

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza**

#### **pt. *Wysokowydajne spawanie metodą TIG elementów konstrukcji morskich ze stali dupleks***

#### **dla Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie**

Doktorat wdrożeniowy mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza podejmuje istotną dla firmy JW Steel Construction Sp. z o.o. w Szczecinie tematykę spawania metodą TIG elementów konstrukcji morskich ze stali dupleks. JW Steel Construction jest znanym producentem konstrukcji stalowych, głównie dla przemysłu offshore. Produkuje konstrukcje rurowe dla farm wiatrowych, platform wiertniczych, przemysłu stoczniowego, konstrukcji wsporczych na statkach instalacyjnych oraz konstrukcje specjalne. Konstrukcje offshore pracujące w warunkach morskich, ze względu na wymagające warunki środowiska, muszą spełniać podwyższone wymagania eksploatacyjne. Do ich wytwarzania stosowane są stale typu dupleks, odporne na korozję wody morskiej.

Proponowana do wdrożenia metoda spawania K-TIG posiada szereg zalet. Jest w pełni zautomatyzowana i wysokowydajna, nie wymaga stosowania materiałów dodatkowych, ponieważ spawane elementy można łączyć przez przetopienie rowka spawalniczego, zapewnia wysoką jakość i czystość spoiny, łatwą kontrolę jeziorka spawalniczego oraz całkowity brak rozprysku ciekłego metalu. Dzięki zastosowaniu elektrody wolframowej pozwala na znaczące ograniczenie strefy przetapiania i strefy wpływu ciepła, a jednocześnie przy zastosowaniu natężenia prądu powyżej 300 A umożliwia łączenie w jednym przejściu elementów o grubości do 12 mm. Jest stosunkowo nową metodą spawania i jej wdrożenie wymaga wszechstronnych badań złączy dla właściwego doboru parametrów urządzenia: energii łuku i szybkości spawania dla stosowanych gatunku stali oraz grubości łączonych elementów.

Zagadnienia te są przedmiotem badań zrealizowanych przez Doktoranta i zawartych w rozprawie doktorskiej.

### **Charakterystyka pracy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza zawiera 184 strony i obejmuje następujące podstawowe części:

- uzasadnienie potrzeby podjęcia tematyki pracy (8 str.),
- przegląd literatury, dotyczącej stali ferrytyczno-austenitycznych odpornych na korozję, technologii spawania stali dupleks oraz teorii symulacji numerycznych i fizycznych procesu spawania (56 str.),



- zdefiniowanie tezy, celu i planu pracy oraz opis metodyki badań (25 str.),
- wyniki badań złączy spawanych (34 str.),
- wyniki badań symulacyjnych (26 str.),
- wnioski (5 str.).

Uzupełnieniem są: zestawienie literatury obejmujące 134 pozycje (8 str.) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Wstępny rozdział zawiera uzasadnienie podjęcia tematyki pracy, którym jest z jednej strony rozwijający się rynek konstrukcji offshore, a z drugiej strony potrzeba wdrożenia nowoczesnej technologii wysokowydajnego spawania metodą K-TIG przez firmę JW Steel Construction.

Światowy rynek konstrukcji offshore dynamicznie rośnie na potrzeby wydobycia ropy i gazu oraz morskiej energetyki wiatrowej. W Polsce kluczowym elementem transformacji energetycznej jest, obok budowy energetyki jądrowej, zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w miksie energetycznym, m.in. poprzez budowę morskich farm wiatrowych na Bałtyku. Firma JW Steel Construction przygotowuje się do udziału w tych inwestycjach poprzez rozwój zaplecza techniczno-technologicznego. Obecnie do wykonywania połączeń spawanych stali odpornych na korozję typu duplex wykorzystuje konwencjonalną metodę MAG, spawania łukowego drutem proszkowym w osłonie gazowej. Przewiduje natomiast wdrożenie wysokowydajnej technologii spawania metodą TIG, która jest mało znana w przemysłowym zastosowaniu do produkcji elementów ze stali duplex. Zapewnia natomiast uzyskanie głębokiego wtopienia, bez potrzeby stosowania materiału dodatkowego.

