

Stalowa Wola, 17.12.2024 r.

dr hab. inż. Andrzej TRYTEK, prof. PRz
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Mechaniczno-Technologiczny
Zakład Wytwarzania Komponentów i Organizacji Produkcji
ul. Kwiatkowskiego 4, 37-450 Stalowa Wola

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgra inż. Damiana Miary

pt.: „*Wpływ wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082*”,

której promotorem jest prof. dr hab. inż. Janusz Adamiec

Recenzję wykonano na podstawie pisma RDIMa.512.8.20224 RM. z dnia 22.10.2024 r. od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Adama Grajcara.

1. Tematyka rozprawy

Rosnące wymagania odbiorców części maszyn oraz komponentów ze stopów metali wymuszają na producentach zmiany stosowanych materiałów oraz technologii i technik wytwarzania.

Nowoczesne rozwiązania technologii trwałego łączenia na szeroką skalę stosuje przemysł motoryzacyjny, lotniczy, kolejowy, stoczniowy, energetyczny i ciepłowniczy. Zmiany stosowanych materiałów do produkcji konstrukcji wytwarzanych za pomocą technik trwałego łączenia wymagają opracowania nowych procedur badawczych, technologicznych i kontrolnych. Wzrost wymagań ekologicznych i ekonomicznych wymusza stosowanie materiałów lekkich i tańszych, a równocześnie o co najmniej takich samych właściwościach użytkowych jak dotychczasowe. Poszukiwane przez przemysł są nowe rozwiązania przyjazne dla środowiska i umożliwiające oszczędności w technologii produkcji. Taką technologią jest zgrzewanie tarcowe FSW stopów aluminium, które coraz częściej stosowane jest w produkcji komponentów dla pojazdów kołowych i szynowych.

Obserwując aktualny rozwój przemysłu, a w szczególności motoryzacji oraz lotnictwa uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej podjęta przez mgra inż. Damiana Miare pt.: „*Wpływ wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082*” jest aktualna i niezbędna dla odlewnictwa. Istotne są także możliwości wdrożeniowe rezultatów rozprawy, które dodają tej pracy pozytywny wydźwięk użyteczny.

2. Charakterystyka i układ pracy

Praca doktorska mgra inż. Damiana Miary ma typowy układ dzielący ją na część teoretyczną i praktyczną. Rozprawa liczy 210 stron, na które składa się 54 strony rozważań teoretycznych oraz

pozostałe 156 stron badań własnych. Studium literaturowe składa się z 5 rozdziałów głównych a badania własne z 7 rozdziałów głównych, wniosków oraz streszczeń w języku polskim i angielskim. W pracy zamieszczono 32 tabele, 146 rysunków oraz 4 wzory i równania. Literatura zawiera 117 pozycji krajowych i zagranicznych, w tym 5 współautorstwa Doktoranta.

2.1. Część teoretyczna

Rozważania literaturowe w rozprawie Autor poświęcił analizie stanu zagadnień związanych z technologią zgrzewania tarcowego z mieszaniem FSW. Scharakteryzował metodę FSW i wpływ poszczególnych parametrów zgrzewania na makro i mikrostrukturę. Przeanalizował ograniczenia i możliwości zastosowania technologii FSW a także niezgodności powstające w takich połączeniach. W kolejnym rozdziale Doktorant scharakteryzował stopy aluminium serii 6xxx (głównie EN AW-6082) pod względem składu chemicznego struktury i właściwości. W rozdziale 4 omówił zgrzewalność metodą oporową oraz metodą FSW stopu aluminium przerabianego plastycznie. Podsumowanie części teoretycznej w rozdziale 5 zawiera plan realizacji doktoratu składający się z 4 głównych zadań.

Uważam, że w tej części pracy Doktorant dobrze dobrał i wykorzystał źródła literaturowe opisując stan zagadnienia. Treści rozważań literaturowych wprowadzają czytelnika w problematykę zgrzewania oraz dają niezbędną porcję informacji dotyczących aspektów zgrzewania stopów aluminium metodą FSW.

2.2. Część praktyczna

Część praktyczna rozprawy rozpoczyna rozdział *Teza, cel i zakres badań*. Doktorant na bazie dotychczasowego doświadczenia oraz analizy literatury sformułował następującą tezę:

„O właściwościach złączy zgrzewanych tarcowo metodą FSW decydują zjawiska strukturalne podczas mieszania materiału w stanie stałym, co pozwala na otrzymanie złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 o wytrzymałości, co najmniej 70% wytrzymałości materiału rodzimego i porównywalnej do materiału rodzimego odporności na korozję. Umożliwia to zastosowanie tych złączy w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz kolejowym.”

Autor przedstawił trzy główne cele: metodyczny, poznawczy i użytkowy.

Sformułowana teza i postawione cele pracy były podstawą do opracowania zakresu pracy, który obejmował: analizę literatury dotyczącą zagadnień ściśle powiązanych z tematyką rozprawy, badania wstępne wytypowanego materiału, badania zasadnicze, opracowanie instrukcji technologicznej zgrzewania, analizę kosztów zgrzewania FSW oraz wnioski. Zakres badawczy pracy Autor przedstawił w formie graficznej, jako schemat programu badań.

Pierwszym etapem badawczym Doktoranta była ocena właściwości mechanicznych, składu chemicznego i mikrostruktury stopu EN AW-6082 wytypowanego do badań a następnie porównanie z wynikami zawartymi w odpowiednich normach oraz atestach.

Próby technologiczne Doktorant wykonał przy zastosowaniu stanowiska do zgrzewania FSW na bazie frezarki konwencjonalnej FYF32 JU2. Do zgrzewania zastosowano zmodyfikowane geometrycznie narzędzie Triflute™. Zgrzewanie wykonano na blachach o grubości 6 mm z zastosowaniem sześciu wariantów przy zmiennych parametrach: trzech prędkościach obrotowych narzędzia 450, 900 i 1800 obr./min. oraz dwóch prędkościach zgrzewania 450 i 900 mm/min.

Podczas zgrzewania wykonano pomiary pola temperatury za pomocą kamery termowizyjnej VIGOcam oraz pomiary temperatury z wykorzystaniem termopar typu K umieszczonych wewnątrz

łączonych blach. Wykonano także badania termicznej analizy różnicowej (DTA) z zastosowaniem analizatora SETSYS Setaram i termopar typu S, w celu określenia temperatur początku i końca przemiany badanego stopu. Autor przeprowadził także symulację zgrzewania i odkształceń złączy z wykorzystaniem oprogramowania SYSWELD.

Kolejnym etapem badań była ocena wizualna złączy FSW oraz badania metalograficzne makro i mikrostruktury złączy. Obserwacje prowadzono na powierzchni połączenia i na przekrojach poprzecznych z wykorzystaniem mikroskopu optycznego oraz elektronowego mikroskopu skaninowego. W skali makro analizowano obszar lica złącza oraz przyległe obszary po stronie natarcia i po stronie spływu. Na przekrojach poprzecznych obserwacje prowadzono w obszarach złącza, SWC oraz materiału rodzimego. Analizowano mikrostrukturę, wielkość i kształt ziaren oraz niezgodności. Wykonano także mikroanalizę składu chemicznego z wykorzystaniem analizatora EDS, XRD do oceny składu fazowego oraz analizatora EBSD do oceny orientacji krystalograficznej i granic ziaren. Metodę FIB-SEM wykorzystano do zobrazowania 3D ziaren i wydzieliń w badanych złączach FSW. Dzięki temu oceniono wielkość, kształt oraz ilość wydzieliń w poszczególnych obszarach złączy.

Badania właściwości mechanicznych wykonano na próbkach wyciętych z połączeń zgrzewanych zgodnie z procedurą określoną w normie dla złączy doczołowych. Wykonano po 4 badania wytrzymałości na rozciąganie dla każdej próbki a wyniki uśredniono. Oceniono również charakter przełomów na powierzchniach po zerwaniu na podstawie obserwacji mikroskopowych. Wytrzymałość na zginanie połączeń zgrzewanych wykonano dla pięciu próbek. Pomiary twardości na przekroju poprzecznym próbek wykonano metodą Vickersa HV1 zgodnie z normą w każdej z analizowanych stref w pobliżu lica oraz grani złącza.

Badania odporności korozyjnej Doktorant wykonał dla trzech różnych warunków otoczenia: w atmosferze symulowanych spalin, w atmosferze SO₂, w rozpylonej solance. Badania korozyjne realizowano dla próbek wyciętych z materiału rodzimego, SWC po stronie natarcia, SWC po stronie spływu i w osi złącza. Ocenę korozji dokonywano na podstawie pomiarów zmian masy próbek oraz obserwacji mikroskopowych.

Część badawcza pracy zawiera obszerną bazę badań, która została wykonana z dużym zaangażowaniem. Zarówno materiał jak i proces zgrzewania badanego stopu zostały wykonane z zastosowaniem niezbędnych metod badawczych oraz nowoczesnych narzędzi technologicznych i informatycznych. Uważam, że Doktorant wykonał bardzo dobrze badania i opracował wyniki badań.

Rozdział 12 pracy zawiera analizę wyników badań oraz aspekty technologiczne zgrzewania FSW. W podrozdziale 12.1 Autor dokonał dość obszernej analizy uzyskanych wyników dodając kalkulację kosztów zgrzewania technologią FSW oraz spawania metodą MIG. W kolejnej części analizy wyników badań Doktorant przedstawił wymagania konieczne do wdrożenia technologii FSW oraz opracował karty niezgodności. W podrozdziale 12.3 wskazał 10 wytycznych zgrzewania FSW badanego stopu aluminium oraz opracował Wstępną Instrukcję Technologiczną Zgrzewania - pWPS oraz Protokół Kwalifikowania Technologii Zgrzewania – WPQR.

Analiza wyników badań jest przeprowadzona rzeczowo i zawiera konkretne stwierdzenia oraz zalecenia dotyczące przygotowania i wykonywania połączeń zgrzewanych stopu EN AW-6082 metodą FSW. Uwagę moją zwraca część dotycząca oceny i kalkulacji kosztów, która moim zadaniem mogłaby znajdować się jako osobny rozdział przed analizą wyników.

Doktorant rozprawę zakończył wnioskami w rozdziale 13. W rozdziale tym odniósł się do postawionej tezy, założonych celów oraz uzyskanych wyników badań. Na tej podstawie sformułował 10 głównych wniosków.

Część badawczą rozprawy oceniam jako bardzo dobrą z obszerną metodyką i zastosowaniem nowoczesnych metod badawczych.

3. Ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Miary zawiera drobne błędy edytorskie dotyczące tekstu i grafiki. Mając na uwadze kolejne prace naukowe Doktorant powinien zwrócić uwagę na kilka przedstawionych poniżej sugestii, które należałoby uwzględnić przy ich opracowaniu;

- rozdziały główne pracy powinny rozpoczynać się od nowych stron,
- str. 42, rys. 34: autor opisuje jako mikrostrukturę zgrzeiny, tu raczej należałoby opisać jako makrostruktura zgrzeiny, ponieważ powiększenie jest zbyt małe aby rozróżnić poszczególne fazy mikrostruktury,
- str. 45, rys. 37: opis na rysunku w języku angielskim,
- str. 17 rys. 11 i str. 46 rys. 38: AS i RS to prawdopodobnie strony natarcia i spływu, ale nie są one opisane wcześniej (np. na rys. 7),
- str. 46 rys. 38: na rysunku podwójne oznaczenie a oraz b , a także nieopisane pod rysunkiem oznaczenia c , d , e , f ,
- str. 48 rys. 40: opis należałoby doprecyzować „Wytrzymałość na rozciąganie i widok przetomów....”,
- na str. 69, Autor pisze: „...że im mniejsza prędkość obrotowa narzędzia tym większa temperatura...”, jednakże z rys.51 wynika że im mniejsza prędkość obrotowa narzędzia tym mniejsza temperatura,
- brak numeru strony na str. 111,
- na str. 105, Autor pisze: „Analiza fazowa wykonana metodą EDSD...”, powinno być EBSD,
- str. 139, tab. 26: brak informacji z której linii pomiarowej są uśrednione wyniki pomiarów twardości,
- str. 140, rys. 116c: skala na osi Y jest większa od pozostałych, należałoby ujednolicić skale dla wszystkich wykresów,
- str. 149-150 rys. 124a, 125a, 126a: rysunki nieczytelne brak odpowiedniego kontrastu i jasności,
- str. 166, rys. 142: należałoby ujednolicić skale dla wszystkich wykresów.

Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają wartości naukowej i merytorycznej niniejszej pracy i są uwagami porządkującymi

4. Osiągnięcia Doktoranta

Zastosowana w pracy metodyka badawcza jest oryginalnym opracowaniem przygotowanym według własnej koncepcji do realizacji celów postawionych przez Autora w rozprawie oraz do udowodnienia postawionej tezy.

Doktorant opracował własny program badań, z wykorzystaniem nowoczesnych metod i urządzeń badawczych, w którym uwzględnił zmianę parametrów procesu wytwarzania złączy metodą FSW.

Doktorant dowiódł, że postawiona teza jest słuszna. Zmieniając parametry procesu zgrzewania FSW uzyskał złącza o wytrzymałości około 70-73% w porównaniu do materiału rodzimego oraz dowiódł, że decydują o tym zjawiska strukturalne podczas mieszania w stanie stałym.

Autor opracował karty niezgodności występujących w procesie FSW w odniesieniu do istniejącej normy niezgodności spawalniczych. Wskazał wytyczne zgrzewania FSW badanego stopu aluminium oraz opracował Wstępną Instrukcję Technologiczną Zgrzewania - pWPS i Protokół Kwalifikowania Technologii Zgrzewania - WPQR.

Doktorat wykorzystał do badań nowoczesne narzędzia i metody badawcze jak np. analizę XRD i EBDS oraz tomografię FIB-SEM.

Przedstawiony w rozprawie plan badawczy, metodyka i analiza badań świadczą o bardzo dobrych predyspozycjach naukowych, badawczych i analitycznych Doktoranta.

5. Pytania do Doktoranta

Proszę mgra inż. Damiana Miare o wyjaśnienia i odpowiedź na poniższe pytania:

1. Na stronach 139-140, tab. 26 i na rys. 116 pojawiły się znaczące różnice twardości w obszarze materiału rodzimego na rys. 116b około 90-95 HV1, a na rys. 116c około 60-70 HV1, jak to wytłumaczyć ?
2. W jaki sposób przygotowywano próbki do pomiarów masy (str. 144, tab. 27, 28) ?
3. Jak Doktorant może wytłumaczyć nieliniowy charakter zmian masy próbek (str. 146, rys. 118 i 119)?
4. Dlaczego charakter odporności na korozję próbki nr 7 jest znacznie inny od pozostałych badanych próbek (str. 155, rys. 132) ?

6. Wniosek końcowy

Rozprawa mgra inż. Damiana Miary pt: „*Wpływ wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082*” **spełnia wymagania dotyczące prac doktorskich:**

- rozprawa zrealizowana według oryginalnej własnej koncepcji i opracowanego planu badawczego,
- postawiona przez Doktoranta w rozprawie teza została udowodniona poprzez wykonane badania i uzyskane rezultaty,
- wyniki badań zostały opracowane w formie tabel, wykresów, makro i mikrostruktur oraz dokonano ich analizy,
- Doktorant opracował karty niezgodności występujących w procesie FSW, wskazał wytyczne zgrzewania FSW, opracował Wstępną Instrukcję Technologiczną Zgrzewania - pWPS i Protokół Kwalifikowania Technologii Zgrzewania - WPQR,

- uzyskane rezultaty wnoszą nową wiedzę i stanowią oryginalny wkład naukowo-badawczy z zakresu łączenia stopów aluminium metodą FSW dla branży spajania materiałów metalicznych i dają możliwość ich wdrożenia w przemyśle.

Rozprawa doktorska mgra inż. Damiana Miary jest oryginalnym opracowaniem, w którym wykazał umiejętności samodzielnego opracowania planu badań i rozwiązywania zadań badawczych. Przeprowadził analizę literatury, opracował koncepcję i plan eksperymentów oraz dokonał analizy wyników badań. Autor posiada predyspozycje do opracowania, interpretacji i analizy wyników badań naukowych.

Biorąc po uwagę powyższe stwierdzenia uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Damiana Miary pt: „*Wpływ wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082*” spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. **Wnioskuje, do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, o dopuszczenie mgra inż. Damiana Miare do publicznej obrony.**

