

Prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechnika Warszawska

Warszawa, 6 grudnia 2024 r.

## **OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Damian MIARA**

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

### **Uwagi ogólne**

Opiniowana praca powstała pod opieką prof. dr hab. inż. Janusza Adamca na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej w Katedrze Metalurgii i Recyklingu gdzie prowadzone są od wielu lat badania podstawowe i aplikacyjne nad rozwiązaniami materiałowymi i technologiami we współpracy z przemysłem. Recenzowana praca wpisuje się doskonale w nurt prac badawczych tej Katedry, a w szczególności dotyczących opracowania innowacyjnych rozwiązań w obszarze technologii spajania tworzyw metalicznych.

W transporcie, a w szczególności w kolejnictwie i lotnictwie, ciągłe dążenie do opracowywania konstrukcji o jak najmniejszej masie, wysokiej wytrzymałości, sztywności i odporności na korozję powoduje niegasnący wzrost zainteresowania materiałami i technologiami łączenia spełniającymi te wymagania.

Na razie od strony materiałowej bezkonkurencyjne są stopy aluminium, z których elementy konstrukcyjne łączyć można ze sobą kilkoma technologiami spajania: spawania łukowego (elektrodą wolframową w osłonie gazowej czy też elektrodą topliwą w osłonie gazowej) oraz zgrzewania (tarcowe, ultradźwiękowe, rezystancyjne).

Doktorant swoje badania przedstawione w dysertacji skupił na stopie aluminium EN AW-6082 oraz metodzie zgrzewania tarcowego FSW (z ang. Friction Stir Welding) stanowiącej alternatywę dla typowych procesów spawania łukowego oraz innych procesów zgrzewania.

Technologia FSW od wielu lat jest intensywnie rozwijana w niemalże wszystkich światowych ośrodkach badawczych zajmujących się technologiami łączenia nowoczesnych stopów przeznaczonych na różnego rodzaju konstrukcje. Jest ona coraz lepiej poznawana pod kątem teoretycznym i technologicznym i uważana za jeden z najważniejszych kierunków rozwoju technologicznego w obszarze łączenia metali, a w szczególności stopów metali lekkich.

Wykorzystanie metody FSW do zgrzewania np. stopu aluminium pozwala uniknąć typowych niezgodności spawalniczych i zgrzewalniczych. W wielu rodzajów konstrukcji staje się ona jedyną metodą ich wykonywania ze względu na możliwość łączenia konstrukcji o skomplikowanych kształtach przy jednoczesnym braku odkształceń zgrzewanych elementów.

W recenzowanej rozprawie szczególna uwaga poświęcona została potrzebie poznania wpływu wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości użytkowych złączy ze stopów aluminium. Do badań wybrano stop aluminium przerabiany plastycznie EN AW-6082 ze względu na jego właściwości i możliwości stosowania w lekkich nowoczesnych konstrukcjach. Uznano, że określenie warunków zgrzewania metodą FSW tego stopu pozwoli na uzyskanie złączy o wysokiej wytrzymałości oraz odpornych na korozję. Zaplanowano prowadzenie badań w celu opracowania wytycznych technologicznych procesu zgrzewania tego stopu przy użyciu technologii FSW pod kątem możliwości wdrożenia jej do przemysłu lotniczego oraz kolejowego.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej i przede wszystkim aplikacyjnej. Podjęto w niej bardzo aktualny wątek badawczy w inżynierii materiałowej – doskonalenie dotychczas stosowanych procesów technologicznych.

### **Uwagi redakcyjne**

Recenzowana praca ma klasyczny układ, jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Autor wyodrębnił w niej kilka części. Na wstępie przedstawił analizę aktualnego stanu wiedzy w obrębie tematyki dysertacji, po czym sformułował wynikający z tego przeglądu cel badań i tezę pracy. Dalsze rozdziały zapoznają czytelnika z koncepcją weryfikacji postawionej tezy oraz programem i metodyką badań. Następnie Doktorant szczegółowo przedstawił wyniki analizy numerycznej oraz badań doświadczalnych.

Pracę kończy dyskusja otrzymanych wyników i wnioski z badań oraz opracowane wytyczne technologiczne zgrzewania FSW w warunkach produkcyjnych.

Dysertację czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest ona napisana bardzo dobrym językiem i praktycznie nie zawiera błędów redakcyjnych. Na uwagę zasługują liczne, trafnie dobrane i aktualne powołania literaturowe.

### **Teza, cel i zakres pracy**

Z przeprowadzonej przez Doktoranta krytycznej analizy aktualnego stanu wiedzy związanego z tematem pracy wynika, że brak jest badań, które dostarczają szczegółowych informacji odnośnie do opisu zjawisk strukturalnych występujących w złączu FSW wykonanym ze stopu aluminium EN AW-6082 związanych z mieszaniem materiału w stanie stałym. Brak jest danych literaturowych w pełni opisujących wpływ warunków zgrzewania (w tym ich synergicznego oddziaływania) na jakość złączy FSW. Według Doktoranta nie pozwala to na opracowanie wytycznych technologicznych tego procesu prowadzących do otrzymywania złączy stopu EN AW – 6082 o dobrej jakości. Autor dysertacji założył, że znajomość warunków zgrzewania tych stopów metodą FSW umożliwi wytwarzanie bezpiecznych konstrukcji w sposób efektywny i powtarzalny oraz zapewni, że powstałe złącza będą pozbawione niezgodności.

Istnieje więc potrzeba wykonania badań umożliwiających poznanie wpływu wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopów aluminium, a w szczególności dla stopu aluminium przerabianego plastycznie EN AW-6082.

Fakt ten był bezpośrednią inspiracją Autora rozprawy do sformułowania następującej tezy badawczej:

*„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”.*

Specyficznym sposobem realizacji badań podporządkowanych weryfikacji postawionej tezy było sformułowanie przez Autora dysertacji trzech rodzajów celów:

*cel metodyczny:*

„opracowanie metodyki oceny struktury i właściwości złączy FSW z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych umożliwiających opisanie zjawisk strukturalnych decydujących o ich właściwościach”,

*cel poznawczy:*

„określenie wpływu prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania na strukturę i właściwości mechaniczne złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 oraz określenie czynników strukturalnych decydujących o odporności na korozję złącza”,

*cel użytkowy:*

„opracowanie wytycznych technologicznych zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny FSW i kwalifikowanie technologii zgrzewania”.

Koncepcja dowodzenia tezy przyjęta przez Doktoranta zakładała przeprowadzenie badań obejmujących:

- opracowanie własnej metodyki badań struktury złączy,
- ocenę wpływu wybranych warunków zgrzewania tarcowego na strukturę i właściwości złączy,
- określenie założeń i wytycznych technologicznych wykonywania konstrukcji,
- opracowanie technologii zgrzewania wytypowanego złącza i jej weryfikacja z zastosowaniem metod obliczeniowych symulacji numerycznej oraz procedury kwalifikowania technologii zgrzewania wg normy PN-EN ISO 25239-4:2021-01.

Szczegółowy program badań obejmował cztery etapy.

Pierwszy zakres pracy obejmował analizę literaturową zagadnienia, w której opisano technologię zgrzewania tarcowego oraz przeprowadzono charakterystykę badanego stopu aluminium.

Kolejnym etapem badań była analiza strukturalna, właściwości mechanicznych oraz badania właściwości użytkowych stopu aluminium EN AW-6082.

Następny, technologiczny etap programu badań obejmował przeprowadzenie prób technologicznych zgrzewania i dobór parametrów technologicznych zgrzewania, w szczególności prędkości obrotowej narzędzia, prędkości zgrzewania oraz ocenę pola temperatur podczas procesu zgrzewania i wyznaczenie sił oraz momentów występujących w tym procesie.

Ostatni etap realizacji programu badań dotyczył oceny makro i mikrostruktury złączy. Doktorant określił również właściwości mechaniczne oraz odporność na korozję wytworzonych złączy w stosunku do materiału rodzimego. Dokonał także oceny wpływu warunków zgrzewania na strukturę i właściwości złączy. Bardzo istotnym z punktu widzenia aplikacyjnego było przeprowadzenie analizy aspektów ekonomicznych stosowania zgrzewania FSW do wykonywania złączy ze stopu aluminium EN AW-6082 oraz wykonanie Wstępnej Instrukcji Technologicznej Zgrzewania.

Uważam, że przeprowadzone przez Doktoranta badania dostarczyły spójnych informacji, które pozwoliły na realizację celu pracy i rzetelne zweryfikowanie postawionej tezy. Raz jeszcze chciałbym podkreślić duże znaczenie zarówno poznawcze jak i przede wszystkim praktyczne uzyskanych wyników badań.

W podsumowaniu stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będącym podstawą rozpraw doktorskich.

### **Ocena rozprawy doktorskiej**

Walorem badań zawartych w recenzowanej dysertacji jest ich bardzo duży potencjał wdrożeniowy. Doktorant zrealizował ambitny program badawczy w celu określenia wpływu wybranych parametrów zgrzewania FSW na strukturę i właściwości złączy wykonanych ze stopu aluminium przerabianego plastycznie EN AW-6082.

Moim zdaniem, bardzo ważne z punktu widzenia zarówno poznawczego jak i aplikacyjnego jest opracowanie przez Autora dysertacji metodyki badań makro i mikrostruktury złącza FSW. Na szczególną uwagę zasługuje wykorzystanie tomografii komputerowej przy użyciu FIB - SEM, która pozwoliła na opis wydzielen w jednostce objętości materiału oraz umożliwiła prawidłową ocenę struktury i jakości złączy FSW badanego stopu aluminium.

Ważnym spostrzeżeniem wynikającym z badań strukturalnych złączy FSW jest wykazanie przez Doktoranta, że rozdrobnienie struktury i wynikające z tego właściwości mechaniczne złącza FSW w strefie mieszania związane jest z odkształceniem materiału wskutek oddziaływania narzędzia w podwyższonej temperaturze. Wielkość odkształcenia jest zależna od cyklu cieplnego zgrzewania oraz stopnia wymieszania mas łączonych materiałów, na co mają wpływ głównie prędkość obrotowa narzędzia oraz prędkość zgrzewania.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych oraz badań eksperymentalnych Autor dysertacji wyznaczył optymalne parametry zgrzewania FSW stopu aluminium EN AW-6082, przyjmując jako kryterium rozkład temperatury oraz najmniejszy poziom odkształceń (prędkość obrotowa  $V_o=900$  obr/min oraz prędkość zgrzewania  $V_z=900$  mm/min).

Ponadto badania właściwości użytkowych złączy FSW w warunkach korozji wysokotemperaturowej (w atmosferze symulowanych spalin silnika diesla), w wilgotnej atmosferze zawierającej związek siarki oraz w mgłę solnej (w atmosferze typowej dla warunków zimowych na drogach) wykazały, że charakteryzują się one podobną odpornością na korozję jak materiał rodzimy i mogą być stosowane w konstrukcjach ze stopu aluminium EN AW-6082 przeznaczonych dla przemysłu motoryzacyjnego.

Niezwykle istotnym wątkiem aplikacyjnym prowadzonych badań była analiza otrzymanych wyników badań pod kątem wdrożenia zgrzewania FSW stopu EN AW-6082 w warunkach przemysłowych. Tą technologią zgrzewania zainteresowanych jest w Polsce kilka firm zajmujących się wytwarzaniem różnych konstrukcji dla przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego. Brak jest jednak danych dotyczących aspektów ekonomicznych tej technologii, zaleceń konstrukcyjnych oraz wytycznych technologicznych służących określeniu projektowych wartości wytrzymałości złączy w zależności od rodzaju zgrzewanego materiału lub różnych warunków zgrzewania.

Doktorant z powodzeniem wypełnił tę lukę dokonując szczegółowej kalkulacji kosztów stosowania technologii zgrzewania FSW oraz spawania metodą MIG w przeliczeniu na metr bieżący złącza za pomocą dedykowanych urządzeń zgrzewania oraz spawania. Zastosowanie metody zgrzewania FSW do wykonywania elementów konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082 zmniejsza koszty produkcji seryjnej o ponad połowę w stosunku do metody spawania łukowego metodą MIG. Autor dysertacji wykazał, że dalsze obniżenie kosztów produkcji możliwe jest poprzez zastosowanie do zgrzewania stacjonarnych frezarek (wyposażonych w głowice do zgrzewania FSW) lub stanowisk zrobotyzowanych znacznie przyspieszających proces zgrzewania.

Niewątpliwym osiągnięciem aplikacyjnym Doktoranta jest opracowanie technologii zgrzewania, poprzez określenie parametrów procesu zgrzewania FSW (w tym prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania), które pozwalają na wykonywanie złączy doczołowych ze stopu aluminium przerobionego plastycznie (EN AW-6082) o określonych właściwościach użytkowych złączy, w tym przede wszystkim właściwości wytrzymałościowych oraz odporności na korozję. Doktorant określił wytyczne zgrzewania FSW bezpośrednio wpływające na przebieg procesu zgrzewania oraz na jakość powstałych złączy. Wytyczne te zestawiał w postaci Wstępnej Instrukcji Technologicznej Zgrzewania FSW.

Moim zdaniem oryginalnym wkładem Doktoranta w rozwój technologii zgrzewania FSW stopu EN AW-6082 jest opracowanie wytycznych zgrzewania, które mogą posłużyć do opracowania i wdrożenia w przemyśle innowacyjnego rozwiązania technologicznego (ekonomicznie uzasadnionego), zapewniającego prowadzenie procesu w sposób powtarzalny i konkurencyjny w stosunku do dotychczas stosowanej technologii spawania łukowego. Mogą także posłużyć do udoskonalenia technologii FSW stosowanej już w przedsiębiorstwie poprzez wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań lub ulepszeń np. poprzez odpowiedni dobór i optymalizację parametrów zgrzewania FSW.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Miary stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego o charakterze aplikacyjnym. Recenzowana dysertacja jest bardzo dobrze osadzona w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

## **Uwagi**

Na podstawie przeprowadzonej analizy aktualnego stanu wiedzy Doktorant stwierdził, że brak jest szczegółowych badań dotyczących opisu zjawisk strukturalnych występujących w złączach FSW wykonanych ze stopu EN AW – 6082. Było to motywacją do podjęcia badań weryfikujących tezę:

*„O właściwościach złączy zgrzewanych tarciovo 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”*

Nie kwestionując słuszności postawionej tezy, nasuwa się pytanie – na jakiej podstawie Autor dysertacji przyjął, że otrzymane złącza z badanego stopu będą posiadały parametry wytrzymałościowe na poziomie co najmniej 70 % wytrzymałości materiału rodzimego?

Czy zdaniem Doktoranta zasadne byłoby, z punktu widzenia weryfikacji postawionej tezy, przeprowadzenie badań odporności zmęczeniowej wytworzonych złączy FSW również w warunkach korozji oraz badań korozji naprężeniowej?

Czy opracowana przez Doktoranta metodyka badań właściwości użytkowych złączy FSW ze stopu EN AW-6082 pod kątem wytwarzania konstrukcji metalowych dla potrzeb transportu może być zastosowana do określenia tych właściwości dla innych stopów aluminium?

### **Opinia końcowa**

Wysoko oceniam pracę doktorską mgr inż. Damiana Miary. Autor pracy wybrał bardzo interesujący problem badawczy zarówno z punktu widzenia poznawczego jak i aplikacyjnego, umiejętnie sformułował tezę, cel i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadził analizę otrzymanych wyników badań. Należy podkreślić, że przeprowadzone przez Doktoranta badania pozwoliły na opracowanie wytycznych technologicznych procesu zgrzewania tarcowego FSW elementów konstrukcji ze stopu aluminium EN AW-6082, które umożliwiają ich zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym oraz kolejowym. Autor dysertacji przeprowadził również wnikliwą analizę ekonomiczną stosowania technologii łączenia metodą FSW badanego stopu.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska przedłożona przez Pana mgr inż. Damiana Miarę pt. „Wpływ wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082” spełnia warunki określone w Art. 187. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, Dz. U. 2022, poz. 574) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr inż. Damiana Miary do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk Inżynieryjno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.



Chciałbym podkreślić, że uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny wkład do rozwoju wiedzy w obszarze nowych technologii łączenia stopów lekkich do zastosowań w transporcie. Uważam, że Doktorant wykazał nieprzeciętną zdolność do zidentyfikowania i skutecznej realizacji bardzo ambitnego celu badawczego.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Miary pt. „Wpływ wybranych warunków zgrzewania tarcowego FSW na strukturę i właściwości złączy ze stopu aluminium EN AW-6082”.

