

dr hab. inż. Grzegorz Rogalski, prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
Zakład Technologii Materiałów Konstrukcyjnych i Spajania
ul. Gabriela Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 03.07.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Wojtaszaka „Wpływ energii liniowej łuku spawalniczego na strukturę i właściwości złączy ze stali DD11 i DD14”

wykonanej pod opieką Promotora Pana Prof. dr. hab. inż. Janusza Adamca oraz Opiekuna pomocniczego Liene Giertmane - Done

na podstawie pisma Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 21 maja 2025 roku. Sygnatura pisma: RDIMa.512.9.2024 RM

Wprowadzenie, tematyka rozprawy

Procesy spajania są powszechnie stosowane w wielu sektorach oraz gałęziach przemysłowych. Pozwalają one na łączenie materiałów jednorodnych strukturalnie oraz o odmiennych właściwościach, co jest ich niewątpliwą zaletą i daje wiele możliwości. Trzeba jednak zaznaczyć, że są to procesy specjalne, które wymagają kontroli zaczynając od fazy projektowania, a kończąc na etapie wydania gotowego produktu odbiorcy. Wśród procesów spajania wyróżnić należy spawanie, zgrzewanie, lutowanie, lutospawanie oraz klejenie. Wymienione metody charakteryzują odmienne warunki oraz mechanizmy tworzenia się trwałych połączeń. Jednocześnie każdy z przywołanych procesów powinien umożliwić uzyskanie właściwości mechanicznych oraz eksploatacyjnych spełniających określone kryteria akceptacji.

Jedną z gałęzi przemysłu, która wykorzystuje wszystkie wymienione metody spajania jest przemysł samochodowy. Związane jest to z budową pojazdów samochodowych, która może być odmienna w zależności od przeznaczenia, np. samochód do pracy w terenie i samochód do codziennej jazdy po mieście. Elementy spajane znajdują się w podwoziu, nadwoziu, układzie elektrycznym, układzie napędowym, układzie zawieszenia czy galanterii samochodowej. We współczesnych pojazdach można spotkać różnorodne materiały konstrukcyjne takie jak stal, aluminium, magnez czy polimery (duroplasty, termoplasty, elastomery). Przykładem stosowania różnych gatunków stali jest współczesne, samonośne nadwozie samochodowe. Można tam odnaleźć stale o niskiej wytrzymałości (LSS), podwyższonej wytrzymałości (HSS), wysokiej wytrzymałości (UHSS) czy bardzo wysokiej wytrzymałości (VHSS). Pokazuje to, jak ważna jest możliwość zastosowania szerokiej palety procesów spajania ze względu na różnorodność stosowanych materiałów konstrukcyjnych.

Jednym z istotnych elementów pojazdu samochodowego jest felga, która pozwala na przeniesienie siły z piasty na oponę, chłodzenie układu hamulcowego oraz ochronę opony. Element ten musi spełniać ściśle określone wymagania w odniesieniu do wytrzymałości oraz zużycia związanego z warunkami eksploatacji. Nie bez znaczenia są również względy

estetyczne. Z tego powodu felgi wytwarza się najczęściej z odpowiednich gatunków stali, aluminium i jego stopów oraz magnezu. Bardzo popularnym rozwiązaniem, szczególnie w przypadku specjalnych wymagań jest stosowanie felg stalowych. Do ich wytwarzania stosowany jest powszechnie proces spawania, który wykorzystuje różne formy ciepła np. łuk elektryczny, wiązka promieniowania laserowego lub ich kombinacja (spawania hybrydowe). Należy jednak podkreślić, że dynamiczne zmiany temperatury w czasie nagrzewania oraz stygnięcia prowadzą do zmian strukturalnych, co przekłada się na właściwości mechaniczne oraz eksploatacyjne. Poznanie wpływu ilości wprowadzonego ciepła (energii liniowej spawania) jest istotne ze względu na przedstawione zmiany, tym bardziej że na omawiany parametr wpływają zmienne zasadnicze danej metody łączenia. Ma to szczególne znaczenie w przypadku nowych odmian procesów spawania. Moim zdaniem podjęta tematyka rozprawy jest aktualna i niezwykle interesująca. Dotyczy to aspektów naukowych, technologicznych oraz organizacyjnych, które ewoluują. Zaproponowane w pracy rozwiązania są istotne i znajdują bezpośrednie przełożenie w rzeczywistych pracach spawalniczych. Przywołane fakty potwierdzają słuszność podjęcia przez Doktoranta prac przedstawionych w recenzowanej dysertacji.

