

Dr hab. inż. Marta Kurek
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska

Opole, 16.01.2026



Recenzja

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

Recenzję pracy wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, dra hab. inż. Łukasza Muślewskiego, prof. PBŚ z dnia 5 listopada 2025 r. Promotorem recenzowanej rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński.

W recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Wojciecha Ziółkowskiego w pierwszej kolejności odniesiono się do zagadnień ogólnych dotyczących charakterystyki pracy. Następnie przedstawiono istotne (oryginały) elementy pracy, uwagi szczegółowe oraz pytania. W części podsumowującej niniejszą recenzję przedstawiono ocenę dysertacji w relacji do wymogów stawianych rozprawom doktorskim. Całość recenzji zamyka wniosek końcowy.

1. Charakterystyka pracy

Przedmiotem niniejszej rozprawy jest analiza możliwości łączenia stali konstrukcyjnej S355 z wysokowytrzymałym stopem aluminium AA6061-T6 metodą zgrzewania tarciowego z przemieszaniem (Friction Stir Welding, FSW) oraz ocena właściwości wytrzymałościowych otrzymanych połączeń, ze szczególnym uwzględnieniem ich odporności na pękanie. Podjęta problematyka wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju inżynierii materiałowej i konstrukcji, ukierunkowane na projektowanie struktur lekkich i hybrydowych, w których redukcja masy jest osiągnięta bez utraty wymaganej nośności i bezpieczeństwa eksploatacji. Złącza stal–aluminium stanowią istotną grupę połączeń różnoimiennych o dużym potencjale aplikacyjnym

w transporcie i konstrukcjach specjalnych, ponieważ umożliwiają jednocześnie wykorzystanie korzystnych cech obu materiałów: wysokiej wytrzymałości i sztywności stali oraz niskiej gęstości aluminium. Z tego względu zagadnienie wytwarzania stabilnych, powtarzalnych i mechanicznie wiarygodnych połączeń stal–aluminium pozostaje ważnym wyzwaniem technologicznym i badawczym, szczególnie w kontekście ograniczenia wad złącza oraz kontroli zjawisk zachodzących w strefie połączenia.

Głównym celem rozprawy było zbadanie odporności na pękanie doczołowego połączenia S355/AA6061-T6 wykonanego metodą FSW, rozpatrywanej lokalnie w charakterystycznych obszarach powstałej zgrzeiny. Analizę ukierunkowano na zróżnicowanie zachowania w strefach typowych dla złączy FSW, obejmujących jądro zgrzeiny (strefę intensywnego mieszania), strefę cieplno-plastyczną (TMAZ) oraz obszar interfejsu pomiędzy łączonymi materiałami, gdzie występują największe gradienty właściwości i niejednorodności mikrostrukturalne. Tak sformułowany cel wynika z faktu, że połączenia różnoimienne, w odróżnieniu od złączy jednorodnych, charakteryzują się silnie niejednorodnym rozkładem mikrostruktury i właściwości w przekroju, co może determinować inicjację i rozwój pęknięcia w odmienny sposób zależnie od strefy materiałowej. Równoległe celem pracy było opracowanie i wdrożenie technologii zgrzewania tarcowego z kontrolowaną wartością przesunięcia trzpienia narzędzia (offsetu) względem linii styku łączonych elementów.

Zakres pracy obejmuje zarówno ugruntowanie teoretyczne, jak i rozbudowane badania własne o charakterze eksperymentalnym. W części teoretycznej przedstawiono podstawy procesu FSW, w tym opis zjawisk fizycznych towarzyszących zgrzewaniu (generacja i rozkład ciepła tarcia, uplastycznienie materiału, mechanizmy mieszania) oraz charakterystykę stref zgrzeiny powstających w wyniku oddziaływania narzędzia i cyklu cieplno-odkształceniowego. Omówiono również zastosowania technologii FSW w przemyśle oraz stan badań dotyczących połączeń stal–aluminium wykonywanych tą metodą, wskazując najważniejsze osiągnięcia oraz obszary wymagające pogłębienia. Istotnym elementem tej części jest także przedstawienie podstaw mechaniki pękania, ze szczególnym uwzględnieniem metod oceny odporności na pękanie opartych na całce J.

