

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Ostromęckiej pt:

„Wpływ częstotliwości pulsującego prądu spawania metodą TIG na efekty oddziaływania ciepła w wybranych stalach specjalnych”

**wykonana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej
na podstawie uchwały z dnia 26 lutego 2019 r.**

Wprowadzenie

Zadaniem łuku spawalniczego przy spawaniu elektrodą nietopliwą w osłonach gazowych jest dostarczenie ciepła do obszaru spawania. Jedną z odmian tego procesu spawania jest spawanie prądem pulsującym. Podstawową jej zaletą jest możliwość sterowania ilością ciepła, a przez to między innymi zapewnienie większej kontroli nad kształtem geometrycznym spoiny, zmniejszenie szerokości strefy wpływu ciepła, obniżenie wartości naprężeń spawalniczych, zmniejszenie odkształceń po spawaniu, zmniejszenie niebezpieczeństwa powstawania pęknięć gorących. Proces ten mimo, że jest stosowany od wielu lat nie jest jednak dokładnie zbadany. Nie jest znany dotychczas wpływ częstotliwości pulsacji prądu na wynik spawania oraz powiązanie sposobu wprowadzenia ciepła z jego ilością dostarczaną do obszaru spawania. W literaturze brak jest informacji na ten temat.

Podjęcie przez mgr inż. Małgorzatę Ostromęcką pracy doktorskiej o charakterze teoretyczno – doświadczalnym pt: **„Wpływ częstotliwości pulsującego prądu spawania metodą TIG na efekty oddziaływania ciepła w wybranych stalach specjalnych”** należy więc uznać za wybór trafny ze względu na znaczenie tematyki w zakresie poznawczym jak również możliwość praktycznego 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 interesujący, uzasadniony i aktualny ze względu na konieczność precyzyjnego określenia ilości wprowadzonego ciepła przy spawaniu stali wysokostopowych.

Treść rozprawy

Praca doktorska pt: „**Wpływ częstotliwości pulsującego prądu spawania metodą TIG na efekty oddziaływania ciepła w wybranych stalach specjalnych**” składa się z dwóch podstawowych części, to jest części literaturowej oraz części badawczej i zawiera 152 strony tekstu, 27 tablic, 79 rysunków oraz 121 pozycji bibliograficznych.

W części literaturowej Autorka przedstawiła zagadnienia dotyczące spawania metodą TIG prądem pulsującym. Opisała metodę oraz przedstawiła parametry spawania, zwracając uwagę na rzadko przywoływany parametr jakim jest skok spoiny punktowej. Szczególnie dokładnie Doktorantka przedstawiła problemy dotyczące częstotliwości prądu pulsującego jako podstawowego parametru spawania tym procesem oraz jego wpływu na zjawiska metalurgiczne w spoinie i jej kształt geometryczny. Następnie omówiła wybrane zagadnienia z zakresu fizyki łuku spawalniczego oraz ruchu cieczy w jeziorce spawalniczym. Przedstawiła strefy łuku elektrycznego przy spawaniu elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego. Zamieściła matematyczny opis zjawisk zachodzących w łuku elektrycznym w tym zasadę zachowania masy, zasadę zachowania pędu, zasadę zachowania energii, zasadę zachowania ładunku elektrycznego. Doktorantka omówiła rozkład temperatury w łuku spawalniczym uwzględniając wpływ natężenia prądu spawania, składu chemicznego gazu, temperatury i ciśnienia środowiska gazowego, procesu rozpraszania ciepła łuku oraz oddziaływania na jego środowiska dodatkowych źródeł ciepła. Autorka przedstawiła zagadnienia ciśnienia i siły łuku elektrycznego, zwracając szczególną uwagę na ich wpływ na ugięcie powierzchni swobodnej jeziorca ciekłego metalu. Szczególnie dokładnie Doktorantka przedstawiła zagadnienia dotyczące ruchu cieczy w jeziorce ciekłego metalu i wpływu na to zjawisko zmiennych spawania prądem pulsującym. W ostatnim rozdziale części teoretycznej Doktorantka omówiła zagadnienia dotyczące energii w procesie spawania. Wskazała między innymi na problemy związane z obliczeniem energii liniowej spawania oraz ograniczoną przydatność obecnie powszechnie stosowanych wzorów w przypadku spawania prądem pulsującym. Część literaturową zakończyła przedstawieniem zagadnień związanych ze sprawnością cieplną oraz sprawnością procesu topienia.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego Autorka sformułowała cel pracy, którym jest określenie czy powszechnie stosowane parametry określające ilość wprowadzonego ciepła są w stanie jednoznacznie oddać sposób kształtowania się złącza i umożliwić sterowanie procesem przy spawaniu metodą TIG prądem pulsującym. Zakres badań obejmował badania parametrów prądowo – napięciowych przy różnych częstotliwościach pulsacji prądu, badania makroskopowe i badania mikroskopowe, badania na mikroskopie skaningowym, pomiary twardości, pomiary zawartości ferrytu.

