

prof. dr hab. inż. Grzegorz Golański

Częstochowa 21.01.2026

Katedra Inżynierii Materiałowej

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechnika Częstochowska

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Wojciech Ziółkowski

pt. „Analiza odporności na pękanie połączeń doczołowych S355/AA6061-T6 zgrzewanych tarciovo metodą FSW”

promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński

promotor pomocniczy: dr inż. Robert Kosturek

**wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny inżynieria mechaniczna
Politechniki Bydgoskiej.**

Podstawa formalna recenzji

Recenzja pracy doktorskiej Pana mgr inż. Wojciecha Ziółkowskiego pt. „Analiza odporności na pękanie połączeń doczołowych S355/AA6061-T6 zgrzewanych tarciovo metodą FSW” została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny inżynierii mechaniczna Politechniki Bydgoskiej (uchwała nr 8/11/2025/2026 z dnia 04.11.2025).

Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana praca doktorska została opracowana pod opieką naukową promotora Pana prof. dr hab. inż. Dariusza Borońskiego oraz promotora pomocniczego Pana dr inż. Roberta Kosturek. Rozprawa została napisana w języku polskim i obejmuje 103 strony tekstu. Dysertacja podzielona była zasadniczo na dwa rozdziały: część teoretyczną i część

eksperymentalną. Część teoretyczna, obejmuje jeden rozdział (numer 2), który był podzielony na pięć podrozdziałów, sumarycznie liczący 19 stron. Część ta poprzedzona była wykazem ważniejszych symboli i skrótów użytych w pracy, spisem treści oraz wstępem (rozdział 1) podzielonym na trzy podrozdziały. W podrozdziale 1.2 i 1.3 przedstawiono odpowiednio cel i zakres pracy. Część badawcza zawierająca 59 strony (rozdziały od 3 do 6), kończyła się wnioskami (rozdział 7). Recenzowana praca zawiera 71 rysunki, przedstawiające udokumentowane wyniki własnych badań, z których część była wielokrotnie złożonymi ilustracjami oraz 12 tabel, w których zestawiono uzyskane wyniki badań eksperymentalnych. Praca kończy się spisem literatury obejmującym 82 pozycje oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

Ocena rozprawy i uwagi ogólne

Metoda zgrzewania Friction Stir Welding (FSW), czyli zgrzewanie tarcie z mieszaniem materiału zgrzeiny, została opracowana i opatentowana w roku 1991 przez zespół pod kierunkiem Wayne Thomas'a w The Welding Institute w Cambridge. Opracowanie tej metody było odpowiedzią na zapotrzebowanie przemysłu lotniczego, związane z możliwością uzyskiwania alternatywnej do nitowania technologii łączenia stopów aluminium serii 2xxx i 6xxx. Metoda FSW wykorzystuje do łączenia materiałów w stanie stałym cylindryczne narzędzie zakończone wieńcem opory i trzpieniem mieszającym, które penetruje materiał wzdłuż linii styku. W wyniku tarcia narzędzia o powierzchnię łączonych detali generowany jest lokalny wzrost temperatury do wartości maksymalnie do 0,8 temperatury topnienia. Wzrost temperatury przyczynia się do uplastycznienia zgrzewanych materiałów, a ruch obrotowy trzpienia umożliwia mieszanie materiałów i utworzenie trwałej spoiny. Zmiany strukturalne zachodzące w wyniku tego procesu przebiegają w stanie stałym, z pominięciem procesu krystalizacji. Pozwala to na uniknięcie potencjalnego występowania niezgodności/wad z tym związanych. Ponadto znacznie niższa temperatura tego procesu od spawania, w mniejszym stopniu wpływa na obniżenie właściwości mechanicznych powstałego połączenia w strefie wpływu ciepła. Ceną zaletą metody FSW z punktu widzenia

technologicznego i ekonomicznego jest możliwość prowadzenia obróbki termomechanicznej z wykorzystaniem konwencjonalnych i numerycznie sterowanych frezarek CNC. Korzyścią zastosowania tej metody jest również zdolność łączenia zgrzewanych materiałów w czasie jednej operacji technologicznej. Metodę FSW można zaliczyć także do technologii energooszczędnych i rozwiązań ekologicznych, co jest istotne ze względu na coraz silniej akcentowane wymagania dotyczących ochrony środowiska oraz produkcji niskoemisyjnej. Liczne zalety metody FSW oraz ciągły rozwój tej termomechanicznej technologii jest przyczyną jej rosnącej popularności. Zgrzewanie tą metodą umożliwia wykonywanie połączeń materiałów konstrukcyjnych nie tylko o jednakowych właściwościach fizykochemicznych (stopy aluminium, miedzi, magnezu, tytanu, żelaza, etc.), ale również możliwość uzyskiwania połączeń pomiędzy materiałami o zdecydowanie odmiennym składzie chemicznym czy też właściwościach mechanicznych. Głównymi odbiorcami wykonywanych tą technologią detali czy elementów konstrukcyjnych są przedsiębiorstwa z branży: transportowej, lotniczej oraz kosmicznej. Powyższe branże oczekują otrzymania nie tylko lekkich i tanich elementów, ale również detali cechujących się wymaganymi i powtarzalnymi w czasie ich wytwarzania właściwościami mechanicznymi. Właściwości wytworzonych połączeń, w tym odporność na pękanie czy odporność na zmęczenie, muszą zapewniać bezpieczeństwo, trwałość i niezawodność konstrukcji w czasie jej użytkowania. Pewność oraz zdolność do przenoszenia przez konstrukcję obciążeń eksploatacyjnych, związana jest wprowadzeniem na etapie projektowania rzetelnych danych materiałowych. Wychodząc naprzeciw tym oczekiwaniom Doktorant w recenzowanej rozprawie przeprowadził badania, których celem było: 1. *opracowanie technologii i dobór parametrów doczołowego różnoimennego złącza zgrzewanego niestopowej stali konstrukcyjnej S335 i stopu aluminium AA6061-T6*, 2. *ocena odporności na pękanie wybranych stref połączenia zgrzewanego oraz materiałów podstawowych z wykorzystaniem metody całki J*, 3. *analiza właściwości mechanicznych połączenia stal S355/stop aluminium AA 6061-T6 zgrzewanego metodą FSW uzyskanych statyczną próbą rozciągania* oraz 4. *analiza fraktograficzna przelomów*. Podjęcie tej tematyki przez Pana

mgr inż. Wojciecha Ziółkowskiego, należy uznać za zasadne, gdyż podstawową wadą złączy FSW jest obecność w niej karbów strukturalnych, co negatywnie wpływa na właściwości złącza, w tym na jego odporność na pękanie. Zrealizowane w ramach rozprawy doktorskiej badania właściwości mechanicznych i odporności na pękanie złączy FSW mają istotny aspekt praktyczny.

Badania własne Doktoranta, zostały poprzedzone przeglądem literaturowym, opracowanym z wykorzystaniem 56 pozycji literaturowych, z 82 przywołanych w bibliografii. Przytoczone pozycje te obejmowały artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach zagranicznych, książki, materiały konferencyjne oraz strony www. Prawie połowa (25 publikacji) z przywołanych pozycji literaturowych została opublikowanych w ostatnich 10 latach, co wskazuje na jej aktualności. W tej części pracy doktorskiej Doktorant, posiłkując się 7 ilustracjami, których część była rysunkami wielokrotnie złożonymi, w sposób zadawalający przedstawił zakres wiedzy wprowadzający w przedmiotową problematykę badawczą. W rozdziale tym przedstawiono charakterystykę procesu FSW i połączeń różnoimiennym stal/aluminium, a także możliwości oceny ich odporności na pękanie z wykorzystaniem narzędzi mechaniki pękania. W tej części rozprawy widoczne były błędy stylistyczne oraz miejscami niedoskonałości językowe związane, zapewne z tłumaczeniem pojęć technicznych z literatury anglojęzycznej, np. *przestarzenie cząstek umacniających*, *przełom jamkowy*, etc. Zastrzeżenie budzi również sam spis przywołanej literatury, który został przygotowany niezgodnie z powszechnie przyjętymi wymogami.

Na podstawie przeglądu literaturowy oraz wstępnych badań własnych Doktorant sformułował cztery cele pracy, które zostały wyżej wymienione. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na doczołowym, różnoimiennym złączu zgrzewanym stal S355/ stop aluminium AA6061-T6. W tym miejscu rodzi się pytanie, dlaczego zastosowano w ramach eksperymentu w/w gatunki materiałów? Proszę o komentarz. W celu rozwiązania postawionych w pracy zadań badawczych Doktorant, zrealizował szeroki wachlarz badań eksperymentalnych obejmujących, m.in. wykonanie połączeń zgrzewanych metodą FSW, pomiar twardości sposobem Vickersa,

przeprowadzenie statycznej próby rozciągania, określenie odporności na pękanie metodą całki J, badania makro- i mikroskopowe złącza, analizę fraktograficzną oraz pomiar naprężeń własnych. Powyższe badania zrealizowano nie tylko w wybranych strefach wytworzonego połączenia zgrzewanego, ale również dla materiałów podstawowych (rozdział 4 i 5). W ramach prowadzonych badań własnych, co zasługuje na podkreślenie, Pan mgr inż. Wojciech Ziółkowski opracował autorski blok antywyboczeniowy umożliwiający określenie wartości całki J dla złącza zgrzewanego o grubości 3 mm. Przyjęty w pracy zakres i metodyka eksperymentu nie budzi większych zastrzeżeń z pojedynczymi wyjątkami. W podrozdziale 4.2, na stronie 34 w tabeli 3.4 Doktorant przedstawił parametry procesowe wytypowane do badań wstępnych, na bazie których w tabeli 3.5, strona 35 zestawiał właściwe parametry zgrzewania. Brak jest jednak w tym podrozdziale informacji dlaczego dla procesu technologicznego zastosowano posuw 5 cm/min oraz średnicę trzpienia 6 mm, skoro dla badań wstępnych wartości tych parametrów wynosiły odpowiednio: 2,5 cm/min i 5 mm. Proszę Doktoranta o komentarz. Wyjaśnienia Doktoranta wymaga również przedstawiona w pracy na stronie 33 informacja dotycząca zaprojektowania i wykonania przyrządu, który pośrednio umożliwiał ustawienie offsetu między tworzącą trzpienia a linią styku łączonych arkuszy blach. Kto był autorem (autorami) tego rozwiązania i jaki był udział i wpływ Doktoranta? Czy uzyskano patent dla zaproponowanego przyrządu? Podobne zastrzeżenia dotyczą informacji zawartej w podrozdziale 5.4, strona 44, gdzie Doktorant wskazuje, że badania naprężeń własnych w złączu zostały zrealizowane w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie przez Pana dr inż. Tomasza Ślęzaka. Ponieważ zgodnie z artykułem 187, punkt 1 Ustawy¹ „Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność **samodzielnego** prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej” proszę Doktoranta o wyjaśnienie, jaki był Jego udział w tych badaniach?

¹ Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami, *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, Dz. U. 2018 poz. 1668

Wyniki badań własnych i ich analizę Doktorant przedstawił w bogato ilustrowanym za pomocą licznych rysunków oraz tabel rozdziale 6. Zrealizowane badania, w szczególności badania właściwości mechanicznych i odporności na pękanie, pozwoliły uzyskać szereg wartościowych i cennych wyników. Wyniki badań właściwości mechanicznych i odporności na pękanie materiałów podstawowych i złączy FSW przedstawione w podrozdziale 6.3 i 6.5, mogą być podstawą do budowy charakterystyki materiałowej tego typu połączeń. Istotną zaletą zrealizowanej pracy, jest również optymalizacja parametrów technologicznych procesu zgrzewania FWS łączonych materiałów, w aspekcie uzyskania wysokich i powtarzalnych właściwości mechanicznych.

Zastrzeżenia Recenzenta budzi jednak podrozdział 6.1.2, pt. „*Mikrostruktura materiałów bazowych i zgrzeiny FSW S355/AA6061-T6*”, gdzie Doktorant próbował poddać analizie mikrostrukturę łączonych materiałów, jak również mikrostrukturę wybranych obszarów zgrzeiny. Przeprowadzoną w tym podrozdziale analizę, oparto na szeregu bardzo słabej jakości obrazach mikrostruktury wykonanych z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej, a ponadto część z tych obrazów pochodziła z wcześniejszej, wieloautorskiej publikacji Autora (pozycja 62 w spisie literatury) – rysunek 6.4 i 6.5. Proszę Doktoranta o wskazanie, jaki był jego wkład w cytowaną publikację. Szkoda, że Doktorant nie zrealizował badań mikrostrukturalnych za pomocą lepszej klasy narzędzia badawczego, np. skaningowego mikroskopu elektronowego. Mikroskop tej klasy Doktorant wykorzystał m.in. do przeprowadzenia mikroanalizy składu chemicznego, której wyniki zamieszcza w tym podrozdziale, a także do analizy fraktografii przełomów (podrozdział 6.7).

Podsumowaniem szerokiego zakresu przeprowadzonych badań był rozdział 7, gdzie Doktorant przedstawił dziesięć szczegółowych wniosków wynikających bezpośrednio z uzyskanych wyników badań eksperymentalnych (podrozdział 7.1). Zrealizowane badania, osiągnięte założone cele oraz sformułowane wnioski pozwoliły Doktorantowi w podrozdziale 7.2, na wyznaczenie w czterech punktach dalszych kierunków badań w zakresie jakości i właściwości złącza FSW stal S355/stop aluminium AA6061-T6.

Oceniając od strony merytorycznej część eksperymentalną recenzowanej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Wojciecha Ziółkowskiego należy stwierdzić, że zarówno zaplanowanie eksperymentu, dobór i zastosowanie technik badawczych oraz opracowanie uzyskanych wyników były wykonane prawidłowo i jako całość (z pojedynczymi wyjątkami) nie budzą większych zastrzeżeń. Cieniem na ocenę recenzowanej dysertacji kładzie się strona redakcyjna, edycyjna i językowa pracy, która nie była na wysokim poziomie. W pracy widoczny był szereg względnie licznych błędów stylistycznych, miejscami brak interpunkcji, wielokrotnie złożone, długie zdania, względnie liczne tzw. „literówki”, również nie zawsze zastosowana terminologia i słownictwo techniczne było właściwe. Na przykład, Doktorant w dysertacji stosuje jako oznaczenie umownej granicy plastyczności symbol $R_{0,2}$, natomiast właściwym jest $R_{p0,2}$ ². W pracy Doktorant stosuje również zaskakujące pojęcia o *lokalnych* i *globalnych właściwości mechanicznych*, a właściwymi formami opisu zrealizowanych badań są makro- i mikroskopowe właściwości (które, notabene w treści rozprawy Doktorant stosuje). Szczególnie widoczne były błędy związane z opisem fraktografii przełomów. Doktorant do charakterystyki przełomów zastosował, m.in. poniższe sformułowania: *zagłębieniami o średniej wielkości, przerwanyimi pustymi przestrzeniami, występowanie licznych zagłębień po przerwanym pustych przestrzeniach*, etc. Opis fraktografii przełomu wykazującego ciągły charakter pękanie powinien zawierać m.in. następujące formy opisu: *(mikro)pustki, oderwania, dolki*, itp. Szkoda, że Doktorant, nie skonsultował tych wyników swojej pracy z osobą mającymi doświadczenie w zakresie interpretacji wyników tego rodzaju badań lub nie sięgnął do właściwej literatury.

Wymienione potknięcia redakcyjne, edycyjne i błędy nomenklaturowe utrudniają lekturę recenzowanej pracy, obniżając jej końcową ocenę, ale nie mają wpływu na moją pozytywną opinię o recenzowanej pracy. Wskazane w recenzji niedoskonałości rozprawy doktorskiej stanowią wskazówki pozwalające w przyszłości uniknąć Doktoratowi

² PN-EN ISO 6892-1 *Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*

podobnych błędów i nieścisłości oraz przyczynią się do doskonalenia i skorygowania Jego warsztatu naukowo-badawczego.

Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

W trakcie szczegółowej analizy recenzowanej rozprawy doktorskiej nasuwają się pewne spostrzeżenia natury polemicznej oraz uwagi szczegółowe, które przedstawiam poniżej.

1. Na stronie 8 rozprawy Doktorant pisze o „wymaganiach trwałościowych”. Proszę o wyjaśnienie, co Doktorant ma na myśli używając tego pojęcia.
2. Na stronie 21 i 30 pracy Doktorant pisze o „długowieczności zgrzein”? Proszę Doktoranta o wyjaśnienie, co według Niego oznacza pojęcie długowieczność złącza.
3. Na stronie 22 pracy Doktorant pisze o „powstawaniu tuneli”. Proszę o wyjaśnienie tego terminu.
4. Dlaczego Doktorant nie odniósł przedstawionych w tabeli 4.1 i 4.2 wyników składu chemicznego materiałów podstawowych do wymagań normatywnych? Na jakim rodzaju urządzenia przeprowadzono analizę składu chemicznego materiałów podstawowych?
5. Wzór 5.1 przedstawiony na stronie 41, nie pozwala obliczyć wartości twardości sposobem Vickersa. Właściwa postać tego wzoru, według PN-EN ISO 6507-1³ posiada następującą formę:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

gdzie:

F – obciążenie wgłębnika, N;

d – średnia przekątna odcisku, mm

³ PN-EN ISO 6507-1 Metale -Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badania

6. Na stronie 47 pracy Doktorant wspomina, że proces generowania pęknięcia zmęczeniowego był weryfikowany za pomocą programu napisanego w WaveMatrix3. Proszę o informację czy było to oprogramowanie komercyjne czy też stworzone na poczet prowadzonych badań? Sytuacja zbliżona na stronie 50, gdzie Doktorant pisze o opracowanym programie z zaimplementowanymi wzorami opartymi o normatywną procedurę obliczeniową.
7. Czy obecność potencjalnych niezgodności w zgrzeinie była badana inną metodą niż wizualna?
8. Na stronie 55b w opisie mikrostruktury Doktorant użył do jej opisu poniższych sentencji: „...przemieszanymi ziarnami aluminium...” oraz „... jest wynikiem kolizji ząbkowanych granic ziaren...”. Prosiłbym o wyjaśnienie, co Doktorant rozumie pod pojęciem przemieszane ziarna w materiale metalicznych i na czym polega kolizja ząbkowanych granic ziaren i co to są ząbkowane granice ziaren.
9. Ile wykonano mikroanaliz składu chemicznego i czy badania składu techniką SEM-EDS upoważniają do stwierdzenia o obniżonej zawartości krzemu w porównaniu do materiału podstawowego?
10. Co zdaniem Doktoranta wnoszą do wiedzy inżynierskiej widma promieniowania pierwiastków stopowych przedstawione na rysunku: 6.8, 6.9 i 6.11, tym bardziej, że są ona mało czytelne.
11. W jakim stanie dostawy był wykorzystany do badań stop aluminium AA6061-T6. Oznaczenie T6 sugeruje na obróbkę cieplną – utwardzanie dyspersyjne, to skąd zaskoczenie Doktoranta przedstawione na stronie 59, a związane z obecnością wydzieleń w pobliżu interfejsu zgrzeiny? Czy temperatura rzędu 200°C i wyższa (rys. 6.10) może doprowadzić do przestarzenia stopu w tym mikroobszarze?
12. Proszę o wyjaśnienie, co oznaczono cyfrą 2 na rysunku 6.12, strona 62.
13. Dlaczego do określenia właściwości plastycznych badanych materiałów zastosowano wydłużenie procentowe całkowite przy największej sile A_{gt} ?

14. Dlaczego uzyskanych wartości właściwości mechanicznych stopu aluminium AA6061-T6 nie odniesiono do wymagań dla tego gatunku materiału zawartych w normie PN-EN 485-2⁴?
15. Na stronie 89, Doktorant wskazuje na istotną rolę wydzielen równowagowych w morfologii uzyskanych przełomów. Prosiłbym o informację, o rodzaju wydzielen równowagowych mogących potencjalnie występować w analizowanym złączu.
16. Wniosek 2. Doktorant wskazuje, że dzięki zastosowaniu wytypowanych parametrów procesu FSW uzyskane połączenia charakteryzują się właściwościami wytrzymałościowymi spełniającymi postawione kryteria. Prosiłbym o wskazanie tych przywołanych kryteriów.
17. W punkcie 7.2, strona 92, wniosek 2, Doktorant pisze, „...*zdolnej do przenoszenia odpowiedzialnych obciążeń...*”, zasadne jest tutaj pytanie czym są odpowiedzialne obciążenia i co Autor rozumie pod tym pojęciem?

Wniosek końcowy

Recenzowana praca Pana mgr inż. Wojciecha Ziółkowskiego pt. „*Analiza odporności na pękanie połączeń doczołowych S355/AA6061-T6 zgrzewanych tarciovo metodą FSW*”, stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe i powiązana jest z potrzebami środowiska przemysłowego w przedmiotowym zakresie. Przedstawione w pracy doktorskiej wyniki badań mają aspekt użytkowy i potencjalnie aplikacyjny. Autor rozprawy w swojej dysertacji wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną, znajomością różnorodnych metod badań materiałów i umiejętnością samodzielnego zaprojektowania oraz samodzielnego przeprowadzenia eksperymentu. Mocną stroną recenzowanej pracy jest scharakteryzowanie właściwości mechanicznych i odporności na pękanie materiałów

⁴ PN-EN 485-2 Aluminium i stopy aluminium - Blachy, taśmy i płyty - Część 2: Właściwości mechaniczne

podstawowych i złączy FSW oraz optymalizacja procesu FSW. Słabszą stroną pracy, obniżającą jej pozytywną ocenę końcową są względnie liczne błędy redakcyjne, edycyjne i stylistyczne.

Podsumowując po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr inż. Wojciecha Ziółkowskiego pt.: „Analiza odporności na pękanie połączeń doczołowych S355/AA6061-T6 zgrzewanych tarciovo metodą FSW”, stwierdzam, że recenzowana praca spełnia w stopniu wystarczającym wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania o nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie: inżynieria mechaniczna.

prof. dr hab. inż. Grzegorz Golański