



**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, 20 stycznia 2026

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Wojciecha Ziółkowskiego pt.:
„Analiza odporności na pękanie połączeń doczołowych S355/AA6061-T6
zgrzewanych tarciovo metodą FSW”

wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dr. hab. inż. Dariusza Borońskiego i promotora
pomocniczego dr. inż. Roberta Kosturka
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
z dnia 5 listopada 2025 r.

Wprowadzenie

W przemyśle transportowym dużą wagę przykładą się do konstrukcji łączących niską masę z wysoką wytrzymałością. Friction Stir Welding (FSW), będące przykładem procesów spajania w stanie stałym, w wielu przypadkach stanowi atrakcyjną alternatywę dla tradycyjnych metod spawania. Proces FSW umożliwia spajanie przy niskiej wartości energii aktywacji, co ogranicza wpływ technologii na przemiany strukturalne materiału i przekłada się na korzystniejsze właściwości eksploatacyjne gotowej konstrukcji. Dodatkowo FSW zapewnia minimalne odkształcenia i naprężenia pozostające, wysoki stopień powtarzalności procesu oraz możliwość łączenia materiałów trudnych do spawania tradycyjnymi metodami, takich jak stopy aluminium, miedzi czy kompozyty. Szczególną zaletą tego procesu jest możliwość wykonywania złączy różnoimiennych z materiałów trudno spawalnych przy zastosowaniu powszechnie stosowanych procesów spajania łukowego, co w przypadku tych materiałów jest utrudnione ze względu na różnice w ich właściwościach fizykochemicznych. Metoda ta jest również bardziej przyjazna dla środowiska, niż tradycyjne procesy spawania. Z tego powodu FSW cieszy się szczególnym zainteresowaniem w sektorach motoryzacyjnym, lotniczym, kolejowym i morskim, zajmujących się wytwarzaniem środków transportu.

Dowodem na dynamiczny rozwój i wysoki potencjał badawczy technologii FSW jest fakt publikacji kilku tysięcy artykułów naukowych, raportów badawczych oraz zgłoszeń patentowych dotyczących zagadnień technologicznych i materiałowych różnych wariantów tego procesu

Fydrych

rocznie. Tematyka ta jest zatem niezwykle aktualna i atrakcyjna zarówno dla środowiska naukowego, jak i dla branży przemysłowej. Przedmiot, cel i zakres pracy zostały właściwie dobrane w kontekście analizy aktualnych trendów rozwojowych technologii FSW. Na podstawie merytorycznej analizy zakresu i treści pracy jednoznacznie stwierdzam, że wpisuje się ona w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna.

Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Pan mgr inż. Wojciech Ziółkowski jest autorem dysertacji doktorskiej, która została wydana w estetycznej formie książkowej. Doktorant zaplanował jej treść w układzie klasycznym obejmującym kolejno wszystkie elementy stylu IMRaD (Introduction, Materials and methods, Results and Discussion). Takie uporządkowanie przedstawionych zagadnień sprawia, że jej lektura jest klarowna i pozbawiona trudności interpretacyjnych. Rozprawa zawiera, oprócz podziękowań i spisu treści, na początku wykazy ważniejszych symboli i skrótów, a na końcu streszczenia w języku polskim i angielskim. Jednak najistotniejszy element pracy stanowi część merytoryczna obejmująca siedem rozdziałów. Rozdział pierwszy przedstawia genezę wyboru tematu, określa cele badawcze i krótko charakteryzuje zawartość poszczególnych rozdziałów. Rozdział drugi obejmuje analizę literatury pod kątem przyjętej problematyki, kończąc się wnioskami istotnymi dla badań własnych. Rozdział trzeci zawiera program badań własnych opracowany na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej. W rozdziale czwartym opisano obiekt badań. Natomiast rozdział piąty poświęcono charakterystyce zastosowanych metod badawczych. Rozdział szósty przedstawia wyniki badań wraz z ich szczegółową analizą. W ostatnim rozdziale zaprezentowano wnioski wynikające z przeprowadzonych badań oraz omówiono możliwości dalszych badań w tym obszarze. Spis literatury zawiera 82 źródła, w tym jeden artykuł [62], którego jest współautorem. Cytowana literatura jest różnorodna i obejmuje prace krajowe oraz zagraniczne, jednak jej liczebność jest ograniczona na tle szeroko eksplorowanej w literaturze przedmiotu tematyki rozprawy doktorskiej. Wszystkie pozycje literaturowe zamieszczone w spisie zostały zacytowane w treści rozprawy.

W rozdziale 2.5 (strona 30) zatytułowanym dość zaskakująco „Wnioski do badań własnych” Doktorant przedstawił uzasadnienie podjęcia się realizacji tematu, bez podania tezy pracy. Przedstawienie tezy nie jest wprawdzie obligatoryjne, jednak w praktyce rozpraw doktorskich pojawia się bardzo często.

Nie mam zastrzeżeń do układu pracy, jednak podczas lektury pracy nasunęło mi się kilka uwag terminologicznych z zakresu inżynierii spajania:

- Strona 15 – „Zgrzeina posiada swoją unikalną budowę i charakteryzuje się obszarami przedstawionymi na rysunku 2.3” oraz Podpis rysunku 2.3: „Budowa zgrzeiny FSW”. Charakterystyka dotyczy złącza zgrzewanego, a nie tylko zgrzeiny. Doktorant

Fryd

wielokrotnie w pracy używa pojęcia „zgrzeina” w odniesieniu do całego złącza zgrzewanego.

- Doktorant regularnie używa terminu „materiał bazowy”, który stanowi kalkę językową wyrażenia „base material”, podczas gdy w polskiej terminologii spawalniczej właściwym i powszechnie przyjętym określeniem jest „materiał podstawowy”. Analogiczna sytuacja dotyczy terminu „złącze” (spawane, zgrzewane), który w pracy jest zastępowany określeniem „połączenie”, co nie jest zgodne z utrwaloną nomenklaturą spawalniczą.
- Strona 17 – „połączeń tożsamyh” – powinno być: „połączeń jednoimiennych”
- Strona 30 – „długowiecznością zgrzein” – powinno być: „trwałością złączy zgrzewanych”
- Wielokrotnie w pracy pojawia się termin: „interfejs”, który w przypadku złączy różnoimiennych określa się pojęciem „strefa przejściowa”.

Nie mogę oprzeć się wrażeniu, że prace redakcyjne zostały zakończone przedwcześnie, jakby Autorowi zabrakło czasu lub motywacji. Poza tym stwierdziłem występowanie innych błędów, m.in.:

- Skróty powinny być wyjaśnione tylko przy pierwszym użyciu, a następnie konsekwentnie używane. Skrót „IMC” jest wyjaśniony na stronach: 9, 21 (dwukrotnie), 22 i 62. Natomiast skrót „DIC” nie jest rozwinięty ani razu w języku angielskim i trzykrotnie w języku polskim. Podobnie skrót „COD” nie został wyjaśniony.
- W języku polskim kropkę stawia się po liczbie zapisanej cyframi arabskimi, gdy pełni ona funkcję liczebnika porządkowego, np. „w latach 60. XX”. Doktorant tej zasady nie przestrzegał.
- W pracy stwierdziłem występowanie licznych błędów typograficznych np. wielokrotne spacje, brak znaków interpunkcyjnych, zwłaszcza przecinków, co nieco utrudnia jej płynną lekturę. Literówki występują nawet w spisie treści np. „pokrewen-pokrewne”; „stornie”-„po stronie”; „mikrotwartości”-„mikrotwardości”; „pod kontem”-pod kątem”; „fraktogrficzna” – „fraktograficzna”; „faktografii”-„fraktografii”; „na szybie”-„na szybkie”; „chodź”-„choć”.

Praca jest dobrze przygotowana od strony graficznej, chociaż występują błędy w aranżacji tekstu, np. pozostawienie pustych przestrzeni na stronach 38, 59 i 81. Spis treści pomija rozdział 6.4, który znajduje się na stronach 73-75. Ponadto rysunki 6.2-6.12 dokumentujące badania metalograficzne nie są przygotowane z należytą starannością. Ich niska jakość utrudnia weryfikację opisywanych wyników badań. Natomiast rysunki 6.23 i 6.24 zawierają opisy osi w języku angielskim, które należało przetłumaczyć na język polski.

Podsumowując ocenę formalną pracy, zauważam, że rozprawa jest dobrze zaplanowana i sformatowana zgodnie ze standardową praktyką, jednak w niektórych aspektach wskazane jest wprowadzenie poprawek, aby w pełni odpowiadała wymogom prac naukowych. Obecność wielu prostych błędów, które można wyeliminować podczas korekty autorskiej, potęguje wrażenie, że praca była pisana w pośpiechu.

Ocena merytoryczna rozprawy

Zawartość merytoryczna rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Wojciecha Ziółkowskiego odpowiada jej tytułowi, wpisuje się w zakres dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna i uważam ją za wartościową pod względem merytorycznym i praktycznym. Doktorant prawidłowo zaplanował i zrealizował założone zadania badawcze, poczynając od przeglądu literatury poprzez zaproponowanie zakresu i planu badań pozwalającego na osiągnięcie postawionych celów pracy, aż po przeprowadzenie zaawansowanych badań eksperymentalnych. Dzięki tym pracom uzyskał wyniki, które posłużyły do sformułowania wniosków.

W rozdziale 1.2 Autor sformułował następujące cele pracy:

1. Dobór parametrów procesowych oraz opracowanie technologii zgrzewania metodą FSW z kontrolowaną wartością przesunięcia trzpienia względem linii styku łączonych elementów.
2. Analiza statycznych właściwości mechanicznych zgrzein FSW S355/AA6061-T6.
3. Doświadczalna analiza porównawcza odporności na pękanie próbek połączenia S355/AA6061 zgrzewanych tarciovo metodą FSW w wybranych strefach połączenia oraz materiałów bazowych.
4. Analiza charakteru pękania połączenia FSW S355/AA6061-T6.

Zakres zrealizowanych i przedstawionych w pracy eksperymentów obejmował następujące prace badawcze podzielone na cztery etapy:

Etap I: Badania statyczne materiałów bazowych, dobór parametrów technologicznych procesu FSW, badania statyczne połączenia FSW S355/AA6061-T6, analiza własności mechanicznych.

Etap II: Analiza mikrotwardości, analiza makro i mikrostruktury, analiza fraktograficzna przełomów powstałych podczas badań statycznych.

Etap III: Badania i analiza FSWS355/AA6061-T6 odkształceń własnych zgrzeiny, badania i analiza lokalnych właściwości statycznych zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6.

Etap IV: Badania i analiza odporności na pękanie materiałów bazowych oraz wybranych stref zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6, analiza rozkładów odkształceń w strefie pęknięcia

Przyjęto

wyznaczonych doświadczalnie z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu (DIC), analiza fraktograficzna przełomów powstałych podczas badania odporności na pękanie.

Podkreślam, że Pan mgr inż. Wojciech Ziółkowski zrealizował zaawansowane i relatywnie rzadko spotykane w literaturze przedmiotu badania właściwości eksploatacyjnych złączy różnoimiennych stali S355 i stopu aluminium AA6061-T6. Plan prac badawczych został zaprezentowany w postaci czytelnego schematu na rysunku 3.1 (strona 31). Do oceny odporności na pękanie złączy wykonanych procesem FSW z różnymi wartościami parametrów procesu i przesunięcia narzędzia względem osi złącza (tzw. „offset”) wykorzystał (wspomniane już) badania metalograficzne makro- i mikroskopowe, pomiary mikrotwardości, statyczna próba rozciągania, badania odporności na pękanie wg przepisów ASTM E1820-18 na próbkach kompaktowych (CT: przyjmując jako kryterium całąkę J), pomiary naprężeń własnych, analizę odkształceń w strefie wierzchołka pęknięcia, oraz badania fraktograficzne przełomów próbek zniszczonych zarówno podczas badań statycznych, jak i próbek kompaktowych. Wyniki z tych badań przedstawił w formie tabelarycznej albo graficznej. Najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań wskazują, że zastosowane wartości przesunięcia narzędzia względem linii zgrzewania oraz parametrów procesu pozwalają uzyskać powtarzalne złącza spełniające wymagania norm i towarzystw klasyfikacyjnych, jednocześnie utrzymujące plastyczny charakter pęknięcia i zachowujące wysoką odporność na pękanie.

Moim zdaniem w pracy wyraźnie brakuje osobnego podsumowania wyników badań na tle literatury. Zaprezentowane w pracy wyniki są interesujące i oryginalne, dlatego uważam, że wskazane byłoby ich uzupełnienie o dodatkowy komentarz, uwzględniający porównanie z dostępnymi już osiągnięciami prezentowanymi w literaturze przedmiotu. Autor dysertacji uniknąłby przy tym błędu cytowania źródeł literaturowych we wnioskach.

W wnioskach perspektywicznych Autor wskazał jako jeden z kierunków przyszłych badań konieczność wykonania badań zmęczeniowych badanych złączy. Ze względu na znaczną różnicę właściwości fizyko-chemicznych zgrzewanych elementów proponuję przeprowadzenie również badań odporności na korozję.

Poniżej wymieniam pozostałe najważniejsze niedostatki pracy w zakresie merytorycznym, które stwierdziłem podczas analizy jej treści:

- Rys. 2.2 – symbol „e” powinien być opisany jako zwrot wyjścia narzędzia, a nie kierunek wyjścia narzędzia, ponieważ kierunek wejścia (zaznaczony na rysunku jako „b”) i wyjścia narzędzia jest taki sam.
- Strona 14 – brakuje źródeł literaturowych w pierwszym wierszu.
- Strona 15 – niefortunne sformułowanie w opisie budowy złącza FSW: „Ponadto, zgrzeina FSW posiada dwie, charakterystyczne tylko dla tej metody strony. Strona natarcia, gdzie kierunek obrotu narzędzia jest tożsamy z kierunkiem zgrzewania oraz strona spływu gdzie kierunek ten jest przeciwny.” Oczywiście jest, że narzędzie obraca

Fryd

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

- Strona 17 – brakuje źródeł literaturowych. W tym miejscu można dodać aktualne artykuły przeglądowe.
- Rozdział 2.4 – brakuje źródeł literaturowych.
- Strona 27 – „Próbki kompaktowe typu CT - Są najbardziej rozpowszechnionymi próbkami stosowanymi w badaniach mechaniki pękania. Mają kształt prostokąta z wyciętym karbem oraz otworami przeznaczonymi do mocowania.” Powinno być: „Mają kształt prostopadłościanu z karbem i otworami umożliwiającymi mocowanie w aparaturze badawczej”.
- Strony 51 i 52 – Doktorant wypisał 11 wzorów (5.9-5.19) bez podania ich źródeł.
- Strona 62 – rysunek 6.13 nie jest potrzebny. Dwie wartości można było podać w tekście. Nie ma potrzeby podawania wyników pomiarów twardości z dokładnością większą od jedności.
- Strony 65 i 66 – tabele 6.1 i 6.2: Nie ma potrzeby podawania wytrzymałości (R_m i $R_{0,2}$) z dokładnością większą od jedności. Wartości modułu Younga podaje się zazwyczaj w GPa, a nie MPa.

Recenzowana praca z pewnością zyskałaby na walorach czytelniczych oraz klarowności wyводу naukowego, gdyby Autor przeprowadził dodatkową korektę autorską. Uważam, że sprawność w sporządzaniu raportu z badań jest jednym z kryteriów, na podstawie których należy oceniać opanowanie warsztatu badawczego. Podsumowując analizę merytoryczną pracy stwierdzam, że Pan mgr inż. Wojciech Ziółkowski udowodnił, że jest dobrze przygotowany metodologicznie do samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych.

Uwagi dyskusyjne

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

1. Podpis rysunku 2.4. brzmiący: „Konfiguracje połączeń do spawania tarcowego z przemieszaniem: (a) połączenie doczołowe, (b) połączenie czołowe krawędziowe, (c) połączenie czołowe typu T, (d) połączenie zakładkowe, (e) połączenie wielozakładkowe, (f) połączenie zakładkowe typu T, (g) połączenie pachwinowe [26]” zawiera kilka błędów. Bardzo proszę o dodatkowy komentarz.

Fryderyk

2. Tabele 4.1 i 4.2 zawierają skład chemiczny materiałów podstawowych, jednak brak jest informacji dotyczącej źródeł oraz podstawy przyjęcia zaprezentowanych wartości. Ponadto zastosowany sposób zapisu składu chemicznego jest nieprawidłowy, gdyż prowadzi do niesumowania się udziałów poszczególnych pierwiastków do 100%. Wymaga to korekty oraz jednoznacznego określenia zasad prezentacji składu chemicznego zgodnie z obowiązującą praktyką publikacyjną.
3. Na rysunku 4.1 przedstawiono m.in. schemat i widok złączy próbnych. Bardzo proszę o dodatkowy komentarz dotyczący doboru wymiarów próbek. Czy różnica w wymiarach obu elementów zgrzewanych może być czymś uzasadniona? Czy takie zaplanowanie eksperymentu może mieć istotny wpływ na wyniki badań w porównaniu ze złączami wykonanymi z elementów o jednakowych wymiarach?
4. Czy przeprowadzono badania wizualne złączy zgrzewanych? Jakie były ich wyniki? Czy Doktorant zauważył jakieś zależności między wartościami parametrów a kształtem i geometrią złączy?
5. Na stronie 50 Doktorant podaje, że: „Otrzymane wyniki przeliczono celem wyznaczenia wartości JQ dla każdej z próbek. Do tego celu został opracowany program z zaimplementowanymi wzorami opartymi o normatywną procedurę obliczeniową...”. Czy wzmiankowany program został opracowany przez Doktoranta?
6. Na rysunku 6.10 pokazano wyniki pomiarów temperatury (pole cieplne i rozkład temperatury) podczas zgrzewania. W części pracy poświęconej metodyce badawczej zabrakło opisu realizacji tych pomiarów. Proszę o uzupełnienie tej charakterystyki oraz odpowiednie podpisanie obu elementów rysunku.
7. Na stronie 68 Doktorant napisał: „Efekt nieciągłości zgrzein lub jej zróżnicowana wytrzymałość wzdłuż linii interfejsu może mieć niekorzystny wpływ na jego aplikacyjność.” To zdanie nie jest jasne i nie wynika to z jego niedostatków gramatycznych. Co Doktorant miał na myśli?
8. Na stronie 69 Doktorant napisał: „[...] wzrost prędkości obrotowej narzędzia wpływa korzystnie na wytrzymałość i powtarzalność połączenia FSW S355/AA6061-T6. Jej zwiększanie umożliwia dokładniejsze przemieszanie oraz powoduje wzrost ilości ciepła dostarczanego do zgrzeiny w wyniku tarcia [...]”. Proszę o informację, czy Doktorant wyliczył zmiany ilości ciepła wynikające ze zmiany wartości parametrów zgrzewania.
9. Na stronie 73 Doktorant napisał: „Na podstawie analizy mikrotwardości w przekroju poprzecznym zgrzeiny (rysunek 6.15) oraz lokalnych właściwości mechanicznych, zaobserwowano korelację między tymi dwiema właściwościami mechanicznymi.” Czy Doktorant wyliczył odpowiedni współczynnik korelacji?

Friedrich

10. Czy Doktorant podejmując się realizacji pracy i planując zakres badań złączy zgrzewanych brał pod uwagę rodzaje obciążeń, którym są on poddane podczas eksploatacji? Bardzo proszę o komentarz.

Pomimo wskazania wielu niedoskonałości pracy oceniam ją pozytywnie pod względem merytorycznym. Przetawione wyniki są oryginalne i uzupełniają stan wiedzy dotyczący wykonywania złączy zgrzewanych stal-aluminium o nowe aspekty. W moim odczuciu praca zyskałaby na klarowności, gdyby Autor przeprowadził bardziej staranną korektę redakcyjną jej treści. Mam nadzieję, że powyższe uwagi okażą się pomocne w kolejnych pracach naukowych Doktoranta i będą stanowiły przyczynek do dyskusji naukowej.

Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Wojciech Ziółkowski przedstawił w swojej rozprawie merytorycznie uzasadniony zestaw wyników badań uzyskanych z użyciem nowoczesnej metodyki badawczej. Pozwoliło mu to na sformułowanie ciekawych i perspektywicznych wniosków. Na tej podstawie uznaję, że Doktorant poszerzył wiedzę o właściwościach eksploatacyjnych elementów zgrzewanych FSW ze stali S355 i stopu aluminium AA6061-T6.

W mojej ocenie przygotowana przez Doktoranta rozprawa doktorska stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a Autor wykazał się wysokim poziomem wiedzy teoretycznej oraz zdolnością do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Recenzowanej pracy z pewnością przydałoby się więcej uwagi poświęconej korekcie autorskiej, szczególnie w zakresie klarowności przekazu, eliminacji licznych uchybień językowych oraz konsekwentnego stosowania terminologii spawalniczej.

Opiniowana praca doktorska spełnia w pełni wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2024 r. pozycja 1571, z późn. zm.) oraz innych stosownych regulacji prawnych i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich o dopuszczenie Pana mgr. inż. Wojciecha Ziółkowskiego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Sporządził:

