



dr hab. inż. Jacek Górka, prof. PŚ
Katedra Spawalnictwa
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice



WPŁYNĘŁO

Gliwice, 12 kwiecień 2023

dnia 17.04.2023
PKLW/15118/298/2023

RECENZJA

pracy doktorskiej

Pana mgr inż. Stanisława Pałubickiego

pod tytułem

„Badania i ocena złączy spawanych ze stali ferrytyczno-austenitycznej w zależności od energii liniowej procesu”

wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dra hab. inż. Jarosława Plichty

i promotora pomocniczego Pana dra inż. Kwiryna Wojsyka

opracowana zgodnie z Uchwałą nr 8/2023 Senatu Politechniki Koszalińskiej z dnia

15.02.2023 roku

Autor w niniejszym opracowaniu podejmuje się określenia wpływu zmian wartości energii liniowej spawania oraz związku pomiędzy wartościami parametrów wchodzących w jej skład (natężenie prądu spawania, napięcia łuku, prędkość spawania) na wybrane własności mechaniczne i strukturalne złączy doczołowych ze stali ferrytyczno-austenitycznej (typu Duplex 2205) o grubości 3 mm spawanych metodą MAG. Analizując treść i zakres pracy należy stwierdzić, że wpisuje się ona w pełni w dyscyplinę naukową: **Budowa i Eksploatacja Maszyn** (obecnie Inżynieria Mechaniczna), choć również można się tutaj doszukiwać bardzo wielu aspektów z obszaru Inżynierii Materiałowej.

Stal duplex jest typem stali o dwufazowej strukturze, w której każda z faz występuje w znacznej objętości (w granicach 50%). Stal ta łączy w sobie zalety zarówno stali austenitycznej, jak i stali ferrytycznej. Ferryt zapewnia stali wymaganą wytrzymałość i odporność na korozję, natomiast austenit odpowiada za dobre własności plastyczne. Stale duplex charakteryzują się lepszymi własnościami w zakresie granicy plastyczności od stali ferrytycznych i austenitycznych oraz większym wydłużeniem w porównaniu ze stalami utwardzanymi wydzieleniowo oraz stalami martenzytycznymi. Właśnie ten zrównoważony układ poszczególnych parametrów mechanicznych decyduje o rosnącym zainteresowaniu przemysłu tym gatunkiem stali. Główne obszary zastosowań stali duplex to przemysł petrochemiczny, transport i magazynowanie oraz przemysł chemiczny. 59% produkcji stali

duplex stanowią blachy. Oczywiście podstawową technologią wytwarzania konstrukcji z tej grupy stali są procesy spawalnicze, a zwłaszcza proces spawania. Przy czym jakość połączenia spawanego to nie tylko własności łączonych materiałów, ale także opracowana technologia spawania (sposób przygotowania elementów do spawania, odpowiednie parametry procesu – energia liniowa spawania, ewentualna obróbka cieplna po spawaniu) oraz dobór właściwego, pod względem wytrzymałościowym i korozyjnym, składu chemicznego materiału dodatkowego. Jednym z podstawowych problemów związanych ze spawaniem stali ferrytyczno-austenicznych jest kontrola ilości ciepła dostarczanego do obszaru tworzonego złącza spawanego. Doprowadzona ilość ciepła z jednej strony (energia liniowa procesu spawania), a przebieg procesu stygnięcia (czas $t_{8/5}$) z drugiej powinny pozwolić na wytworzenie docelowej, dwufazowej struktury złącza spawanego, jednocześnie nie dopuszczając do tworzenia się niepożądanych faz oraz wydzieleni. Energia liniowa spawania (ilość wprowadzonego ciepła) musi być dobierana indywidualnie, w zależności od typu spawanej stali, rodzaju złącza i jego grubości. Zastosowana energia liniowa wpływa nie tylko na zapewnienie odpowiedniej geometrii spoiny, ale również albo przede wszystkim na uzyskanie odpowiedniej struktury, co przekłada się na własności mechaniczne połączenia. Prawidłowe oszacowanie ilości wprowadzonego ciepła do złącza staje się więc kluczowe w opracowaniu poprawnej technologii, która zapewni powtarzalność jakości wytworzonych połączeń. W dostępnej literaturze zagranicznej i krajowej pojawia się wiele publikacji dotyczących prób szacowania ilości wprowadzanego ciepła do połączenia, opartych zarówno na eksperymencie badawczym jak i na wykorzystaniu symulacji komputerowych. Jednak jak się okazuje dostępne w literaturze współczynniki sprawności termicznej procesu spawania nie odzwierciedlają rzeczywistości praktycznej. Wiele prób praktycznych wykazało, że przy ocenie wpływu energii liniowej spawania na geometrię spoiny należy brać pod uwagę istotność poszczególnych jej składowych tj. natężenia prądu spawania, napięcia łuku czy prędkości spawania. W przypadku oszacowania istotności tych składowych będzie możliwość precyzyjnego sterowania nie tylko cechami geometrycznymi złącza, ale również zmianami strukturalnymi, co ma ogromne znaczenie w przypadku spawania stali duplex.

