



Politechnika Wrocławska

Wrocław, 01 grudnia 2025 roku

Dr hab. inż. Marzena Lachowicz, prof. PWr
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Katedra Obróbki Plastycznej, Spawalnictwa i Metrologii
Ul. Łukasiewicza 7-9
50-371 Wrocław

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Sławomira Topór

pt. „Opracowanie technologii wytwarzania i spawania rur stalowych z trudnościeralnymi wkładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie hydraulicznym lub pneumatycznym mediów powodujących ścieranie oraz występowanie korozji”

Podstawą formalną niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej dotyczące wyznaczenia mojej osoby jako jednego z recenzentów rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Sławomira Topór (pismo RDyMa.RMT.512.34.2025 z dnia 23.09.2025r.).

1. OPINIA OGÓLNA

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Sławomira Topór powstała pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Santiny Topolskiej, prof. PŚ. Opiekunem pomocniczym pracy był Pan mgr inż. Witold Rusin. Realizowana była w ramach Wspólnej Szkoły Doktorskiej Politechniki Śląskiej. Praca ma charakter wdrożeniowy, choć w treści pracy nie zawarto informacji wskazującej, aby doktorat był realizowany w ramach projektu „Doktorat Wdrożeniowy” współfinansowanego przez MEiN. Rozprawa zawiera wyniki badań dotyczące zagadnień technologicznych związanych ze spajaniem niestopowej stali konstrukcyjnej powlekanej kompozytem na bazie poliuretanu, które mieszczą się w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa. Praca porusza również zagadnienia typowe dla inżynierii mechanicznej. Mocno zaakcentowany jest inżynierski profil wykonywanych prac badawczych. Praca stanowi prawidłowe rozwiązanie zdefiniowanego przez Doktoranta problemu badawczego, stając się przykładem oryginalnego rozwiązania w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, spełniając tym samym pkt. 1 Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2. OCENA MERYTORYCZNA

2.1 Ocena znaczenia problemu naukowego rozprawy

W wielu zastosowaniach różne obszary danej konstrukcji mogą pracować w odmiennych warunkach środowiskowych. Głównym mechanizmem zniszczenia rur wykonanych ze stali o wysokiej odporności na ścieranie, które stosuje się m.in. w transporcie pneumatycznym i hydraulicznym, obejmuje zużycie abrazyjne oraz erozję przy wysokiej prędkości medium. Związane jest to z oddziaływaniem cząstek stałych (popioły, pyły, piasek) unoszonych w strumieniu cieczy. Aby zmniejszyć koszty ekonomiczne, w przemyśle coraz częściej występuje zapotrzebowanie na materiały warstwowe oraz gradientowe. Umożliwiają one wytwarzanie materiałów o zmiennych właściwościach, powodując że nie trzeba stosować drogiego stopu na całej grubości komponentu. W tym zakresie szerokie zastosowanie znajduje np. połączenie stali niestopowej lub niskostopowej ze stalą austenityczną lub stopami niklu. Najpowszechniejszą technologią wytwarzania materiałów warstwowych jest walcowanie na gorąco, które pozwala na wytworzenie struktur z trwałym połączeniem między warstwami, bez konieczności stosowania materiałów dodatkowych. Szeroko stosuje się także procesy napawania, pozwalających na wytworzenie struktury o dwóch odrębnych funkcjach dzięki uzyskaniu metalurgicznego złącza między materiałami. Kolejną metodą jest zgrzewanie wybuchowe, umożliwiające łączenie materiałów, których połączenie tradycyjnymi metodami jest trudne lub wręcz niemożliwe. Do wytwarzania materiałów warstwowych stosuje się także odlewanie dwuetapowe, używane na przykład przy produkcji tulei ślizgowych. Rozwój technologii addytywnych powoduje, że stają się one naturalnym obszarem ich stosowania do wytwarzania materiałów gradientowych, ponieważ pozwalają one precyzyjnie kontrolować zarówno skład chemiczny, jak i mikrostrukturę w różnych obszarach jednego elementu. Dzięki temu możliwe jest tworzenie płynnych zmian właściwości, co jest niemożliwe do uzyskania metodami konwencjonalnymi.

Stosowanie materiałów warstwowych powoduje, że ich złożona, zmienna w przekroju struktura przyczynia się do tego, że tradycyjne technologie spawania często nie gwarantują poprawnej jakości połączeń. W szczególności wymagana jest ochrona obszarów o niższej odporności termicznej. Z tego względu konieczne jest opracowywanie dla nich dedykowanych technologii spawania. Biorąc pod uwagę aktualność, aspekty naukowe i znaczenie praktyczne postawionego przez Doktoranta problemu, wybór tematu rozprawy należy uznać za trafny i uzasadniony. Praca porusza ciekawe zagadnienia wpływu technologii oraz parametrów spawania na możliwość uzyskania trwałego i szczelnego połączenia bez istotnej degradacji powłoki kompozytowej. Celem użytkowym pracy było opracowanie technologii spawania rur powleczonych powłoką kompozytową. Dotychczasowe metody łączenia takich rur obejmują m.in. połączenia kołnierzowe lub obejmowe, a także spawanie elementów pośrednich.

2.2 Materiał i metodyka badawcza

W badaniach wykorzystano rury wykonane z niestopowej stali konstrukcyjnej – w badaniach wstępnych wykorzystano stal w stanie niepowlaczonym, natomiast w części dotyczącej badań zasadniczych - z naniesioną powłoką kompozytową. Niestety w różnych częściach pracy Doktorant stosował zróżnicowane gatunki stali tj. P355 (bez wskazania dalszych elementów oznaczenia), P355NH TC2, S355J2+N. Choć są to zbliżone gatunki stali pod względem właściwości,

to należy mieć na uwadze, że mogą występować nieznaczne różnice pomiędzy poszczególnymi gatunkami wynikające chociażby z ich odmiennego przeznaczenia. Przykładowo dotyczy to ograniczeń w czystości metalurgicznej, a także sumarycznej zawartości niektórych pierwiastków. Do wykonania prototypowej rury próbnej zastosowano natomiast stal P265GH. Stosowanie zamiennie różnych gatunków stali, mogło przełożyć się na powtarzalność wyników uzyskiwanych na poszczególnych etapach pracy.

W pracy wykorzystywano metody typowo stosowane w badaniach dotyczących połączeń spawanych. Doktorant wykorzystał metody badań nieniszczących: wizualne (VT), penetracyjne (PT) oraz magnetyczno-proszkowe (MT). W dalszej części pracy również radiograficzne (RT). Do oceny jakości połączeń spawanych zastosował również badania makroskopowe, mikroskopowe z użyciem metod mikroskopii świetlnej oraz pomiary twardości. Na ostatnim etapie pracy wykorzystał również statyczną próbę rozciągania oraz metodę elementów skończonych (MES). Zakres badań został poprawnie dobrany do udowodnienia tez i celu pracy.

Za pozytywny zabieg należy uznać przedstawienie przebiegu realizowanych badań w formie schematu, co zdecydowanie poprawia czytelność pracy i ułatwia interpretację (str. 42). Doktorant używa w opisie Metodyki badań formę bierną czasu przeszłego np. „planowane było” (str. 40), „przewidziane było” (str. 41), co jest dość nietypowym zabiegiem. Praca byłaby również czytelniejsza, gdyby Doktorant opisy dotyczące prób spawania przedstawił w metodyce badań, a nie w treści rozdziałów, w których powinien skupić się przede wszystkim na omówieniu wyników uzyskanych badań (np. str. 48, 51).

Sama metodyka badań wykazuje szereg nieudolności m.in. nie wskazano urządzeń wykorzystanych w badaniach nieniszczących, nie opisano sposobu przygotowania próbek do badań metalograficznych. W pracy nie scharakteryzowano także materiałów bazowych, które miały posłużyć do wytworzenia powłoki kompozytowej. Przeprowadzenie badań strukturalnych pozwoliłoby na jednoznaczne określenie składu fazowego powłoki określanej przez Doktoranta w pracy jako kompozytowa. Nie zostało więc jednoznacznie udowodnione, że stosowanie określenia „powłoka kompozytowa” jest właściwe. Dane dostępne na stronie internetowej producenta rur o nazwie handlowej PUGA® sugerują, że powłoka wykonana jest z materiału polimerowego zaliczanego do elastomerów (poliuretanu), a nie kompozytu na jego bazie. Również znajomość składu chemicznego stali jest niezbędne do prawidłowego zaprojektowania procesu spawania. Dopiero w rozdziale 10 wskazano, że przedmiotem badań była stal gatunku P355 (choć było to zmienne w dalszej części pracy). Z treści pracy nie wynika, aby zweryfikowano zgodność gatunku z wymaganiami normy przedmiotowej. Również oznaczenie nie jest pełne, gdyż nie definiuje wymagań temperaturowych i ciśnieniowych (np. P355N, P355GH, etc).

W metodyce badań, a także podczas omawiania wyników, kilka aspektów budzi moje zastrzeżenia:

- 1) Dobrym zwyczajem jest opisywanie uzyskanych obrazów mikroskopowych techniką badawczą, która pozwoliła na ich uzyskanie (Mikroskopia świetlna), a także wskazanie, że jest to stan trawiony. Nie ma potrzeby wskazywania użytego powiększenia, gdyż zastosowano znacznik skali.

- 2) W przypadku zdjęć mikroskopowych wykonywanych przy powiększeniach do 50x bardziej poprawne byłoby stosowanie opisu „Obraz makrostruktury” pod uzyskanymi obrazami – rys. 37-40.
- 3) Na rysunku 155 (str. 129) Doktorant przedstawił wykres uzyskany w statycznej próbie rozciągania w zależności od siły [N]. Krzywa rozciągania powinna być przedstawiana w zależności od naprężenia [MPa].
- 4) Zastrzeżenia budzi sposób przygotowania próbek do statycznej próby rozciągania (rys. 150-153), gdyż brak jest pełnej ciągłości przekroju próbki. Doktorant uwzględnił w analizach jedynie przekrój wynikający z obszaru przetopu (jak wynika z Tabeli 24, grubość blachy wynosiła 6,3 mm). Brak przetopu obserwowany w pozostałym obszarze prowadzi do powstania karbu, który zasadniczo zmienia charakter tego badania, przez co nie odzwierciedla rzeczywistego wyniku, a także nie jest to zgodne ze standardową procedurą. Normy wymagają próbek bez karbów i gładkiej powierzchni. Z tego względu uzyskane wyniki nie można uznać za miarodajne. Dla uzyskania prawidłowych wyników można było przygotować próbki nieproporcjonalne, ale zapewniające jednakowy przekrój na całej próbce.
- 5) Podczas omawiania symulacji MES nie wskazano rodzaju zastosowanego elementu. W analizie MES typu użytego elementu ma kluczowy wpływ na dokładność obliczeń, a wybór elementu jest jednym z ważniejszych etapów podczas opracowywania symulacji.

