

Kraków 2025-04-12

dr hab. inż. Tomasz MACHNIEWICZ, prof. AGH
Katedra Projektowania i Eksploatacji Maszyn
Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominiki PŁACZEK

pt.: *„Analiza połączeń spawanych różnoimiennych materiałów z zastosowaniem
cienkościennych łączników zgrzewanych wybuchowo Al/Fe”*.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich z dnia 28 stycznia 2025, w sprawie powołania recenzentów przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Oceniana praca koncentruje się na analizie – głównie mechanicznych, ale także strukturalnych – właściwości połączeń spawanych wykonanych z zastosowaniem cienkościennych łączników aluminiowo-stalowych zgrzewanych wybuchowo. Dążenie do poprawy funkcjonalności konstrukcji inżynierskich prowadzi często do potrzeby trwałego łączenia ze sobą metali o różnych właściwościach fizyko-chemicznych, czego nie można zrealizować w sposób bezpośredni przy użyciu klastycznych metod spawania fuzyjnego. Mimo, że spawanie stali i stopów aluminium poprzez łączniki zgrzewane wybuchowo znane jest od kilkudziesięciu lat, to jednak rozwój technologii spajania metali, a równocześnie rozwój technik badawczych – zarówno eksperymentalnych, jak również dotyczących modelowania

numerycznego – powodują, że temat ten jest wciąż interesujący pod względem naukowych, a przy tym ma istotny aspekt praktyczny. Świadczą o tym z jednej strony liczne, nowe publikacje naukowe dotyczące tej tematyki, a równocześnie trwała już obecność tych technologii w różnych sektorach przemysłu, szczególnie związanych z transportem. Synergiczny efekt oddziaływań całej mozaiki czynników materiałowych i termomechanicznych skoncentrowanych w obrębie niewielkiej objętości materiału tworzy paradoksalnie szeroką przestrzeń dla badań naukowych o interesujących walorach poznawczych i dużym pragmatycznym znaczeniu. Jest to szczególnie istotne w aspekcie wskazania kryteriów zapewniających bezpieczną eksploatację, szczególnie w warunkach obciążeń zmęczeniowych, elementów konstrukcyjnych wykonanych przy użyciu tych technologii. W pełni uzasadnia to celowość podjęcia tematu rozprawy, a równocześnie pozwala uznać jej zakres badawczy za odpowiedni dla pracy doktorskiej.

Podstawowym obiektem badań realizowanych w ramach pracy jest połączenie spawane blachy ze stali S355J2 z blachą ze stopu aluminium AA5083-H321, za pośrednictwem zgrzewanego wybuchowo cienkościennego łącznika wykonanego z tych samych materiałów i warstwy pośredniczącej między nimi ze stopu AA1050-H24.

Zastosowane metody badawcze, tj. w głównej mierze eksperymentalne badania charakterystyk mechanicznych i parametrów wytrzymałościowych, analizy strukturalne a także analizy MES rozważanych obiektów, bezspornie kwalifikują przedstawione osiągnięcie do dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Praca ma formę książki formatu 160 mm x 235 mm i składa się z ośmiu rozdziałów rozmieszczonych na 151 stronach. Pierwszy z nich – *wstęp* (3 strony) – prezentuje genezę pracy, jej tezę, cele i zakres. Rozdział 2 (24 strony) stanowi teoretyczny wstęp do rozprawy, zaś pozostałe rozdziały (124 strony) dotyczą własnych badań Doktorantki. Całość poprzedza dwustronicowy *wykaz ważniejszych symboli i oznaczeń* (2 strony), zamyka zaś, obejmujący 150 pozycji *spis literatury*, oraz *streszczenia w języku polskim i angielskim*.

Ogólną strukturę pracy, pomijając dalej wymienione drobne uwagi, można uznać za właściwą. Objętościowo zdecydowanie większa część pracy przedstawia własny wkład Doktorantki w poszerzenie aktualnego stanu wiedzy o nowe dane eksperymentalne i modele obliczeniowe. Baza bibliograficzna jest aktualna; ponad 40% przywoływanych pozycji (64/150) pochodzi z ostatnich 10 lat, a 27 – z ostatnich dwóch lat. Spis literatury obejmuje także 2

publikacje których Doktorantka jest współautorką, wydane w czasopiśmie *Marine Structures* (200 pkt. wg MNiSW) oraz *Materials* (140 pkt. wg MNiSW).

Praca zawiera łącznie 125 rysunków; 17 spośród nich dotyczy przeglądu literatury, zaś 108 pozostałych stanowi w większości autorskie schematy, wykresy i ilustracje opisujące wykonane przez Doktorantkę badania, analizy i ich wyniki. Część przeglądową uzupełniają 2 tabele, 39 tabel opisuje wyniki badań własnych Doktorantki. Przedstawione ilustracje i tabele cechuje wysoki poziom graficznego dopracowania, są przejrzyste, czytelne i łatwe w interpretacji.

Jak już wspomniano, w dość krótkim, bo zaledwie trzystronicowym wstępie Doktorantka przedstawiła genezę pracy, a następnie jej cele, i zakres. Można uznać, że celowość podjęcia tematu rozprawy została, jako geneza pracy, przekonująco wyjaśniona. Kolejne jednak strategiczne punkty (teza, cele i zakres pracy) nie zostały przynajmniej w jawny i chronologiczny sposób poparte analizą literatury, prowadzoną zwyczajowo w celu rozpoznania aktualnego stanu wiedzy w zakresie rozważanej tematyki, tak aby cele i zakres pracy mogły uzupełnić tą wiedzę we wskazanych obszarach jej niedostatku. Niezależnie jednak od tej formalnej niekonsekwencji, podane cele pracy, ich zakres i ranga są odpowiednie do pracy doktorskiej. Korespondują one także z przedstawionym przeglądem literatury i sformułowanymi na jego podstawie wnioskami do badań własnych, choć te przedstawiono dopiero pod koniec następnego rozdziału.

Zasadnicza część pracy, prezentująca wyniki badań własnych Doktorantki zawiera się w rozdziałach 3-8. Łączna liczba badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych zrealizowanych w ramach pracy jest tak duża, że sama ich skrupulatna „inwentaryzacja” jest pewnym wyzwaniem. W celu przedstawienia nakładu włożonej pracy warto jednak literalnie przynajmniej wymienić je wszystkie.

Tak więc zakres badań eksperymentalnych zrealizowanych w ramach pracy obejmował:

- 1) badania statyczne stopu AA5083-H321 (materiał bazowy),
- 2) badania statyczne stali S355J2+N (materiał bazowy),
- 3) badania zmęczeniowe stopu AA5083-H321 (materiał bazowy) – krzywe zmęczenia dla $R=-1$ i $R=0.1$ (łącznie 45 badań zmęczeniowych),
- 4) badania statyczne mini-próbek utworzonego laminatu Al/Fe (przed spawaniem),
- 5) badania statyczne całego połączenia spawanego Al/Fe,
- 6) badania zmęczeniowe złącza spawanego Al/Fe – krzywe zmęczenia dla $R=0.1$ (po 8 próbek na 4 poziomach obciążenia = 32 badania),

- 7) badania monotoniczne mini-próbek laminatu Al/Fe po procesie spawania,
- 8) badania monotoniczne mini-próbek strefy spoiny pachwinowej AA5083 ,
- 9) badania cyklicznych właściwości mini-próbek strefy spoiny pachwinowej AA5083,
- 10) badania zmęczeniowe mini-próbek strefy spoiny pachwinowej AA5083 – krzywe zmęczenia dla $R=-1$ oraz $R=0.1$ (łącznie 30 badań zmęczeniowych),
- 11) badania cyklicznych właściwości mini-próbek stopu AA5083-H321 ze strefy wpływu ciepła połączenia,
- 12) badania cyklicznych właściwości mini-próbek stali S355J2+N ze strefy wpływu ciepła połączenia,
- 13) termograficzne badania rozkładu temperatur podczas spawania,
- 14) badania makro- i mikrostruktury różnych stref połączenia spawanego na mikroskopie metalograficznym,
- 15) badania mikrotwardości różnych stref połączenia spawanego,
- 16) badania SEM i EDS statycznych i zmęczeniowych przełomów materiału bazowego AA5083 oraz połączeń spawanych,
- 17) analiza stanu odkształcenia złączy metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC) pod działaniem obciążeń statycznych,
- 18) analiza stanu odkształcenia złączy metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC) pod działaniem obciążeń zmęczeniowych,

Dodatkowo praca obejmuje następujące rodzaje analiz MES:

- 19) modelowanie rozkładu temperatur podczas spawania, z uwzględnieniem dwóch wariantów tego procesu:
 - a) spawanie blachy stalowej do zgrzanego wybuchowo łącznika Al/Fe,
 - b) spawanie blachy stalowej do łącznika Al/Fe z uprzednio dospawaną blachą aluminiową.
- 20) analiza naprężeń i odkształceń w złączu spawanym:
 - a) pod działaniem obciążeń statycznych,
 - b) pod działaniem obciążeń zmęczeniowych.
- 21) modelowanie wykresów trwałości zmęczeniowej wyznaczone na podstawie:
 - a) efektywnego naprężenia w karbie,
 - b) naprężeń strukturalnych wg metody hot spot.

Uważam, że liczba i różnorodność wymienionych wyżej badań zrealizowanych przez Doktorantkę w ramach ocenianej pracy jest imponująca. Tak duża liczba przeprowadzonych eksperymentów zasługuje na wysoką ocenę, co dotyczy szczególnie czasochłonnych badań zmęczeniowych prowadzonych dla dużej liczby próbek, z uwzględnieniem także wysokocyklowych zakresów charakterystyk zmęczeniowych. Metodyka prowadzonych badań

a także sposób analizy danych doświadczalnych i prezentacji uzyskanych wyników są właściwe. Opisy prowadzonych eksperymentów są syntetyczne lecz równocześnie czytelne i wyczerpujące.

Doktorantka zastosowała klasyczną i generalnie przejrzystą kompozycję pracy prezentując wyniki własnych badań w rozdziałach opisujących kolejno: obiekty badań (Rozdział 4), metody i stanowiska badawcze (Rozdział 5), wyniki badań (Rozdział 6), analiza wyników badań (Rozdział 7), wnioski (Rozdział 5). Jest to typowy podział stosowany w artykułach naukowych, które jednak nie są aż tak wielowątkowe jak oceniana praca doktorska. Biorąc pod uwagę liczebność zbioru badań i analiz przedstawionych w pracy, byłoby w moim odczuciu bardziej wygodne dla czytelnika jej tematyczne pogrupowanie, tj. prezentacja w sposób ciągły w osobnych rozdziałach wszystkich aspektów dotyczących przykładowo badań statycznych, badań zmęczeniowych, analiz numerycznych, itd. W obecnym układzie lektura pracy wymaga częstych i dalekich retrospekcji do wcześniejszych rozdziałów, choć trzeba przyznać, że porządek zachowany w pracy jest w tym podróżach sporym ułatwieniem.

Praca została starannie zredagowana pod względem stylistycznym i edytorskim. Drobne i być może uznaniowe potknięcia w tym zakresie zdarzają się raczej sporadycznie. Generalnie Doktorantka operuje dobrym stylem wypowiedzi - krótkim i komunikatywnym.

2. Najważniejsze osiągnięcia Doktorantki

Do najważniejszych udokumentowanych w pracy osiągnięć Doktorantki zaliczyć należy:

- 1) Zrealizowanie, przedstawionego wyżej, bardzo obszerne i urozmaiconego programu badań eksperymentalnych** obejmującego badania statyczne i zmęczeniowe rozważanych połączeń spawanych i poszczególnych ich fragmentów. Na tej podstawie opracowane zostały modele materiałowe różnych stref badanego połączenia. Uzyskane wyniki poza wartością czysto poznawczą, posłużyły do opracowania modeli MES dotyczących badanego złącza. Wyniki badań zmęczeniowych pozwoliły na opracowanie krzywych zmęczenia badanych połączeń oraz ujawniły typowy charakter i miejsce ich zniszczenia. Wykazano, że bez względu na charakter obciążenia (monotoniczny lub zmęczeniowy) , zniszczenie badanych połączeń następuje zawsze poza łącznikiem zgrzewanym, po stronie blachy aluminiowej, co ujawnia potencjalną możliwość dalszej minimalizacji samego łącznika. Makro- i mikroskopowa analiza rozważanych połączeń wskazała na zmiany

strukturalne blach składowych łącznika, świadczące o potrzebie minimalizacji energii spawania (a może też/lub wymuszonego chłodzenia?) przy wykonywaniu tego połączenia.

2) Opracowanie modeli i przeprowadzenie analiz numerycznych MES dotyczących obciążeń mechanicznych i termicznych rozważanych połączeń, na podstawie których:

- wyznaczono rozkłady temperatur w analizowanych połączeniach w trakcie procesu spawania i potwierdzono ich ilościową zgodność z wynikami analiz termowizyjnych, co demonstrowa użyteczność opracowanego modelu numerycznego do optymalizacji parametrów spawania oraz geometrii łączników, ze względu na kontrolę ich nagrzewania,
- wyznaczono rozkłady naprężeń i odkształceń w badanych łącznikach wskazując na miejsca najbardziej wyęzione. Dokonano pozytywnej weryfikacji opracowanego modelu poprzez porównanie wyznaczonych numerycznie rozkładów odkształceń z wynikami pomiarów prowadzonych metodą cyfrowej korelacji obrazu.
- zamodelowano wykresy trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem wyznaczonych na podstawie MES naprężeń i krzywych projektowych FAT, według metody efektywnego naprężenia karbu oraz metody hot-spot. Zademonstrowano, że trwałości zmęczeniowe oszacowane na podstawie obu tych metod mają zbliżone wartości i odpowiadają trwałościom wyznaczonym doświadczalnie, co wskazuje na użyteczność opracowanych modeli.

Praca ujawnia, że Doktorantka dysponuje szerokim warsztatem badawczym umożliwiającym swobodną pracę naukową w reprezentowanej dyscyplinie. Posiada dużą sprawność w planowaniu i prowadzeniu wielkoskalowych badań właściwości mechanicznych materiałów, z uwzględnieniem badań monotonicznych, cyklicznych i zmęczeniowych. Opanowała umiejętność prowadzenia metalograficznych analiz makro- i mikrostrukturalnych, a także analiz SEM oraz EDS. Skutecznie stosuje metodę cyfrowej korelacji obrazu w analizach odkształceń a także termografię. Sprawnie posługuje się metodą elementów skończonych zarówno w zakresie analizy zjawisk mechanicznych jak i termicznych. Wykazała przy tym dobrą umiejętność interpretacji wyników, w tym właściwego kojarzenia rezultatów badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych.

3. Uwagi krytyczne

Analiza tekstu rozprawy nasuwa także pewne uwagi krytyczne, bądź wątpliwości, zapewne w dużej części dyskusyjne, które w związku z tym mogą być oczywistą inspiracją do tejże dyskusji podczas obrony pracy.

3.1. Uwagi ogólne i kwestie dyskusyjne

- 1) Praca w skromnym stopniu odnosi się do aktualnego stanu wiedzy z rozważanej tematyki, zarówno jeśli chodzi o genezę pracy, jak również konfrontację uzyskanych wyników z danymi literaturowymi. Przegląd literatury dotyczącej badania właściwości mechanicznych łączników Fe/Al zgrzewanych wybuchowo i połączeń spawanych wykonanych przy ich użyciu jest dość wybiórczy bo odnosi się tylko do 9 publikacji. Sądzę też, że bardziej korzystne byłoby przegrupowanie tych treści w taki sposób, by prezentacja nie koncentrowała się na tym co przedstawiono w kolejnych artykułach, lecz raczej była syntezą istniejących danych na temat konkretnych właściwości badanych połączeń. Dokonując analizy uzyskanych wyników, również nie porównano ich z danymi literaturowymi, co prowokuje do co najmniej trzech wymienionych niżej wątpliwości:
 - a) Bez odpowiedzi pozostała interesująca kwestia, czy zaproponowana w rozprawie technologia łączenia umożliwiła wykonanie łączników o porównywalnych, czy może wyższych parametrach wytrzymałościowych w stosunku do osiągnięć innych ośrodków badawczych.
 - b) Zaproponowana w pracy technologia umożliwiła wykonanie połączenia w którym, zarówno przy statycznych jak i zmęczeniowych obciążeniach, najłabszym ogniwem okazała się spoina lub strefa wpływu ciepła po stronie blachy aluminiowej. To sugeruje, że parametry wytrzymałościowe rozważanego połączenia nie są niższe w porównaniu z klasycznym połączeniem spawanym płyt ze stopu aluminium, do czego pośrednio nawiązuje także jeden z wniosków pracy (p. 8.1., wniosek 8). Tymczasem, jak podano w punkcie 6.2 w spoinach aluminiowych nie uzyskano pełnego przetopu, co niewątpliwie wpłynęło na obniżenie właściwości wytrzymałościowych tego połączenia. W mojej opinii mogło to zostać spowodowane redukcją parametrów spawania zastosowaną w celu ochrony laminatu Al/Fe przed przegrzaniem, czego by nie było przy spawaniu elementów litych. W tej sytuacji nie jest oczywiste, czy wykonane połączenie gwarantuje taki sam poziom

wytrzymałości, jak adekwatne połączenie blach Al-Al, co można by rozstrzygnąć jedynie przez bezpośrednie porównanie wyników odpowiednich badań.

- c) Jak podano, w badanych połączeniach spawanych uszkodzenie nigdy nie nastąpiło pomiędzy warstwami materiałów zgrzewanego wybuchowo łącznika Al/Fe. Mimo to, łącznik ten należy uznać za najbardziej newralgiczną część tego połączenia - nawet jeśli on nie ulega zniszczeniu, to optymalizacja parametrów spawania musi uwzględniać ryzyko jego przegrzania, co wpływa na wytrzymałość pozostałych stref złącza. Nasuwa się pytanie na ile właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe tego łącznika są powtarzalne, przy tak niekontrolowanym procesie jego produkcji. Wiedza jak korespondują właściwości mechaniczne łącznika badanego w pracy z danymi literaturowymi mogłaby pozwolić ocenić jak bardzo właściwości te są wrażliwe na niepowtarzalność parametrów procesu technologicznego.
- 2) Szczegółowe parametry technologiczne procesu zgrzewania wybuchowego (np. ilość i rodzaj ładunku, prędkość detonacji, odległość między płytami) stanowią know-how wykonawcy i jest oczywiste, że nie mogły zostać w pracy ujawnione. Biorąc jednak pod uwagę newralgiczną rolę tego łącznika w kształtowaniu wytrzymałości całego połączenia, nasuwa się pytanie jak można ocenić że powtórnie wykonany laminat Al/Fe wykazywać będzie właściwości zbliżone do tych jakie określono w pracy, bez powtarzania tych badań. Czy można zaproponować jakąś nieniszczącą miarę jakości wykonania tego łącznika? Czy mogłaby to być miara oparta np. na pominiętej w pracy charakterystyce fal międzypowierzchniowych (amplituda i długość) powstających na granicy łączonych materiałów podczas detonacji, jako synergiczny efekt całego zestawu zastosowanych parametrów technologicznych?

3.1. Uwagi szczegółowe

- 1) Cykliczne krzywe odkształcenia zostały dopasowane dla punktów pomiarowych zarejestrowanych w trakcie wielu cykli zmęczeniowych, co spowodowało że dobrane równania Ramberga-Osgooda uśredniają zmieniające się cyklicznie właściwości. Nie zostało jednoznacznie wyjaśnione, czy wyniki te dotyczą kolejnych cykli obciążenia, czy wybranych z pewnym interwałem. Generalnie jednak przyjmuje się, że cykliczna krzywa odkształcenia opisuje docelowe właściwości materiału, już po jego cyklicznej stabilizacji, o ile taka następuje. Wobec tego może byłoby bardziej słuszne dopasowanie zależności σ_a - ϵ_a do

danych zarejestrowanych tylko w ostatnich cyklach, szczególnie przy dużym tempie cyklicznych zmian właściwości materiału.

- 2) W mojej opinii Dyplomantka błędnie zinterpretowała zalecenia Trilac dotyczące dopuszczalnego promienia gięcia (str. 17-18). Wymóg, że powinien stanowić on co najmniej dziesięciokrotność szerokości połączenia dotyczy tzw. bocznego gięcia, tj. w płaszczyźnie prostopadłej względem przypadku pokazanego na rys. 2.4b).
- 3) Jak już wspomniałem praca została starannie zredagowana pod względem stylistycznym i edytorskim, drobne potknięcia w tym zakresie zdarzają się zawsze i są nieistotne przy ocenie pracy. Uwagę chciałbym zwrócić jedynie na dwa zauważone uchybienia terminologiczne, bo one akurat ściśle dotyczą obszaru naukowej działalności Doktorantki:
 - a) *friction stir welding* (FSW) nazywa się zwykle z języku polskim „zgrzewaniem tarciovym z przemieszaniem materiału” (a nie „z przemieszczeniem narzędzia/materiału” jak na str. 14),
 - b) pojęcie *linear-elastic fracture mechanic* (LEFM) funkcjonuje w literaturze polskiej jako „liniowo-sprężysta mechanika pękania” (nie zaś „liniowa mechanika pękania sprężystego” – str. 26).

4. Wniosek końcowy

Z powyższej charakterystyki ocenianej rozprawy doktorskiej wynika, że podjęty w niej temat, o istotnym znaczeniu poznawczym i praktycznym, został, pomimo pewnych uwag krytycznych, zrealizowany na odpowiednio wysokim poziomie. Rozprawa prezentuje oryginalne osiągnięcie Doktorantki, jakim jest przeprowadzona na podstawie szerokiego zakresu badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych ocena właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych połączeń Al/Fe spawanych z zastosowaniem cienkościennych łączników spawanych wybuchowo. Zrealizowane badania i analizy pozwoliły na uzyskanie interesujących, opisanych wyżej wyników i zależności. Część z nich już wcześniej opublikowano w „wysokopunktowanych” periodykach, co oznacza, że wartość naukowa tych wyników została także doceniona przez niezależne eksperckie grono recenzentów redakcyjnych.

Ostatecznie więc wyrażam opinię, że będąca przedmiotem niniejszej recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Dominiki Płaczek spełnia wymogi określone ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i w związku z tym wnioskuję o jej dopuszczenia do publicznej obrony.

Dodatkowo biorąc pod uwagę imponujący zakres, a także różnorodność zrealizowanych eksperymentów, oraz wykazaną przez Doktorantkę biegłość w posługiwaniu się szerokim wachlarzem narzędzi badawczych, skłonny jestem wystąpić z wnioskiem o wyróżnienie niniejszej rozprawy, jeśli tylko przebieg obrony, a w szczególności odpowiedzi na wyrażone w recenzjach uwagi, będą dobrze korespondować z wysoką wartością samej dysertacji.

dr hab. inż. Tomasz Machniewicz, prof. AGH