

W P Ł Y N Ę Ł O

dnia 04.05.2023  
PK/WPI/BW/8/311/2023

Gdańsk, 24.04.2023

Prof. dr hab. inż. Jerzy Łabanowski  
Politechnika Gdańska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów  
ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
jerzy.labanowski@pg.edu.pl

### RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Pałubickiego**  
**pt. "Badania i ocena złączy spawanych ze stali ferrytyczno-austenitycznej w zależności**  
**od energii liniowej procesu"**  
zrealizowanej pod kierunkiem  
Promotora prof. dr hab. inż. Jarosława Plichty  
Promotora pomocniczego dr inż. Kwiryna Wojsyka

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Rektora Politechniki Koszalińskiej dr hab. Danuty Zawadzkiej, prof. PK z dnia 01.03.2023r. Podstawę prawną wykonania recenzji stanowi Ustawa o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003r. (Dz. U. poz. 595 z 2003 r. z późniejszymi zmianami).

#### 1. Zakres i aktualność tematu rozprawy

Przedstawiona do oceny praca doktorska dotyczy zagadnień związanych ze spawalnością nowoczesnych stali odpornych na korozję typu duplex o strukturze ferrytyczno-austenitycznej. Stale te wykazują blisko dwukrotnie wyższą granicę plastyczności oraz lepszą odporność korozyjną w stosunku do stali austenitycznych. Z tych powodów ich użycie na konstrukcje spawane jest coraz większe. Te dobre cechy stali duplex mogą jednak zostać utracone w wyniku niewłaściwie prowadzonych procesów technologicznych przetwórstwa, zwłaszcza w wyniku spawania. Spawalniczy cykl cieplny niekorzystnie oddziałuje na mikrostrukturę stali w obrębie złącza spawanego powodując zmianę stosunku ilościowego ferrytu i austenitu oraz sprzyjając procesom wydzieleniowym faz wtórnych. Podatność do przemian strukturalnych w stalach duplex zależy od temperatury i czasu jej oddziaływania. W przypadku wykonywania złączy spawanych powszechnie używanym parametrem



opisującym wkład ciepła jest energia liniowa spawania ( $E$ ) określona jako iloczyn prądu ( $I$ ) i napięcia spawania ( $U$ ) podzielonego przez prędkość spawania ( $v$ ). Zmiany tego parametru istotnie wpływają na strukturę złącza spawanego oraz w konsekwencji na jego właściwości. Doktorant krytycznie odnosi się do obecnie stosowanych wytycznych spawania stali duplex, zwłaszcza do szerokiego zakresu dopuszczalnych wartości energii liniowej spawania. Jest przekonany, iż można wyznaczyć wartość parametru  $E$  spełniającą warunek stabilnego jarzenia łuku oraz uzyskania optymalnych właściwości złącza. W swoich badaniach duży nacisk kładzie na określenie rzeczywistych, a nie nastawionych parametrów wejściowych procesu. Ważnym elementem nowości w podjętych badaniach jest analiza wpływu parametrów wejściowych  $I$ ,  $U$ ,  $v$ , określających energię liniową spawania. Doktorant zakłada, że zmiany stosunku mocy źródła ciepła ( $U \times I$ ) do prędkości spawania ( $v$ ), przy takiej samej wartości  $E$  może prowadzić do powstania różnic strukturalnych w obrębie złącza.

Do osiągnięcia celów pracy doktorant przeprowadził szeroki program badań własnych. Ograniczył metodę spawania do procesu GMAW. Badania wytworzonych załączy przeprowadził w oparciu o standardowe metody badawcze nieniszczące (VT, RT) oraz niszczące – próby statyczne rozciągania, zginania, twardości, pomiary odkształceń, badania metalograficzne makroskopowe oraz mikroskopowe. Przyjętą metodykę badawczą uważam jako poprawną, wystarczającą do osiągnięcia założonych celów pracy. Właściwy również jest dobór materiału do badań wpływu energii liniowej na właściwości złączy. Nawet niewielkie różnice wartości wprowadzonego ciepła podczas spawania stali duplex mogą być zauważalne, ponieważ powodują zmiany w udziale faz ferrytu i austenitu w mikrostrukturze złącza i na tej podstawie można optymalizować warunki spawania stali.

Uważam, że wybór tematyki pracy doktorskiej jest trafny i aktualny. Rozważane zagadnienia dotyczą technologii wytwarzania i z tego powodu osiągnięcia naukowe wykazane w tej pracy przyczyniają się do rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna.

## 2. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa o objętości 212 stron zawiera 86 rysunków, 38 tabel i składa się z trzech zasadniczych części. Obejmują one: analizę stanu zagadnienia w świetle literatury, opis badań własnych wraz z analizą wyników i wnioskami oraz wykaz literatury.

Wykaz literatury jest bardzo obszerny i zawiera 207 pozycji w postaci artykułów z czasopism oraz podręczników. Ponadto Autor wykazuje odniesienia do 8 źródeł elektronicznych i 40 dokumentów normatywnych. Zdecydowana większość przywołanych



artykułów z czasopism jest aktualna, wydana w ostatnich 10-15 latach. W wykazie zostało przytoczonych 5 artykułów z czasopism recenzowanych, w których Doktorant jest współautorem, natomiast artykuły te nie są związane bezpośrednio z realizowanym tematem pracy doktorskiej. Należy oczekiwać, że wkrótce ukażą się publikacja Autora przedstawiające osiągnięcia w zakresie badań spawalności stali duplex.

Część studialna pracy opisana na 53 stronach została oparta na szerokim przeglądzie pozycji literaturowych dotyczących spawalności stali ferrytyczno-austenitycznych, ale również zagadnień bardziej ogólnych z zakresu spawalnictwa. Uważam, że zamieszczenie podrozdziałów dotyczących schematów obliczeniowych przepływu ciepła w procesach spawalniczych oraz opis transferu metalu w łuku podczas spawania metodą GMAW nie jest niezbędnie konieczne do opisu stanu wiedzy w zakresie wytyczonym tematem pracy. Brakuje natomiast głębszej analizy przemian fazowych w stali podczas chłodzenia od temperatury likwidus oraz przemian zachodzących w wyniku oddziaływania wtórnych cykli cieplnych. Autor rozważa i opisuje przemiany w stali podczas spawania jednościegowego. W przypadku spoin wielościegowych, wielokrotne nagrzewanie uprzednio ułożonych ściegów powoduje powstawanie austenitu wtórnego  $\gamma_2$ , który znacząco różni się składem i morfologią od austenitu pierwotnego i przez to wpływa na właściwości mechaniczne i odporność korozyjną złącza. Opis skłonności stali duplex do wydzielania faz wtórnych najlepiej pokazać na wykresie CTP. Taki wykres znajduje się w tekście pracy (rys. 9), lecz tylko w formie ogólnej. Przedstawienie rzeczywistego wykresu CTP dla stali typu 2205 mogłoby wnieść wiele cennych informacji w zakresie spawalności rozważanej stali.

W podsumowaniu tej części pracy Autor stwierdza, że w dostępnej literaturze nie znalazł kompleksowej oceny relacji pomiędzy strukturą złączy stali duplex i ich właściwościami, a parametrami wejściowymi procesu spawania, zwłaszcza w zakresie ilości wprowadzonego ciepła. Przedstawia dwuczłonową hipotezę pracy zakładającą, że w celu zwiększenia dokładności przewidywania wpływu wartości energii liniowej spawania na właściwości połączeń spawanych, należy uwzględnić nie tylko wartość samej energii liniowej, ale również związki pomiędzy wartościami parametrów wchodzących w jej skład, tj. wartościami natężenia prądu, napięcia łuku i prędkości spawania. Zakłada również, że standardowe wyznaczanie ilości wprowadzonego ciepła w procesie spawania metodą GMAW na podstawie nastawionych wartości parametrów wejściowych procesu nie odpowiada rzeczywistej ilości ciepła wprowadzonego do złącza. Znajomość rzeczywistych parametrów



procesu spawania zmierzonych w trakcie trwania procesu pozwalają na przewidywanie właściwości złączy spawanych z wyższą dokładnością.

Uważam, że hipotezy pracy zostały przedstawione poprawnie. W literaturze, normach oraz przepisach Okręgowych Towarzystw Klasyfikacyjnych podawane są wartości minimalne i maksymalne energii liniowej spawania dla poszczególnych grup stali duplex, natomiast nie są dostępne informacje dotyczące optymalizacji parametrów spawania.

W celu udowodnienia założonych hipotez oraz osiągnięcia celów pracy Doktorant przyjął program opracowany na podstawie planowania eksperymentu. Na tej podstawie ustalił wartości parametrów spawania (natężenie prądu, napięcie łuku oraz prędkość spawania) dla 33 złączy doczołowych z blach o grubości 3 mm ze stali typu duplex 2205 zakładając metodę spawania MAG (DC+) oraz technologię spawania w trybie pulsacyjnym MAG Puls (DC+). Proces spawania przeprowadził na stanowisku zrobotyzowanym wyposażonym w układ pomiarowy umożliwiający ciągłą rejestrację parametrów w trakcie wykonywania złącza spawanego. Ocenę wykonanych złączy spawanych przeprowadził w oparciu o badania nieniszczące VT i RT, badania niszczące - statyczne próby rozciągania, próby zginania, próby udarności, pomiary twardości, badania metalograficzne makroskopowe oraz mikroskopowe. Ponadto wykonał pomiary odkształceń spawalniczych wykonanych złączy. Wyczerpującą charakterystykę systemów pomiarowych przedstawił w rozdziale 5.4.1.

W kolejnych rozdziałach części doświadczalnej pracy Dyplomant przedstawia wyniki badań. W rozdziale 5.4.3.1 wykazuje znaczne rozbieżności pomiędzy wartościami energii liniowych obliczonych na podstawie nastawionych wartości parametrów wejściowych procesu spawania, a wartościami energii liniowych obliczonych na podstawie wartości rzeczywistych parametrów procesu. Buduje model matematyczny identyfikujący wartość rzeczywistej energii liniowej dla badanych złączy, który jest punktem wyjścia do optymalizacji parametrów procesu spawania. W kolejnym rozdziale 5.4.3.3 analizuje wpływ energii liniowej spawania na podatność do odkształceń spawalniczych badanych złączy. Rozważa wpływ poszczególnych parametrów procesu spawania na wielkość odkształceń oraz wyznacza wąski zakres ilości wprowadzanego ciepła, dla którego odkształcenia spawalnicze złączy są znacznie mniejsze w stosunku do pozostałych rozważanych wartości. W kolejnym punkcie pracy udowadnia istnienie zależności liniowej pola przekroju poprzecznego spoiny w zależności od zadanych wartości parametrów wejściowych procesu spawania. Udowadnia, że pole przekroju poprzecznego spoiny jest jednoznacznym miernikiem energii liniowej



spawania wprowadzonej do złącza w różnych odmianach spawania metodą MAG. W następnych rozdziałach przedstawia wyniki badań właściwości mechanicznych. Na podstawie analizy regresji buduje model matematyczny identyfikujący średnią twardość SWC i spoiny złączy w zależności od zastosowanych parametrów spawania. W mojej opinii przedstawiony model jest mało przydatny do przewidywania wartości twardości złącza, ponieważ rozrzut uzyskanych, a następnie analizowanych wyników badań przedstawionych na rys. 62 i 64 jest bardzo duży. Za interesujące natomiast uznaję przedstawione na rys. 75-79 zależności wpływu poszczególnych wartości parametrów spawania na wielkość pracy łamania próbek z karbem naciętym w osi spoiny.

Właściwości mechaniczne oraz odporność korozyjna złączy stali duplex zależą przede wszystkim od mikrostruktury, stąd wyniki badań metalograficznych przedstawione przez Doktoranta w rozdziale 5.4.3.6 są szczególnie cenne. Zawartość fazy ferrytycznej i austenicyzacji w spoinie oraz w SWC złączy przedstawiona została na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych oraz badań magnetycznych. Doktorant jednoznacznie wykazał, że wzrost energii liniowej spawania wpływa na zmniejszenie ilości ferrytu w SWC złączy.

W eksperymentalnej części pracy Doktorant wykonał szeroki zakres badań gwarantujący uzyskanie szczegółowych informacji na temat wpływu parametrów spawania metodą MAG na właściwości złączy stali duplex. Praktyczna realizacja tych badań wymagała od Doktoranta odpowiednich kompetencji i umiejętności badawczych. Dużą zaletą opracowania jest staranne udokumentowanie wyników badań w postaci wykresów, zdjęć makrostruktur oraz komputerowych wizualizacji.

W rozdziale 5.5 pracy mgr inż. Stanisław Pałubicki przedstawił podsumowanie materiału badawczego wskazując optymalizację procesu spawania metodą MAG złączy doczołowych blach ze stali duplex 2205 o grubości 3,0 mm. Przedstawił dopuszczalne zakresy parametrów spawania ustalając zakres energii liniowej w granicach 0,19-0,32 kJ/mm. Wnioski (rozdział 5.6) sformułowane na podstawie otrzymanych wyników badań i ich dyskusji są przedstawione w sposób jasny i wskazują, że postawione cele pracy zostały osiągnięte.



### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

W pracy można wyróżnić osiągnięcia naukowe wpisujące się w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz osiągnięcia użytkowe, do których zaliczam:

- Eksperymentalne wskazanie zależności mikrostruktury i właściwości złączy doczołowych ze stali duplex 2205 od ilości wprowadzonego ciepła wyrażonego energią liniową spawania.
- Wskazanie związków pomiędzy wartościami parametrów określających energię liniową spawania na właściwości złączy stali duplex.
- Wyznaczenie zależności pomiędzy energią liniową spawania a poprzecznym polem powierzchni wtopienia dla złączy doczołowych stali duplex.
- Przeprowadzenie wzorcowej optymalizacji procesu spawania metodą MAG złączy doczołowych blach ze stali duplex 2205 o grubości 3,0 mm.

Oceniając pozytywnie rozprawę doktorską kieruję do Doktoranta pytania i uwagi do dyskusji.

- W rozdziale 5.4.3.6 przedstawia Pan wyniki badań strukturalnych wskazując zawartość ferrytu w SWC złączy na poziomie 44-48% (na podstawie badań metalograficznych), czyli poniżej zawartości tej fazy w materiale rodzimym (MR). W praktyce obserwuje się wyższy udział procentowy ferrytu w SWC złączy stali duplex w porównaniu do MR, który często dochodzi do granicy 70%. Na rys 82a widoczna jest gruboziarnista struktura ziaren ferrytu w SWC, co może sugerować większą zawartość procentową tej fazy. Jak Pan wyznaczał granice SWC oraz jaka była metodyka pomiarów zawartości ferrytu w tym obszarze?
- Proszę o skomentowanie wiarygodności pomiarów magnetycznych zawartości ferrytu w SWC badanych złączy biorąc pod uwagę bardzo małą szerokość tej strefy.
- Proszę o skomentowanie możliwości optymalizacji procesu spawania stali duplex 2205 w przypadku złączy wielościęgowych.
- Str. 83, Tabela 10. Dlaczego w tabeli podano wartość temperatury międzycięgowj, jeżeli wykonywano złącze jednościęgowe?
- Str. 160, Tabela 34. Jaki jest sens podawania wartości wydłużenia (A) oraz granicy plastyczności ( $R_{p0,2}$ ) w statycznej próbie rozciągania próbek ze złączem spawanym?

- Str. 161, 3 w. góra. Głębokość karbu w próbkach udarnościowych Charpy V wynosi 2,0 mm, a nie 0,5 mm.
- Str. 168. Błędny opis: „struktura austenitu na tle stopionego ferrytu”.
- Str. 167. Błędnie opisane powiększenie mikrografii na rys. 82. 700x – za duże.

Pod względem edytorskim rozprawę oceniam bardzo dobrze. Jest napisana poprawnym i jasnym językiem. Znalazłem tylko pojedyncze błędy edycyjne, bądź składu tekstu. Dokumentacja wyników badań przedstawiona w postaci tabel, rysunków i zdjęć jest szczegółowa i starannie opracowana.

#### 4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną rozprawę doktorską uważam za interesującą i wartościową. Pan mgr inż. Stanisław Pałubicki zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy. Wykazał umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz opracowania i analizy uzyskanych wyników. Przedstawione w rozprawie wnioski są dobrze udokumentowane. Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy, klarowne sformułowanie celów pracy oraz ich osiągnięcie na drodze zaplanowanych i przeprowadzonych badań, dobrze oceniam przedstawioną rozprawę doktorską.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że przedstawiona przez mgr inż. Stanisława Pałubickiego praca pt. „Badania i ocena złączy spawanych ze stali ferrytyczno-austenitycznej w zależności od energii liniowej procesu” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003 r. i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżyniera Mechaniczna Politechniki Koszalińskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