2.3 Ocena merytoryczna poszczególnych części rozprawy

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska ma charakter doświadczalny i zachowuje klasyczny układ. Recenzowana rozprawa zawiera 148 strony maszynopisu, bez wykazu bibliografii obejmującego 66 pozycji literaturowych oraz 22 norm przedmiotowych. Przegląd piśmiennictwa zajmuje około 1/4 objętości całości pracy. Układ jest czytelny, ułożony chronologicznie i nie budzi zastrzeżeń. Na początku pracy zamieszczono jednostronicowe streszczenia w języku polskim oraz angielskim. Treść pracy podzielona została na siedemnaście rozdziałów. Po spisie treści zamieszczono również wykaz ważniejszych oznaczeń.

Pierwszy rozdział stanowi krótki (jednostronicowy) *Wstęp*, w którym uzasadniono potrzebę realizacji badań objętych tematyką pracy. W drugim rozdziale zatytułowanym *Transport hydrauliczny* omówiono definicje związane z tym rodzajem środka służącego do przesyłania ciał stałych w strumieniu cieczy. W trzecim rozdziale przedstawiono *Transport pneumatyczny*, natomiast w czwartym *Problemy występujące w układach transportu pneumatycznego i hydraulicznego*. Rozdziały 2-4 są dość krótkie, z powodzeniem można było je połączyć w jeden większy rozdział. Autor w czwartym rozdziale zwraca uwagę na zagrożenia związane ze środowiskiem pracy elementów transportujących, które wiąże się z narażeniem na oddziaływania korozyjne oraz erozyjne. W piątym rozdziale zatytułowanym *Materiały trudnościeralne stosowane do transportu hydraulicznego lub pneumatycznego* Autor charakteryzuje grupy materiałów stosowanych w rurociągach transportu hydraulicznego i pneumatycznego. Biorąc pod uwagę tematykę pracy, ten rozdział budzi pewien niedosyt. Przykładowo Doktorant omawiając stale trudnościeralne (podrozdział 5.1) nie przedstawił żadnego zestawienia gatunków stali wraz ze składem chemicznym, które są stosowane w omawianym zastosowaniu. Skupił się głównie na zagadnieniach spawalności tych materiałów. W podrozdziale 5.2 Autor przedstawił ogólny schemat dotyczący klasyfikacji metod natryskiwania cieplnego, jednak nie przeprowadził żadnej

syntezy dotyczącej stanu wiedzy w zakresie zastosowania tej technologii dla transportu pneumatycznego oraz hydraulicznego. Podobna uwaga dotyczy podrozdziału 5.3, w którym Doktorant opisując rury stalowe z powłokami uzyskanymi poprzez napawanie, wymienił przede wszystkim metody napawania materiałów w różnych sektorach przemysłu. W rozdziale 5.4 zatytułowanym *Rury z materiałów kompozytowych* Autor skupił się na definicjach związanych z materiałami kompozytowymi, natomiast nie podał żadnych rozwiązań materiałów kompozytowych, które znajdują zastosowanie w przemyśle. Co prawda, w ostatnim akapicie Autor odnosi się do przykładu rury wykonanej z materiału o nazwie handlowej Sanicro 3R12/4L7, jednak przykład jest o tyle niefortunny, że nie spełnia on wprowadzonych w tym samym rozdziale przez Doktoranta definicji (kompozyt jako materiał monolityczny, złożony z osnowy oraz fazy zbrojącej – str. 21). Przedstawiony przykład odnosi się do rury o konstrukcji dwuwarstwowej. W podrozdziale 5.5 niefortunnie został nadany tytuł tego podrozdziału brzmiący: *Rury stalowe z aplikowanymi wkładkami kompozytowymi typu PUGA*. Doktorant wskazuje, że naniesienie kompozytu na bazie poliuretanu na podłoże stalowe następuje w stanie ciekłym (str. 30), co pozwala uzyskać trwałe połączenie. Biorąc pod uwagę przedstawiony sposób jej nanoszenia poprawniej byłoby używać określenia „powłoka”. Określenie „wkładka” byłoby bardziej poprawne, gdyby łączenie następowało poprzez ciasne pasowanie obu elementów. Autor przedstawia w tym rozdziale porównanie dwóch rur transportowych wykonanych ze stali trudnościeralnej oraz rury z wkładką poliuretanową (str. 21). Niestety nie odnosi się w tym miejscu do treści literaturowych, które potwierdzałyby przedstawione analizy. Jeśli są one wynikiem samodzielnych analiz powinno to zostać zaznaczone w pracy i podparte odpowiednimi badaniami. Tytuł podrozdziału 5.5.1 *Sposób łączenia powłoki kompozytowej z rurami stalowymi* nie w pełni odzwierciedla jego zawartość, gdyż de facto opisuje sposób naniesienia powłoki kompozytowej na powierzchnię rury stalowej. W rozdziale 6 przedstawiono istniejące sposoby łączenia tych rur. Omówiono połączenia rozłączne, w tym kołnierzowe i obejmowe, a także poprzez wykonanie połączeń spawanych w elementach pośrednich. W podsumowaniu dotyczącym części teoretycznej pracy należy podkreślić, że przeprowadzone studia literaturowe zostały słabo podparte odwołaniami literaturowymi. Brakuje w tym miejscu podsumowania, w którym na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych Doktorant porównałby ze sobą wady oraz zalety, cechy strukturalne, właściwości mechaniczne oraz fizykochemiczne różnych materiałów stosowanych na rurociągi pracujące w środkach transportu hydraulicznego i pneumatycznego.

Cel i tezę pracy przedstawiono w rozdziale 7. W tym miejscu zawarto również uzasadnienie realizowanych badań. Nie jest jasne, co Autor miał na myśli wskazując, że (...) „Przedstawiona charakterystyka (...) potwierdza istnienie wielu czynników wpływających na dobór zarówno materiałów na rurociągi, technologii ich wytwarzania, jak i sposobów ich łączenia (...). Z treści pracy to nie wynika, gdyż Doktorant takich analiz w ramach studiów literaturowych nie prowadził. Teza pracy jest rozbudowana i brzmi: *„Opracowanie odpowiedniego sposobu wytwarzania oraz spawania montażowego rur ze stali węglowej, wyposażonych w wewnętrzne powłoki z trudnościeralnych, odpornych na korozję wkładek 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 nowych systemach rurociągowych.”* Należy jednak stwierdzić, że Autor nie opracowywał

w ramach pracy technologii wytwarzania rur. Jak wskazano również wcześniej, samo zastrzeżenie budzi używanie w pracy określenia „wkładka”, a określenie „stal węglowa” nie jest zgodne z obowiązującą terminologią.

Rozdział 8 dotyczy metodyki badań, co omówiono w poprzednim podrozdziale. Kolejne rozdziały dotyczą badań własnych. Autor przeprowadził badania w kilku etapach. W rozdziale 9-tym dysertacji przedstawiono różne koncepcje dotyczące sposobu wykonania złączy rur stalowych z powłokami kompozytowymi na bazie poliuretanu. Zaproponowano różne warianty geometryczne przygotowania materiałów bazowych w celu wytworzenia prawidłowego połączenia spawanego. Początkowo zaproponowano 15 rozwiązań geometrycznych dla przygotowania złączy do spawania (rys. 27). Ostatecznie do dalszych rozważań wybrano dwa, natomiast trzy uznano za możliwe do przyjęcia (Tabela 2). Pozostałe rozwiązania zostały odrzucone, jednak nie przedstawiono jasnych kryteriów oceny tych założeń. Rozdział 10 oraz 11 należą do badań wstępnych i są ze sobą ściśle powiązane. W pierwszym z nich opisuje sposób przygotowania materiału badawczego do procesu spawania wg dwóch założonych koncepcji określanych dalej jako „a” oraz „g”. W kolejnym opisał proces spawania w celu wytworzenia materiału badawczego, a następnie dokonał porównania złączy spawanych wykonanych z niepowleczonych rur ze stali S355 (bez wskazania dalszych elementów oznaczenia, str. 46-47). W mojej opinii, nie było konieczności rozdzielania tego materiału na dwa odrębne rozdziały, z powodzeniem można było wszystkie te informacje przedstawić w jednym wspólnym rozdziale. Nie wpłynęło to jednak w żaden sposób na dalszy tok postępowania. Dla uzyskania zamierzonego celu wykorzystano spawanie ręczne elektrodą otuloną (metoda 111). Dla obu rozwiązań wyznaczono spawalnicze cykle cieplne z wykorzystaniem czterech termopar. Doktorant stwierdził, że osiągnięte temperatury przekraczające 1000 °C mogą mieć negatywny wpływ na stan powłoki kompozytowej, dla której jest to temperatura znacznie przekraczająca dopuszczalne. Zaznaczył jednak, że celem tego etapu badań było wytypowanie koncepcji przygotowania złączy do spawania. Dla uzyskanego materiału badawczego przeprowadzono badania nieniszczące (VT, PT, MT), a także makroskopowe, mikroskopowe oraz wykonano pomiary twardości. Wyniki badań nieniszczących przedstawiono w formie opisowej. W ramach przeprowadzonych badań niszczących przedstawiono zdjęcie makrozglądów uzyskanych połączeń, wyniki obserwacji mikroskopowych, a także uzyskane rozkłady twardości. Całość zakończono podsumowaniem uzyskanych wyników, w którym rekomendowano rozwiązanie „a” jako najbardziej optymalne, ze względu na istotnie krótsze czasy chłodzenia. Niedosyt budzi brak głębszej dyskusji uzyskanych wyników. W podsumowaniu rozdziału 11-tego, Autor stwierdza, że (...) „dobór parametrów został zoptymalizowany” (...). Jednak w tym rozdziale Doktorant nie wykonywał optymalizacji, ale proponował dwa rozwiązania, które następnie porównywał.

Rozdział 12 dotyczy dalszych badań nad rozwojem technologii spawania rur niepowleczonych i wykonanych wg rozwiązania „a” poprzez rozszerzenie technik spawania. Wykorzystano w tym celu dodatkowe dwie metody tj. TIG oraz MAG. Powtórzono również badania dla metody MMA (spawanie ręczne elektrodą otuloną). Pewna niespójność pojawia się tu w oznaczeniu próbek, gdyż zarówno próbki uzyskane metodą MAG, jak i MMA oznaczono jako III. Z dalszej treści wynika, że próbka wykonana metodą MMA została oznaczona jako II. W badaniach wykorzystano stal gatunku P355NH. Grubość ścianki była inna niż w badaniach wstępnych przedstawionych w ramach rozdziału 11. Ten etap prac określony jako *Optymalizacja I* zakończono podsumowaniem, w którym podjęto decyzję o konieczności wyeliminowania z dalszych rozważań

metod łukowych, a także zaproponowano sprawdzenie dla tego celu przydatności ręcznego spawania laserowego (LBW). Słusznie założono, że metoda pozwoli na wprowadzenie mniejszej ilości energii cieplnej do materiału. Jest to innowacyjne rozwiązanie, gdyż metoda ta nie jest powszechnie stosowana w warunkach terenowych. Najniższe temperatury maksymalne oraz najkrótsze czasy przebywania w wysokich temperaturach uzyskano wśród metod łukowych dla metody TIG, z tego względu wykorzystano ją ponownie do wytworzenia próbki referencyjnej. Spawanie laserowe wykonano z użyciem oraz bez materiału dodatkowego. W przypadku metody TIG podczas pierwszej optymalizacji wykorzystywano jako materiał dodatkowy pręt lity gatunku W MoSi, natomiast podczas drugiej – pręt lity W 4Si1. Nie uzasadniono w treści pracy zmiany rodzaju elektrody. Badania realizowano na blachach ze stali gatunku S355J2+N o mniejszej grubości ze względu na wyższe wymagania dotyczące dokładności przygotowania krawędzi. Autor słusznie zauważa, że zmiany w grubościach spawanych elementów ogranicza możliwość porównywania z wcześniejszymi wynikami badań. Dla uzyskanych w ten sposób trzech złączy wykonano badania nieniszczące (VT, PT, MT), a także makroskopowe, mikroskopowe oraz rozkłady twardości. Dodatkowo dla złączy wykonanych techniką laserową wykonano również badania radiograficzne (RT). W podsumowaniu stwierdzono, że wykorzystanie spawania laserowego pozwala na istotne obniżenie temperatur podczas cyklu spawania. Najkorzystniejsze parametry cieplne uzyskano dla spawania laserowego z zastosowaniem materiału dodatkowego. Doktorant tłumaczy to faktem przejmowaniem ciepła przez nagrzewany materiał dodatkowy. W podsumowaniu Autor odnosi się również do wyników badań termogravimetrycznych (TGA), które wykazały, że temperatura degradacji materiału powłoki kompozytowej wynosi około 300 °C. Szkoda, że nie przedstawiono odpowiednich wyników badań w treści pracy. Wskazano również na problemy technologiczne związane z metodą laserową, która prowadziła do zwiększonej porowatości uzyskanych spoin. Zasugerowano, że może to być związane z doбором gazu osłonowego. Biorąc to pod uwagę, w kolejnym etapie zastosowano różne gazy osłonowe z jednoczesną redukcją mocy wiązki laserowej uzyskaną poprzez modyfikację parametru kompensacji. Założono, że wpłynie to na obniżenie temperatury na linii wtopienia, co powinno skutkować poprawą jakości spoiny. Próby przeprowadzono z wykorzystaniem trzech różnych gazów osłonowych: azotu, argonu oraz mieszanki argonu i CO₂. Spawanie przeprowadzono ponownie na blachach stalowych gatunku S355J2+N i grubości blachy 3 mm. Na podstawie przedstawionych wyników można wnioskować, że dla uzyskanych złączy wykonano badania radiograficzne (RT), a także makroskopowe i mikroskopowe. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że prawidłową jakość połączeń spawanych uzyskano dla spawania w osłonie azotu.

Kolejne rozdziały dotyczą już badań zasadniczych tj. realizowanych na wyrobach powlekanych powłoką kompozytową. W rozdziale 13-tym przedstawiono etap badań związany z doбором parametrów spawania laserowego w celu wytworzenia stalowych połączeń spawanych z blach o grubości 4 mm z naniesioną powłoką o grubości 6 mm, będących wyrobem producenta. Z Tabeli 20 wynika, że badania realizowano na siedmiu próbkach wykonanych z użyciem różnych parametrów spawania. Połączenia wykonano z zainicjowanym przesunięciem liniowym oraz szczeliną między blachami w pozycji podolnej (PA) Dla wszystkich uzyskanych złączy przeprowadzono badania makroskopowe oraz penetracyjne. Wykonano również makrozgłady metalograficzne na przekroju poprzecznym, dla których oceniono geometrię spoiny. Ze względu na zaobserwowane odspojenie powłoki w obszarze spoiny, przeprowadzono również badania

przyczepności wykorzystując dla tego celu zmodyfikowaną metodę „pull-off”. Na podstawie uzyskanych wyników ograniczono ilość dalszych prób do trzech, dla których wykonano dalej badania w pozycji wymuszonej (PG). Pozwoliło to stwierdzić, że wybór pozycji spawania nie wpływa istotnie na geometrię spoiny. Podobne spostrzeżenia Doktorant formuje w zakresie ilości ciepła wprowadzanego do materiału podczas spawania, jednak tego nie uzasadnia. W kolejnym etapie wykonano połączenia spawane rur gatunku P355 (bez uszczegółowienia oznaczenia) o grubości ścianki 6,3 mm z naniesioną powłoką kompozytową. Z treści pracy oraz rysunku 136 nie wynika, jaka była grubość powłoki. Nie jest również jasne, czy Doktorant sam nanosił powłokę czy zastosował produkt producenta, jak to miało miejsce w przypadku blach. Spawanie prowadzono w pozycji PJ, stosowanej dla rur. Wyznaczono cykle cieplne spawania z wykorzystaniem czterech punktów pomiarowych. Pomiarów wykonano dla każdego ze ściegów. Następnie przeprowadzono badania VT, PT oraz makroskopowe. Stwierdzono, że temperatury nagrzewania maleją podczas nanoszenia kolejnych ściegów, mimo to obserwowano odspojenie powłoki od powierzchni rury. W ostatnim etapie prac przeprowadzono spawanie rur powleczonych łącząc ze sobą metodę spawania laserowego LBW oraz TiG. Doprowadziło to do uzyskania odspojenia powłoki od rury na dużo większej powierzchni, co pozwoliło ostatecznie Doktorantowi na wyeliminowanie technik łukowych z aplikacji. Dla obu wykonanych w ten sposób złączy (LBW oraz LBW+TiG) przeprowadzono badania wytrzymałościowe. Szkoda, że Doktorant wyznaczył jedynie wytrzymałość na rozciąganie R_m , z pominięciem umownej granicy plastyczności $R_{p0.2}$ oraz wydłużenia. Autor odnosi się dalej do zgodności uzyskanej wytrzymałości z normą, ale należy pamiętać, że to granica plastyczności wskazuje zakres „bezpiecznej pracy” konstrukcji i decyduje o dopuszczalnych poziomach naprężeń. Ponadto zastrzeżenia budzi samo przygotowanie próbek do badań wytrzymałościowych, co omówiono w metodyce badań.

W rozdziale 14-tym dysertacji wyniki uzupełniono o symulacje procesu spawania laserowego LBW, na podstawie których uzyskano maksymalne temperatury wzdłuż określonych linii pomiarowych w obszarze rury oraz powłoki kompozytowej. Rozdział 15-ty przedstawia sposób wykorzystania uzyskanych wyników dla zastosowań przemysłowych. W tym celu wykonano testowe połączenie spawane wykonane ze stali P265GH (grubość: ścianki 12,5 mm, powłoki 9 mm), które zaimplementowano następnie do istniejącej instalacji. Dla powstałego złącza Autor wykorzystał obliczenia wytrzymałościowe do wyznaczenia poziomu naprężeń eksploatacyjnych oraz dopuszczalnych. Dla uzyskanych złączy wskazano, że przeprowadzono badanie makroskopowe oraz nieniszczące, jednak nie przedstawiono ich wyników. W ostatnim kroku wykonano próbę ciśnieniową. Następnie Autor wskazuje, że zostały przeprowadzone badania eksploatacyjne, jednak również nie wskazuje jej wyników wyjaśniając to względami poufności. Rozdział 16-ty stanowi podsumowanie zrealizowanych badań, w którym Doktorant w sposób zwięzły ponownie przedstawia najważniejsze wyniki. Autor na koniec wskazuje także zalecenia proceduralne dla projektowanych instalacji. W tym rozdziale oczekiwałabym przeprowadzenia większej dyskusji. Niestety obecna forma ma dość analityczny charakter, co znacząco obniża naukową wartość pracy. Potencjał dla zbudowania szerszych dyskusji naukowych miałyby w szczególności badania mikrostrukturalne, a także uzyskane cykle spawania.

We *Wnioskach* zawartych w rozdziale 17-tym Autor przedstawia wnioski naukowe oraz utylitarne/wdrożeniowe. Doktorant na podstawie przeprowadzonych badań sformułował cztery wnioski naukowe, a także sześć utylitarnych. W mojej opinii wniosek naukowy dotyczący

opracowania nowego rozwiązania w zakresie ukosowania krawędzi rur powinien zostać zakwalifikowany jako wniosek o charakterze wdrożeniowym.

Na końcu pracy zestawiono cytowane prace naukowe, normy, spis załączników, rysunków, tabel. Załączono również 19 załączników, które stanowią wstępne instrukcje technologiczne spawania (pWPS) oraz świadectwo odbioru.

2.4 Ocena redakcji i formalnej strony rozprawy

Praca została przygotowana starannie, z użyciem poprawnego i zrozumiałego języka. Pomimo ogólnie starannej redakcji pracy, odnotowuje się pewne nieścisłości, które przedstawione w dalszej części recenzji. Wybór literatury jest trafny, aczkolwiek dość ubogi jak na rozprawę doktorską. Większa część pozycji literaturowych to prace polskich Autorów. Jest to zbyt mała ilość aby zbudować szeroką dyskusję w pracy. Część z cytowanych prac to pozycje, w których Doktorant jest jednym z autorów, co świadczy o Jego aktywności publikacyjnej w analizowanym temacie. Osobno zestawiono wykorzystywane normy przedmiotowe.