W drugiej, doświadczalnej części pracy Doktorantka przeprowadziła badania w których wykorzystała stal austenityczną 301L (X5CrNi17-7) oraz stal duplex 2205 (X2CrNiMoN22-5-3).

Autorka wykonała natapiania próbek stosując proces TIG. Przeprowadziła pomiary oscyloskopowe wartości średnich i skutecznych natężenia prądu i napięcia łuku, a następnie w oparciu o otrzymane wyniki obliczyła energię liniową spawania. Próby zostały przeprowadzone dla różnych, wybranych częstotliwości. Doktorantka przeprowadziła badania makroskopowe związane z pomiarem kształtu geometrycznego nadtopień, ocenę struktur fazowych, badania na mikroskopie skaningowym i analizę składu chemicznego w mikroobszarach w celu potwierdzenia różnic chemicznych w strukturach uzyskanych przy różnej częstotliwości pulsacji prądu spawania oraz pomiary mikrotwardości. Dla próbek ze stali duplex przeprowadziła pomiar zawartości ferrytu. Całość badań zakończyła ich obszernym podsumowaniem. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorantka sformułowała trzy wnioski dotyczące spawania TIG prądem pulsującym oraz wpływu częstotliwości pulsacji na ciepło wprowadzone do obszaru spawania.

Ocena rozprawy oraz uwagi ogólne

Wybór tematu rozprawy doktorskiej należy uznać za bardzo trafny, aktualny i potrzebny ze względu na brak dostępnych wyników badań w tym obszarze. Doktorantka przeprowadziła niezwykle obszerne badania doświadczalne mające na celu sprawdzenie wpływu częstotliwości prądu pulsującego na ilość ciepła wprowadzonego do obszaru spawania. Na szczególne podkreślenie zasługuje bardzo wnikliwe studium literatury w tym obszarze, kompleksowe podejście Autorki do badań doświadczalnych obejmujące szczegółową analizę zjawisk na poziomie makro i mikrostrukturalnym oraz wyjątkowo obszerne i szczegółowe podsumowanie wyników badań.

W pierwszej części rozprawy Doktorantka dokonała przeglądu ponad stu dwudziestu pozycji literatury dotyczącej badanego zagadnienia, uwzględniając ważne publikacje ostatniej dekady. W tym zakresie Doktorantka wykazała się dobrą znajomością zagadnienia oraz prawidłową oceną zjawisk zachodzących w spawalniczym łuku elektrycznym przy spawaniu procesem TIG prądem pulsującym.

Ogólna koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Autorkę 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 wpływu częstotliwości pulsacji na ilość energii dostarczonej do obszaru spawania na podstawie badań strukturalnych, mikroanalizy składu chemicznego, badań fraktograficznych. Szczególnie cenne są wyniki badań makroskopowych dotyczące wpływu częstotliwości pulsacji na kształt geometryczny nadtopienia i szerokość strefy wpływu ciepła oraz badań mikroskopowych dotyczące wpływu na jego strukturę. Doktorantka skutecznie i konsekwentnie zastosowała doświadczalne techniki badań, dzięki czemu uzyskała bardzo rozległy obraz badanego zagadnienia. W wyniku przeprowadzonych obszernych i różnorodnych badań uzyskała interesujące i wartościowe wyniki, które następnie poprawnie zinterpretowała. Wnikliwe i wyczerpujące podsumowanie końcowe uzyskanych wyników znacznie podnosi wartość przedstawionej pracy i potwierdza umiejętność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że zaplanowany cel i zakres pracy zostały osiągnięte i dlatego całość rozprawy doktorskiej mgr inż. Małgorzaty Ostromeckiej oceniam pozytywnie. Doceniam zwłaszcza trafnie przyjęty zakres metod badawczych, bardzo dużą ilość przeprowadzonych badań oraz interesujące wnioski końcowe. Forma prezentowania wyników oraz rzeczowy sposób ich analizowania świadczą o dojrzałości badawczej Doktorantki. Sposób przygotowania rozprawy i jej szata graficzna nie budzą moich zastrzeżeń

