



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. uczelni
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 13 stycznia 2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza pt.:

„Wysokowydajne spawanie metodą TIG elementów konstrukcji morskich ze stali duplex”
wykonanej pod opieką promotor Pani Prof. dr hab. inż. Jolanty Baranowskiej oraz
promotora pomocniczego Pana Dr. inż. Michała Kawiaka
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 8 listopada 2024 r. (L.dz. WIMiM/317/24)

Wprowadzenie

Agresywne warunki eksploatacyjne w przemyśle morskim determinują zastosowanie na konstrukcje spawane materiałów charakteryzujących się specyficznymi właściwościami fizykochemicznymi. Niektóre z obszarów użytkowania konstrukcji metalowych w przemyśle offshore wymagają zastosowania stopów metali posiadających jednocześnie wysoką wytrzymałość na obciążenia mechaniczne i dobrą odporność na różne typy środowiska korozyjnego. Wysokostopowe (ferrytyczno-austenityczne) stale odporne na korozję (dupleks) stanowią odpowiedź na takie potrzeby, gdyż ich dwufazowa struktura pozwala na łączenie korzyści wynikających z zastosowania stali ferrytycznych i austenitycznych. Możliwości spajania, zwłaszcza spawania, takich stali są ograniczane przez konieczność sterowania cyklem cieplnym i metalurgią procesu w celu uniknięcia formowania się wad i niezgodności spawalniczych: m.in. pęknięć i przyklejeń. Niewłaściwa procedura spajania może doprowadzić również do ograniczenia właściwości eksploatacyjnych: odporności na korozję i wytrzymałości zmęczeniowej.

Spośród kilku zalecanych do spawania stali typu duplex procesów szczególną pozycję zajmuje spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych (TIG). Proces ten umożliwia wykonywanie złączy o wysokiej jakości, jednak cechuje się niską wydajnością ograniczającą przede wszystkim ekonomicznie uzasadnioną maksymalną grubość spawanych elementów.

W recenzowanej rozprawie Doktorant jako metodę obniżenia kosztów spawania zaproponował zastosowanie innowacyjnego procesu K-TIG (Keyhole Tungsten Inert Gas), co w kontekście analizy aktualnych trendów badawczych w spawalnictwie należy uznać za właściwe. Tematyka dysertacji jest aktualna i wartościowa z praktycznego i naukowego punktu widzenia. Na podstawie merytorycznej analizy zakresu i treści pracy stwierdzam, że wpisuje się ona w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna.

Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Rozprawę Pana mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza, pomimo jej dużej objętości (184 strony), czyta się z przyjemnością, gdyż jest klarownie skomponowana, a zastosowany język techniczny jest prosty i zrozumiały. Dysertację rozpoczyna streszczenie w języku polskim i angielskim. Poza tym praca składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, dziewięciu rozdziałów: wstępu, charakterystyki stanu wiedzy przedstawionej w trzech rozdziałach, tezy, celu i planu pracy, badań własnych opisanych w kolejnych trzech rozdziałach oraz wniosków. Na końcu rozprawy Autor zamieścił spisy tabel i rysunków oraz bibliografię. Praca nie zawiera załączników. Struktura pracy jest prawidłowa i odpowiada zmodyfikowanemu (poprzez umieszczenie dyskusji wyników bezpośrednio po ich przedstawieniu w kolejnych rozdziałach) układowi IMRaD.

Praca jest przygotowana starannie pod względem formalnym, edycyjnym i językowym. Nie mam poważniejszych uwag dotyczących struktury rozprawy. Rysunki i tabele są ponumerowane konsekwentnie, zgodnie z numeracją rozdziałów. Wszystkie rysunki i tabele są przywołane w tekście. Podobnie wszystkie umieszczone w spisie pozycje źródłowe są zacytowane w pracy i vice versa. Stwierdzam również, że rozprawa ma bardzo wysoki poziom edytorski. Zarówno edycja tekstu, jak i przygotowanie schematów, rysunków i wykresów zasługuje na bardzo wysoką ocenę. Również udokumentowane wyniki badań metalograficznych są wyjątkowo starannie przedstawione. Świadczy to o rzetelności Autora i jego poważnym podejściu do realizacji zadań naukowych, wśród których ważną rolę ma przygotowywanie raportu z badań.

Opisy stanu wiedzy i zrealizowanych zadań badawczych są przygotowane z zastosowaniem prawidłowej terminologii technicznej z obszaru inżynierii mechanicznej, a także inżynierii materiałowej i technologii spawalniczych. W pracy występują jedynie nieliczne literówki i błędy interpunkcyjne.

Spis wykorzystanej literatury (bibliografia) jest zrobiony profesjonalnie, cytowane prace są sformatowane jednolicie, z pełnym opisem bibliograficznym umożliwiającym zidentyfikowanie źródeł. Są one ułożone w kolejności cytowania w treści rozprawy. Spis obejmuje 134 pozycji źródłowych, w tym 2 prace, których Doktorant jest współautorem. Przytaczane źródła są różnorodne i merytorycznie uzasadnione, lista obejmuje aktualne polsko- i anglojęzyczne artykuły z czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych i inne źródła z całego świata.

Do nielicznych uwag w zakresie oceny formalnej zaliczam:

- Brak źródeł literaturowych: strona 14/15 (problemy spawania stali dupleks), podpis tabeli 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, rysunki 6.6 i 6.7, strona 36 (pierwszy i czwarty akapit),
- Brak jednostki (%) przy opisie równoważników PRE i PREw, brak jednostek przy wyjaśnianiu składników równań (np. strony 54 i 55),
- Stosowanie pierwszej osoby: „możemy”, „znajdziemy”, „zaliczamy”, „wykonujemy”,
- Stosowanie skrótu: „HAZ” w miejsce powszechnie przyjętego w polskiej terminologii spawalniczej „SWC”,
- Skróty należy wyjaśnić tylko przy pierwszym użyciu w pracy,
- Strona 71: „Dla udowodnienia podstawionych tez sformułowano następujące główne i szczegółowe cele pracy”. W pracy naukowej dokonuje się zazwyczaj weryfikacji postawionej tezy.
- Pozycja [104] jest zacytowana zbyt wcześnie (strona 71),
- Strona 131: „wielkości energii łuku” – powinno być: „wartości energii łuku”.

Natomiast wśród niedostatków edycyjnych wskazuję:

- Rys. 1.1. jest zbyt mały, żeby szczegółowo go analizować,
- Rys. 1.2. powinien być podzielony na dwie części: a) i b) i odpowiednio podpisany,
- Strona 80: „sekund”-powinno być: „s”,
- Opisy w języku angielskim należało przetłumaczyć na język polski, np. rysunki 4.6., 4.7., 4.10., 6.3.
- Strona 85: „Przesunięcie liniowe płyt (5071): <10% grubości blachy. Zakres badań nieniszczących NDT: 100%”. To są równoważniki zdania, które należało zamienić na zdania,
- Strona 125: „7.5 Ocena przydatności technologii K-TIG” – brakuje informacji do czego ma być przydatna opisywana technologia.

Podsumowując ocenę formalną pracy chciałbym podkreślić jej wysoki poziom pod względem edycyjnym, graficznym i językowym.

Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza dotyczy opracowania technologii wysokowydajnego spawania metodą K-TIG stali ferrytyczno-austenitycznej typu dupleks, z przeznaczeniem dla elementów konstrukcji morskich. Praca powstała w odpowiedzi na potrzeby przedsiębiorstwa JW Steel Construction Sp. z o.o. w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” i obejmuje aspekty technologiczne i symulacyjne procesu spawania oraz porusza

zagadnienia eksploatacyjne złączy spawanych w warunkach przemysłu morskiego i offshorowego.