Doktorant nie ustrzegł się w swojej rozprawie niejasnych lub nieścisłych sformułowań. Część z nich dotyczyła metod badawczych i z tego względu opisano je w rozdziale 2.2. Do pozostałych uwag w tym zakresie należy zaliczyć:

- 1) Na stronie 23 omawiając rury Sandvik 3R12/4L7, w której warstwę wewnętrzną stanowi stal kotłowa gatunku P265GH, natomiast warstwę zewnętrzną stal austenityczna gatunku X2CrNi18-10, Doktorant niewłaściwie używa określenia rura kompozytowa. W przedstawionym przykładzie bardziej poprawne byłoby określenie materiał warstwowy. Należy jednocześnie podkreślić, że także Autor w swojej pracy definiuje kompozyt jako materiał monolityczny, powstały z fazy osnowy oraz fazy zbrojącej, których właściwości są wynikiem synergii zastosowanych komponentów (str. 21).
- 2) Nieaktualne, choć w pełni zrozumiałe w zastosowanym kontekście jest określenie „stal węglowa” (str. 29, 38, 39 (teza), 40, 137). Obowiązującą formą jest określenie „stal niestopowa”.
- 3) W Tabeli 1 zestawiono wybrane właściwości poliuretanów na podstawie danych producenta. W tabeli przedstawiono dwa razy ten sam opis. Powstały błąd jest wynikiem korzystania z polskiego tłumaczenia strony producenta. Sięgając do wersji anglojęzycznej tej tabeli na stronie internetowej (dostęp 20.11.2025) istnieje wyraźne rozdzielenie oraz wyjaśnienie różnych właściwości przedstawionych w w/w tabeli, gdyż odnoszą się one odpowiednio do poliuretanu poliestrowego i polieterowego.
- 4) Doktorant zamiennie stosuje w odniesieniu do powłok kompozytowych naniesionych na wewnętrzne powierzchnie rur stalowych określeń: „powłoka” (np. str. 23, 26, 29, 31), „wkładki” (np. str. 23, 24, 28, 30, 31, 48), „wykładzina” (str. 27). Biorąc pod uwagę przedstawiony w treści pracy sposób nanoszenia materiału na podłoże stalowe, które zapewnia ich trwałe połączenie, bardziej odpowiednie jest stosowanie „powłoka”.
- 5) W pełni zrozumiałe jest określenie zastosowane na stronie 34 „połączenia na obejmę”, choć bardziej poprawne byłoby „połączenia obejmowe”.
- 6) W treści Autor wskazuje, że w rozwiązaniu „a” zastosowano grubszą ściankę oraz większą średnicę rur niż dla rozwiązania „g” (str. 47). Tymczasem z rysunku 29 wynika, że to

rozwiązanie „g” charakteryzowało się większą średnicą rury. Na rysunku nie wskazano również jednoznacznie, że podany wymiar dotyczy średnicy.

- 7) Na stronie 63 Autor odnosi się do rozwiązania „a” oraz „g” odnosząc się do (...) „połączeń spawanych rur bez uszkodzenia wkładek oraz bez utraty ich pierwotnych właściwości” (...). Jednak w w/w rozwiązaniach Doktorant analizował rury bez powłoki kompozytowej. Byłoby to bardziej zrozumiałe, gdyby Autor zastosował tryb przypuszczający.
- 8) Również na tej samej stronie pojawia się niespójność w oznaczeniu próbek, gdyż zarówno próbki uzyskane metodą MAG, jak i MMA oznaczono jako III.
- 9) Na stronie 64 Autor wskazuje, że próby spawania przeprowadzono na czterech zestawach próbek. Nie jest to jasne, co Autor miał na myśli, gdyż w opinii na str. 63 wskazuje na trzy próbki. Nie przedstawiono również w uzyskanych wynikach badań analiz dla różnych próbek z wykorzystaniem tej samej technologii, co również wskazuje, że określenie to nie dotyczy próbek w tej samej serii.
- 10) Na stronie 98 Autor odnosi się do wytrzymałości temperaturowej powłok, wiążąc ją z temperaturą degradacji. Pojęcia te nie są sobie jednoznaczne. Wymagania dotyczące metod wyznaczenia temperatury wytrzymałości cieplnej zawierają normy PN-EN ISO 75-3/ASTM D648 i wymagają przeprowadzenia trójpunktowego zginania. Nie jest również jasne, co Doktorant ma na myśli w kontekście temperatury degradacji, gdyż degradacja jest procesem zazwyczaj długotrwałym, który niekoniecznie musi wiązać się z osiągnięciem temperatury rozpadu.
- 11) Z treści pracy nie wynika, jaka jest grubość powłoki kompozytowej zastosowanej w przypadku próbki oznaczonej jako 1R (str. 118).
- 12) Doktorantowi nie udało się również ustrzec przed drobnymi błędami redakcyjnymi, takimi jak przeniesienie podpisu pod rysunkiem 7 na kolejną stronę (str. 21).

Zauważone nieścisłości nie wpływają merytorycznie na postępowanie przyjęte przez Doktoranta.

2.5 Pytania problemowe

Na etapie redakcji pracy Autorowi nie udało się uniknąć nieścisłości, a także niektóre zagadnienia nie zostały wyjaśnione w wyczerpujący sposób. W konsekwencji, podczas analizy treści rozprawy doktorskiej nasunęło się recenzentowi kilka pytań i kwestii problematycznych, które wymagają uszczegółowienia i stanowią zagadnienia do dalszej dyskusji. Należy do nich zaliczyć:

- 1) Jaką zaletę ma proponowane rozwiązanie poprzez bezpośrednie spawanie rur z powłoką kompozytową w porównaniu do stosowanego spawania elementów pośrednich (tuleje, pierścienie) przed naniesieniem powłok? Autor wskazuje w pracy, że to rozwiązanie nie pogarsza właściwości powłoki oraz zapewnia szczelnie połączenie (str. 37).
- 2) Na stronie 60 Doktorant wskazuje dla rozwiązania „a” jedynie na obecność obszaru znormalizowanego. Czy nie obserwowano strefy przegrzania? Podobnie w rozwiązaniu „g” Doktorant wspomina jedynie o strefie przegrzania, natomiast nie wskazuje na obecność strefy znormalizowanej. Czy nie jest to konsekwencja prowadzenia obserwacji w jednym obszarze SWC?
- 3) Na stronie 61 Autor używa określenia „quasiperlit”, które odnosi się do perlitu powstającego w warunkach nierównowagowych. Czy Autor określał udział perlitu w mikrostrukturze i obserwował jego większy udział w porównaniu do warunków równowagi termodynamicznej?

- 4) Również na stronie 61 Autor stwierdza, że próbki wykonane wg rozwiązania „a” charakteryzowały się wyższą twardością. Z jakimi różnicami w mikrostrukturze Autor to wiąże (wielkość ziarna, udział perlitu)?
- 5) Co Autor rozumie pod pojęciem „temperatura degradacji” w odniesieniu do powłoki na bazie poliuretanu? W jaki sposób została ona wyznaczona w badaniach TGA? – str. 98.
- 6) Doktorant przeprowadził symulacje procesów spawania metodą LBW. Jaka jest zgodność uzyskanych analiz z wynikami rzeczywistych pomiarów realizowanych we wcześniejszych etapach?
- 7) Jak wyznaczono grubość strefy rozciąganej (parametr a_0) dla potrzeb statycznej próby rozciągania dla uzyskanych złączy spawanych (str. 129)?
- 8) Dla próbki R1.2 stwierdzono wyraźnie wyższą wartość wytrzymałości oraz inny przebieg krzywej rozciągania (rys. 155). Czym Doktorant to uzasadni?
- 9) Doktorant proponuje jako rozwiązanie technologiczne wykorzystanie metody LBW. Metoda ta charakteryzuje się dużymi wymaganiami dotyczącymi pracy w warunkach terenowych. Należą do nich m.in. wymagania wydzielonej, kontrolowanej strefy pracy ze względu na promieniowanie wysokoenergetyczne, łatwość destabilizacji procesu przez warunki środowiskowe, a także wysokie wymagania dotyczące dopasowanie elementów, itd. W jaki sposób Autor chce zintegrować technologię ze środowiskiem przemysłowym, aby móc ją stosować w warunkach terenowych?

3. WNIOSKI I OCENA KOŃCOWA

Na podstawie przeprowadzonej analizy przedłożonej mi do oceny dysertacji doktorskiej należy stwierdzić, że jej tematyka dotyczy istotnych zagadnień technologicznych o znaczeniu praktycznym. Autor podjął się w niej opracowania technologii spawania rur stalowych z naniesioną powłoką na bazie poliuretanu o wysokiej odporności na ścieranie i obojętnej pod względem chemicznym. Pomimo pewnych braków wykazanych w recenzji, **praca stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.**

Praca wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktoranta w zakresie prac prowadzonych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa. Autor pracy wykazuje dużą wiedzę praktyczną w problematyce, której poświęcił rozprawę doktorską. Praca zawiera poznawcze wyniki badań, które wnoszą nowe elementy wiedzy w zakresie technologii spajania rur wykonanych z dwóch różnych materiałów o zróżnicowanej odporności na temperaturę. **Istotne znaczenie w mojej ocenie ma aplikacyjny (wdrożeńiowy) charakter realizowanej pracy z zakresu technologii spajania.** O wartości wiedzy decyduje jej praktyczna przydatność. W mojej opinii uwzględniam fakt, że zgodnie z pkt. 3 Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, rozprawę doktorską może stanowić praca technologiczna, wdrożeniowa.

Mgr inż. Sławomir Topór w celu udowodnienia postawionych tez i celu wytworzył materiał do badań, a następnie przeprowadził badania doświadczalne według przemyślanego planu badawczego. **Samodzielne wytworzenie oraz przemyślany plan badawczy to zdecydowanie mocne strony recenzowanej pracy.** Badania były zrealizowane wieloetapowo, a każdy

z zakończonych etapów pozwalał na podsumowanie uzyskanych wyników i wdrożenie kolejnych założeń w kolejnym etapie. Sposób realizacji badań, które zrealizowane zostały zgodnie ze sztuką inżynierską oraz z wykorzystaniem różnych metod badawczych pozwala stwierdzić, że **Doktorant opanował umiejętność samodzielnego prowadzenia badań eksperymentalnych**. Interpretacja uzyskanych wyników, choć dość ogólna, to jednak pozwoliła Doktorantowi na uzyskanie odpowiedzi na sformułowaną w pracy tezę. Uzyskane wyniki stanowią uzupełnienie aktualnego stanu wiedzy oraz wnoszą nowe treści poznawcze do dyscypliny Inżynieria Materiałowa, a także pokrewnej inżynierii mechanicznej.

W kontekście powyższych przesłanek dysertacja doktorska Pana mgr inż. Sławomira Topór p.t. *"Opracowanie technologii wytwarzania i spawania rur stalowych z trudnościeralnymi wkładkami kompozytowymi do zastosowań w transporcie hydraulicznym lub pneumatycznym mediów powodujących ścieranie oraz występowanie korozji"* spełnia ustawowe kryteria określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa o dopuszczenie mgr inż. Sławomira Topór do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz publicznej obrony jego rozprawy doktorskiej.

Prof. Marzena Lachowicz

/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)