Struktura rozprawy i jej charakterystyka

Recenzowana dysertacja liczy 171 stron. Zawiera 9 rozdziałów wraz z licznymi podrozdziałami. W dostarczonej wersji pracy oznaczenia rozdziałów i podrozdziałów w spisie treści nie są zbieżne z ich oznaczeniem w pracy. Jest to związane z oznaczeniem spisu treści jako rozdział 1, co prawdopodobnie spowodowało kolejne przestawienie numeracji.

W mojej ocenie struktura pracy jest odpowiednia, czytelna i kompletna, choć brakuje w niej wykazu oznaczeń i skrótów, dotyczących głównie terminologii technicznej i symboli w przywołanych wzorach. Tytuł pracy jest właściwy, ale dosłowne tłumaczenie sformułowania „... energii liniowej łuku spawalniczego ...” na język angielski w formie „... linear energy of the welding arc ...” jest w mojej ocenie mylne. Związane jest to z terminologią stosowaną w odpowiednich normach przedmiotowych np. PN-EN 1011-1, ISO/TR 18491, ISO/TR 17671-1.

Pracę rozpoczyna czytelny spis treści. Kolejno w rozdziale 2 (Wstęp) oraz 3 (Przegląd literatury) Doktorant wprowadza czytelnika w poruszaną tematykę. Przedstawia obszary zastosowania felg specjalnych, zmiany strukturalne w stalach niestopowych wywołane procesem spawania, proces produkcyjny felg oraz aspekty ekonomiczne. Następnie płynnie przechodzi do omówienia wymagań prawnych i technicznych stawianych felgom, stosowanych materiałów, technologii wytwarzania oraz przeglądu procesów wykorzystywanych do łączenia elementów felg, takich jak: zgrzewanie elektryczne oporowe, spawanie metodą MAG oraz MAG z podwójnym pulsem, spawanie laserowe i spawanie hybrydowe (MAG w połączeniu ze spawaniem laserowym). Każdy z poruszanych obszarów został opisany w sposób właściwy i kompletny. Czytelnik uzyskuje informacje, które pozwalają na zrozumienie poruszanej tematyki. W przypadku opisu procesów spajania w tym spawania, brakuje mi jednak przywołania numerów procesów spawania zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 4063. Takie podejście pozwoliłoby na jednoznaczne zdefiniowanie wykorzystanych metod. Jest to istotne, ponieważ stosowana symbolika i opisy są niejednoznaczne np. oznaczenie MAG jest ogólne i nie definiuje postaci materiału dodatkowego. Tę część pracy kończy właściwe i trafne podsumowanie, do którego nie mam zastrzeżeń. W kolejnym rozdziale Autor przedstawia cele, zakres badań oraz tezę pracy o następującej treści:

„Energia liniowa łuku spawalniczego oraz moc wiązki laserowej decydują o strukturze i właściwościach złączy, a tym samym o możliwym zastosowaniu nowoczesnych wysokowydajnych procesów łączenia w produkcji felg specjalnego zastosowania, spełniających wymagania klienta zgodnych z wytycznymi ETRTO”.

Tak sformułowaną tezę pracy uważam za poprawną, a postawione cele pozwolą na jej weryfikację w zakresie naukowym, użytkowym oraz metodycznym. Tę część pracy, którą traktuję jako analizę aktualnej wiedzy oraz przegląd literatury związanej z poruszaną tematyką zamyka program badań przedstawiony na rysunku 2.6.1. Jest on poprawnie skonstruowany. Wyróżnić w nim można etapy prac badawczych z przypisanymi zadaniami w odniesieniu do poszukiwanych danych wyjściowych.

Rozdział oznaczony w tekście jako 3 to Badania własne (w spisie treści oznaczony jako 4). W tej części Doktorant scharakteryzował materiały podstawowe wykorzystane w przedmiotowych badaniach (stałe DD11 oraz DD14 przeznaczone do przeróbki plastycznej), przedstawił grupy badań wraz z ich metodyką, symulację numeryczną procesu spawania, opisał próby technologiczne spajania przedmiotowych felg oraz przedstawił uzyskane wyniki badań. Ten fragment dysertacji jest uporządkowany i czytelny. W kolejnym rozdziale Autor skupia się na aspektach technologicznych nowej technologii spajania felg specjalnego zastosowania. Przedstawia tu analizę SIPOC dla procesów produkcji felg poniżej 20 oraz mapowanie procesu. Widać, że Doktorant doskonale odnajduje się w tego rodzaju zagadnieniach, a przedstawione informacje odzwierciedlają realne, ale i systemowe podejście do zarządzania procesem produkcyjnym. Rozdział oznaczony w tekście jako 5 związany jest z analizą uzyskanych wyników badań. Autor wykorzystuje do tego narzędzia statystyczne np. test Ryana-Joinera czy Mann-Whitneya. Jest to bardzo dobra praktyka, która umożliwia ocenę uzyskanych wyników badań, w tym ich informatywność. Należy jednocześnie pamiętać, że procesy spajania są specyficzne i pewne skojarzenia danych wejściowych nie zawsze dają pożądany efekt w rozumieniu statystycznym. W tym przypadku stwierdzam, że zastosowane narzędzia zostały dobrane poprawnie. Pracę kończą wnioski, wykaz piśmiennictwa (literatura) oraz podsumowania w języku polskim i angielskim. Wnioski sformułowano w 11 punktach oraz powiązanych z nimi podpunktach. Z edycyjnego punktu widzenia, wskazane byłoby oznaczenie wniosków głównych jako cyfry 1, 2, 3, itp., a podpunkty jako litery a), b) c) itp., takie podejście jest bardziej czytelne. Moim zdaniem warto podzielić wnioski na naukowe, użytkowe i perspektywiczne.

Literatura zawiera 152 pozycje, co świadczy o rozpoznaniu poruszanego zagadnienia w świetle istniejących doniesień. Literatura jest zróżnicowana, można w niej odnaleźć pozycje książkowe, artykuły naukowe polsko i anglojęzyczne, normatywy, specyfikacje oraz strony internetowe. Stwierdzam, że jest ona związana z poruszanymi zagadnieniami i jest wystarczająca.

Wykresy, rysunki oraz tabele są czytelne i poprawnie sformatowane, choć z pewnymi wyjątkami, które zostaną przywołane w uwagach do recenzowanej dysertacji. Pracę czyta się płynnie, pomimo szerokiej i złożonej tematyki.

Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowaną dysertację oceniam bardzo wysoko. Po jej analizie stwierdzam, że poruszane zagadnienia są bardzo interesujące, a przeprowadzone badania przyniosą korzyści w zakresie naukowym, poznawczym oraz technologicznym. Procesy spajania, które zostały

wykorzystane do wykonania przedmiotowych felg poddano ocenie na podstawie szerokiej gamy badań. Pozwoliło to na wybór optymalnego i zaimplementowanie go do cyklu produkcyjnego felg stalowych specjalnego przeznaczenia w firmie Yokohama-TWS.

Doktorant prawidłowo zdefiniował cele, a następnie zrealizował je w ramach opracowanego planu badań, który przedstawiono na rysunku 2.6.1. Zawiera on cztery etapy. Pierwszy z nich to postawienie tezy pracy i zdefiniowanie celów. Drugi dotyczy wykonania analiz numerycznych, złączy próbnych wytypowanymi procesami spawania oraz weryfikacja jakości otrzymanych połączeń na podstawie badań nieniszczących. W trzecim etapie Doktorant określił struktury i mikrostruktury z wykorzystaniem technik SM, LM, SEM, mikroanalizy EDS oraz analizy fazowej XRD. Czwarty etap to szeroka analiza wyników badań pozwalająca na określenie wpływu energii liniowej spawania (ilości wprowadzonego ciepła), mocy wiązki laserowej na właściwości uzyskanych złączy, ocenę wpływu czynników technologicznych i strukturalnych na odporność na korozję elektrochemiczną oraz wpływu zastosowanych procesów na wydajność wytwarzania przedmiotowych felg. W tym etapie Autor opracował również wytyczne technologiczne pozwalające na zakwalifikowanie technologii spawania oraz zgrzewania zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi, jak i ocenił aspekty ekonomiczne.

Materiały podstawowe wykorzystane w badaniach, stale DD11 i DD14 zostały scharakteryzowane właściwie. Ich właściwości przedstawiono w tabeli 3.1.1., a struktury materiału w stanie dostawy na rysunku 3.1.1. Brakuje mi w tej części pracy podania grubości łączonych elementów. Ta informacja pojawia się dopiero w kolejnym rozdziale (Analiza wyników badań), co według mnie jest ważnym przeoczeniem. Doktorant opisał wykonywane badania z powołaniem się na odpowiednie normy przedmiotowe oraz przedstawieniem schematów przygotowania próbek i przeprowadzenia badań np. badania właściwości mechanicznych, rysunek 3.2.3.1., 3.2.3.2. Moim zdaniem takie podejście jest właściwe, ponieważ w sposób jednoznaczny definiuje sposób postępowania i daje możliwość porównania uzyskanych wyników z innymi, które otrzymano w oparciu o przywołane standardy.

Symulację numeryczną wykonano przy zastosowaniu oprogramowania Visual WELD (SYSWELD) dla procesów spawania laserowego, hybrydowego i metodą MAG. Odpowiednio dobrano modele źródła ciepła dla poszczególnych metod spawania, co przedstawiono w tabelach np. dla spawania metodą MAG tabela 3.3.3. Poprawnie zdefiniowano warunki brzegowe opisujące odprowadzanie ciepła do otoczenia oraz zamocowanie spawanego elementu. Zastosowano odpowiednie siatki modelu, a jej zagęszczenie w obszarze ściegu oraz strefy wpływu ciepła pozwala na uzyskanie wysokiej dokładności prowadzonych analiz. Bardzo dobrym rozwiązaniem, a według mnie koniecznym było porównanie uzyskanych wyników symulacji z rzeczywistymi przekrojami poprzecznymi złączy spawanych. Pozwala to na weryfikację zgodności rezultatów numerycznych z geometrią złącza i daje podstawę do dalszych analiz. Doktorant na podstawie analiz MES określił rozkłady ciepła na powierzchni oraz w przekroju spoin, rozkład poszczególnych faz, rozkład odkształceń całkowitych, naprężeń średnich i zredukowanych oraz skumulowanego odkształcenia plastycznego. Uzyskane wyniki uważam za wiarygodne i pozwalające na wyciągnięcie odpowiednich wniosków. W tym punkcie pojawia się jednak pytanie, dlaczego Doktorant wykonał symulację tylko dla procesów spawania, a pominął proces zgrzewania elektrycznego oporowego?

W rozdziale oznaczonym w tekście jako 3.4 Autor przedstawia próby technologiczne spawania. Nazwa rozdziału powinna być zmieniona na próby technologiczne spajania,

ponieważ uwzględnia ona również wykonanie złączy przy zastosowaniu procesu zgrzewania elektrycznego oporowego. Wykonanie złączy testowych zostało opisane poprawnie. Przedstawiono podstawowe zmienne zasadnicze zastosowanych metod oraz opis stanowisk i urządzeń. Warto byłoby opracować i przedstawić instrukcje technologiczne spawania i zgrzewania (WPS), co pomogłoby przy wdrożeniu opracowanych technologii. W kolejnym punkcie (3.4.2) Doktorant przedstawia pomiary i wyniki pomiarów spawalniczych cykli cieplnych. Dla procesów spawania zostały zarejestrowane na stanowisku w Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, a dla procesu zgrzewania na stanowisku produkcyjnym w zakładzie Yokohama-TWS. Brakuje mi w tej części dokładniejszego opisu stosowanej metodyki pomiaru np. jakiego rodzaju termoelementu (termopary) użyto, jak kalibrowano układ pomiarowy z uwzględnieniem kompensacji zimnych końców, jaka była częstotliwość próbkowania czy błąd pomiaru. Cykle cieplne spawania i zgrzewania dostarczają wielu cennych informacji. Dla zastosowanych materiałów podstawowych ważnym jest wyznaczenie temperatury maksymalnej, czasu stygnięcia w zakresie temperatur od 800 do 500°C (oznaczony jako $t_{8/5}$) oraz chwilowej prędkość stygnięcia w temperaturze najmniejszej trwałości austenitu. Czas $t_{8/5}$ wykorzystywany jest jako parametr charakteryzujący warunki stygnięcia obszaru SWC, co umożliwia prognozowanie struktur oraz związanych z nimi właściwości. Przedstawione wykresy dla procesów spawania nie umożliwiają tego ze względu na zbyt niską temperaturę maksymalną. Uwzględniając rysunek 3.4.2.1, przedstawiający rozmieszczenie termoelementów, zarejestrowane cykle temperaturowe mogą być przydatne do określenia rozkładu temperatur i odniesienia go do wyników symulacji numerycznych.

W rozdziale 3.5 Autor przedstawia wyniki badań. Odnosi się do kryteriów akceptacji ustanowionych normami przedmiotowymi, co bardzo dobrze świadczy o znajomości procesu, weryfikacji uzyskanych rezultatów oraz stosowanych standardów, które przywołuje. Ocenę badań metalograficznych makro i mikroskopowych oceniam bardzo dobrze. Ich opis jest merytoryczny i oparty na posiadanej wiedzy. Trafnie określił ujawnione makro i mikrostruktury, co przedstawiano w tabeli 3.5.2.1 i rysunku 3.5.2.1. Autor wykazał się umiejętnością identyfikacji mikrostruktury w poszczególnych obszarach złączy zgrzewanych i spawanych. Mikroanaliza wydzielen strukturalnych przy zastosowaniu techniki EDS również nie budzi moich zastrzeżeń. Wyniki badań mechanicznych zostały przedstawione w formie graficznej oraz tabelarycznej, co bardzo ułatwia ich interpretację. Widać świadomość Doktoranta, co do poszukiwanych wielkości. Zdarza się, że dla złączy spawanych niektórzy naukowcy wyznaczają granicę plastyczności, co moim zdaniem jest niewłaściwe. Wynika to z faktu, że obszar SWC jest anizotropowy mikrostrukturalnie, co powoduje, że granica plastyczności jest zmienna w przedziale trudnym do określenia. Autor świadomie tego błędu uniknął, wyznaczył wytrzymałość na rozciąganie R_m i miejsce zerwania próbki. Pomiary pracy łamania oraz udarności przeprowadzono na próbkach zredukowanych w temperaturze 20°C oraz -40°C. Moim zdaniem taki wybór jest odpowiedni i odzwierciedla warunki eksploatacji felg stalowych specjalnego przeznaczenia. W tym miejscu sugeruję podanie kryterium akceptacji, aby odnieść uzyskane wyniki do wymagań, jeżeli takie istnieją. Taką samą uwagę mam to wyników pomiaru twardości. W badaniach właściwości użytkowych Doktorant jako kryterium oceny właściwości użytkowych złączy doczołowych ze stali DD11 i DD14 przyjął poziom odporności na korozję w mgle solnej oraz atmosferze zawierającej związki siarki, co w mojej opinii jest bardzo dobra decyzją. Badania zostały wykonane zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi. Wyniki przedstawiono na rysunkach oraz w tabelach np. rysunek 3.5.4.1., tabela 3.5.4.1 i 3.5.4.2. Wyniki mikroanalizy składu chemicznego EDS, rozkładu

pierwiastków w produktach korozji na powierzchni badanych złączy oraz wyniki badań składu fazowego (XRD) produktów korozji umożliwiając dokonanie pełnej analizy i wyciągnięcie odpowiednich wniosków.

W rozdziale 4 (oznaczenie w tekście) recenzowanej pracy Autor porusza aspekty ekonomiczne zastosowania nowej technologii łączenia felg specjalnego przeznaczenia. Analizuje opłacalność inwestycji technologicznej w firmie Yokohama-TWS wykorzystując narzędzia mapowania procesów ujętych w metodologii LEAN. Do tego celu stosuje analizę SIPOC (diagram opisujący dane wejściowe, proces i dane wyjściowe procesu: Supplier, Input, Process, Output, Customer) oraz VSM (Value Stream Mapping). Pomimo złożonego zagadnienia jest ono opisane i wyjaśnione w sposób czytelny i zrozumiały. Doktorant analizując proces łączenia felgi i dysku, stwierdził, że najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby wdrożenia spawania metodą MAG z podwójnym pulsem lub spawania hybrydowego laser + MAG. Ostatecznie biorąc pod uwagę inne czynniki wytypowano MAG z podwójnym pulsem jako docelowy proces łączenia elementów felg specjalnych.

Rozdział 5 dotyczy analizy uzyskanych wyników badań. Doktorant wykorzystuje narzędzia statyczne takie, jak test Ryana-Joinera czy Mann-Whitneya. Pozwala to na ocenę pozyskanych danych wejściowych w ramach badań i określenie ich wpływu na poszukiwane wielkości wyjściowe. Wybór odpowiedniego testu w odniesieniu do procesów spajania nie jest prosty, co wynika z jego cech charakterystycznych np. powiązanie niskich wartości natężenia prądu spawania z wysoką wartością napięcia łuku nie jest możliwe do zaimplementowania. Biorąc to pod uwagę, uważam, że zastosowane testy są odpowiednie i dają możliwość wykonania właściwej analizy. Przyjęte założenie, że jeśli wartość „p” jest większa od ustalonego poziomu istotności (zazwyczaj 0,05), to nie ma wystarczających dowodów, aby odrzucić hipotezę zerową o normalności rozkładu danych jest słuszne. Wykonane analizy przy takim założeniu w mojej ocenie są informatywne. Doktorat wykonał analizę korelacji jednostkowej zmiany masy próbki w funkcji czasu ekspozycji wykorzystując współczynnik korelacji liniowej Pearsona, a następnie przeprowadził analizę regresji, która pozwoliła na wyznaczenie równań krzywych kinetyki korozji dla poszczególnych złączy spawanych. Takie podejście świadczy o dużej świadomości i umiejętności posługiwania się Autorem narzędziami statystycznymi. Należy również podkreślić, że posiada on umiejętność interpretacji uzyskanych efektów.

Zastosowano standardowe i nowoczesne metody badawcze, co umożliwiło weryfikację postawionej tezy oraz sformułowanie odpowiednich wniosków. W przypadku recenzowanej pracy do najważniejszych dokonań Doktoranta można zaliczyć:

1. Określenie wpływu energii liniowej spawania (ciepła wprowadzonego) na strukturę i właściwości złączy spawanych oraz zgrzewanych ze stali DD11 i DD14 w oparciu o standardowe i nowoczesne metody badawcze.
2. Porównanie właściwości złączy wykonanych różnymi procesami spajania w zakresie mikrostrukturalnym, mechanicznym, technologicznym oraz ekonomicznym. Pozwoliło to na wybór optymalnej metody możliwej do zaimplementowania w firmie Yokohama-TWS.
3. Opracowanie wytycznych technologicznych do kwalifikowania technologii spawania zgodnie z odpowiednimi normami przedmiotowymi dla spawania łukowego metodą MAG z podwójnym pulsem oraz hybrydowego (laser + MAG) oraz zgrzewania blach ze stali DD11 i DD14.
4. Określenie skali kosztów wdrożenia technologii zgrzewania w stosunku do technologii spawania hybrydowego do produkcji cylindra felg specjalnych. Pozwala to na

podjęcie odpowiedniej decyzji opierając się na aspektach naukowych, technologicznych oraz ekonomicznych.

Pomimo bardzo dobrego odbioru pracy oraz wysokiej oceny merytorycznej w wyniku jej dokładnej analizy nasunęły mi się pewne spostrzeżenia, uwagi oraz pytania, które przedstawiam poniżej.

Uwagi do recenzowanej rozprawy

1. Moim zdaniem tłumaczenie sformułowania „energia liniowa spawania” bezpośrednio na język angielski do postaci „linear energy of the welding arc” jest niefortunne. Wszystkie znane mi standardy np. PN-EN 1011-1, ISO/TR 18491, ISO/TR 17671-1 przywołują sformułowanie heat input nawiązując do przywołanego wzoru.
2. Na rysunku 1.2 przedstawiono struktury złącza spawanego w odniesieniu do fragmentu układu żelazo – cementyt, co oznaczono Fe-C. Czy nie powinno zastosować się w tym przypadku oznaczenia Fe-Fe₃C?
3. Nie wszystkie wzory posiadają przywołane jednostki przy wielkościach fizycznych, np. wzór 2.4.1.1, 2.4.1.2, 3.3.1., 3.3.2, 3.3.3.
4. Podczas spawania metodą MAG Autor stosował gaz osłonowy o nazwie handlowej MISION 18 i składzie chemicznym 81,97 % Ar, 18% CO₂ oraz 0,03% NO. Czy dodatek NO ma wpływ na proces spawania i jaką ma rolę w zastosowanej mieszance gazów? Jakie oznaczenie ma ten rodzaj gazu osłonowego zgodnie z normą PN-EN ISO 14175? Moim zdaniem jest to zmienna zasadnicza tego procesu i powinna być ona oznaczona zgodnie z przywołaną normą, aby można było przeprowadzić proces kwalifikowania technologii spawania.
5. Proszę o informację czy skład chemiczny materiałów dodatkowych do spawania został podany na podstawie danych katalogowych, czy zgodnie z atestem materiałowym lub świadectwem odbioru?
6. Proszę o krótkie uzasadnienie i komentarz w odniesieniu do zastosowanych stężeń mediów w badaniach odporności na korozję. Dotyczy to badania we mgle solnej oraz komorze Koesternicha.
7. Na stronie 76 Autor napisał „ *próby zgrzewania przeprowadzono na stanowisku do spawania felg specjalny ...* „. Wydaje się, że bardziej właściwym było by tu napisanie na stanowisku do zgrzewania, tym bardziej, że jest ono przedstawione na rysunku 3.4.1.1.
8. Proszę o informację czy parametry podane na stronie 7 są wartościami średnimi i czy one zostały ujęte w obliczeniach energii liniowej spawania (ciepła wprowadzonego).
9. Podczas spawania wiązką promieniowania laserowego istotnym parametrem jest miejsce jej ogniskowania np. na powierzchni spawanego elementu, pod powierzchnią itp. Parametr ten ma wpływ na geometrię wtopienia. Proszę o podanie tego parametru dla wykonanego złącza.
10. Proszę o wyjaśnienie w jakim celu zostały wyznaczone cykle cieplne spawania?
11. Przy opisie badań nieniszczących warto byłoby pokazać zdjęcia lub raporty z ich przeprowadzenia.
12. Dla jakiej stali przedstawiono makrostrukturę w tabeli 3.5.2.1? Z analiz tekstu to nie wynika. Czy wykonano badania dla stali DD11 i DD14.

13. Na stronie 88, 8 wiersz od dołu Autor napisał „*Mniejsza ilość wprowadzonej energii zmienia również cykl cieplny spawania*„. Proszę o rozwinięcie tego sformułowania i wyjaśnienie co Autor miał na myśli.
14. Na rysunku 3.5.3.2 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie. Jeżeli są to wartości średnie, to wskazane jest podanie odchylenia standardowego na wykresie słupkowym. Dodatkowo linią poziomą zaznaczono wymagania minimalne. Z tabeli 3.1.1. wynika, że są to wartości min. 440 MPa dla stali DD11 i min. 380 MPa dla stali DD14. Przypisane linie są poniżej tych wartości. Jakie wartości są zaznaczone linią poziomą?
15. Jakie kryterium akceptacji przyjęto dla pomiarów twardości? Czy jest ono związane z normą PN-EN ISO 145614-1 i spawaną grup materiałową?
16. W tabeli 3.5.3.3 oraz na rysunkach 3.5.3.4 i 3.5.3.5 na osi rzędnych nie podano obciążenia dla pomiaru HV. Czy mierzono twardość HV10?
17. Analizując recenzowaną pracę w opisie materiałów podstawowych oraz planowaniu badań nie znalazłem informacji o grubości łączonych elementów. Pojawia się ona dopiero w rozdziale Analiza wyników badań. Moim zdaniem jest to niedopatrzenie, ponieważ grubość odgrywa istotną rolę, choćby z punktu widzenia doboru parametrów spawania czy mechanizmu dystrybucji ciepła.
18. Zalecam stosowanie sformułowań: natężenie prądu spawania i napięcie łuku zamiast prąd spawania i napięcie spawania. Taka terminologia jest zgodna z opisem zmiennych zasadniczych dla danego procesu w normach przedmiotowych.
19. W pracy pojawiły się nieliczne literówki, brak jednostek przy wartościach oraz błędy stylistyczne, co nie wpływa na jakość merytoryczną recenzowanej pracy.

Przedstawione uwagi i spostrzeżenia nie obniżają wysokiej wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy. Jej lektura oraz analiza dostarcza wielu ciekawych informacji. W mojej ocenie zaproponowana do wdrożenia technologia spawania przyniesie wymierne korzyści.

Wniosek końcowy

Recenzowana praca doktorska Pana mgr. inż. Macieja Wojtaszaka pod tytułem „*Wpływ energii liniowej łuku spawalniczego na strukturę i właściwości złączy ze stali DD11 i DD14*” wykonana pod opieką Promotora Pana prof. dr. hab. inż. Janusza Adamca oraz opiekuna pomocniczego Liene Giertmane-Doniejest jest bardzo interesująca i stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe oraz technologiczne. Doktorant wykazał różnice pomiędzy badanymi procesami oraz wskazał najbardziej korzystny do implementacji uwzględniając właściwości metalurgiczne, mechaniczne oraz aspekty produkcyjno – ekonomiczne. Postawiona teza została udowodniona poprzez wykonanie szerokiej gamy badań oraz właściwą i trafną analizę uzyskanych wyników. Doktorant udowodnił, że posiada umiejętności planowania badań, realizacji oraz analizowania i interpretowania uzyskanych wyników. Moim zdaniem wykazuje umiejętność formułowania odpowiednich wniosków, które oparte są o dowody naukowe. Doktorant potwierdził wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych, a przedstawiona przez Niego praca doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego.

Stwierdzam, że opiniowana praca doktorska spełnia w pełni wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z roku 2018 pozycja 1668) oraz wcześniejsze regulacje prawne (w szczególności Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku: tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 882 ze zmianą: Dz. U. z 2016 r. poz. 1311). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Materiałowej, Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Macieja Wojtaszaka do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Sporządził

dr hab. inż. Grzegorz Rogalski, prof. PG

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)