Doktorant racjonalnie podzielił recenzowaną pracę na dwie główne części: stan wiedzy w świetle literatury uzasadniający podjęcie tematyki oraz badania własne. Pierwszy rozdział zatytułowany: „Uzasadnienie potrzeby podjętej tematyki pracy” stanowi wprowadzenie (i uważam, że taki tytuł powinien nosić), w którym Autor przedstawia dynamiczny rozwój branży offshore, w szczególności sektora energetyki wiatrowej, a także rosnące zapotrzebowanie na zaawansowane technologie spawania w produkcji elementów morskich konstrukcji stalowych. Autor uzasadnia wybór tematu poprzez analizę wyzwań technologicznych i eksploatacyjnych, takich jak dobór materiałów inżynierskich i korozja w odniesieniu do wymagań wytrzymałościowych konstrukcji offshore. Uważam, że Doktorant w tym rozdziale właściwie opisał motywację do przyjęcia tej tematyki jako podstawy do rozważań naukowych i jednocześnie dobrze wprowadza czytelnika w świat konstrukcji morskich, zwłaszcza tych wykonanych ze stali typu duplex. W rozdziale drugim Pan mgr inż. Przemysław Zmitrowicz scharakteryzował stale duplex w kontekście ich właściwości, które czynią je odpowiednimi materiałami dla konstrukcji morskich. Autor przedstawił szczegółową charakterystykę mikrostrukturalną oraz klasyfikację gatunków stali, uwzględniając ich skład chemiczny i wyrażoną przez równoważniki odporność na korozję. W kolejnym rozdziale Doktorant początkowo skoncentrował się na konwencjonalnych metodach spawania stali duplex: 111, 121, 135, 136, 138, 141, 142 i 15 oraz ich ograniczeniach technologicznych. Następnie szczególną uwagę poświęcił procesowi K-TIG, omawiając jego ideę, zalety i zastosowanie w przemyśle offshore oraz przedstawiając potencjalne możliwości wykorzystania go. Przedstawione opisy zwracają uwagę swoją wnikliwością i szczegółowością. Mam tu na myśli przede wszystkim charakterystykę fizyki spajania. W rozdziale czwartym Autor omówił podstawy teoretyczne modelowania cieplnego w procesach spawania oraz zastosowanie symulacji numerycznych do analizy źródeł ciepła i cykli cieplnych. Autor wyjaśnił, jak symulacje fizyczne wspierają odwzorowanie rzeczywistych warunków cieplnych w złączach spawanych. Tak przeprowadzona analiza stanu wiedzy pozwoliła Doktorantowi na sformułowanie tezy pracy następującej postaci:

„1. Wysokowydajne spawanie metodą K-TIG może być stosowane do jednościęgowego łączenia blach grubych ($t=10$ mm) ze stali duplex gatunku 1.4462 bez użycia materiału dodatkowego, przy zapewnieniu właściwości uzyskanych złączy spawanych spełniających wymagania kwalifikacyjne stawiane tym połączeniom w warunkach morskich.

2. Połączenie modelowania numerycznego metodą elementów skończonych, przy wykorzystaniu złożonego źródła ciepła, wraz z symulacją fizyczną cykli cieplnych stanowi efektywną metodykę opisu procesu spawania metodą K-TIG blach o grubości 10 mm ze stali duplex gatunku 1.4462 i może być wykorzystane do przyspieszonej oceny jakości tych złączy.”

Zaproponowane tezy oceniam jako prawidłowe. W dalszej kolejności Doktorant założył szereg celów badawczych i przedstawił zakres pracy, zarówno w formie opisowej, jak

i czytelnego schematu ilustrującego poszczególne etapy prac eksperymentalnych i symulacyjnych (rysunek 5.1).

W następnych rozdziałach Pan mgr inż. Przemysław Zmitrowicz szczegółowo przedstawił metodykę badawczą oraz wyniki swoich badań. Zakres przeprowadzonych prac obejmował w pierwszym etapie badania nieniszczące złączy spawanych: badania wizualne mające na celu wytypowanie złączy o najlepszej jakości, które poddano dalszym badaniom, badania penetracyjne i radiograficzne. Następnie przeprowadzono badania właściwości mechanicznych: statyczną próbę rozciągania, próby udarności i pomiary twardości metodą Vickersa. W zakres badań strukturalnych włączono: badania makro- i mikroskopowe oraz elektronową mikroskopię skaningową (SEM) wraz z analizą EDS. W ramach oceny właściwości eksploatacyjnych przeprowadzono badania odporności korozyjnej (korozja wżerowa i w rozpylonej solance) oraz badania wytrzymałości zmęczeniowej. Wyniki badań eksperymentalnych zostały przez Autora zestawione z wynikami badań numerycznych (ANSYS) i symulacji fizycznych z użyciem urządzenia Gleeble 3500-GTC. Opis procedury wykonania złączy oraz ich badań jest kompletny i szczegółowy, co umożliwia powtórzenie takich badań przez czytelnika. Autor prawidłowo zinterpretował wyniki badań i przygotował wzorowy raport z badań w postaci rozprawy.

