



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
I OKRĘTOWNICTWA



Gdańsk, 10 marca 2025

Dot. 2/NCS.520.5.2025

Pan
dr hab.inż. Łukasz Muślewski
Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Bydgoskiej



Szanowny Panie

W załączeniu przesyłam recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominiki Płaczek pt. „Analiza połączeń spawanych różnoimiennych materiałów z zastosowaniem cienkościennych łączników zgrzewanych wybuchowo Al/Fe”, wraz z dokumentami formalno-księgowymi.

Z poważaniem

Jan Kord

Prof. dr hab. inż. Janusz Kozak
Instytut Okrętowy
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12 Gdańsk

Gdańsk, 10 marca 2025

RECENZJA rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominiki Placzek pt.

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

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński, Politechnika Bydgoska

Promotor Pomocniczy: dr inż. Paweł Maćkowiak, Politechnika Bydgoska

1. Podstawa formalna

Podstawą formalną wykonania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich nr 5/01/2024/2025 z dnia 28 stycznia 2025r. o wyznaczeniu mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr inż. Dominiki Placzek (Zawiadomienie o sygnaturze nr 2/NCS.520.5.2024) i następujące po tej uchwale zlecenie jej wykonania. Ocena rozprawy doktorskiej nastąpiła zgodnie z przepisami Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz kryteriami oceny prac doktorskich i w oparciu o fundamentalne zasady oceny osiągnięcia naukowego, takie jak aktualność tematyki badawczej, oryginalność podejścia badawczego i metodyki oraz znaczenie osiągnięcia dla rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna.

2. Tematyka rozprawy, ocena ważności i aktualności tematu

Podjęta w prezentowanej rozprawie tematyka badawcza ma duże znaczenia dla optymalizacji konstrukcji metalowych poprzez wykorzystanie materiałów o najdogodniejszych właściwościach ciężarowo-wytrzymałościowych na poziomie lokalnym.

Perspektywa budowy obiektów inżynierskich z wykorzystaniem różnych materiałów metalowych – na przykład statku o stalowym kadłubie i aluminiowej nadbudowie - zwraca uwagę na problem łączenia metali różnoimiennych. Nitowanie i połączenia śrubowe przez wiele lat stanowiły jedyne rozwiązanie dla problemu konstrukcji mieszanych. Jednak ze względu na zbyt dużą liczbę czynności towarzyszących tym procesom, a także w obliczu niezadowalającej odporności korozyjnej połączenia, zastosowanie obecnie znajdują tzw. łączniki przejściowe stal-aluminium wytworzone w drodze zgrzewania wybuchowego, czyniąc aplikowanie aluminiowych konstrukcji łatwym i praktycznie bezproblemowym. Dodatkowo w odróżnieniu do połączeń mechanicznych, nie zauważa się tendencji do korozji szczelinowej czy naprężeniowej, a korozji elektrochemicznej wywołanej dużą różnicą potencjałów łączonych metali przeciwdziała – jak zapewniają producenci łączników, stosowana na całym kadłubie powłoka malarska. W przypadku uszkodzenia warstwy ochronnej, uszczelniający efekt produktów korozji aluminium zapobiega rozprzestrzenianiu się zniszczenia.

Celem pracy było opracowanie i weryfikacja technologii spawania wraz z analizą jego wpływu na właściwości cienkościennego łącznika zgrzewanego wybuchowo w strefie przejściowej oraz analiza statyczna i zmęczeniowa właściwości połączenia spawanego z jego zastosowaniem. Badaniom poddano połączenie krzyżowe stopu aluminium AA5083 H321 oraz stali 355J2+N. Łącznik zgrzewany wybuchowo stanowi laminat z wyżej wymienionych materiałów rozdzielony warstwą pośredniczącą w

postaci stopu aluminium AA1050 H24. Dla weryfikacji własności takiego połączenia wykonano obszerny program badawczy w ramach którego:

1. Opracowano i zweryfikowano technologię spawania a dalej przeprowadzono analizę jego wpływu na właściwości cienkościennego łącznika zgrzewanego wybuchowo w strefie przejściowej.
2. Wykonano analizę statycznych i zmęczeniowych właściwości wytrzymałościowych opracowanych połączeń spawanych z użyciem cienkościennego łącznika zgrzewanego wybuchowo,
3. Zamodelowano odkształcenia i pole temperatur w opracowanym połączeniu spawanym z zastosowaniem lokalnych właściwości materiałowych.

Metody badawcze zrealizowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej są nowoczesne - widoczny jest wysoki poziom umiejętności stosowania tych metod przez doktorantkę. Zastosowanie numerycznej analizy procesu spawania w zakresie w jakim robi to autorka stoi na wysokim poziomie i wymaga dużej wiedzy, zarówno od strony użycia metodyki, modelu wędrującego źródła ciepła, jak i implementacji modeli materiałowych. Poprawne modelowanie przebiegu procesu spawania jest osiągnięciem wymagającym znacznie większych umiejętności niż w powszechnej praktyce inżynierskiej. Autorka w sposób poprawny dokumentuje otrzymane wyniki i posiada umiejętności nowoczesnych metod do opisu i prezentacji uzyskanych rezultatów.

Podsumowując należy stwierdzić że zarówno podjęta tematyka jest bardzo aktualna jak i metody, którymi posługuje się autorka są nowoczesne.

3. Przegląd treści pracy

Badania w opisanym zakresie dysertacji doktorskiej otwierają nowe możliwości pozyskiwania danych niezbędnych do prawidłowej analizy własności łączników zgrzewanych wybuchowo i ich łączenia w węzły konstrukcyjne. Badania te zostały zaprezentowane w 9 rozdziałach, obejmujących wprowadzenie i wnioski. Praca dodatkowo zawiera bibliografię, oraz dwa streszczenia: w języku polskim i angielskim.

Wprowadzenie przedstawia opis pracy, przegląd stanu wiedzy obejmujący istotne publikacje w danym obszarze wiedzy, zawiera również motywację, która we właściwy sposób ukazuje aktualność problematyki, cele pracy i tezę oraz niedoskonałości istniejących rozwiązań. Ta część pracy przygotowana jest właściwie dla niezbędnych elementów pracy naukowej i pozwala czytelnikowi na zaznajomienie się z tematem i założeniami pracy. Pozwala również na jasne wyodrębnienie osiągnięcia naukowego autorki na tle zaprezentowanego dorobku innych publikacji.

W kolejnym rozdziale 2. „Analiza stanu problemu” przedstawiono między innymi problemy towarzyszące spajaniu materiałów różniamiennych, pokazano zastosowanie zgrzewanych wybuchowo łączników w połączeniach spawanych Al/Fe, omówiono proces spawania połączeń Al/Fe z użyciem łączników zgrzewanych wybuchowo, przedyskutowano właściwości mechaniczne łączników zgrzewanych wybuchowo Al/Fe i połączeń spawanych a również dokonano streszczenia podejść do modelowania połączeń spawanych poddanym obciążeniom zmęczeniowym.

W następnym rozdziale 3. nakreślono „Program badań własnych”, a w kolejnym 4. „Obiekty badań” przedstawiono opis materiałów bazowych wytypowanych jako tworzywo łącznika przewidywanego do badań a w tym stop aluminium AA5083 H321 jako tworzywo zewnętrznej warstwy laminatu, stop aluminium AA1050 H24 jako materiał wewnętrznej warstwy przekładkowej oraz stal S355J2+N jako tworzywo drugiej, zewnętrznej warstwy laminatu, a na tym tle pokazano próbki do badań materiałów bazowych. W dalszej części rozdziału przedstawiono specyfikę cienkościennego materiału warstwowego wytworzonego z wymienionych wcześniej materiałów - zgrzewanego wybuchowo, omówiono technologię zgrzewania wybuchowego oraz pokazano geometrię i sposób wytworzenia próbek do badań. W końcowej części rozdziału 4. zawarto opis złącza stal-aluminium w postaci połączenia krzyżowego. Omówiono charakterystykę złącza Al/Fe, przedyskutowano technologię spawania złączy i pokazano geometrię i sposób wykonania próbek do badań złączy.

Rozdział 5. zawiera opis zastosowanych metod i stanowisk badawczych. Omówiono sposób wyznaczania temperatury podczas spawania, metody opisywania makro- i mikrostruktury, sposób

pomiaru mikrotwardości, a dalej metody wyznaczania właściwości statycznych i zmęczeniowych zarówno na poziomie globalnym jak i lokalnie, oraz sposób wyznaczania pola odkształceń w złączu. Następnie omówiono budowę stanowiska i sposób analizy przelomów po zniszczeniu. Kolejna część rozdziału 5. zawiera informacje na temat sposobów i metod prowadzenia analizy numerycznej a w tym: określanie pola temperatur podczas spawania, rozkładów naprężeń i odkształceń połączenia spawanego Al/Fe w badaniach statycznych i zmęczeniowych, a także sposobów modelowania wykresów trwałości zmęczeniowej na podstawie różnych podejść.

W rozdziale 6. przedstawiono wyniki uzyskane w trakcie badań i ich analizę. Pokazano między innymi rozkłady temperatury w połączeniu spawanym uzyskane w drodze numerycznej jak i eksperymentalnej, wyniki mikrotwardości a dalej rezultaty z badań statycznych – zarówno dla materiałów bazowych, łącznika jak i węzła krzyżowego. Podobnie przedstawiono wyznaczone właściwości zmęczeniowe – także dla materiałów bazowych, łącznika jak i węzła krzyżowego. Następnie przedstawiono i omówiono wyniki badań struktury przelomów a następnie rozkłady naprężeń i odkształceń w złączu wyznaczone zarówno w drodze obliczeń MES jak i metodą cyfrowej korelacji obrazu (DIC). W końcowej części rozdziału 6. zestawiono wykresy trwałości zmęczeniowej wyznaczone na podstawie efektywnego naprężenia karbu i krzywych projektowych FAT i równolegle - wykresy trwałości zmęczeniowej wyznaczone na podstawie naprężeń strukturalnych obliczonych metodą hot spot i krzywych projektowych FAT.

W rozdziale 7. „Analiza wyników badań” przedstawiono i przedyskutowano wybrane własności złącza w oparciu o pozyskane wyniki. Przeprowadzono między innymi analizę: wpływu energii spawania na właściwości łącznika w strefie połączenia, wyników badań z prób statycznych, porównawcze analizy wyników badań zmęczeniowych materiału spoiny oraz materiału bazowego AA5083, materiału bazowego AA5083 z połączeniem spawanym Al/Fe, badań zmęczeniowych spoin materiału bazowego AA5083 i połączenia spawanego Al/Fe. Omówiono zastosowanie lokalnych właściwości materiałowych w modelowaniu odkształceń w opracowanym połączeniu spawanym zarówno w warunkach obciążeń statycznych jak i zmęczeniowych. Dokonano analizy porównawczej wyznaczonej obliczeniowej i eksperymentalnej trwałości zmęczeniowej złączy spawanych.

W rozdziale 8. przedstawiono wnioski – zarówno wynikające z przeprowadzonych badań jak i mogące stanowić punkt wyjścia do dalszych badań.

