



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. uczelni  
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Politechnika Gdańska  
ul. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 27 grudnia 2024

### **RECENZJA**

**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”**

wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dr. hab. inż. Janusza Adamca,  
promotor pomocniczej Pani dr inż. Katarzyny Łyczkowskiej oraz opiekuna pomocniczego Pana  
dr. inż. Adama Pietrasa

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa  
Politechniki Śląskiej

z dnia 22 października 2024 r.

### **Wprowadzenie**

Procesy spajania w stanie stałym, do których zalicza się zgrzewanie Friction Stir Welding (FSW) w wielu przypadkach stanowią atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnie stosowanych procesów spawania. Dotyczy to zwłaszcza konstrukcji spajanych przeznaczonych do eksploatacji w przemyśle transportowym, które powinny charakteryzować się niską masą i wysoką wytrzymałością. Możliwość przeprowadzenia procesu w warunkach niskiej wartości energii aktywacji spajania jest szczególną zaletą procesu FSW. Wpływa to przede wszystkim na ograniczenie wpływu technologii na przemiany strukturalne, co przekłada się na korzystniejsze właściwości eksploatacyjne konstrukcji. Proces FSW jest przedmiotem szczególnego zainteresowania podmiotów zajmujących się wytwarzaniem środków transportu m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, kolejowym i morskim.

W kontekście analizy aktualnych trendów badawczych w dziedzinie spawalnictwa nie mam wątpliwości, że Pan mgr inż. Damian Miara właściwie dobrał przedmiot, cel i zakres pracy. Jej tematyka jest niezwykle aktualna, a wyniki badań cieszą się dużym zainteresowaniem zarówno wśród naukowców, jak i przedstawicieli przemysłu. O potencjale badawczym tej tematyki świadczyć może również fakt, że co roku publikowanych jest kilka tysięcy artykułów naukowych i innych raportów badawczych, a także patentów traktujących o różnych aspektach technologicznych i materiałowych zgrzewania FSW. Bez wątpienia zagadnienia procesów spajania i innych wariantów technologicznych wykorzystujących zamianę energii mechanicznej

na ciepłą wraz z silnym odkształceniem plastycznym (Friction Stir Processing) są w ostatnich latach jednym z najsilniej rozwijających się trendów rozwojowych w spawalnictwie.

### **Charakterystyka i ocena formalna rozprawy**

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Damiana Miary jest opracowaniem bardzo obszernym, ale równocześnie jest klarownie skomponowana. Ułatwia to podążanie za przedstawionymi w logicznie uzasadnionym ciągu przyczynowo-skutkowym myślami oraz opisami badań i ich wyników.

Rozprawa składa się ze spisu treści, 13 rozdziałów zawartych na 197 stronach, które obejmują wstęp, charakterystykę stanu wiedzy przedstawioną w 4 rozdziałach, tezę, celu i zakresu pracy, badań własnych opisanych w 5 rozdziałach, analizy wyników i wniosków, a także spisu literatury. Praca nie zawiera załączników, jednak Autor zamieścił na jej końcu streszczenie w języku polskim i angielskim.

We wstępie Pan mgr inż. Damian Miara przedstawił tło naukowe i przemysłowe problemu badawczego oraz wskazał wynikające z niego cele i tezę pracy. W rozdziale drugim Doktorant zaprezentował przegląd literatury z zakresu możliwości łączenia stopów aluminium różnymi metodami spajania. W trzecim rozdziale scharakteryzowano stopy aluminium, w tym badany stop aluminium EN AW-6082. W rozdziale czwartym Autor ocenił możliwości łączenia tego stopu różnymi technologiami spajania. Rozdział piąty stanowi podsumowanie stanu zagadnienia w świetle literatury. Zakończona w tym miejscu część literaturowa jest skomponowana prawidłowo, dobrze wprowadza czytelnika w świat zgrzewania FSW stopów aluminium i jednocześnie doskonale uzasadnia podjęcie tematyki badawczej. Uważam, że już na tym etapie pracy naukowej Pan mgr inż. Damian Miara dowiódł, że jego praca zasługuje na wyróżnienie m.in. zamieszczając (rysunek 23) autorskie i wartościowe zestawienie prezentujące klasyfikację niezgodności spawalniczych. Takie podejście Doktoranta świadczy o Jego dużej wiedzy i znajomości tematu. W rozdziale szóstym Autor zdefiniował tezę, cele pracy (metodyczny, poznawczy i użytkowy) oraz przedstawił zakres badań. W rozdziale siódmym scharakteryzowano pod względem właściwości mechanicznych i budowy strukturalnej stop aluminium EN AW-6082. Metodę badań struktury złączy Doktorant opisał w rozdziale ósmym. W rozdziale dziewiątym dokonano analizy pola temperatury i odkształceń w złączach FSW, a opracowany model numeryczny (MES) zwalidowano w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych. Rozdział dziesiąty zawiera opis eksperymentów ukierunkowanych na ocenę parametrów i warunków procesu zgrzewania FSW za pomocą różnych badań. W rozdziale jedenastym określono mechaniczne i korozyjne właściwości złączy FSW. Rozdział 12 stanowi podsumowanie wyników badań wraz ze wskazaniem wytycznych technologicznych możliwych do zastosowania w warunkach produkcyjnych oraz analizą ekonomiczną. Na zakończenie Doktorant sformułował wnioski (rozdział 13). Spis literatury jest zrobiony profesjonalnie, cytowane prace są sformatowane jednolicie, z pełnym opisem bibliograficznym umożliwiającym

zidentyfikowanie źródeł. Są one ułożone w kolejności cytowania w treści rozprawy. Spis obejmuje 117 pozycji źródłowych, w tym 5 prac, których Doktorant jest współautorem. Przytaczane źródła są różnorodne i uzasadnione, spis obejmuje aktualne polsko- i anglojęzyczne artykuły z czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych i inne źródła z całego świata. Dobór źródeł w przypadku tak obszernie omawianego w światowych zasobach bibliograficznych tematu jest bardzo trudny i wymaga przeprowadzenia gruntownego przeglądu literatury i wyselekcjonowania prac szczególnie wartościowych z punktu widzenia ich trafności w odniesieniu do rozważanej tematyki. Uważam, że Doktorantowi to trudne zadanie udało się zrealizować.

Pod względem formalnym i edycyjnym Autor również przygotował rozprawę w sposób wyjątkowo staranny. Z językowego punktu widzenia praca napisana jest wyróżniająco, bez utrudniających zrozumienie błędów gramatycznych i logicznych, z zastosowaniem prawidłowej terminologii technicznej, zwłaszcza z obszaru inżynierii materiałowej i spawalniczej. Podczas lektury znalazłem jedynie nieliczne literówki, uchybienia interpunkcyjne i kilka drobnych błędów formalnych, które jednak nie wpływają na percepcję pracy:

1. Rysunek 56 (strona 67) nie jest zacytowany we właściwej kolejności.
2. Pozycja [63] nie jest zacytowana w pracy, natomiast źródło [106] jest zacytowane zbyt wcześnie, niezgodnie z przyjętą w całej pracy kolejnością (strona 54). To samo dotyczy pozycji [90] i [101, 102] strony: 65 i 72.
3. Różne style cytowania tych samych źródeł, np.: [39] jako: „Salih O.S., Neate N. i inni” albo „Salih O.S., Neate N.” (strony 18 i 19).
4. Rysunek 16 (strona 21): w podpisie są wskazane dwa elementy (a) i (b), natomiast rysunek zawiera tylko jeden.
5. W podpisach rysunków 90, 117, 131 i 138 powinny znajdować się źródła, gdyż są to schematy stanowisk pomiarowych.

Rozprawa jest przygotowana na bardzo wysokim poziomie edytorskim. Zarówno edycja tekstu, jak i przygotowanie schematów, rysunków i wykresów zasługuje na bardzo wysoką ocenę. Również udokumentowane wyniki badań metalograficznych są wyjątkowo starannie przedstawione.

Podsumowując ocenę formalną pracy chciałbym podkreślić jej wyróżniający poziom pod względem edycyjnym, graficznym i językowym.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Damiana Miary spełnia kryteria stawiane przez program „Doktorat wdrożeniowy”, w ramach którego została zrealizowana. Treść rozprawy odpowiada jej tytułowi i uważam ją za bardzo wartościową pod względem merytorycznym i praktycznym. Autor prawidłowo zrealizował zadania badawcze będące przedmiotem jego pracy doktorskiej: przeprowadził szeroki przegląd literatury, zaproponował

odpowiednie do osiągnięcia celu pracy eksperymenty i badania, przeprowadził zaawansowane i wzajemnie uzupełniające się badania eksperymentalne ukierunkowane na ocenę procesu zgrzewania oraz morfologii i właściwości złączy zgrzewanych FSW ze stopu EN AW-6082. Szczegółowy zakres prac został przedstawiony na schemacie pokazanym na rysunku 47 (strona 57), następnie uszczegółowiony na rysunku 50 (strona 66). Moim zdaniem, szczególnie cennym, poza standardowymi celami, którym służy analiza literatury, osiągnięciem Doktoranta jest wspomniane już w niniejszej recenzji opracowanie i graficzne przedstawienie klasyfikacji niezgodności spawalniczych dla procesu FSW wraz z opisem (rysunek 23, strona 31). Staranne przeprowadzenie przeglądu literatury i własne doświadczenia z zastosowań procesu FSW pozwoliły Autorowi na sformułowanie tezy następującej postaci (strona 55):

„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.”

Weryfikacji postawionej tezy posłużyło sformułowanie czterech celów pracy: metodycznego, dwóch poznawczych i użytkowego:

– opracowanie metodyki oceny struktury i właściwości złączy FSW z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych umożliwiających opisanie zjawisk strukturalnych decydujących o ich właściwościach, – określenie wpływu prędkości obrotowej narzędzia oraz prędkości zgrzewania na strukturę i właściwości mechaniczne złączy ze stopu aluminium EN AW-6082, – określenie czynników strukturalnych decydujących o odporności na korozję złącza, – opracowanie wytycznych technologicznych zgrzewania tarciovo z mieszaniem materiału zgrzeiny FSW i kwalifikowanie technologii zgrzewania.

Prace eksperymentalne obejmowały m.in. szczegółową charakterystykę budowy strukturalnej i właściwości mechanicznych i korozyjnych materiału rodzimego (EN AW-6082), dobór parametrów zgrzewania FSW, eksperymentalne i numeryczne (MES) analizy procesów cieplnych i warunków mechanicznych podczas zgrzewania, szczegółową charakterystykę budowy strukturalnej i właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych (odporność na korozję) wytworzonych złączy, a także analizę kosztów. Realizacja tak szerokiego zakresu prac badawczych wymagała od Doktoranta opracowania procedur badawczych dopasowanych do specyfiki złączy FSW ze stopu aluminium, np. weryfikację przydatności procedur przygotowania zglądów metalograficznych. Na koniec Autor prawidłowo zinterpretował wyniki badań i przygotował wzorowy raport z badań w postaci rozprawy.

Moim zdaniem, do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zawartych w recenzowanej rozprawie można zaliczyć:

1. Opracowanie i czytelną prezentację klasyfikacji niezgodności mogących wystąpić podczas zgrzewania FSW (rysunek 23) oraz weryfikację skuteczności ujawniania struktury stopu sześcioma odczynnikami metalograficznymi (tablica 10).
2. Ocenę właściwości eksploatacyjnych złączy zgrzewanych FSW z badanego stopu w różnych warunkach środowiska korozyjnego.

Na uwagę zasługuje zwłaszcza szeroki zakres badań z zakresu inżynierii materiałowej, co nie jest powszechne w pracach naukowych dotyczących procesów spajania. Na wyróżnienie zasługuje również fakt, że Doktorant przeprowadził (rozdział 12 – strony 167-194) wyjątkowo szeroką dyskusję wyników, co potwierdza bardzo dobre przygotowanie merytoryczne Autora oraz Jego duży potencjał jako pracownika naukowego. Podsumowanie nie ogranicza się jedynie do skomentowania uzyskanych wyników na tle literatury, a zawiera także trzy inne wartościowe z praktycznego punktu widzenia elementy. Jednym jest analiza kosztów dwóch wariantów zgrzewania FSW w porównaniu ze spawaniem MIG, drugim karta niezgodności (tablica 30), a trzecim przedstawienie wytycznych technologicznych do wykonywania złączy FSW zgodnie z zasadami kwalifikowania technologii zgrzewania. W zakresie oceny merytorycznej stwierdziłem następujące drobne uchybienia:

1. Strona 10: niefortunne sformułowanie w opisie budowy złącza FSW:

„W złączu FSW, wokół powierzchni powstającej zgrzeiny, powstają dwie charakterystyczne tylko dla tej metody strony [36]: • strona natarcia – w której kierunek obrotu narzędzia FSW jest taki sam jak kierunek zgrzewania, • strona spływu - w której kierunek obrotu narzędzia FSW jest przeciwny do kierunku zgrzewania.”

Oczywiste jest, że narzędzie obraca się w jednym kierunku, zaś różnica polega na tym samym (strefa natarcia) albo przeciwnym (strefa spływu) zwrocie wektorów prędkości obrotowej i liniowej procesu.

2. Rysunki 69a, 70a, 71a, 72a, 73a i 74a: zamiast „5000  $\mu\text{m}$ ” można napisać: „5 mm”.
3. Rysunek 116: wykres pokazany na 116c mógłby mieć taki sam zakres skali na osi rzędnych jak pozostałe wykresy, co ułatwiłoby porównanie rozkładów twardości.
4. Tablica 32: błąd w tłumaczeniu terminu z języka angielskiego: „Grubości materiałów zgrzewanych” - „Parent material thicknesses” to zgodnie z aktualną terminologią spawalniczą: „Base material thicknesses”.

Pomimo postawienia powyższych uwag rozprawę oceniam jednoznacznie pozytywnie pod względem merytorycznym. Pan mgr inż. Damian Miara jednoznacznie udowodnił, że jest bardzo dobrze przygotowany metodologicznie do samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych. Na podstawie merytorycznej analizy zakresu i treści pracy jednoznacznie stwierdzam, że wpisuje się ona w dyscyplinę naukową Inżynieria Materiałowa. Chciałbym jednocześnie podkreślić, że ocena merytoryczna zakresu przeprowadzonych prac naukowych

upoważnia mnie do określenia treści rozprawy jako interdyscyplinarnej, obejmującej również zagadnienia tradycyjnie zaliczane do Inżynierii Mechanicznej i innych dyscyplin naukowych.

### Uwagi dyskusyjne

Podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań. Bardzo proszę Doktoranta o odpowiedzi i komentarze do wymienionych zagadnień:

1. Tablica 2 (strona 23) zaczerpnięta ze źródła [10]: czy Doktorant może dodatkowo skomentować wynikającą z tabeli niemożność zastosowania procesu MIG w przypadkach złączy zakładkowych?
2. Rysunek 17 (strona 26): czy Doktorant może dodatkowo skomentować przetłumaczony z języka angielskiego [55] termin: „Niezgodności w postaci pęcherzy”. Wydaje się, że (rozważając mechanizm formowania się tej niezgodności) termin: „pęcherz” nie jest adekwatny w stosunku do oryginalnego słowa: „wormhole”.
3. Opis pomiarów cykli cieplnych zgrzewania (rozdział 10.2) wymaga uzupełnienia. Proszę o komentarz dotyczący sposobu akwizycji danych (w tym dokładności pomiarowej) i sposobu mocowania termopar do elementów zgrzewanych. Ponadto proszę o komentarz odnośnie zaburzonego przebiegu zmiany temperatury na rysunkach 59c, 60c, 60f, 61c-g, 62c, 62f, 63c i 64c.
4. Tablica 19: na jakiej podstawie Doktorant założył wartość 50000 m jako długość złączy wykonywanych rocznie?
5. Czy Doktorant rozważał przeprowadzenie badań zmęczeniowych złączy zgrzewanych, co wydaje się uzasadnione biorąc pod uwagę obszar ich zastosowania?

Powyższe uwagi stanowią raczej komentarze i w żadnym stopniu nie umniejszają wyróżniającej oceny, na którą w moim głębokim przekonaniu, zasługuje recenzowana praca. Mam nadzieję, że powyższe uwagi będą stanowiły podstawę do dyskusji i okażą się pomocne w dalszych pracach naukowych Doktoranta.

### Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Damian Miara przedstawił w swojej pracy doktorskiej komplementarne i dobrze uzasadnione merytorycznie wyniki badań i analiz uzyskane nowoczesnymi metodami badawczymi określając warunki technologiczne i właściwości złączy zgrzewanych procesem FSW rozwijając stan wiedzy dotyczący spawalności (zgrzewalności) stopu EN AW-6082 w stanie stałym. Zaprezentowane wyniki i sformułowane wnioski mają bardzo duże znaczenie praktyczne i potencjał aplikacyjny.

Recenzowana rozprawa doktorska jednoznacznie prezentuje wysoki poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Autora i jest oryginalnym osiągnięciem (rozwiązaniem problemu naukowego)

Doktoranta. W moim odczuciu potwierdził On tym samym umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Opiniowana praca doktorska spełnia w pełni wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 r. pozycja 212, z późn. zm.) oraz innych stosownych regulacji prawnych i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Damiana Miary do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Podkreślając bardzo wysoki poziom naukowy, merytoryczny i edycyjny recenzowanej rozprawy, szeroki zakres prac badawczych zrealizowanych z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych oraz przedstawienie perspektywicznych wyników o charakterze aplikacyjnym **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Damiana Miary.**

Sporządził:

Prof. Dariusz Fydrych

/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)