut Inżynierii Materiałowej
Al. Piastów 19, 70 - 310 Szczecin

OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Małgorzaty Ostromęckiej

**pt. Wpływ częstotliwości pulsującego prądu spawania metodą TIG
na efekty oddziaływania ciepła w wybranych stalach specjalnych**

wykonanej pod opieką naukową promotora
Pana Prof. dra hab. inż. Andrzeja Kolasy

opracowana na podstawie pisma Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki
Warszawskiej Prof. dr hab. inż. Andrzeja Kolasy z dnia 28 lutego 2019 roku w oparciu o uchwałę
Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej z dnia 26 lutego 2019 roku.

Znaczenie problematyki

Wdrożenie prądu pulsującego umożliwiło cykliczne i bez zwarciowe przenoszenie kropli płynnego metalu do jeziora spawalniczego. Źródło prądu wytwarza dwa rodzaje prądu spawania: prąd impulsu zapewniający stabilne przenoszenie ciekłego już metalu do jeziora spawalniczego oraz prąd podstawowy podtrzymujący jarzenie łuku spawalniczego. Pomiędzy impulsami dochodzi do obniżenia temperatury obszaru spawania, co ogranicza strefę przegrzania materiału przy jednocześnie dobrym wtopieniu sterowanym prądem impulsu i łatwej kontroli ilości wprowadzanego ciepła. Prąd podstawowy zapewnia podtrzymanie procesu spawania, czyli formowanie jeziora lub podtrzymanie łuku.

Spawanie prądem impulsowym pozwala na rozszerzenie możliwości zastosowania metody TIG w wyniku racjonalnego kierowania procesem topienia i krystalizacji spoiny. Zmiana amplitudy, częstotliwości, czasu impulsu i prędkości spawania pozwala precyzyjnie regulować ilość ciepła wprowadzonego do metalu. Spawanie impulsowe umożliwia ograniczenie wielkości jeziora spawalniczego, ponieważ w czasie przerwy impulsu następuje krystalizacja spoiny. Ułatwia to spawanie w pozycjach przymusowych oraz spawanie folii i cienkich blach. W efekcie i pozwala na uzyskanie spoin o wysokiej jakości, również wpływa korzystnie na współczynnik kształtu spoiny oraz szerokość strefy wpływu ciepła.

Spoina uzyskuje właściwy kształt i drobnoziarnistą strukturę, jest węższa, nie ma odprysków i ma lepszy przetop przy niższych średnich parametrach prądu.

Dzięki tym walorom metoda TIG PULS znajduje zastosowanie przede wszystkim do spawania cienkich elementów wykonanych ze stali stopowych i rzadziej niestopowych.

W spawaniu metodą TIG PULS najważniejsze są następujące parametry: prąd podstawowy, prąd pulsu, czas trwania i częstotliwość pulsu, a czasami prąd narastania, prąd opadania, czas wyływu gazu przed zajarzeniem łuku i po zakończeniu spawania.

Doświadczenia zdobyte przez lata w obszarze spawania metodą TIG PULS stali stopowych stanowią materiał ułatwiający optymalny dobór wymienionych parametrów spawania w różnych węzłach konstrukcyjnych. Mimo to selekcja częstotliwości pulsacji może nasuwać pytania w aspekcie mechanizmu kształtowania jeziorka spawalniczego, ilości ciepła wprowadzonego do obszaru spawania i wielkości energii liniowej.

Charakterystyka ogólna rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Małgorzaty Ostromęckiej na temat „Wpływ częstotliwości pulsującego prądu spawania metodą TIG na efekty oddziaływania ciepła w wybranych stalach specjalnych”, dotyczy problematyki wpływu częstotliwości pulsacji prądu na wybrane aspekty fizyki łuku i zjawiska zachodzące w jeziorku podczas spawania prądem pulsującym TIG.

Mimo wieloletniego rozwoju, licznych przykładów zastosowań w różnych gałęziach przemysłu oraz szeregu opublikowanych prac badawczych dotyczących spawania metodą TIG PULS nadal istnieją niewyjaśnione zagadnienia z obszaru podstaw teoretycznych procesu. Jednym z nich jest szeroko rozumiany wpływ częstotliwości pulsacji prądu na wynik, bilans cieplny i mechanizm spawania.

Wpływ częstotliwości pulsacji prądu na kinetykę wymiany ciepła podczas spawania, procesy elementarne kształtowania jeziorka spawalniczego, krystalizacji i mikrostruktury spoiny oraz właściwości złącza a także optymalizacja warunków spawania również wymaga następujących badań.

Problematyka ta winna być przedmiotem dalszych prac o charakterze poznawczym i rozwojowym w obszarze doskonalenia technologii, właściwości i możliwości zastosowań. Dlatego wydaje się być nadal aktualną oraz atrakcyjną dla rozważań naukowych.

Analiza kierunków właściwego i uzasadnionego naukowo doboru warunków i parametrów spawania prądem pulsującym TIG stanowi jeden z elementów optymalnego kształtowania struktury i właściwości złącza w całej objętości, jak i jej strefach jest aktualny i stanowi dobrą tematykę dla rozprawy doktorskiej.

Znajdujące się w obszarze zainteresowań budowy i eksploatacji maszyn problemy doskonalenia metod optymalnego projektowania technologii spawania oraz sterowania podstawowymi zjawiskami w czasie procesu kształtowania mikrostruktury i właściwości złącza prądem pulsującym TIG są interesujące od strony badawczej i słusznie zostały obrane jako przedmiot pracy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Ostromęckiej.

Ocena szczegółowa rozprawy

W swych rozważaniach mgr inż. Małgorzata Ostromecka koncentruje się na problematyce znaczenia częstotliwości pulsacji prądu w natapianiu stali austenitycznej 301L i ferrytyczno – austenitycznej 2205 w aspekcie geometrii i mikrostruktury nadtopień.

Rozprawa zawiera 9 rozdziałów a jej objętość wynosi 152 strony zawierające 79 rysunków i 29 tabel, streszczenia i wykaz literatury.

Wykaz cytowanej literatury obejmuje 121 pozycje, z których w jednej Doktorantka jest autorem i w jednej współautorem. Przegląd literatury jest wyczerpujący a cytowane materiały źródłowe dotyczą problematyki rozprawy i pochodzą w znacznej części z ostatnich piętnastu lat.

W pierwszej części rozprawy, w Rozdziale 1 i 2 Doktorantka na podstawie źródeł dokonuje analizy procesu TIG i TIG PULS ze szczególnym odniesieniem do problemu znaczenia częstotliwości prądu pulsującego.

W Rozdziale 3 rozważa wybrane zagadnienia fizyki łuku spawalniczego oraz ruchu cieczy w jeziorce spawalniczym obejmujące m. in. matematyczny opis zjawisk w łuku elektrycznym, rozkład temperatury, ciśnienie i siłę łuku elektrycznego oraz wpływ łuku pulsującego na kształtowanie jeziorca spawalniczego, zjawiska zachodzące w łuku i osłonie gazowej, ruch cieczy w jeziorce spawalniczym i częstotliwość oscylacji jeziorca.

W Rozdziale 4 rozważa problematykę energii w procesie spawania, w tym przepływ ciepła, definicje energii liniowej i jej pomiaru oraz sprawność cieplną i sprawność topienia.

Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia stanowią podstawę sformułowania w Rozdziale 5 pt. „Badania własne” uzasadnienia wyboru tematu i celu pracy, pytań badawczych, kryteriów oceny wyników i planu badań.

W Rozdziałach 6 – 8 zostały umieszczone wyniki badań natapiania stali austenitycznej i ferrytyczno – austenitycznej.

Rozdział 9 zawiera dyskusję o wynikach, podsumowanie i wnioski, w tym odniesienie się do kryteriów oceny wyników i doboru badanych materiałów, odpowiedzi na postawione pytania badawcze, podsumowanie wyników i interpretację zjawisk.

Wprawdzie Doktorantka nie sformułowała tezy rozprawy stawiając trzy pytania określające cel pracy i jej problem naukowy. Pytania dotyczą wpływu częstotliwości pulsacji na:

1. średnie i skuteczne natężenia prądu spawania i napięcia łuku,
2. ilość ciepła dostarczonego do materiału na jednostkę długości spoiny,
3. ilość ciepła dostarczonego do materiału na jednostce czasu.

Z zastosowaniem kryterium oceny:

- geometrii i pola powierzchni nadtopienia,
- mikrostruktury.

Zakres eksperymentu obejmował:

- zestawienie stanowiska badawczego składającego się ze modułu spawania: spawarki TIG MaficWave 2500 z możliwością spawania prądem pulsującym, butli z argonem, stołu z wózkiem pozycjonera liniowego, oraz modułu pomiarowego Siglent 1072CML i kasety pomiarowej, a w przypadku nadtapiania stali duplex dodatkowo systemu monitorowania i rejestracji przebiegów dla określenia wartości chwilowych mocy,
- próby nadtapiania dla różnych częstotliwości pulsacji prądu wraz z oscyloskopowymi pomiarami natężenia i średniego oraz skutecznego napięcia prądu i oszacowaniem energii spawania, prądu,
- badania wizualne, makroskopowe i mikroskopowe na mikroskopie optycznym i skaningowym i mikroanalizę a w przypadku stali ferrytyczno – austenitycznej dodatkowo udziału ferrytu w spoinie.

W wyniku obszernych badań metalograficznych wykazano, że zmiana częstotliwości prądu przy stałych pozostałych parametrach wpływa znacząco na geometrię natopienia w zakresie różnic głębokości oraz pól przekrojów stali 301L i 2225. Nie zdefiniowano jednak konkretnych kierunków zmian.

Zmiana częstotliwości prądu wpływa też wpływa na zmianę mikrostruktury obu badanych stali. W przypadku stali austenitycznej zmiany te polegają na rozdrobnieniu mikrostruktury, zróżnicowaniu morfologii ferrytu, szerokości strefy wpływu ciepła oraz długości pasm ferrytu i segregacji zanieczyszczeń. W przypadku stali ferrytyczno – austenitycznej zmiany dotyczą proporcji oraz morfologii austenitu i ferrytu.

Wyniki badań eksperymentalnych stanowiły argument dla negatywnej odpowiedzi na sformułowane w rozdziale piątym pytania badawcze oraz podstawę interpretacji wybranych zjawisk elementarnych w obszarze łuku pulsacyjnego TIG.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych eksperymentów wskazują na to, że osiągnięto założony cel pracy i dowodzą słuszności doboru metodyki eksperymentu dla rozwiązania problemu badawczego.

Do mocnych stron rozprawy zaliczam:

- kompleksowe ujęcie podstaw fizyki łuku spawalniczego oraz energii w procesie spawania, które są istotne z punktu widzenia rozpatrywanego problemu badawczego,
- konfigurację stanowiska badawczego umożliwiającą precyzyjne pomiary prędkości nadtapiania i przebiegów prądowo-napięciowych łuku spawalniczego,
- wyniki szczegółowych badań mikrostrukturalnych analizowanych złączy z zastosowaniem mikroskopii skaningowej i analizy EDS,
- opisanie charakterystyki dynamicznej układu źródła zasilania - łuk wskazującej na zmieniającą się stabilność procesu spawania w zależności od częstotliwości pulsacji,
- sformułowanie wniosku dotyczącego energii liniowej w przypadku spawania prądem pulsującym, trafnego i korespondującego z obecnymi tendencjami dotyczącymi ograniczonego zastosowania klasycznych metod wyznaczania energii liniowej, co jest bardzo istotne w przypadku zaawansowanych stali o dużej wrażliwości na ciepło spawania oraz nowoczesnych procesów spawalniczych wykorzystujących łączenie źródeł ciepła i modulowanie wartości mocy łuku,

- udzielenie wnikliwych odpowiedzi z krótkim i jasnym podsumowaniem na postawione w pracy pytania badawcze.

Do słabych stron rozprawy zaliczam:

1. brak jasno określonej tezy pracy, zamiast której sformułowano cel pracy w formie trzech pytań badawczych i kryteria oceny próbek,
2. brak uzasadnienia sensu wykonywania i spójności z celami pracy sformułowanych w planie badań trzech zadań badawczych,
3. brak uzasadnienia wyboru zastosowanych materiałów rodzimych i brak w części teoretycznej analizy ich spawalności,
4. zastosowanie w eksperymencie stali austenitycznej 301L i ferrytyczno – austenitycznej 2205 z pewnością niekorzystnie wpłynęło na zróżnicowanie wyników twardości, które nie wniosły niczego istotnego do wyników badań,
5. brak odniesienia do spawania z materiałem dodatkowym, mającym istotny wpływ na ilość wprowadzonego ciepła i w zależności od jego średnicy i objętości rowka spawalniczego odgrywającego niebagatelną rolę w procesie odbierania ciepła łuku spawalniczego,
6. brak analizy dotyczącej istotności statystycznej obserwowanych zależności, która pozwoliłaby, przy założonym poziomie istotności potwierdzić hipotezę zerową, (która również nie została postawiona).
7. brak analizy korelacji pomiędzy obserwowanymi zmiennymi zależnymi i niezależnymi w badaniach zależności pomiędzy parametrami pulsu, a efektami oddziaływania ciepła (istota pracy - nawiązuje bezpośrednio do tematu), co jest to widoczne na rysunkach 6-8; 6-9; 7-6; 7-7; 7-8 gdzie zamiast określenia zależności regresyjnej połączono punkty pomiarowe (zapewne sugerując się m.in. pracą [23]); analiza korelacji, precyzyjnie w sposób liczbowy wykazałaby siłę tych zależności; bez niej wnioskowanie ma charakter jakościowy,
8. konsekwencje powyższych punktów skutkują niepotwierdzonymi liczbowo kolokwializmami, np.: "niewykazywanie specjalnych różnic", "dla zbliżonych wartości mocy otrzymano istotnie różniące się głębokości wtopienia"; "dla głębokości wtopienia istotniejsza jest wartość częstotliwości niż moc"; "wykazywała znacznie bardziej spektakularne różnice niż otrzymane dla stali austenitycznej"
9. w świetle uprzednich uwag niektóre stwierdzenia (np. uwaga w rozdziale 6.7 "duży wpływ częstotliwości pulsacji prądu na rezultat nadtapiania") nie są merytorycznie uzasadnionego za pomocą analizy statystycznej ma charakter życzenia,
10. w rozdziale 9 w podsumowaniu drugiego pytania badawczego stwierdzono, że pomiar zmian wartości energii liniowej "nie wykazał korelacji ze zmianami częstotliwości pulsacji prądu dla żadnej z przyjętych metod" nie ma uzasadnienia analizą korelacji,
11. błędy redakcyjne, jak: braki przecinków, niespójne akapity, błędne odwołania – str. 63 odwołanie do wzoru (43), wielokrotne spacje.
12. nieprecyzyjne opisy rysunków, z których domyślać się trzeba, który z nich przedstawia poszczególne elementy eksperymentu, np.: Rys. 6-4 - nie podaje, które zdjęcia dotyczą lica, a które grani oraz brak jasnego wskazania zastosowanej częstotliwości pulsacji; Rys 6-5 - brak kierunku spawania,
13. niepotrzebnie zastosowany kolor w przeważającej ilości zdjęć mikrostruktury; zastosowanie skali szarości oraz zwiększenie kontrastu poprawiłoby jakość.

Sugestie dotyczące przyszłych badań:

1. Z uwagi na obiekty Autorki pracy odnoszące się do badań geometrii przetopu (zwłaszcza dla niskich częstotliwości pulsu) zasadne byłoby wprowadzenie rejestracji temperatury w referencyjnych punktach leżących w stałej odległości od osi nadtopienia. Analiza przebiegów temperaturowych w takich punktach pozwoliłaby ocenić ilość wprowadzonego ciepła, maksymalnej zarejestrowaną temperatury, czas jej osiągnięcia oraz dynamikę nagrzewania i chłodzenia, co byłoby istotnym elementem analizy efektów oddziaływania ciepła.
2. Dobrym uzupełnieniem pracy byłoby wprowadzenie elementów komputerowego wspomaganie analizy procesu w postaci symulacji numerycznych nadtopiania. Zastosowanie znanych specjalistycznych pakietów MES typu Sysweld czy Simufact Welding pozwoliłyby na precyzyjną analizę indukcji cyklu cieplnego w dowolnym punkcie złącza.

Przytoczone wyżej uwagi traktuję raczej, jako dyskusję z Doktorantką lub sugestią odnośnie problemów do uwzględnienia w publikacjach i dalszych badaniach. Nie zmieniają one mojej pozytywnej oceny całości rozprawy, którą podsumowałem we wniosku końcowym.

Rozprawa mgr inż. Małgorzaty Ostromęckiej stanowi oryginalne opracowanie z zakresu rozwojowego i złożonego zagadnienia technologicznego w obszarze inżynierii spawania, jakim jest projektowanie i dobór warunków spawania metodą TIG PULS umożliwiającą uzyskanie szerokiego zakresu właściwości złącza spawanego.

Wniosek końcowy

Na podstawie dokonanej oceny pracy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Ostromęckiej na temat „Wpływ częstotliwości pulsującego prądu spawania metodą TIG na efekty oddziaływania ciepła w wybranych stalach specjalnych,„ stwierdzam, że Doktorantka wykazała się umiejętnością formułowania problemów naukowych i prowadzenia samodzielnej pracy badawczej na dobrym poziomie.

Rozprawa stanowi szczegółowe i wartościowe opracowanie naukowe odnoszące się problematyki wpływu częstotliwości pulsacji prądu na wybrane aspekty fizyki łuku i zjawiska zachodzące w jeziorce podczas spawania prądem pulsującym TIG a wyniki eksperymentu stanowić będą dobry materiał źródłowy do wykorzystania praktycznego w obszarze właściwości i zastosowań prądu pulsującego TIG..

Dotycząca metodyki eksperymentu i technologii w obszarze inżynierii spawalnictwa w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn opiniowana rozprawa wypełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora nauk technicznych stawiane Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami.

Wobec wymienionych wyżej walorów rozprawy zwracam się z wnioskiem do Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