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

1. Na stronie 9 Doktorantka używa terminu „prędkość chłodzenia” podczas gdy, moim zdaniem powinna użyć terminu „szybkość chłodzenia”, ponieważ szybkość jest to stosunek zmiany danej wielkości do czasu w którym ona następuje, natomiast „prędkość” to wielkość kinematyczna związana z ruchem.
2. Na stronach 15, 29, 38, 75, 136 proces przejścia stopionego metalu w stan stały Autorka określa nieprawidłowym terminem „krzepnięcie” podczas, gdy prawidłowy termin to „krystalizacja”. Termin ten został użyty na stronie 59.
3. Na rysunku 3-12 ze strony 32 Doktorantka użyła terminu „krytyczna głębokość wtopienia” nie definiując go w tekście pracy. Proszę o jego zdefiniowanie.
4. Na stronie 34 Autorka wprowadza termin „spawanie stacjonarne”, również go nie definiując. Proszę o jego zdefiniowanie.
5. W treści podrozdziału 5.1 „Uzasadnienie wyboru tematu oraz cel pracy”, cel nie został w sposób jednoznaczny wyodrębniony. Uważam, że dla przejrzystości pracy Doktorantka powinna go wyodrębnić.
6. W tablicy 6-2 na stronie 55 oraz w tablicy 7-2 na stronie 77 podano wybrane własności fizyczne i mechaniczne stali użytych w badaniach. Nie podano natomiast i w pracy nie analizowano, moim zadaniem bardzo istotnych dla przeprowadzonego eksperymentu takich własności jak przewodność cieplna i pojemność cieplna.
7. Na stronie 82 w rozdziale „Wyniki badań – część II. Badanie wyników nadtopiania stali duplex 2205” Doktorantka używa sformułowania „Autorzy stwierdzili, że jest to skutkiem faktu, że przy wzroście częstotliwości pulsacji plazma łuku ma większą podatność na zawężanie się”. Równocześnie nie przywołała pozycji literaturowej odnoszącej się do tego stwierdzenia. Nie wiadomo więc, czy dotyczy ono badań własnych, czy wiedzy zaczerpniętej z literatury.
8. Podrozdział 7.4 na stronie 85 ma tytuł „Pomiar energii liniowej spawania” podczas, gdy w pierwszej linijce tekstu Autorka pisze „Wartość energii liniowej spawania została obliczona według podanego w normie PN-EN 1011-1 wzoru”. Uważam, że tytuł rozdziału powinien brzmieć „Obliczenie wartości energii liniowej spawania”.
9. Na stronie 106 Doktorantka użyła terminu „optymalne właściwości”, nie podając jednak ze względu na jakie kryterium.
10. Na stronie 136 Autorka stwierdza „Zmiany mikrostruktury w nadtopieniach zaobserwowane podczas badań wskazują na zdecydowaną zależność od częstotliwości. Różnice takie zwykle łączy się z różnicami w ilości wprowadzonego do materiału ciepła, choć precyzyjniej byłoby powiązać je z procesem odprowadzenia

ciepła, czyli dynamiką krzepnięcia (krystalizacji) oraz szybkością chłodzenia w danym zakresie temperatur”. Odprowadzenie ciepła z obszaru spawania następuje przede wszystkim do materiału rodzimego i wpływa na szybkość chłodzenia. Warunki przepływu ciepła od obszaru spawania do materiału rodzimego związane są z przywołanymi w punkcie 6 recenzji takimi własnościami materiału jak przewodność cieplna i pojemność cieplna. Proszę o komentarz w tym zakresie.

Najważniejsze uwagi szczegółowe

1. Dla wielkości fizycznych we wzorach 3 na stronie 20, 4 na stronie 21, 11 na stronie 23, 14 i 15 na stronie 25, 16 na stronie 26, 17 na stronie 34, 20 na stronie 37, 33, 34, 35 na stronie 41 nie podano jednostek miary.
2. W przypadku rysunków 3-6 na stronie 29, 3-8 na stronie 30, 4-1 na stronie 44, 4-6 na stronie 48 nie podano źródeł literaturowych ich pochodzenia.
3. Na rysunkach 6-19 na stronie 74 i 7-20 na stronie 111 nie zamieszczono opisów osi.
4. Wnioski (strony 142 i 143) zostały oznaczone znakami interpunkcyjnymi. Uważam, że dla ułatwienia ich przywoływania powinny mieć oznaczenia cyfrowe.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomimo wymienionych uwag ogólnych i szczegółowych stwierdzam, że Autorka osiągnęła cel postawiony w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale również szczególnie istotnych dla praktyki spawalniczej związanej z zastosowaniem badanego procesu spawania. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktorantki oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo – badawczej.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania w zakresie stopni naukowych stawiane przez obowiązującą ustawę. Na tej podstawie składam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Małgorzaty Ostromeckiej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej.