Zawartość merytoryczna pracy doktorskiej odpowiada jej tytułowi i uważam ją za bardzo wartościową pod względem naukowym i aplikacyjnym. Autor właściwie zrealizował założone zadania badawcze: przeprowadził szeroki przegląd literatury, zaproponował odpowiednie do osiągnięcia celu pracy eksperymenty i badania, przeprowadził zaawansowane i wzajemnie uzupełniające się badania eksperymentalne ukierunkowane na osiągnięcie celu pracy, a poprzez to weryfikację postawionych tez.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta przedstawionych w recenzowanej rozprawie zaliczam powiązanie metod eksperymentalnych oraz symulacji fizycznej i numerycznej w celu ustanowienia możliwości oceny przydatności zaproponowanej technologii spawania stali typu duplex dla przemysłu offshore.

W zakresie oceny merytorycznej stwierdziłem następujące drobne uchybienia:

- Strona 14: „Obecnie przedsiębiorstwo JW Steel Construction Sp. z o.o., Sp. K. do wykonywania połączeń spawanych stali odpornych na korozję typu duplex wykorzystuje konwencjonalną metodę spawania łukowego drutem proszkowym w osłonie gazów aktywnych (MAG)”. Spawanie drutem proszkowym ma skrót FCAW. Idee tych metod spawania są podobne, jednak z punktu widzenia przepisów i norm spawalniczych stanowią odrębne procesy, których nie można rozpatrywać i stosować zamiennie (wyjątek od tej reguły stanowią procesy 135 i 138).
- Strona 16: „Stale odporne na korozję o strukturze ferrytyczno-austenicyznej (typu duplex) zawierają ponad 10,5 % chromu i maksymalnie 0,08 % węgla”. Bardzo proszę o zweryfikowanie tej definicji albo poprzez wskazanie właściwego źródła, albo poprzez jej skorygowanie.

- Strona 36: „Elektrody zasadowe wymagają suszenia bezpośrednio przed zastosowaniem w temperaturze 400 °C przez okres około 1÷3 godzin.” Temperatura 400 °C wydaje mi się zbyt wysoka.
- Strona 38: „Podczas spawania drutem litym (proces 135) do osłony gazowej jeziora spawalniczego stosuje się najczęściej mieszanki argonu z helem, azotem i tlenem, a podczas spawania drutem proszkowym (proces 136, 138) możliwe jest zastosowanie dwutlenku węgla.” Zastosowanie mieszanki argonu z helem dotyczy procesu MIG.
- Strona 40: „Spoiny wykonane większą energią liniową charakteryzują się zwiększoną zawartością ferrytu w strefie HAZ”. Termin: „spoiny” powinien być zastąpiony: „złącza spawane”. SWC nie jest obszarem spoiny.
- Strona 93: Podpis rys. 6.10: „Układ z zamocowaną próbką przygotowany do prób HAZ” nie jest informatywny. Powinien zawierać nazwę symulatora cykli cieplnych.
- Strona 117: rysunek 7.27: „Ilość cykli”-powinno być: „liczba cykli”.

Powyższe uwagi nie wpływają negatywnie na jednoznacznie pozytywną merytoryczną ocenę wartości recenzowanej rozprawy. Doktorant jednoznacznie udowodnił, że jest bardzo dobrze przygotowany metodologicznie do samodzielnego planowania i realizacji rozwojowych prac naukowo-badawczych. Z oceny zakresu przeprowadzonych prac naukowych wynika, że jest to praca interdyscyplinarna, obejmująca również zagadnienia tradycyjnie zaliczane do Inżynierii Materiałowej.

Uwagi dyskusyjne

Podczas lektury nasunęło mi się kilka pytań. Bardzo proszę Doktoranta o odpowiedzi i komentarze do wymienionych zagadnień:

1. Strona 34: „Wskazane też jest stosowanie większych niż dla stali austenitycznych (o około 10°) kątów ukosowania oraz zwiększenie odstępów (szczeliny) między spawanymi elementami.” Proszę o uszczegółowienie tej informacji, ponieważ w pracy zabrakło odpowiedniego uzasadnienia.
2. Doktorant stosuje w rozprawie zamiennie (sądząc po takiej samej jednostce: kJ/mm) pojęcia: „energia liniowa łuku”, „energia łuku” mając na myśli energię liniową spawania. Z informacji przedstawionych np. na stronie 34 wynika, że Autor odróżnia to pojęcie od wskaźnika „ilość wprowadzonego ciepła”. Proszę o dodatkowy komentarz do przyjętej nomenklatury.
3. Strona 37: „Stwierdzono, że zakresy energii liniowej od 2,5 do 4,0 kJ/mm nie mają negatywnego wpływu na spawanie stali duplex.” Ten zapis jest niejasny. Czy Doktorant ma na myśli proces spawania, czy właściwości złączy spawanych?
4. Strona 74: skąd pochodzą dane dotyczące składu chemicznego i właściwości badanego gatunku stali zestawione w tabelach 6.1 i 6.2?

5. Strona 74: „Proces spawania metodą K-TIG złączy ze stali duplex został przeprowadzony na urządzeniu HTIG-1000, które posiada źródło prądu o zakresie regulacji prądu spawania: 60÷1000 A, napięciu biegu jałowego $U_0 = 79$ V oraz cyklu pracy 100 % dla maksymalnego prądu spawania.” Proszę o zweryfikowanie danych dotyczących cyklu pracy urządzenia.
6. Strona 98: „Wartym podkreślenia jest fakt, że po mimo braku ukosowania blach przed spawaniem (przygotowanie na I) i kierunku krzepnięcia spoiny prostopadłego do kierunku odprowadzania ciepła, zapewniony jest prawidłowy współczynnik kształtu spoiny.” Proszę o dodatkowy komentarz (schemat?) dotyczący kierunku krzepnięcia spoiny.
7. Strona 102: „Zwiększona zawartość ferrytu w spoinie (WM), wynika również z faktu, że w stosowanej technologii spawania nie stosowano materiału dodatkowego (spoiwa), który najczęściej ma zwiększoną zawartość niklu w stosunku do materiału rodzimego (BM) w celu uzyskania większego udziału austenitu podczas chłodzenia spoiny [19].”. Czy, zdaniem Doktoranta, zastosowanie gazu osłonowego zawierającego N mogłoby spowodować poprawę (obniżenie) wartości stosunku ferrytu do austenitu?
8. Wykresy z wynikami pomiarów (rys. 7.8-7.11, 7.20-7.24, 7.27): Jaką wielkość pokazują słupki błędów?
9. Strona 117: „Badania te traktowane były jako próba technologiczna wykonanych złączy spawanych i ich założeniem było uzyskanie wymaganej liczby cykli przy określonym naprężeniu.” Strona 126: „Badania zmęczeniowe przeprowadzone zostały jako próba technologiczna mająca na celu określenie powstałych w złączy spawanym karbów strukturalnych oraz geometrycznych”. Jak należy rozumieć stwierdzenie, że badania zmęczeniowe traktowane były jako technologiczne, a nie eksploatacyjne?

Moje uwagi stanowią raczej zapytania uszczegóławiające treść pracy i w żadnym stopniu nie umniejszają wysokiej oceny, na którą ona zasługuje. Liczę na to, że powyższe uwagi będą pretekstem do dyskusji i okażą się pomocne w dalszych pracach Doktoranta.

Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Przemysław Zmitrowicz przedstawił w swojej rozprawie doktorskiej uzasadnione merytorycznie wyniki badań i analiz uzyskane nowoczesnymi metodami badawczymi weryfikując eksperymentalnie i symulacyjnie możliwość zastosowania procesu K-TIG do wykonywania złączy ze stali duplex 2205 przeznaczonych na konstrukcje offshore. Dysertacja wpisuje się w cele programu „Doktorat wdrożeniowy”. Moim zdaniem, wyniki pracy są wartościowe dla przemysłu, rozszerzają wiedzę dotyczącą spawalności stali typu duplex i stanowią bardzo dobry materiał publikacyjny.

W moim odczuciu Doktorant potwierdził wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych, a przedstawiona przez Niego praca doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego.

Opiniowana praca doktorska spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2018 r. pozycja 1668, z późn. zm.) oraz innych stosownych regulacji prawnych i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego o dopuszczenie Pana mgr. inż. Przemysława Zmitrowicza do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Sporządził:

Dariusz Frydrych