

Gdańsk, 3.11.2025

Prof. dr hab. inż. Jerzy Łabanowski
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
jerzy.labanowski@pg.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sławomira Topora
pt. "Opracowanie technologii wytwarzania i spawania rur stalowych
z trudnościeralnymi wykładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie
hydraulicznym lub pneumatycznym mediów powodujących ścieranie
oraz występowanie korozji"
zrealizowanej pod kierunkiem
promotora dr hab. inż. Santiny Topolskiej, prof. PŚ
opiekuna z przemysłu mgr inż. Witolda Rusina

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej Pana prof. dr hab. inż. Adama Grajcara, z dnia 23.09.2025 r. nr RDIMa.512.34.2025. Podstawę prawną wykonania recenzji stanowi ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20.07.2018 r. (j.t. Dz. U. z 2024r. poz. 1571) Art. 187.

1. Zakres i aktualność tematu rozprawy

Mgr inż. Sławomir Topór realizował dysertację w ramach programu Doktorat wdrożeniowy, a w związku z tym w recenzji poza rozwiązaniem problemu naukowego oceniany jest również aspekt praktyczny zastosowania proponowanych rozwiązań w przemyśle.

Przedmiotem badań i analiz w recenzowanej pracy doktorskiej są technologie łączenia elementów nowoczesnych rurociągów do transportu hydraulicznego bądź pneumatycznego substancji powodujących silne zużycie ściernie lub korozyjne. Łączonymi elementami są rury stalowe z trwale osadzonymi na powierzchni wewnętrznej kompozytowymi wykładkami, które zapewniają odporność na korozję i ścieranie, przy zachowaniu obojętności chemicznej względem transportowanego medium. Obszar połączenia rur musi zapewnić ciągłość i dobrą przyczepność do podłoża materiału wykładek. Obecnie połączenia rur w takich rurociągach

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 05.11.2025
RDIMa/222/51/2025
nr zał.

wykonywane są jako rozłączne za pomocą śrubowych złączy kołnierzowych lub obejm zaciskowych. Takie rozwiązania zapewniają poprawne działanie instalacji jednak są drogie i trudne do napraw zwłaszcza w przypadku złożonego przebiegu rurociągu. Z tych powodów Doktorant zaproponował metodę montażu rur zawierających wykładki za pomocą połączeń nierozłącznych spawanych. Ta prosta w założeniu metoda jest jednak trudna do realizacji ze względu na małą stabilność termiczną polimerowych wyładek i ich skłonność do odspajania od podłoża i degradacji materiałowej w podwyższonych temperaturach. Podjęty problem naukowy i technologiczny dotyczy opracowania sposobu spawania specyficznych elementów konstrukcyjnych, w których należy użyć dużej energii do wytworzenia złącza spawanego z jednoczesnym jej ograniczeniem w obszarze styku materiału rury z wykładką. Ze względu na wskazane trudności, doczołowe spawanie rur zawierających polimerowe wykładki nie jest obecnie stosowane i z tego powodu podjęte przez Doktoranta analizy i badania mają aspekt innowacyjności.

Doktorant jasno sprecyzował zamierzenia użyteczne pracy doktorskiej wynikające ze współpracy z zakładem przemysłowym realizującym konstrukcje rurociągów przesyłowych oraz aspekt naukowy ukierunkowany na analizę wpływu zastosowanej technologii spawania na właściwości złączy doczołowych rur zawierających wykładki kompozytowe.

Rozważane w pracy zagadnienia dotyczą wpływu procesów technologicznych spawania na kształtowanie mikrostruktury oraz właściwości złączy i z tego powodu osiągnięcia naukowe wykazane w tej pracy przyczyniają się do rozwoju dyscypliny inżynieria materiałowa.

2. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Odnosząc się do tytułu opiniowanej rozprawy „Opracowanie technologii wytwarzania i spawania rur stalowych z trudnościeralnymi wykładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie hydraulicznym lub pneumatycznym mediów powodujących ścieranie oraz występowanie korozji” uważam, że nie w pełni odzwierciedla zawartość merytoryczną pracy, ponieważ Doktorant nie zajmuje się technologią wytwarzania rur, lecz tylko technologią ich spawania. W mojej opinii odpowiednim tytułem pracy jest „Opracowanie technologii spawania rur stalowych z trudnościeralnymi wykładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie hydraulicznym lub pneumatycznym”.

Rozprawa o objętości 169 stron, zawiera 169 rysunków, 29 tabel i składa się z trzech zasadniczych części. Obejmują one: analizę stanu zagadnienia, opis badań własnych wraz z analizą wyników i wnioskami oraz wykaz literatury.

Wykaz literatury zawiera 66 pozycji artykułów naukowych i podręczników, ponadto Autor odwołuje się do 33 norm europejskich i światowych. Większość przywołanych artykułów z czasopism jest aktualna, wydana w ostatnich 15 latach. W wykazie zostały przytoczone 2 artykuły z czasopism recenzowanych oraz 10 referatów zamieszczonych w materiałach z krajowych konferencji naukowych, w których Doktorant jest współautorem. Świadczy to, że mgr inż. Sławomir Topór zdobył już doświadczenie w zakresie tematyki objętej rozprawą doktorską.

Część studialna pracy jest integralnie związana z jej tematem i została oparta na przeglądzie pozycji literaturowych dotyczących charakterystyki materiałów trudnościeralnych stosowanych w konstrukcjach do transportu hydraulicznego lub pneumatycznego, rur stalowych z wykładkami kompozytowymi oraz sposobów łączenia takich rur w rurociągach przesyłowych. Analiza dotychczas stosowanych technik łączenia rur wskazuje na zastosowania połączeń rozłącznych kołnierzowych lub wykorzystujących obejmy zaciskowe oraz połączenia spawane z użyciem pierścieniowych elementów pośrednich. W podsumowaniu tej części pracy Doktorant zwraca uwagę na możliwość zastosowania rozwiązania polegającego na doczołowym spawaniu rur zawierających wykładki kompozytowe zapewniającego otrzymanie wymaganych właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych rurociągu oraz zmniejszenie kosztów wytwarzania, jednak istoty tych zamierzeń nie przedstawia w tezie pracy:

- *„Opracowanie odpowiedniego sposobu wytwarzania oraz spawania montażowego rur ze stali węglowej, wyposażonych w wewnętrzne powłoki z trudnościeralnych, odpornych na korozję wykładek kompozytowych, może stanowić innowacyjne rozwiązanie pozwalające na redukcję kosztów produkcji i montażu systemów rurociągowych. Proponowana technologia może zostać skutecznie wdrożona jako zamiennik dotychczasowych rozwiązań, zarówno w instalacjach wyeksploatowanych, szybkozużywających się, jak i w nowych systemach rurociągowych”.*

Postawiona teza jest bardzo ogólna i nie wskazuje wybranego przez Doktoranta kierunku działań ani sposobu spawania rur. Więcej informacji przynoszą wskazane cele pracy:

- *opracowanie sposobu wytwarzania rur oraz ocena przydatności różnych procesów spawania do łączenia rur z wykładkami w miejscu ich docelowego montażu,*
- *analiza wpływu parametrów oraz warunków prowadzenia procesu spawania rur z wykładkami kompozytowymi na możliwość uzyskania trwałego i szczelnego połączenia, spełniającego wymagania eksploatacyjne i technologiczne.*

Dla realizacji założonych celów Doktorant przyjął program przedstawiony na rys. 26 w pracy doktorskiej zakładający przeprowadzenie badań wstępnych oraz badań zasadniczych.

Badania wstępne ukierunkowane były na ustalenie sposobu przygotowania krawędzi rur przed wykonaniem doczołowych złączy spawanych oraz dobór metody spawania. Działania te miały na celu otrzymanie złącza spawanego spełniającego poziom jakości B wg PN-EN ISO 5817 przy jednoczesnym zachowaniu stabilności materiałowej wykledek kompozytowych i ich integralności z materiałem rur w obszarze grani spoin obwodowych. Podstawowym problemem było ograniczenie ilości dostarczonej energii podczas spawania, co w sposób decydujący wpływa na temperaturę nagrzania ściany wewnętrznej rury.

Doktorant podzielił pracę na kilka etapów, w których oceniał wyniki badań dla wybranych technologii spawania, odrzucając te, które nie spełniały założonych efektów. Wykonanie wszystkich złączy próbnych poprzedzone było sporządzeniem kart technologicznych spawania (pWPS). Cykle cieplne spawania mierzone były za pomocą termopar typu K (NiCr-Ni) przygrzanych bezpośrednio do ściany wewnętrznej rury. Ocena jakości wykonanych złączy oparta została o badania nieniszczące wizualne (VT), magnetyczno-proszkowe (MT) i/lub penetracyjne (PT), a w niektórych przypadkach także ultradźwiękowe (UT) i radiograficzne (RT), oraz w oparciu o standardowe badania niszczące; metalograficzne makroskopowe i mikroskopowe, pomiary twardości oraz statyczne próby rozciągania złączy spawanych.

Przyjęte przez Doktoranta metody badań uznaję, jako właściwie ze względu na aspekt użytkowy pracy i wystarczające dla osiągnięcia zamierzonych celów naukowych pracy.

W zakresie badań wstępnych Doktorant przedstawił propozycje 15 rozwiązań przygotowania krawędzi rur do spawania, z których wybrał dwa do dalszych badań, zakładające spawanie doczołowych złączy z pełnym przetopem z użyciem podkładki stalowej o grubości 2,0 mm od strony grani oraz bez tej podkładki. Złącza próbne wykonał na rurach ze stali S355 bez wykledek kompozytowych stosując metodę spawania elektrodami otulonymi (MMA). Celem badań było określenie maksymalnej temperatury ściany

wewnętrznej rury w obszarze złącza, czasu przebywania tego obszaru w temperaturze powyżej 110°C, tj. maksymalnej temperatury eksploatacji wykładek kompozytowych, oraz ocenie jakości uzyskanych złączy. Rezultatem tego etapu było wskazanie złączy doczołowych bez zastosowania podkładki do dalszych badań. Moje zastrzeżenia do tej części pracy budzi zastosowanie do spawania obwodowych złączy próbnych, rur o różnej grubości ścian 14,0 i 8,0 mm. Porównanie rejestrowanych cykli cieplnych spawania w takich złączach jest trudne i może prowadzić do błędnych wniosków.

W kolejnym etapie badań wstępnych (rozdział 12) Doktorant porównuje efekty spawania złączy doczołowych rur bez wykładek o grubości ścianki 7,1 mm łączonych za pomocą metod 141 (TIG), 135 (MAG) i 111 (MMA) charakteryzujących się zróżnicowaną ilością wprowadzanego ciepła podczas spawania. Uzyskuje złącza o zadawalającej jakości, jednak ze względu na zbyt wysokie wartości temperatur nagrzania obszaru grani złączy, odrzuca z dalszych badań metody MMA i MAG.

Kolejny etap badań polega na porównaniu efektów spawania złączy wykonanych za pomocą metody TIG oraz spawania laserowego ręcznego LBW bez użycia materiału dodatkowego oraz z materiałem dodatkowym. W tych badaniach Doktorant wykonuje próbne złącza z pełnym przetopem stosując blachy o grubości 3,0 mm. Użycie do badań blach, a nie rur, uzasadnia trudnościami z precyzyjnym przygotowaniem krawędzi rur do spawania LBW bez użycia materiału dodatkowego. Jest to słuszna obawa i w mojej ocenie ta metoda spawania rur powinna zostać odrzucona przed przystąpieniem do badań. Wyniki tego etapu badań pozwoliły na wskazanie metody LBW z użyciem materiału dodatkowego, jako najbardziej korzystnej do spawania rur z wykładkami. Problemem jednak okazała się duża liczba niezgodności spawalniczych w złączu w postaci pęcherzy gazowych. Z tego powodu Doktorant podjął dodatkowe badania wpływu osłony gazowej przy spawaniu LBW na jakość uzyskanych złączy. Rozważał zastosowanie osłony z argonu, azotu i mieszanki Ar+18% CO₂. Wynikiem badań było wskazanie azotu, jako optymalnego gazu osłonowego.

Ta część badań, moim zdaniem, wymaga dalszej weryfikacji ze względu na niekorzystne oddziaływanie azotu na materiał spawany stali niskowęglowej. Duża rozpuszczalność azotu w ciekłym metalu oraz w austenicie jest przyczyną następujących procesów starzeniowych w mikrostrukturze powodujących wzrost twardości i kruchości stali. Z tego powodu osłony gazowe z azotu nie są stosowane w spawaniu łukowym.

Badania zasadnicze opisane w rozdziałach 13 i 14 prowadzone były na blachach i rurach z wykładkami kompozytowymi. Analiza wyników badań wstępnych wykazała brak

możliwości uzyskania ciągłości połączenia rura-wykładka w obszarze złączy spawanych z pełnym przetopem, niezależnie od zastosowanej metody spawania. Z tego powodu Doktorant kontynuował badania z użyciem metody LBW na złączach bez pełnego przetopu pozostawiając nieprzetopiony próg o wysokości ok. 3 mm. Wykonanie doczołowych złączy płaskich na blachach o grubości 4,0 mm miało na celu pozyskanie próbek do weryfikacji przyczepności wykładek w próbie odrywania. Próby te dały wynik pozytywny potwierdzając zbliżoną przyczepność wykładek do podłoża w obszarach złącza spawanego i obszarach materiału rodzimego.

Bazując na wynikach przeprowadzonych badań Doktorant opracował technologię spawania LBW rur z wykładkami i wykonał złącza próbne na rurach ze stali P355 o średnicy 219 mm i grubości ścianki 6,3 mm. Badania przekrojów złączy wykazały tylko niewielki obszar odspojenia wykładki pod granią złącza spawanego. Statyczne próby rozciągania złączy z niepełnym przetopem wykazały wyższą wartość wytrzymałości na rozciąganie (R_m) spoiny w stosunku do materiału rodzimego rury.

Na podstawie przeprowadzonych prób spawania przeprowadzono symulacje w programie ESI VisualWeld 2023.5 obrazujące rozkład temperatur w obszarze złącza spawanego na granicy z wykładką kompozytową. Osiągnięciem Doktoranta jest przedstawienie modelu pozwalającego na łatwą predykcję obciążenia cieplnego wykładek rur w zależności od przyjętych parametrów spawania.

Weryfikację opracowanej technologii spawania rur z wykładkami kompozytowymi przeprowadzono na rurach ze stali P265GH o średnicy 1016 mm i grubości ścianki 12,5 mm. Odcinki próbne rury zostały zespawane metodą LBW, a następnie poddane próbie ciśnieniowej. Pozytywne wyniki tych prób pozwoliły na wstawienie odcinka próbnego do rurociągu przesyłowego, gdzie obecnie pracuje bezawaryjnie.

W podsumowaniu Autor podkreśla konkurencyjność opracowanej technologii spawania rur z wykładkami kompozytowymi w stosunku do dotychczas stosowanych metod ich łączenia, wskazując na znaczne oszczędności czasu i kosztów wytwarzania. Wnioski sformułowane na podstawie otrzymanych wyników badań i ich dyskusji są przedstawione w sposób jasny i wskazują, że założone cele pracy zostały osiągnięte.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

W pracy można wyróżnić osiągnięcia naukowe i wdrożeniowe, do których zaliczam:

- Opracowanie efektywnej ekonomicznie technologii spawania rurociągów do transportu hydraulicznego lub pneumatycznego zapewniającą stabilność i przyczepność do podłoża wewnętrznych wykładek kompozytowych.
- Wskazanie przydatności nowoczesnej metody spawania ręcznego LBW do wykonywania odpowiedzialnych złączy spawanych wymagających niskiego poziomu wkładu ciepła.
- Wykazanie zmian mikrostruktury i właściwości mechanicznych złączy spawanych rur w zależności od zastosowanej metody spawania.
- Opracowanie modelu numerycznego pozwalającego na przewidywanie obciążenia cieplnego wykładek kompozytowych rur w zależności od przyjętych parametrów spawania.

Oceniając pozytywnie rozprawę doktorską kieruję do Doktoranta pytania i uwagi do dyskusji.

- Autor analizuje technologie spawania doczołowego rur z wykładkami za pomocą tradycyjnych metod łukowych MMA, MAG i TIG. Dlaczego w badaniach pominięta została metoda CMT (Cold Metal Transfer) opracowana w 2002 roku, jako odmiana procesów MIG/MAG z impulsowym podawaniem drutu, która pozwala obniżyć o 1/3 ilość ciepła wprowadzanego do spoiny?
- Czy doktorant rozważał zagrożenia dla całej konstrukcji rurociągu wynikające z zastosowania niepełnego przetopu w obwodowych złączach spawanych rur? Te zagrożenia mogą ujawniać się w postaci ograniczenia ciągliwości złączy i pęknięć w grani spoin, tendencji do pęknięcia zmęczeniowego podczas eksploatacji oraz korozji w wąskiej szczelinie nieprzetopionego progu złączy.
- We wniosku nr 5 (str. 148) Doktorant stwierdza, że opracowana technologia spawania pozwoliła na redukcję masy rur. Ten wniosek wydaje się być błędnym ze względu na pozostawienie nieprzetopionego progu w obwodowych złączach spawanych, co wymusza zwiększenie grubości ścianki rury.
- Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia z wniosku nr 2 na str. 147. „*Stwierdzono, że mikrostruktura spoin wykazuje zgodność ze strukturą materiału rodzimego, co świadczy o stabilności procesu i poprawności zastosowanych parametrów*”. Na czym polega zgodność tych mikrostruktur? Czy Autor bierze pod uwagę również mikrostrukturę w obszarze SWC?

- Str. 17 2w. dół – „*Nowoczesne technologie powlekania, w tym te najbardziej zaawansowane, umożliwiają uzyskiwanie niemal pełnego zakresu właściwości fizyko-mechanicznych i krystalicznych...*” Jakie właściwości krystaliczne ma Autor na myśli?
- Str. 26, Tabl. 1 – jest „*Rzeczywistość powierzchniowa*” powinno być *Rezystywność powierzchniowa*.
- Str. 97, 7w. od dół – w jednym z wniosków podsumowania etapu badań Autor stwierdza, że „*Niższe energie liniowe oraz mniejsze objętości spoin przy spawaniu metodą LBW skutkowały zmniejszeniem odkształceń spawalniczych względem metody TIG*”. Ten wniosek nie jest uprawniony, ponieważ w pracy nie badano odkształceń badanych złączy.
- Tabele 11, 12, 13 – W tabelach wskazano czas chłodzenia $t_{8/5}$ w miejscu zamocowania termopar. W jakim celu, skoro w tekście pracy Autor nie komentuje tych wyników?
- W tabelach oraz w tekście pracy Autor używa zamiennie określeń *energia liniowa* oraz *ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]*. Proszę to wyjaśnić.
- Str. 112 Autor opisuje badania przyczepności wykładek do podłoża stalowego w próbie odrywania. Na jakiej podstawie przyjęto kryteria akceptacji wyników tej próby? Autor wskazuje minimalną *siłę* odrywania wykładek wyrażoną w MPa. Jest to błąd, ponieważ w tej próbie określa się naprężenie.

Pod względem edytorskim rozprawę oceniam dobrze. Jest napisana poprawnym i jasnym językiem. Znalazłem niewielką liczbę błędów stylistycznych i edycyjnych. Dokumentacja wyników badań przedstawiona w postaci tabel i rysunków jest szczegółowa i starannie opracowana. Obrazy mikrostruktur metalograficznych zostały przygotowane i przedstawione z dużą starannością. Istotnym niedopatrzeniem w wersji drukowanej pracy (przedstawionej do oceny) jest brak numeracji stron. Ponadto w wykazie najważniejszych oznaczeń zabrakło opisu często używanych w tekście pracy skrótów jak np. SWC, TIG, MMA, PA, PG etc.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną rozprawę doktorską uważam za interesującą i wartościową. Pan mgr inż. Sławomir Topór zrealizował zadanie badawcze oraz wdrożeniowe będące przedmiotem rozprawy. Wykazał umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz opracowania i analizy uzyskanych wyników. Przedstawione w rozprawie wnioski są

udokumentowane. Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy, klarowne sformułowanie celów pracy oraz ich osiągnięcie na drodze zaplanowanych i przeprowadzonych badań pozytywnie oceniam przedstawioną rozprawę doktorską.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że przedstawiona przez mgr inż. Sławomira Topora praca pt. "Opracowanie technologii wytwarzania i spawania rur stalowych z trudnościeralnymi wykładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie hydraulicznym lub pneumatycznym mediów powodujących ścieranie oraz występowanie korozji" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20.07.2018 r. i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. Jerzy Łabanowski

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)