4. Charakterystyka i ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa reprezentuje solidny poziom naukowy. Przedstawiona kompozycja pracy jest właściwa, poszczególne rozdziały tworzą logiczną i wspólną całość, ciąg prezentowania treści wiąże ze sobą logicznie poszczególne elementy. Rozprawa napisana jest jasnym, poprawnym językiem, terminologia specjalistyczna używana jest prawidłowo. W pracy jest pewna liczba błędów stylistycznych, edycyjnych i terminologicznych jednak ich liczba jest niewielka, przedstawiłem je poniżej w części dotyczącej uwag krytycznych. Cytowana i omawiana bibliografia jest wyczerpująca i aktualna i co najważniejsze na tle omawianej bibliografii łatwo wyodrębnić osiągnięcie naukowe autorki. Sposób prezentacji wyników jest bez zarzutu, dobór rysunków i wykresów uważam za właściwy.

Tematyka badawcza ma istotne znaczenia dla rozwoju wiedzy teoretycznej dotyczącej własności statycznych i zmęczeniowych łączników Al/Fe wytwarzanych wybuchowo, daje przykłady procedur wyznaczania takich własności dla nowych, projektowanych dopiero, geometrii połączeń i co więcej stwarza możliwości dalszych badań i rozwoju, zmierzających do poszukiwań nowych kombinacji materiałowych dla poprawiania parametrów wytrzymałościowych czy masowych, albo dla projektowania dedykowanych rozwiązań np. dla wagonów pasażerskich.

Metodyka badawcza została wybrana prawidłowo, prawidłowo udokumentowana, nosi cechy uniwersalności i daje możliwości dalszego rozwoju. Z tego też powodu opracowane podejście może posłużyć do analizy nowych wariantów rozwiązań w kierunku dalszej minimalizacji wymiarów łącznika zgrzewanego wybuchowo, zmiany geometrii spoin a również zastosowania do wykonywania połączeń stali i stopów aluminium innych technik spawania, w tym przede wszystkim spawania laserowego, co powinno zredukować rozmiar stref wpływu ciepła w łączonych materiałach.

5. Uwagi krytyczne i błędy edytorskie

1. W mojej ocenie, zaprezentowana w pracy teza: „Istnieje możliwość zastosowania cienkościennych łączników zgrzewanych wybuchowo do łączenia stali ze stopami aluminium w strukturach poddanych obciążeniom statycznym i zmiennym. Uzyskane w ten sposób połączenia spełniają podstawowe kryteria wytrzymałościowe stawiane połączeniom spawanym” jest niezbyt potrzebna zwłaszcza w świetle przedstawionego przez Autorkę obszaru już stosowanych rozwiązań na skalę przemysłową. Owszem, poszukiwania Autorki zmierzają w kierunku „odchudzenia” masy łącznika, jednakże zasadnicze osiągnięcie naukowe przedstawione w pracy dotyczy opracowania postępowania związanego z wyznaczaniem parametrów opisujących własności połączenia zarówno na drodze numerycznej jak i badań doświadczalnych. Jest to istotny walor pracy ponieważ prowadzi do wniosków aplikacyjnych. Dla tego rodzaju dokonań naukowych w aplikacyjnych obszarach badań, nie jest wymagane formułowanie ani tezy ani hipotezy badawczej. Możliwe jest sformułowanie hipotezy metodycznej, jednakże nie stanowi to warunku koniecznego dla uznania osiągnięcia za naukowe. Kluczowymi elementami są: wykazanie istotności badanego problemu, identyfikacja niedoskonałości istniejących metod jego rozwiązania lub braków wiedzy mogących przeszkadzać w rozwiązaniu problemu, określenie celu pracy, metod badawczych oraz rzetelna weryfikacja stopnia osiągnięcia tego celu przy wykorzystaniu adekwatnych technik badawczych lub ocena stopnia poszerzenia wiedzy. Wszystkie te komponenty zostały uwzględnione w pracy, natomiast wprowadzenie tezy w formie w jakiej znajduje się ona w pracy, niepotrzebnie obciąża pracę. Teza jest fundamentalnym stwierdzeniem opartym na istniejącej wiedzy, wymaga rygorystycznej argumentacji, uwzględniającej wszelkie założenia upraszczające.
2. W opisie procesu spawania węzła Autorka kilkakrotnie podkreśla (na podstawie analizy pola temperatur w strefie przejściowej złącza) konieczność spawania strony aluminiowej w pierwszej kolejności z racji odprowadzania ciepła ze strefy przejściowej łącznika. Tym niemniej iż różnica temperatur w obu technologiach wynosi około 50°C i tak jest ona wyższa niż zalecenia niektórych producentów łączników do zastosowań okrętowych. Jest to podane arbitralnie tymczasem praktyka stoczniowa wskazuje często na stosowanie odwrotnej kolejności układania spoin (najpierw strona stalowa). Daje się to również uzasadnić innymi czynnikami niż temperatura w złączu. Wobec aplikacyjnych walorów opracowania należałoby przynajmniej zasygnalizować tę wątpliwość.
W dyskusji poproszę o odniesienie się do tej uwagi.
3. Z uwagi na duże gradienty rozkładów naprężeń i osiąganie poziomów uplastycznienia w strefach koncentracji w analizowanych połączeniach, zbyt mało dyskusji poświęcono zastosowaniu lokalnego podejścia w analizie trwałości zmęczeniowej połączeń. Autorka zaznacza ten problem we wnioskach do dalszych badań, jednakże w pracy to podejście zostało potraktowane zbyt wąsko.
4. Błędy edytorskie, interpunkcyjne, ortograficzne i stylistyczne:

Str.10: użyto skrótu ŁZW w tym momencie niezdefiniowanego w tekście (jest w wykazie skrótów),

Str.15: ...proces spawania sklasyfikowano w normach i Amerykańskie Towarzystwo Spawalnicze. - styl zdania,

Str.27: ...opracowana przez Hobbochera... - Hobbachera,

Str.28: Rys.2.12 opis osi Y jest narężenia.... – naprężenia,

Str.29 i dalej : istnieją polskie określenia dla pojęć „root” oraz „toe”, tak czy inaczej należałoby je zdefiniować,

Str.43: ... przeszły badania ultradźwiękowa... - metodą ultradźwiękową?,

Str.71: ... Wartości odczytywane są zarówno dla maksymalnego obciążenia w cyklu dla pierwszego poziomu obciążenia. – zarówno to jaka druga opcja?

Str.87: ... W tabeli zamieszczono również wartość odchylenie standardowe dla każdej wyznaczonej.... – odchylenia standardowego,

Str.129: ... I 374 stopni $^{\circ}\text{C}$ – czy jest potrzebne dublowanie określenia stopień?

Str.131: ...Temperatura maksymalna jest niższa, ale również ulega szybszemu chłodzeniu... temperatury nie można chłodzić,

6. Uwaga końcowa

Pomimo przedstawionych uwag krytycznych pracę należy wysoko. Tematyka pracy jest aktualna i istotna. Metoda badawcza jest nowoczesna, daje dalsze możliwości rozwoju i jest stosowana w sposób wymagających dużych umiejętności. Wyniki zarówno badań laboratoryjnych jak i symulacji numerycznych są zaprezentowane w sposób rzeczowy, czytelny i odnoszący się do zdefiniowanych celów.

Autorka prezentuje dobre rozeznanie w obszarze inżynierii mechanicznej i dobre umiejętności w zakresie posługiwania się wybranymi narzędziami badawczymi, a praca jako całość stanowi wkład w rozwój metod badawczych dotyczących kreowania i oceny właściwości nowych materiałów konstrukcyjnych.

Recenzowana praca spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym, zatem wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie z uwagi na istotny wkład w rozwój metod badawczych dotyczących wypracowywania i oceny właściwości nowych materiałów konstrukcyjnych na poziomie utylitarnym, wnoszę o wyróżnienie pracy.