Dlatego mając na uwadze doniesienia literaturowe oraz obecny stan wiedzy na ten temat celowym wydaje się podjęcie przez Doktoranta badań dotyczących wpływu zmian wartości energii liniowej spawania oraz związku pomiędzy wartościami parametrów wchodzących w jej skład na własności mechaniczne i strukturalne złączy ze stali ferrytyczno-austenicznej (typu Duplex 2205).

Autor rozprawy na podstawie analizy literaturowej i doświadczeń własnych sformułował następujące hipotezy:

- „Należy przypuszczać, że w celu zwiększenia dokładności przewidywania wpływu wartości energii liniowej spawania na wybrane własności połączeń spawanych, takich jak makro i mikrostrukturę, odkształcenia, pola przekroju poprzecznego spoin, udarność i twardość, należy przy opracowaniu zależności funkcyjnych uwzględnić nie tylko wartość energii liniowej, ale również związki pomiędzy wartościami parametrów wchodzących w jej skład, tj. wartościami natężenia prądu, napięcia łuku i prędkości spawania”,
- „Należy przypuszczać, że standardowe wyznaczanie ilości wprowadzonego ciepła w procesie GMAW na podstawie nastawionych wartości parametrów wejściowych procesu (napięcia łuku, natężenia prądu i prędkości spawania), według wzoru normowego, nie odpowiada rzeczywistej ilości ciepła wprowadzanego do złącza, co nie pozwala precyzyjnie przewidywać własności połączeń spawanych. Wyznaczając wartość energii liniowej na podstawie wartości rzeczywistych parametrów procesu spawania (zmierzonych w trakcie trwania procesu), można z wyższą dokładnością przewidywać własności połączeń spawanych”.

Doktorant zdefiniował również trzy cele badawcze: cel poznawczy, cel metodyczny oraz cel użyteczny. Aby zrealizować cele badawcze oraz udowodnić poprawność przyjętych hipotez Autor zdefiniował problemy badawcze i ustalił zakres prac badawczych, który podzielił na cztery etapy:

- Etap I: analiza stanu wiedzy, zdefiniowanie hipotez i celu pracy, opracowanie metodyki doświadczalnej,
- Etap II: przeprowadzenie badań doświadczalnych procesu spawania, wyznaczenie energii liniowej spawania i energii liniowej łuku na podstawie wartości rzeczywistych parametrów procesu, określenie poziomu jakości wykonanych złączy, opracowanie modelu matematycznego obiektu badań w postaci funkcji regresji,
- Etap III: przeprowadzenie badań niszczących wykonanych połączeń, przeprowadzenie szczegółowej analizy wyników badań w odniesieniu do wielkości wprowadzonego ciepła do złącza, określonego na podstawie wartości rzeczywistych parametrów procesu spawania,
- Etap IV: sformułowanie wniosków końcowych z wyszczególnieniem wniosków poznawczych, metodycznych i użytecznych, określenie kierunków dalszych badań.

Uważam, że Doktorant prawidłowo zdefiniował problemy badawcze i ustalił odpowiedni zakres prac badawczych oraz wykorzystał odpowiednie metody badawcze, które umożliwiły mu potwierdzenie przyjętych hipotez oraz osiągnięcie zdefiniowanych celów pracy.

Opiniowana praca doktorska Pana mgr inż. Stanisława Pałubickiego pt. „**Badania i ocena złączy spawanych ze stali ferrytyczno-austenitycznej w zależności od energii liniowej procesu**” posiada układ klasyczny, obejmuje w pierwszej części przegląd piśmiennictwa, w drugiej badania własne. Praca jest bardzo obszerna (213 stron), złożona jest z 6 rozdziałów zawierających 86 rysunków i 38 tablic. Przegląd literatury oparty jest na 210 pozycjach literaturowych obcojęzycznej i krajowych, w 5 z nich Doktorant jest współautorem. Wykorzystana literatura została poprawnie dobrana pod względem merytorycznym, jednak uważam, że Autor mógł większej ilości skorzystać z bardziej aktualnych publikacji. Klasyczny układ pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Praca zaczyna się od spisu treści, który moim zdaniem jest zbyt rozbudowany. Również cała część literaturowa jest bardzo obszerna (63 strony) i zawiera część informacji ogólnie znanych i niewnoszących nic szczególnego do pracy. W ramach przeglądu literaturowego opisano zagadnienia związane z stalami odpornymi na korozję, ze szczególnym uwzględnieniem stali ferrytyczno-austenitycznych (typu duplex). Zostały przedstawione metody spawania tej grupy stali ze szczególnym uwzględnieniem metody GMAW. Opisane zostały tutaj też modele źródeł ciepła oraz sposoby monitorowania parametrów spawania łukowego. I w tym miejscu moim zdaniem powinien się pojawić punkt 4: Teoretyczno-doświadczalne podstawy wyznaczania ilości ciepła wprowadzanego do złącza. Moim zdaniem bez straty wartości pracy w części literaturowej można byłoby pominąć opis badań nieniszczących oraz badań niszczących złączy spawanych. Mimo tych uwag uważam, że ta część rozprawy zawiera ciekawe informacje dla czytającego i ukierunkowuje go na przeprowadzony eksperyment badawczy. Co warto podkreślić, część literaturowa napisana jest bardzo poprawą polszczyzną pod względem językowym i stylistycznym. Nie znajduję tutaj błędów merytorycznych. Doktorant w tej części rozprawy nie ustrzegł się jednak pewnych drobnych błędów i nieścisłości do których można zaliczyć:

- str. 11: odpowiednią mikrostrukturę uzyskuje się poprzez dobór składu chemicznego, a nie przez jego dostosowanie,
- w punkcie 2.1.2., str. 16 – Autor klasyfikuje stale odporne na korozję czy stale nierdzewne?,
- str. 23 słowo „balansowanie” w kontekście produkcji stali wydaje się być nieco mylne,
- proszę szczegółowo odnieść się do roli azotu w umocnieniu austenitu,
- str. 28: Autor podaje zakres pracy stali duplex od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$, (wytyczne normy PN EN 1011-3 podają zakres do $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$),

- str. 31: parametrów spawania się nie „kształtuje”, tylko dobiera,
- str. 31: czy producenci materiałów dodatkowych podają energię liniową spawania?
- str. 51: dlaczego do stali hyper duplex nie jest zalecane spawanie GMAW?,
- str. 51: czy podgrzewanie wstępne wpływa na zawilgocenie powierzchni spoiny?
- Informacje z punktu 2.4.1., 2.4.3. oraz 2.4.4. można pominąć bez obniżenia wartości pracy.

Drobnych błędów językowych i literówek szczegółowo nie wymieniam.

W rozdziale 3 Doktorant przedstawił hipotezy pracy, cele do osiągnięcia, problemy badawcze i zakres pracy. Zaproponowany plan badawczy jest poprawny i pozwala na osiągnięcie założonych celów badawczych. Rozdział 4 Teoretyczno-doświadczalne podstawy wyznaczania ilości ciepła wprowadzanego do złącza spawanego, moim zdaniem powinien znaleźć się w części literaturowej pracy. Rozdział 5 to bardzo obszerny rozdział opisujący badania doświadczalne wpływu energii liniowej w procesie spawania stali duplex 2205 o grubości 3 mm na geometrię i własności. Do oceny wpływu energii liniowej na własności geometrii i struktury złączy, Autor zaplanował eksperyment w oparciu o pięciopoziomowy kompozycyjny plan rotalny (5 poziomów czynników). Dla trzech wielkości wejściowych (natężenie prądu spawania, napięcie łuku, prędkość spawania) zaproponowano wykonanie łącznie 20 doświadczeń (8 w jądrze planu, 6 w punktach gwiazdnych i 6 w centrum planu). W celu porównania ze sobą wpływu różnych procesów spawalniczych w tym spawania w trybie pulsacyjnym, na cechy złącza spawanego, plan badawczy rozszerzono o wykonanie dodatkowych złączy metodą MAG (DC+) i metodą MAG Puls (DC+). Łącznie wykonano 33 doczołowe złącza próbne, które poddano badaniom nieniszczącym i niszczącym w określonym zakresie i poddano wnikliwej analizie. Rozdział ten kończy 19 wniosków. Przeprowadzony eksperyment badawczy jest bardzo wartościowy pod względem naukowym i aplikacyjnym. Doktorant prawidłowo określił wielkości wejściowe, wyjściowe, stałe oraz zakłócenia w odniesieniu do obiektu badań. Zaplanowany eksperyment w oparciu o model matematyczny, znacznie ograniczył ilość koniecznych prób praktycznych, niezbędnych do oceny wpływu energii liniowej spawania na jakość uzyskiwanych połączeń. Autor w tej części pracy:

- obliczył energię liniową procesu spawania,
- ocenił jakość badanych połączeń (VT i RT),
- ocenił wpływ energii liniowej spawania na odkształcenia spawalnicze,
- ocenił wpływ energii liniowej spawania na zmiany wielkości pola poprzecznego spoiny,
- ocenił własności mechaniczne złączy spawanych,
- ocenił zmiany strukturalne uzyskanych połączeń.

Doktorant wyznaczył równanie regresji opisujące zależność energii liniowej obliczonej na podstawie wartości rzeczywistych parametrów procesu od wartości zadanych, co pozwoliło na zaproponowanie modelu matematycznego identyfikującego wartość rzeczywistej energii liniowej w procesie spawania złączy ze stali duplex 2205. Model ten stał się punktem wyjścia do optymalizacji parametrów spawania. Przeprowadzony zakres badań nieniszczących oraz niszczących pozwolił na prawidłową ocenę jakości wykonanych połączeń. Analiza przebiegów prądowo-napięciowych, wykazała korelację pomiędzy zmianami stanu łuku spawalniczego, a powstałymi niezgodnościami spawalniczymi. Największą istotnością w tym zakresie charakteryzuje się natężenie prądu spawania. Cenne informacje Autor uzyskał, w zakresie pomiarów odchyłek płaskości wywołanych cyklem cieplnym spawania. Do ceny odchyłek zastosowano badania stykowe z wykorzystaniem trzpienia pomiarowego w kształcie kulki o średnicy 0,025mm oraz pomiary bezstykowe z wykorzystaniem skanera 3D. W tej części Autor wykazał, że istnieje wąski zakres ilości wprowadzonego ciepła, dla którego odkształcenia są najmniejsze, a zależność odkształceń od ilości wprowadzonego ciepła nie jest funkcją monotoniczną. Badania związane z makrostrukturą i przekrojem poprzecznym wykazały, że zależność pola przekroju spoiny od energii liniowej jest monotonicznie rosnąca i może być opisana funkcją liniową. Doktorant wykazał, że nie ma możliwości jednoznacznego powiązania energii liniowej spawania ze zmianami twardości w poszczególnych obszarach złącza. Oceniał, również istotność wpływu energii liniowej spawania na pozostałe własności mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie, zginanie, udarność). Wyniki tej części technologicznej badań oceniam bardzo wysoko, trochę szkoda, że część związana z analizą strukturalną i wpływu energii liniowej na te zmiany jest niezbyt szeroka. Na koniec tego rozdziału Doktorant wyznaczył dopuszczalny zakres zmienności rzeczywistych parametrów spawania pozwalający na uzyskanie wymaganego poziomu jakości B dla złączy ze stali duplex 2205 o grubości 3 mm. Co do tej części pracy mam jednak kilka zastrzeżeń, pytań i uwag:

- moim zdaniem program badań doświadczalnych powinien być zawarty na początku tego rozdziału,
- podawanie danych technicznych urządzeń spawalniczych, czy sprzętu pomiarowego jest zbędne,
- dlaczego przyjęto grubość blach 3 mm?
- brak informacji o sposobie przygotowania elementów do spawania (cięcie, czyszczenie, ukosowanie, odstęp, osłona grani),
- przy analizie składu chemicznego nie podano zawartości węgla i azotu, dlaczego?, azot w przypadku tej stali odgrywa duże znaczenie,
- proces spawania przeprowadzono z wykorzystaniem drutu elektrodowego o średnicy 1,2mm, czy niekorzystniej byłoby zastosować drut elektrodowy o średnicy 1,0mm?