Część doświadczalna obejmuje opracowanie technologii wykonywania doczołowych złączy FSW S355/AA6061-T6 oraz ich kompleksową charakterystykę. W ramach badań własnych wykonano złącza przy różnych konfiguracjach parametrów procesu, ze szczególnym uwzględnieniem zmian offsetu trzpienia. Przeprowadzono badania makro- i mikrostruktury złączy z wykorzystaniem mikroskopii optycznej i skaningowej, a także pomiary

mikrotwardości w przekroju zgrzeiny, umożliwiające ocenę zróżnicowania właściwości w poszczególnych strefach. Właściwości mechaniczne oceniano zarówno w skali globalnej, na podstawie statycznych prób rozciągania, jak i lokalnej, z wykorzystaniem pomiarów twardości oraz miniaturowych prób wytrzymałościowych.

Kluczowym elementem badań była ocena odporności na pękanie z zastosowaniem próbek typu CT (Compact Tension) wyciętych z różnych obszarów zgrzeiny. Badania prowadzono w oparciu o podejście mechaniki pękania z wykorzystaniem całki J, przy czym ze względu na ograniczenia geometryczne część analiz miała charakter porównawczy pomiędzy strefami złącza i wariantami technologicznymi. Program badań uzupełniono o pomiary naprężeń własnych metodą trepanacji otworowej z tensometrycznym pomiarem odkształceń, co pozwoliło uwzględnić wpływ stanu naprężeń własnych na inicjację i rozwój pęknięcia.

Dodatkowo wykonano analizę pól odkształceń w otoczeniu wierzchołka pęknięcia metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Interpretację wyników wzmocniono analizą fraktograficzną przełomów z użyciem mikroskopu skaningowego, pozwalającą powiązać charakter przełomu z warunkami obciążenia, mikrostrukturą i strefą materiałową złącza.

Rozprawa ma charakter eksperymentalny i realizuje spójny, etapowy program badań obejmujący opracowanie technologii FSW dla układu stal–aluminium, ocenę jakości i niejednorodności złącza, analizę właściwości globalnych i lokalnych, wyznaczenie naprężeń własnych oraz ocenę odporności na pękanie w ujęciu mechaniki pękania.

Innowacyjność pracy ma charakter metodyczno-aplikacyjny i przejawia się przede wszystkim w opracowaniu oraz praktycznym zastosowaniu autorskiego oprzyrządowania umożliwiającego precyzyjne sterowanie offsetem w procesie FSW, co pozwoliło uzyskać powtarzalne połączenia stal–aluminium o wysokiej jakości; rozwiązanie to posiada potencjał wdrożeniowy, czego wyrazem jest podjęcie procedury patentowej.

Oryginalność badań wynika także z konsekwentnego zastosowania podejścia mechaniki pękania opartego na całce J do oceny lokalnej odporności na pękanie poszczególnych stref złącza FSW, w tym interfejsu oraz obszarów silnie zróżnicowanych mikrostrukturalnie (WNZ i TMAZ), co pozwoliło uzyskać porównawcze, merytorycznie istotne informacje o zróżnicowaniu właściwości w przekroju połączenia i o wpływie parametrów technologicznych na zachowanie złącza. W konsekwencji przeprowadzony program badawczy umożliwił kompleksową charakterystykę połączeń S355/AA6061-T6 wykonanych metodą FSW oraz sformułowanie wniosków dotyczących zależności pomiędzy parametrami procesu, strukturą i właściwościami mechanicznymi, ze szczególnym uwzględnieniem odporności na pękanie w kluczowych strefach zgrzeiny.

Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera szereg wartościowych rezultatów naukowych i praktycznych.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych Autora pracy należą:

1. Opracowanie innowacyjnego przyrządu do kontroli offsetu narzędzia FSW. Doktorant zaprojektował i wykonał oryginalne oprzyrządowanie umożliwiające precyzyjne ustawianie przesunięcia trzpienia zgrzewającego względem linii styku łączonych materiałów. Rozwiązanie to jest istotnym wkładem własnym, gdyż w literaturze brak było opisu podobnego urządzenia dedykowanego do zgrzewania stali z aluminium. Dzięki temu przyrządowi możliwe było wykonanie serii prób z różnymi wartościami offsetu, co stanowi istotną nowość metodologiczną rozprawy oraz stanowiło podstawę do podjęcia procedury patentowej (RP.540.18.2023), wnosząc istotny wkład aplikacyjny i innowacyjny.
2. Przeprowadzenie kompleksowej analizy jakości i niezawodności połączeń różnoimiennych S355/AA6061-T6 wykonanych metodą FSW, obejmującej zagadnienia technologiczne, strukturalne oraz wytrzymałościowe, z uwzględnieniem zarówno globalnych, jak i lokalnych kryteriów oceny oraz aparatu mechaniki pękania.
3. Uzyskanie złączy FSW o właściwościach spełniających wymagania przemysłowe – Na podstawie wyników badań, Autor dobrał parametry zgrzewania (m.in. prędkość obrotową 350 obr/min, posuw 50 mm/min oraz offset trzpienia 0,4 mm), dla których wykonane połączenie S355/AA6061-T6 osiągnęło bardzo dobre właściwości mechaniczne. Średnia wytrzymałość na rozciąganie uzyskanych złączy wyniosła ok. 178 MPa, a umowna granica plastyczności ok. 123 MPa, co jest poziomem porównywalnym z wymaganiami stawianymi spawanym złączom ze stopu AA6061-T6. Tym samym wykazano, że opracowana technologia FSW pozwala na wytworzenie powtarzalnych i wytrzymałych połączeń stal–aluminium, które mogą przenosić znaczne obciążenia i potencjalnie znaleźć zastosowanie w konstrukcjach inżynierskich. Jest to istotne osiągnięcie o charakterze aplikacyjnym, dowodzące praktycznej przydatności wyników rozprawy.
4. Szczegółowa charakterystyka mikrostruktury i właściwości lokalnych zgrzeiny. Praca wnosi istotny wkład w poznanie struktury połączeń stal–aluminium wykonanych metodą FSW. Przeprowadzone analizy makro- i mikroskopowe przekrojów złączy pozwoliły na identyfikację charakterystycznych stref zgrzeiny. Na interfejsie stali i aluminium stwierdzono obecność ciągłej warstwy związków międzymetalicznych

o grubości 2–3 μm , której jednorodny i cienki charakter – zgodnie z doniesieniami literaturowymi, co świadczy o prawidłowym połączeniu materiałów bez nadmiernego tworzenia kruchych faz. Pomiarzy mikrotwardości wykazały około 50% spadek twardości w jądrze zgrzeiny względem materiału bazowego aluminium, co wiąże się z dynamiczną rekrytalizacją oraz częściowym zanikiem faz umacniających stopu w trakcie procesu FSW. Te obserwacje są cennym wynikiem pracy, poszerzającym wiedzę o zmianach mikrostrukturalnych i właściwościach lokalnych w połączeniach Al-St wykonywanych metodą zgrzewania tarcowego.

5. Identyfikację strefy TMAZ jako obszaru krytycznego z punktu widzenia odporności na pękanie, co ma istotne znaczenie dla projektowania, kwalifikacji i bezpiecznej eksploatacji hybrydowych złączy spawanych tarcowo z mieszaniem materiału.
6. Ocena odporności na pękanie złączy stal–aluminium metodą całki J. Jednym z kluczowych osiągnięć rozprawy jest przeprowadzenie unikatowych badań odporności na pękanie w poszczególnych obszarach złącza FSW S355/AA6061-T6. Wyznaczenie porównawczych charakterystyk odporności na pękanie dla materiałów bazowych oraz kluczowych stref złącza (interfejs, WNZ, TMAZ) i wykazanie wyraźnego zróżnicowania odporności na pękanie w obrębie złącza.
7. Dodatkowo, autor wzbogacił badania wytrzymałościowe o analizę pól odkształceń przy wierzchołku pęknięcia z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu (DIC). Wykazał występowanie asymetrii rozkładu odkształceń w próbkach zawierających złącze, co wiąże się z niejednorodnością materiałową zgrzeiny. Przeprowadził również analizę faktograficzną przełomów po pęknięciu, potwierdzając plastyczny (ciągliwy) charakter pęknięcia we wszystkich przypadkach.

Doktorant wykazał się dużą samodzielnością i wszechstronnością w realizacji badań. Osiągnięcia rozprawy obejmują zarówno elementy nowatorskie (opracowanie przyrządu i technologii zgrzewania z kontrolą offsetu), rezultaty istotne aplikacyjnie (wykonanie i charakterystyka złączy spełniających wymagania wytrzymałościowe dla przemysłu), jak i wkład do rozwoju wiedzy (dogłębna analiza mikrostruktury oraz odporności na pękanie w złączach FSW stali z aluminium). Wszystkie wymienione wyniki świadczą o znaczącej wartości naukowej pracy

2. Uwagi szczegółowe i pytania dotyczące pracy

Poniższe uwagi mają charakter merytoryczny i dyskusyjny. Nie podważają zasadniczej wartości rozprawy, lecz wskazują obszary wymagające doprecyzowania lub uzupełnienia:

1. Autor słusznie akcentuje kluczową rolę parametru offset w złączach różnoimiennych i wskazuje ograniczenia stanowiska w zakresie jego precyzyjnej regulacji, co uzasadnia opracowanie dodatkowego oprzyrządowania. Warto wyraźniej rozdzielić (w sensie metrologicznym) dokładność ustawienia offsetu od rzeczywistego offsetu efektywnego w trakcie procesu. Czy wykonywano kontrolę po procesie jako walidację?
2. Parametry docelowe zestawiono w tabeli (m.in. 350 obr/min, posuw 5 cm/min, offset 0,4 mm). Jaka była powtarzalność wyników (rozrzut) dla serii wykonanych przy parametrach docelowych i czy rozrzut istotnie malał po wdrożeniu oprzyrządowania offset?
3. Jakie były główne przesłanki do wyboru całki J jako kryterium dla złącza St/Al oraz jakie ograniczenia interpretacyjne wynikają z zastosowania próbek CT o nienormatywnej grubości?
4. Rozprawa koncentruje się na statycznych i quasi-statycznych właściwościach połączeń (wytrzymałość na rozciąganie, odporność na pękanie), natomiast pomija kwestie trwałości zmęczeniowej zgrzein. W przypadku elementów konstrukcyjnych narażonych na obciążenia cykliczne (np. w pojazdach czy maszynach) znajomość odporności połączeń na zmęczenie jest kluczowa dla oceny ich przydatności eksploatacyjnej. Brak badań zmęczeniowych stanowi pewne ograniczenie rozprawy, nie wiemy, jak opracowane złącze zachowuje się pod długotrwałym obciążeniem zmiennym i czy ewentualne kumulowanie się uszkodzeń zmęczeniowych nie obniży jego wytrzymałości w stopniu większym, niż wynikałoby to z badań statycznych. Uzupełnienie pracy o taką analizę byłoby pożądane z punktu widzenia pełnej charakterystyki połączenia.
5. Jakie są potencjalne ograniczenia zaprojektowanego oprzyrządowania do ustawiania offsetu? Czy badano wpływ innych wartości offsetu (większych, mniejszych lub przesunięcia trzpienia w stronę stali) na przebieg zgrzewania i właściwości złącza? Jak zmiana parametru offset poza wartość 0,4 mm mogłaby wpłynąć na jakość połączenia stal-aluminium?
6. Proszę wyjaśnić, jakie mechanizmy stoją za obserwowanym brakiem spadku odporności na pękanie w złączu FSW (a nawet lokalnym wzrostem wartości J w jądrze

zgrzeiny) względem materiału bazowego. Dlaczego, mimo nieco niższej odporności w strefie ciepłno-plastycznej, uważa Pan, że proces FSW nie degraduje właściwości wytrzymałościowych połączenia?

7. Jak Autor ocenia wpływ stanu naprężeń własnych (w tym naprężeń ściskających/rozciągających w określonych kierunkach) na inicjację i propagację pęknięć w analizowanym złączu?
8. Autor wskazuje, że pewne efekty technologiczne (np. niedogrzenie od strony grani) utrudniały uzyskanie wiarygodnych wyników do analizy pól odkształceń. To ważna obserwacja. Proszę sprecyzować czy ograniczenia te dotyczyły wszystkich serii próbek czy tylko wybranych.

3. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Rozprawa została przygotowana starannie pod względem formalnym i graficznym, jednak w tekście zauważono kilkanaście drobnych uchybień językowych i edytorskich. Poniżej wymieniono najistotniejsze z nich:

- brak indeksów dolnych (Rm, R0.2) na niektórych rysunkach np. 6.22
- w podpisie pod rysunkiem 5.2 występuje sformułowanie „*Schemat rozmieszczeni punktów... podczas badani mikrotwardości*”, powinno być „*Schemat rozmieszczenia punktów... podczas badania mikrotwardości*”
- w opisie metodyki (rozdz. 5.5) zdanie „...polegał na wygenerowania wstępnego pęknięcia...” jest niepoprawne – powinno brzmieć: „polegał na wygenerowaniu wstępnego pęknięcia”.
- rys. 1.1. „procesy pokrewen”
- w tabelach i opisach niektórych wykresów zauważalne są niepoprawne odstępy przed jednostkami, np. „*naprężenie , MPa*” zamiast poprawnego „*naprężenie, MPa*” (bez spacji przed przecinkiem) czy „*odkształcenie , mm/mm*” zamiast „*odkształcenie, mm/mm*”.
- str. 10: W opisie procesu FSW pojawia się fraza „*na skutek uplastycznia i wymieszania*” – stylistycznie niepoprawna; należałoby użyć form rzeczownikowych: „*na skutek uplastycznienia i wymieszania*”.
- w tekście brakuje konsekwencji w stawianiu kropek po skrótach – np. użyto „*tj*” zamiast poprawnego „*tj.*” (skrót od „to jest”). Takie drobne uchybienie pojawia się m.in. na str. 90
- w oznaczeniu stopu aluminium pojawia się incydentalnie błąd: zapisano „*AA606-T6*” (str. 90) zamiast poprawnego „*AA6061-T6*”.

Ponadto dostrzec można kilka innych kosmetycznych usterek, takich jak sporadyczne literówki (strony: 5, 8, 27, 63, 90) , brakujące przecinki czy niejednolite formatowanie niektórych

rysunków i tabel (np. różna wielkość czcionki opisów osi wykresów). Uchybienia te nie zakłócają jednak ogólnego odbioru pracy. Zasadniczo rozprawa jest czytelna, a jej struktura jest uporządkowana i zgodna z wymaganiami edytorskimi obowiązującymi w pracach doktorskich.

4. Wnioski ogólne

Rozprawa jest poprawnie osadzona w literaturze i odpowiada na realną lukę aplikacyjną dotyczącą jakości oraz niezawodności złączy St/Al wykonywanych metodą FSW, w szczególności w kontekście odporności na pękanie oraz zróżnicowania stref złącza. Za istotny wkład uznaję połączenie w jednym opracowaniu: doboru parametrów procesu, opracowania rozwiązania umożliwiającego stabilne ustawianie offsetu (aspekt wdrożeniowy), oraz wieloaspektowej oceny mechanicznej z podejściem mechaniki pękania.

Praca dobrze wpisuje się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań, w szczególności w zakresie: trwałości zmęczeniowej, odporności środowiskowej (korozja, korozja naprężeniowa) oraz oceny degradacji w długotrwałej eksploatacji – co koresponduje z przedstawionymi w literaturze potrzebami badań niezawodności złączy St/Al.

5. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej umożliwia sformułowanie wniosku o spełnienie w stopniu wystarczającym warunków określonych Ustawą *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami i dopuszczenie rozprawy mgr inż. Wojciecha Ziółkowskiego pod tytułem „**Analiza odporności na pękanie połączeń doczołowych S355/AA6061-T6 zgrzewanych tarciovo metodą FSW**” do publicznej obrony pracy doktorskiej na Politechnice Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Z poważaniem

Krzysztof Kurek