Przegląd literatury obejmuje trzy podrozdziały, z których pierwszy dotyczy charakterystyki stali odpornych na korozję, ich właściwości mechanicznych, odporności na korozję i spawalności, natomiast dwa pozostałe - technologii spawania stali duplex oraz metod numerycznych i fizycznych symulacji procesu spawania. Omawiając gatunki stali duplex Doktorant zwrócił uwagę na ich zróżnicowanie w odporności na korozję, która jest szczególnie wysoka w stalach superduplex i hyperduplex. Stale duplex posiadają strukturę ferrytyczno-austenityczną z udziałem szerokiej gamy wydzielen. Ich spawanie wymaga utrzymania ustalonej proporcji udziału ferrytu i austenitu w strefie wpływu ciepła i spoinie oraz ograniczenia wydzielen wtórnych i faz międzymetalicznych. Stale te można spawać wszystkimi metodami spawania łukowego, jak również wiązką promieniowania laserowego i plazmowego, z zapewnieniem osłony złącza przed dostępem powietrza. Doktorant omówił wszystkie metody spawania, szczególną uwagę poświęcając metodzie K-TIG, z zastosowaniem elektrody wolframowej, która pozwala na znaczące ograniczenie strefy przetapiania i strefy wpływu ciepła. Podkreślił fakt ograniczonej liczby badań na temat związku między parametrami procesu, a tworzeniem się spoiny i jej właściwościami mechanicznymi. Zwrócił uwagę na to, że metoda K-TIG jest stosowana w trybie zautomatyzowanym, a tworzenie złącza spawanego jest zależne od kombinacji parametrów spawania. W związku z tym pomocne dla opisu tych zjawisk mogą być metody symulacji. Doktorant opisał





najczęściej stosowane do symulacji numerycznych procesów spawania modele źródeł ciepła oraz wyniki symulacji różnych autorów. Stwierdził, że symulacje te pozwalają modelować pole temperatury, rozmiar i kształt jeziora stopionego metalu oraz strefy wpływu ciepła. W kolejnym podrozdziale omówił metody i wyniki symulacji fizycznych procesów spawania, m.in. z wykorzystaniem symulatora Gleeble. Badania te najczęściej dotyczyły wpływu zmiennych parametrów spawania oraz wpływu czasu chłodzenia na strukturę i właściwości materiałowe. Zwrócił uwagę na brak badań z łącznym zastosowaniem numerycznej i fizycznej symulacji, co Jego zdaniem byłoby bardzo przydatne do analizy cykli cieplnych w różnych objętościach spoiny, szczególnie dla odwzorowania spawania blach grubych, gdzie mogą występować zróżnicowane cykle cieplne na grubości materiału spawanego, zwłaszcza w przypadku spawania metodą K-TIG.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury Doktorant sformułował tezy swojego doktoratu, w postaci stwierdzenia, że spawanie metodą K-TIG może być stosowane do jednościgowego łączenia blach grubych (10 mm) ze stali duplex w gatunku 1.4462 bez użycia materiału dodatkowego i pozwala spełnić wymagania kwalifikacyjne złączy spawanych dla warunków morskich. Ponadto stwierdził, że efektywną metodyką przyspieszonej oceny jakości tych złączy może być połączenie modelowania numerycznego metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu złożonego źródła ciepła oraz symulacji fizycznej cykli cieplnych.

Dla potwierdzenia tezy swojej pracy Doktorant przyjął dwa cele: opracowanie technologii spawania metodą K-TIG blach ze stali duplex w gatunku 1.4462 o grubości 10 mm spełniającej wymagania kwalifikacyjne oraz opracowanie metodyki opisu procesu spawania metodą K-TIG tych blach w oparciu o łączne wykorzystanie symulacji numerycznej i symulacji fizycznej.

W następnym rozdziale Doktorant opisał zastosowane w pracy metody badań. Na wstępie określił materiał badań i szczegółowo opisał technologię wykonania złączy spawanych. Materiałem badań była blacha o grubości 10 mm ze stali w gatunku 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3). Proces spawania wycinków o wymiarach 300x500 mm został przeprowadzony metodą K-TIG na urządzeniu HTIG-1000. Wykonano złącza ze spoiną czołową z pełnym przetopem, jednostronne, jednościgowe bez materiału dodatkowego, bez ukosowania, przy zastosowaniu gazu osłonowego (argonu) zarówno od strony lica, jak i grani spoiny. Do dalszych badań przygotowano 5 złączy różniących się parametrami procesu spawania.

Pierwsza grupa metod obejmowała badania nieniszczące złączy, badania właściwości mechanicznych, badania strukturalne i badania odporności korozyjnej. Natomiast druga grupa - metodykę symulacji procesu spawania metodą K-TIG, w tym dobór modelu pola temperatur w procesie spawania oraz wykonanie symulacji fizycznych strefy wpływu ciepła z wykorzystaniem urządzenia Gleeble 3500-GTC z systemem bezpośredniego nagrzewania oporowego.

W kolejnych dwóch rozdziałach Doktorant omówił wyniki badań wykonanych złączy spawanych, przy czym kryterium wyjściowym była ocena występowania niezgodności spawalniczych zgodnie z wymaganiami stosowanej normy. Dwa złącza wykazały niezgodność, przy czym jedno określono jako brak przetopu, a drugie jak brak spoiny na całej długości złącza. Pozostałe złącza oceniono wizualnie jako poprawne. Pozytywną ocenę uzyskano również w wyniku badań penetracyjnych i radiograficznych. Ze złączy spawanych, które spełniły



założony poziom jakości, wycięto próbki do pozostałych badań. Doktorant wykonał szczegółowe badania struktury i właściwości mechanicznych, uzyskując pozytywne wyniki. Podobnie pozytywne wyniki uzyskał w wyniku badań odporności korozyjnej w środowisku chlorku żelaza oraz w rozpylonej obojętnej solance. Pomimo relatywnie niskich zawartości austenitu w otrzymanych złączach, nie stwierdził znaczącego obniżenia ich właściwości mechanicznych, w tym udarności i wytrzymałości zmęczeniowej, jak również odporności korozyjnej.

Reasumując całość wykonanych badań materiałowych Doktorant uznał, że potwierdzają one przydatność zastosowania technologii spawania metodą K-TIG do wykonania złącza według wszystkich ustalonych założeń. Numeryczna symulacja procesu spawania metodą K-TIG umożliwia otrzymanie 3- wymiarowych rozkładów temperatury w spawanym złączu oraz analizę cykli cieplnych w dowolnie wybranym obszarze złącza spawanego oraz strefy wpływu ciepła. Uzyskane rozmiary jeziora spawalniczego oraz kształt linii wtopienia na przekroju poprzecznym złącza wykazały zgodność z parametrami uzyskanymi dla eksperymentalnych złączy wykonanych przy różnych wielkościach energii łuku.

Dla weryfikacji i uzupełnienia wyników symulacji numerycznych Doktorant wykonał symulacje fizyczne cyklu cieplnego podczas procesu spawania metodą K-TIG jednego złącza, korzystając z oprogramowania HAZ urządzenia Gleeble 3500-GTC. Niestety stwierdził, że symulacja fizyczna cykli cieplnych na podstawie energii łuku spawanego złącza nie potwierdza wyników otrzymanych w procesie symulacji numerycznej. Następnie Doktorant przeprowadził z wykorzystaniem symulatora Gleeble fizyczne cykle obróbki cieplnej próbek badanych stali, symulując warunki odpowiadające różnym przekrojom strefy wpływu ciepła. Uzyskane mikrostruktury próbek po symulowanych cyklach obróbki cieplnej wykazały zgodność z mikrostrukturą rzeczywistego złącza w obszarze analizowanego cyklu cieplnego. Stwierdził, że mierzone zawartości ferrytu nie korespondują z odpornością złączy na korozję wżerową.

W podsumowaniu symulacji numerycznych i fizycznych Doktorant stwierdził przydatność zaproponowanej metodyki opartej na łącznym wykorzystaniu symulacji numerycznej i fizycznej do badań procesu spawania metodą K-TIG blach grubych ze stali duplex. Wykorzystując symulowane numerycznie cykle cieplne można za pomocą symulatora Gleeble wykonać fizyczną obróbkę cieplną próbek, uzyskując reprezentatywny materiał do badań struktury oraz właściwości mechanicznych i korozyjnych.

W 16 wnioskach Doktorant zawarł najważniejsze rezultaty swojej rozprawy dotyczące procesu spawania, jak również wykonanych symulacji numerycznych i fizycznych. Pokreślił przydatność metody K-TIG do spawania blach o grubości 10 mm ze stali duplex gatunku 1.4462, jak również metod symulacji numerycznych i fizycznych do opisu procesów zachodzących w spawanym materiale.

Wskazał, że metodyka łącząca symulację numeryczną z fizyczną jest elastycznym narzędziem umożliwiającym analizę procesu spawania i poszerza możliwości optymalnego doboru parametrów spawania.



## Ocena pracy

Podjęta przez mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza tematyka badawcza, dotycząca spawania metodą K-TIG blach ze stali dupleks, stanowi pozytywny przykład pracy naukowej na potrzeby podnoszenia innowacyjności polskiego przemysłu. Wsparcie badawcze przy wdrażaniu efektywnej jakościowo i ekonomicznie technologii spawania do produkcji zaawansowanych konstrukcji dla przemysłu offshore, pozwoli na poprawę konkurencyjności firmy JW Steel Construction na rynku krajowym i światowym, a jednocześnie wpisuje się kierunek transformacji energetycznej polskiej gospodarki. Pozytywna ocena jakości złączy spawanych ze stali dupleks wykonanych metodą K-TIG, stanowi potwierdzenie użyteczności tej wydajnej metody spawania. Doktorant wykonał szczegółowe badania struktury, właściwości mechanicznych i odporności na korozję złączy spawanych uzyskanych przy zróżnicowanych parametrach spawania, wskazując parametry optymalne. Mimo spełnienia norm kwalifikacyjnych złączy spawanych stwierdził, że ich właściwości użytkowe można byłoby poprawić. Dotyczy to m.in. niezbyt wysokiej odporności na korozję wżerową oraz obniżenie właściwości plastycznych złączy (granicy plastyczności i wydłużenia) i udarności wskutek wysokiej zawartości ferrytu kosztem austenitu w spawie i strefie wpływu ciepła.

Zaproponował w tym celu zastosowanie powiązanych metod symulacji numerycznej i fizycznej do kompleksowej oceny struktury i właściwości złączy spawanych oraz do doboru optymalnych parametrów technologii spawania.

Jest to niewątpliwe osiągnięcie koncepcyjne Doktoranta, które przedstawił i zweryfikował w rozprawie. Do symulacji numerycznych zastosował przestrzenny model obliczeniowy oraz termalną analizę ciągłą w stanie nieustalonym z poruszającym się złożonym źródłem ciepła, w postaci połączenia modelu podwójnie elipsoidalnego w części górnej i stożkowego w części dolnej. Metoda symulacji numerycznej pozwala określić przestrzenny rozkład pola temperatur przyporządkowując każdemu mikroobszarowi próbki cykl cieplny, tj. krzywą zmiany temperatury w funkcji czasu. Przebieg cyklu cieplnego w poszczególnych mikroobszarach spawu decyduje o ich strukturze i właściwościach.

Przeniesienie warunków w skali mikro na próbkę w skali makro umożliwia symulacja fizyczna z wykorzystaniem symulatora Gleeble. Zastosowanie teoretycznych cykli cieplnych do sterowania obróbką cieplną próbek w symulatorze Gleeble umożliwia kształtowanie struktury próbek makro, a następnie przeprowadzanie na nich pomiarów właściwości mechanicznych i korozyjnych. Badania takie wykonano dla obszaru złącza w miejscu nacięcia karbu do badania udarności oraz w miejscach, w których zaobserwowano korozję wżerową na złączach spawanych. Ten obszar badań i ich wyniki stanowią cenny wkład w rozwój dyscypliny inżynierii mechanicznej w zakresie teorii procesów spawania.

Analiza przedstawionych przez Doktoranta wyników badań wskazuje na pewne braki i nieścisłości.

Doktorant twierdzi, że połączenie modelowania numerycznego z symulacją fizyczną cykli cieplnych stanowi efektywną metodykę opisu procesu spawania blach metodą K-TIG i może być wykorzystane do przyspieszonej oceny jakości tych złączy. W rzeczywistości ocena taka nie jest szybka, ponieważ wymaga znacznego nakładu



badani i powinna być polecana na etapie wdrażania nowej metody spawania lub nowych gatunków stali i grubości łączonych elementów.

Ponadto jak stwierdza Doktorant uzyskane złącza spawane nie są najwyższej możliwej jakości. Dla wszystkich złączy stwierdził podwyższoną zawartość ferrytu w strefie wpływu ciepła oraz w spoinie do górnej akceptowalnej granicy pomiędzy 60÷75 % (str.101). Zanotował również, że granica wytrzymałości określona dla złącza i strefy wpływu ciepła jest podwyższona w stosunku do materiału rodzimego: „dla złączy numer 2 i 3 (próbki wzdłużne) widać wyraźny wzrost wytrzymałości na rozciąganie i pogorszenie parametrów plastyczności,, (str.106), a jednocześnie stwierdził „ tendencję zmniejszania się twardości w strefie wpływu ciepła i spoinie w stosunku do twardości materiału podstawowego dla wszystkich trzech poziomów energii łuku” (str.111). Przeczy to zasadzie proporcjonalności pomiędzy twardością a wytrzymałością na rozciąganie.

Na podstawie przeprowadzonych badań mikrostrukturalnych nie udało się wyjaśnić obserwowanych różnic w zachowaniu złączy w warunkach korozyjnych: *Mierzone zawartości ferrytu nie korespondują z odpornością złączy na korozję wżerową* (str.122,164).

Niezbyt oczywista jest również konkluzja: „*Obliczenia numeryczne pokazują, że wraz ze wzrostem energii łuku spawalniczego maleje maksymalna temperatura procesu spawania* (str.130), podczas gdy w innym miejscu pracy stwierdził, że „*przeprowadzona uśredniona analiza numeryczna, której wynikiem jest cykl cieplny procesu spawania pokazuje, że wraz ze wzrostem energii łuku w procesie spawania wzrasta również maksymalna temperatura cyklu cieplnego* (str.147).

Wyjaśnienia wymaga też stwierdzenie: *Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że symulacja fizyczna cykli cieplnych na podstawie energii łuku spawanego złącza nie potwierdza wyników otrzymanych w procesie symulacji numerycznej dla metody spawania K- TIG. Kierując się jedynie energią łuku nie możemy określić położenia symulowanej strefy w rzeczywistym złączu, co stanowi poważne ograniczenie takiej metodyki badawczej i nie wykorzystuje w pełni potencjału symulacji fizycznej* (str.144).

Oceniając jakość opracowania całej rozprawy należy przyznać, że napisana jest poprawnym i logicznym językiem. Niemniej Recenzent odnotował kilka błędów i niewłaściwych określeń:

Str.107: *obniżenie granicy plastyczności wyniosło odpowiednio 216% dla złącza 2, 66% dla złącza 3 i 28% dla złącza 4.* Dane w tabelach 7.1 i 6.2 nie wskazują na takie zależności.

Str. 147-148: *najniższa uzyskana szybkość chłodzenia w przypadku złącza numer 4 wynosi 20,62°C/s, natomiast największa w przypadku złącza numer 2 wynosi: 16,34 kJ/mm.* Ma być 26,34°C/s.

Str. 21: *przesycanie z temperatury 1040÷1100 °C, z oziębianiem w wodzie.* Powinno być z chłodzeniem.

Str.28. *W określonej składem chemicznym temperaturze stop ten przecina krzywą rozpuszczalności w stanie stałym.* Zamiast stop powinno być obszar występowania ferrytu.

Str.149-150. *próbki symulowane fizycznie.* Powinno być próbki po symulacji fizycznej.



W podsumowaniu należy uznać, że mimo wskazanych powyżej zastrzeżeń o charakterze dyskusyjnym Doktorant zrealizował zaplanowany program badań i osiągnął założony cel pracy. Potwierdził możliwość zastosowania spawania metodą K-TIG do łączenia blach ze stali duplex o grubości 10 mm bez materiałów dodatkowych. Na uznanie zasługuje Jego dobra znajomość inżynierii mechanicznej w zakresie technologii i urządzeń do spawania oraz w zakresie zaawansowanych metod badań materiałoznawczych, takich jak: pomiary właściwości mechanicznych i analiza mikrostruktury materiałów metodami mikroskopii elektronowej, jak również testy odporności na korozję. Należy również podkreślić, że Doktorant wykonał obszerny zakres badań oraz udokumentował go szczegółowo i przejrzysto w postaci zdjęć, wykresów i tablic.

#### **Wniosek końcowy**

**Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza stanowi wykonane na wymaganym poziomie naukowym opracowanie zagadnienia, określonego celem pracy. Posiada bezpośrednie odniesienie do światowego dorobku w zakresie technologii spawania stali duplex z zastosowaniem nowoczesnej metody spawania łukowego K-TIG oraz wzbogaca go o nowe wyniki. Spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązujące ustawy. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie pracy doktorskiej mgr inż. Przemysława Zmitrowicza do publicznej obrony.**