- W Tabelicy 20 (i następnych), str. 104, Autor opisuje energię liniową z oznaczeniem Q (czy nie jest to ilość wprowadzonego ciepła?), czy podawanie tych wartości z dokładnością do 4 miejsc po przecinku jest uzasadnione?
- proszę uzasadnić istotność różnicy pomiędzy energią liniową obliczoną na podstawie nastawionych wartości natężenia prądu i napięcia łuku, a wartościami zmierzonymi,
- jakość badań metalograficznych makroskopowych jest trochę niska,
- skąd tak duże różnice w twardości materiału rodzimego?
- proszę uzasadnić badania udarności dla takiej grubości złącza i takich własności plastycznych spawanego materiału,
- zakres przedstawionych badań metalograficznych mikroskopowych na mikroskopie świetlnym jest bardzo ubogi,
- brak zaawansowanych badań metalograficznych z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej,
- czy rzeczywiście w obszarach złączy spawanych nie było wydzielenia faz wtórnych, czy ich po prostu nie ujawniono w przeprowadzonych badaniach?
- proszę uzasadnić wniosek 8 (str. 176) i powiązać go ze zmianami strukturalnymi,
- wniosek 13 (str. 177) jest mało precyzyjny, jaki ten cykl powinien być aby, zapewnić odpowiednią jakość złącza?
- jak Autor uważa, jaka będzie skuteczność zaproponowanego eksperymentu badawczego w przypadku zmiany grubości spawanego materiału, czy rodzaju materiału spawanego?

W rozdziale 6 Podsumowanie i wnioski, Autor przedstawił swoje osiągnięcia naukowe, użytkowe oraz nakreślił dalsze kierunki badań. Przeprowadzone badania doświadczalne pozwoliły na zweryfikowanie postawionych hipotez badawczych dotyczących wpływu wartości energii liniowej spawania oraz związków pomiędzy wartościami parametrów wchodzących w jej skład na wybrane własności połączeń spawanych metodą GMAW stali duplex 2205. Autor opracował modele matematyczne wpływu parametrów procesu spawania na własności użytkowe połączeń spawanych, co ma ogromne znaczenie pod względem aplikacyjnym. Doktorant wykazał, że standardowe wyznaczanie ilości wprowadzonego ciepła w procesie spawania GMAW na podstawie nastawionych wartości parametrów wejściowych procesu (napięcia łuku, natężenia prądu i prędkości spawania), według wzoru normowego, nie odpowiada rzeczywistej ilości ciepła wprowadzanego do złącza, co nie pozwala na precyzyjne przewidywanie własności połączeń spawanych. Wyznaczenie wartości energii liniowej na podstawie wartości rzeczywistych parametrów procesu spawania (zmierzonych w trakcie trwania procesu), pozwala z większą dokładnością przewidywać własności połączeń

spawanych. Swoje osiągnięcia Doktorant zawarł w wnioskach poznawczych, metodycznych i utylitarnych.

Oczywiście przeprowadzone badania nie wyczerpują w pełni problematyki, co podkreślił Autor w rozdziale 6.4, ale myślę że te aspekty wyznaczają dalszy kierunek badań Doktoranta i zostaną rozwiązane w następnych pracach. Z mojej strony w pracy brakuje nieco elementów z zakresu Inżynierii Materiałowej (szerszy zakres oceny zmian strukturalnych, szczegółowa analiza strukturalna, bardziej zaawansowana aparatura badawcza). Uwagi krytyczne, czy dyskusyjne dotyczące niniejszej rozprawy, odnoszą się głównie do aspektów technologicznych, sposobu opisu eksperymentu, zakresu tematycznego i informacji w nich podanych i mam nadzieję, że będą pomocne w dalszych badaniach prowadzonych przez Doktoranta. Uważam jednak, że podane uwagi nie wpływają na obniżenie ogólnej pozytywnej oceny opiniowanej pracy doktorskiej Pana mgra inż. Stanisława Pałubickiego. Praca cechuje się dobrym poziomem merytorycznym, jest napisana bardzo poprawnie pod względem językowym i stylistycznym,. Uzyskane wyniki eksperymentu badawczego Doktoranta są oryginalne, wartościowe poznawczo i mają znaczenie aplikacyjne. W mojej opinii przedstawiona praca doktorska Pana mgra inż. Stanisława Pałubickiego zasługuje na pozytywną ocenę merytoryczną i formalną.

Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana praca doktorska Pana mgra inż. Stanisława Pałubickiego pod tytułem „Badania i ocena złączy spawanych ze stali ferrytyczno-austenitycznej w zależności od energii liniowej procesu” spełnia wymogi stawiane pracom na stopień doktora nauk Inżynieryjno-technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz. U. nr 65, poz. 595 (z późniejszymi zmianami) oraz ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668). Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Koszalińskiej o dopuszczenie Pana mgra inż. Stanisława Pałubickiego do publicznej obrony jak również procedowania kolejnych etapów w zakresie ubiegania się przez Doktoranta o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk Inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie: Inżynieria Mechaniczna.

Opracował:

