

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Szmula
pt. „Procesy inicjowane udarem zachodzące w stalach o różnych mikrostrukturach
przeznaczonych na elementy konstrukcji maszyn”

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Zastępcy Dyrektora Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. Aleksandra Krupkowskiego Polskiej Akademii Nauk Pana dr. hab. inż. Macieja Szczerby, prof. Instytutu, nr IMIM/DP/215/2021 z dnia 5 lipca 2021 r.

1. Wstęp

Wymagania stawiane nowoczesnym materiałom konstrukcyjnym motywują zespoły badawcze na całym świecie do prac zmierzających zarówno do modyfikacji istniejących, jak i projektowania nowych materiałów mogących spełnić coraz większe oczekiwania konstruktorów. Spełnienie wszystkich wymagań przez jeden materiał jest często niemożliwe, stąd potrzeba poszukiwania możliwości łączenia materiałów o różnych właściwościach użytkowych i strukturze. Jedną z metod realizacji tego celu jest platerowanie wybuchowe umożliwiające wytwarzanie nowoczesnych, warstwowych kompozytów metalowych. Uzyskiwane tą drogą bimetale, a także kompozyty wielowarstwowe, posiadają unikalne własności konstrukcyjne, takie jak m.in: duża wytrzymałość, odporność balistyczna czy odporność korozyjna. Usytuowanie polskich ośrodków naukowo-badawczych w awangardzie jednostek zajmujących się tematyką wybuchowego platerowania to bezsprzecznie zasługa profesjonalizmu i aktywności w realizacji innowacyjnych procesów wytwórczych firmy ZTW EXPLOMET Gałka, Szulc sp. jawna, która stworzyła warunki techniczne i logistyczne do przemysłowego wytwarzania tego typu wyrobów. Firma ta jednocześnie systematycznie udoskonala swoje zaplecze badawczo-rozwojowe zapewniając tym samym warunki do jeszcze lepszego rozwoju i buduje poziom kompetencji odpowiadający naukowym partnerom. Rozwój technologii wybuchowego platerowania umożliwia wytwarzanie materiałów warstwowych dedykowanych różnorodnym gałęziom przemysłu, jednak realizacje konstrukcji o złożonych kształtach są ciągle sporadyczne z uwagi na ograniczenia

technologiczne w zakresie ich łączenia. Na tej niwie w ostatnich latach kształtuje się niezwykle istotny obszar aktywności naukowej leżący u podstaw rozwoju nowoczesnych rozwiązań inżynierskich a obejmujący prace nad nowymi, innowacyjnymi technikami spajania materiałów warstwowych. Skuteczna ich implementacja w praktyce przemysłowej wymaga podjęcia badań podstawowych i stosowanych służących wyjaśnieniu zjawisk towarzyszących poszczególnym procesom spajania i właściwościom użytkowym tego typu połączeń.

W świetle powyższego, podjęcie w recenzowanej pracy doktorskiej próby opracowania nowej technologii spawania stali platerowanej wybuchowo tytanem, pozwalającej na udoskonalenie stosowanego dotychczas procesu wytwarzania aparatury chemicznej i procesowej przeznaczonej do pracy w agresywnych chemicznie środowiskach oraz zwiększenie jej jakości użytkowej uważam za w pełni uzasadnione.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Szmula składa się z 5 rozdziałów, wykazów literatury i przywołanych norm oraz sześciu załączników zawierających w przeważającej części tabelaryczne zestawienia składu chemicznego, właściwości mechanicznych i odporności korozyjnej materiałów wyjściowych oraz spawalniczych materiałów dodatkowych. Na podkreślenie zasługuje treść załącznika 6 poświęconego opisowi procesu zgrzewania wybuchowego w aspekcie platerowania stali niestopowej tytanem. Załącznik ten, liczący wraz z wykazem literatury uzupełniającej 12 stron, zawiera charakterystykę przemysłowego procesu wytwarzania materiałów warstwowych platerowanych tytanem. Praca na 197 stronach jest bogato ilustrowana rysunkami i fotografiami struktur, próbek przed i po badaniach oraz stanowisk badawczych wykorzystywanych podczas badań własnych. Łącznie w rozprawie zamieszczono 114 rysunków i 28 tabel.

We wprowadzeniu, stanowiącym rozdział pierwszy rozprawy liczący 42 strony, w praktyce zamieszczono przegląd literatury służący wyjaśnieniu tematyki doktoratu oraz przedstawieniu obecnego stanu wiedzy. Osiągnięto to dokonując podziału całości opisu na komplementarne części poświęcone: zastosowaniom materiałów platerowanych wybuchowo w budowie aparatury chemicznej, odporności korozyjnej tytanu i jego stopów, obróbce postprocesowej i spawaniu stali platerowanej wybuchowo tytanem oraz zjawiskom dyfuzji i powstawania faz międzymetalicznych podczas realizacji tych procesów. Autor po zidentyfikowaniu nielicznych przypadków węzłów spawanych stosowanych w budowie

aparatury procesowej z wykorzystaniem materiałów platerowanych, zgłębnemu opisowi poddał technologie spawalnicze stosowane w procesie łączenia stali platerowanej wybuchowo tytanem. Dokonany w tej części pracy szczegółowy opis najchętniej wykorzystywanej obecnie, opracowanej ponad 30 lat temu technologii łączenia metodą lutowanych wkładek stanowi wstęp do krytycznej oceny opisywanych w literaturze procesów spawalniczych bezpośrednich i z zastosowaniem materiałów pośrednich dedykowanych materiałom platerowanym. Ograniczając przedmiot analizy do stali platerowanej tytanem opisane zostały aktualne wyniki badań, w głównej mierze strukturalnych, złączy spawanych wykonanych metodami GMAW i GTAW. Powołując się na 24 prace, w przeważającej części chińskich i rosyjskich autorów z ostatnich 10 lat, wskazano na złożoność problemu spajania tego typu platerów i konieczność stosowania w opisanych przypadkach specjalnego podejścia inżynierskiego oraz niekonwencjonalnych technologii spawalniczych. Dopelnienie przeglądu publikacji dotyczących spajania platerów stal-tytan stanowi prezentacja wybranych wyników badań złączy zrealizowanych za pomocą wiązki promieniowania laserowego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej Doktorant zdecydował się na opracowanie podsumowania, co z pewnością wpłynęło pozytywnie na ciągłość logiczną i zachowanie prawidłowej struktury pracy. W podsumowaniu wskazano jednoznacznie na brak opracowań pozwalających na implementację jednego z konwencjonalnych procesów spajania w konstrukcjach inżynierskich ze stali platerowanej wybuchowo tytanem. Przedstawiono również syntetyczne uzasadnienie konieczności pilnego podjęcia prac nad opracowaniem nowej technologii spawania złącza doczołowego plateru tego typu. Doktorant słusznie identyfikuje tę konieczność jako wyzwanie z punktu widzenia możliwości wytwarzania nowoczesnej aparatury chemicznej i procesowej, co legło u podstaw sprecyzowania w następnym, drugim rozdziale tezy i celów rozprawy. Należy podkreślić, że już we wprowadzeniu Doktorant wspomina o celu użytecznym pracy, rozumianym jako poszerzenie, w wyniku realizacji pracy, możliwości aplikacyjnych stali platerowanej wybuchowo tytanem. W tej części rozprawy sformułowano kolejne cele, wśród których wyróżnić należy cel nadrzędny (brzmienie oryginalne) stanowiący opracowanie technologii spawania stali platerowanej wybuchowo tytanem oraz wykazy celów technologicznych i naukowych. Wyszczególniono cztery cele technologiczne obejmujące:

- 1) Wyznaczenie optymalnych parametrów procesów wyżarzania odprężającego stali platerowanej wybuchowo tytanem w procesie wytwarzania aparatury procesowej.
- 2) Określenie wpływu wyżarzania odprężającego na odporność korozyjną tytanu poddanego uprzednio procesowi zgrzewania wybuchowego.

3) Opracowanie technologii spawania stali platerowanej tytanem dotyczących:

- napraw tytanu stanowiącego materiał nakładany na stal w procesie zgrzewania wybuchowego,
- wykonywania spawanych złączy doczołowych stali platerowanej wybuchowo tytanem

i trzy cele naukowe w brzmieniu:

- 1) Określenie wpływu technologicznych obróbek cieplnych stali platerowanej wybuchowo tytanem na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne złącza zgrzewanego wybuchowo i odporność korozyjną materiału nakładanego.
- 2) Określenie wpływu zastosowanych parametrów procesu napawania naprawczego materiału nakładanego na przemiany fazowe w złączu zgrzewanym wybuchowo oraz jego właściwości mechaniczne.
- 3) Określenie wpływu zastosowanych technologii spawalniczych na mikrostrukturę i uzyskiwane właściwości mechaniczne oraz odporność korozyjną doczołowych złączy spawanych stali platerowanej wybuchowo tytanem.

Uwzględniając fakt sformułowania w p. 3.3.2 rozprawy kolejnego, głównego celu technologicznego, w brzmieniu analogicznym do wspomnianego wcześniej celu nadrzędnego, nie sposób nie odnieść wrażenia pewnego rozproszenia zapisu postawionego problemu badawczego. Oczywiście treść tezy oraz celów technologicznych i naukowych w pełni ujmują zamierzenia Doktoranta, nie mniej zalecana precyzja ich formułowania skłania do dyskusji nad syntezą części zapisów i wydzieleniem celów: naukowego i utylitarnego, które w przypadku doktoratu wdrożeniowego często są osiąmane poprzez rozwiązanie konkretnego problemu technologicznego. W praktyce Doktorant podjął się opracowania technologii spawania stali platerowanej wybuchowo tytanem i napawania naprawczego materiału nakładanego plateru. Aspekt naukowy badań służących osiągnięciu celu praktycznego obejmuje zbadanie wpływu zastosowanych technologii spawalniczych i dodatkowych obróbek cieplnych na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i odporność korozyjną wytworzonych złączy. W części wstępnej rozprawy zrezygnowano z przedstawienia zakresu pracy, co w pewnym stopniu utrudnia dalszą ocenę realizacji zaplanowanego obszaru badawczego.

Ogólny pogląd na planowany zakres badań można sobie wypracować podczas literatury rozdziału trzeciego zatytułowanego *Metody eksperymentalne*. Rozdział ten poświęcono identyfikacji zarówno przedmiotu badań jak i zastosowanych podczas realizacji pracy metod i technik badawczych. W tej części pracy, na 18 stronach, scharakteryzowano materiały użyte

do badań i obróbki cieplnej, którym poddano dwa plater: stal SA 516 Gr.60 MT+N/tytan techniczny Ti Gr. 1 o grubości (14+2) mm i stal P265 GH+N/tytan techniczny Ti Gr. 1 o grubości (65+5) mm. Plater te należą do grupy wyrobów komercyjnych firmy ZTW EXPLOMET Gałka, Szulc sp. jawna i parametry procesu zgrzewania wybuchowego stanowią tajemnicę przedsiębiorstwa. Dla celów poznawczych w rozprawie podjęto się rozpatrzenia wpływu obróbek cieplnych przewidzianych w normach przemysłowych konstrukcji spawanych z wymienionych dwóch gatunków stali na strukturę, właściwości mechaniczne i odporność korozyjną wytworzonych platerów. Łącznie rozpatrzono od jednej do czterech obróbek cieplnych w postaci wyżarzania odprężającego plateru ze stalą SA 516 Gr.60 i jedną lub dwie obróbki cieplne plateru ze stalą P265 przeprowadzone po zgrzewaniu wybuchowym. Jako pierwsze zaplanowano badania mające na celu opracowanie technologii napawania naprawczego materiału nakładanego, wykorzystując wytwarzany przez ZTW EXPLOMET plater stal SA 516 Gr.60/tytan Ti Gr. 1 po wygrzewaniu odprężającym i prostowaniu na drodze walcowania. Napawanie wykonano metodą GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ze zmechanizowanym podawaniem materiału dodatkowego w postaci drutu TA1 o średnicy 0,8 mm. Dwanaście wybranych zestawów parametrów procesu napawania poszczególnych napoin naprawczych ujęto w formie tabelarycznej. Oceny jakości napoin dokonano w oparciu o wytyczne normatywne podczas badań nieniszczących, mikrostrukturalnych i gięcia bocznego. Niestety również w tym przypadku pełne dane dotyczące najkorzystniejszych parametrów napawania zostały zastrzeżone ze względu na *know-how* pracodawcy Doktoranta.

Z uwagi na nakreślone wcześniej cele rozprawy znacznie większy nacisk w dalszej części rozdziału trzeciego położono na opis parametrów procesu realizacji złącza doczołowego. Do tego celu wykorzystano plater stal SA 516 Gr.60/tytan Ti Gr. 1 po wygrzewaniu odprężającym i prostowaniu na drodze walcowania. Wykorzystując dane literaturowe opracowano zestaw parametrów procesu spawania metodą GTAW składający się z 13 ściegów, przy czym dwa pierwsze ściegi w obszarze warstwy tytanu i złącza zgrzewanego wybuchowo wykonano na stanowisku zmechanizowanym z wykorzystaniem odpowiednio: drutu TA1 o średnicy 0,8 mm i drutu SG-CuSi3 o średnicy 0,8 mm, a pozostałe ściegi wykonano ręcznie stosując chłodzenie w kąpieli wodnej, przy czym ściegi trzeci i czwarty wykonano z wykorzystaniem drutu Ni200 o średnicy 0,8 mm, a wszystkie pozostałe z drutu proszkowego MEGAFIL®710M o średnicy 1,2 mm. Wprowadzając zmiany warunków spawania dokonano szeregu prób realizacji złączy, przy czym w rozprawie opisano szczegółową procedurę układania ściegów jedynie dla wariantu nie spełniającego wymogów normatywnych. Sposób wykonania złącza, dla którego uzyskano zadawalające wyniki badań

nieniszczących, mikrostruktury, właściwości mechanicznych i odporności korozyjnej spoiny, strefy wpływu ciepła oraz materiału rodzimego w warstwie materiału nakładanego nie został ujawniony ze względu na *know-how* pracodawcy Doktoranta. Dalszy opis zamieszczony w niniejszym rozdziale dotyczy metodyk badawczych i wykorzystywanej aparatury oraz urządzeń w postaci: mikroskopów elektronowych – skaningowego i transmisyjnego, mikroskopu świetlnego, dyfraktometru rentgenowskiego, mikrotwardościomierza, maszyn wytrzymałościowych do osiowego rozciągania, statycznego ścinania i zginania bocznego, młota Charpy'ego oraz potencjostatu/galwanostatu zastosowanego podczas badań korozyjnych.

Zasadniczą część rozprawy stanowi rozdział czwarty zatytułowany *Wyniki badań*, liczący 93 strony. W rozdziale tym przedstawiono, zachowując logiczny układ, wyniki szeroko nakreślonych badań, które można podzielić na trzy obszary badawcze:

- 1) Wpływ obróbki cieplnej stali platerowanej wybuchowo tytanem na mikrostrukturę strefy rozdziału złącza zgrzewanego, właściwości mechaniczne tego złącza oraz odporność korozyjną materiału nakładanego po zrealizowaniu poszczególnych obróbek cieplnych.
- 2) Dobór parametrów napawania naprawczego metodą GTAW stali platerowanej wybuchowo tytanem.
- 3) Struktura, właściwości mechaniczne i odporność korozyjna połączenia spawanego ze złączem doczołowym stali platerowanej wybuchowo tytanem.

W praktyce realizacja powyższych punktów posłużyła do osiągnięcia celu użytecznego rozprawy, tj. opracowania technologii spawania stali platerowanej wybuchowo tytanem i napawania naprawczego materiału nakładanego plateru. Za dyskusyjne należy jednak uznać tytuły punktów 4.2 i 4.3 rozprawy zaczynające się od sformułowań: „Badania technologii napawania ...” i „Badania technologii spawania ...”.

Doktorant dążąc do jednoznacznej identyfikacji efektów zastosowania technik spawalniczych w odniesieniu do wymienionych powyżej właściwości użytkowych rozpatrywanych platerów przeprowadził szereg obszernych i zarazem bardzo szczegółowych badań mikrostrukturalnych *ex-situ* z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej skaningowej i transmisyjnej oraz badań *in-situ* przed i po obróbce cieplnej z wykorzystaniem TEM. Pewnym utrudnieniem dla czytelnika w usystematyzowaniu wyników badań zawartych w niniejszej części rozprawy jest przyjęty układ numeracji. W wyniku wprowadzenia nagłówek wyróżniających opisy wyników badań *in-situ* i *ex-situ*, osiągnięto w dwóch przypadkach jednakowe ich brzmienie: „Badania obróbki cieplnej *ex-situ* z wykorzystaniem

TEM” (str. 75 i str. 82). Nie ujmuje to wartości prezentowanych wyników badań strukturalnych przed i po obróbce cieplnej wykonanych bardzo dużym nakładem pracy i wnoszących wiele cennych ustaleń do obecnego stanu wiedzy w zakresie wybuchowego zgrzewania stali i tytanu. Warty podkreślenia jest komplementarny opis uzyskanych wyników badań własnych i wyników publikowanych w przywołanych 26 pracach opublikowanych w przeważającej części w ostatnich siedmiu latach. Zachowując analogiczny układ, w dalszej części rozprawy opisane zostały wyniki badań właściwości mechanicznych platerów uzyskane podczas testów gięcia bocznego, ścinania pomiarów mikrotwardości w kierunku poprzecznym do strefy rozdziału tytan-stal po serii obróbek cieplnych. Jako niezwykle istotne, na tym etapie badań plateru stal-tytan, należy uznać określenie zmian mikrostruktury materiału nakładanego w postaci Ti Gr. 1 i związanych z nimi właściwości korozyjnych po zrealizowaniu poszczególnych obróbek cieplnych. Te ostatnie określono wykorzystując metody: potencjodynamiczną oraz elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej. Badania te należy uznać za pionierskie, a uzyskane wyniki potwierdziły pozytywny wpływ obróbki cieplnej na odporność korozyjną nakładanego tytanu technicznego. W dostępnej literaturze nie napotkano również opisu zmian mikrostruktury złącza zgrzewanego wybuchowo zachodzących podczas napraw tej warstwy tytanu metodą napawania. Tematyka oddziaływania cyklu cieplnego napawania na obszar złącza zgrzewanego została podjęta przez Doktoranta, a uzyskane wyniki wskazują na skuteczne ustalenie parametrów tego procesu, co zaowocowało opracowaniem technologii napawania naprawczego stali platerowanej wybuchowo tytanem o relatywnie małej grubości równej 2 mm.

Opisane wyniki badań strukturalnych, właściwości wytrzymałościowych i właściwości korozyjnych materiału nakładanego uwzględniające obecność napoin poprzedzają część pracy poświęconą opracowaniu technologii spawania złącza doczołowego rozpatrywanego plateru. Obszerny zakres badań służących osiągnięciu tego celu należy uznać jako węzłowy, korespondujących bezpośrednio z tytułem rozprawy. Doktorant na 43 stronach, dokonując doraźnych powołań na 24 publikacje, przeprowadza szczegółową analizę mikrostruktury charakterystycznych stref doczołowego złącza spawanego w świetle zidentyfikowanych zjawisk zachodzących podczas procesu spajania. Szczegółowe obserwacje i pomiary z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej oraz dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD) zaowocowały ujawnieniem szczegółów budowy tychże złączy. Analizę strukturalną uzupełniono o interesujące wyniki badań mikrotwardości, przełomów próbek po badaniach właściwości mechanicznych oraz odporności korozyjnej, analogicznych jak w przypadku opisanych wcześniej badań wpływu zgrzewania wybuchowego i obróbki cieplnej na

odporność korozyjną materiału nakładanego. Przedstawioną analizę mikrostrukturalną należy ocenić jako wnikliwą i wartościową, opartą na bardzo dobrze przygotowanej i opracowanej dokumentacji fotograficznej powierzchni zgładów próbek i preparatów. Ten etap realizacji rozprawy wzbogacono wynikami badań radiograficznych wymaganych w opracowaniach normatywnych. Pozbawione imperfekcji struktury złącza wykazały wysoką jakość potwierdzoną podczas prób gięcia bocznego, statycznych prób rozciągania, testów udarności oraz badań odporności korozyjnej w warstwie materiału nakładanego. Podkreślić przy tym należy z pełną mocą bogactwo zastosowanych metod i technik badawczych. Ostatecznie Doktorant stwierdza, że opracowana technologia realizacji doczołowego złącza spawanego stali platerowanej wybuchowo tytanem wraz z zastosowaną obróbką postprocesową w postaci wyżarzania odprężającego może być zastosowana w procesie technologicznym wytwarzania aparatury chemicznej i procesowej. Znaczenie tego osiągnięcia jest tym większe, że na bazie przedstawionego w Tabeli 16 zestawienia 12 prac opublikowanych w ciągu ostatnich pięciu lat i poświęconych tej samej tematyce, dotychczas żadnemu z zespołów takiego wyniku nie udało się osiągnąć.

Opisane z należytą starannością wyniki badań zapewniły możliwość wnioskowania, które Doktorant przedstawił w rozdziale piątym. Zamieszczenie zwięzłego podsumowania przed sformułowaniem wniosków ułatwia czytelnikowi możliwość płynnego zapoznania się z wnioskami końcowymi.

3. Ocena rozprawy

Ustawiczny rozwój technologii wytwarzania materiałów dostosowanych do rosnących wymagań różnorodnych gałęzi przemysłu musi iść w parze z rozwojem technologii umożliwiających ich łączenie. Możliwości wykorzystania stali platerowanej wybuchowo tytanem w budowie aparatury chemicznej i procesowej również ściśle zależą od rozwiązania problemów spawalniczych związanych z realizacją konkretnych odmian konstrukcyjnych złączy spawanych. Jak zasygnalizowano wcześniej, problem ten nie został do tej pory rozwiązany w stopniu zadowalającym w odniesieniu do stali platerowanej wybuchowo tytanem, zatem przedłożona do recenzji rozprawa ma wymiar nie tylko teoretyczny, ale i praktyczny, co powinno cechować doktorat wdrożeniowy. Całość pracy pod względem merytorycznym zasługuje na pozytywną ocenę i nie budzi istotnych zastrzeżeń. Krytyczne uwagi dotyczące obszaru merytorycznego rozprawy wynikają przede wszystkim z woli uściślenia niektórych zagadnień, mogących stanowić przyczynek do dyskusji podczas obrony recenzowanej rozprawy i dotyczących następujących problemów:

- 1) Nieustający rozwój cywilizacji technicznej stale dostarcza nowych technik spajania stanowiących oręż w wojnie z niespawalnością. Szereg trudności w wykonywaniu połączeń spójnościowych platerów stal-tytan z wykorzystaniem tradycyjnych technik spawania coraz częściej skłania konstruktorów na przykład do prac nad implementacją technik innowacyjnych, na przykład FSW (ang. friction stir welding) oraz spawania wiązką lasera. Warto podkreślić, że metoda FSW pozwala na ograniczenie tworzenia się faz międzymetalicznych. W przypadku spajania materiałów warstwowych, w których poszczególne warstwy istotnie różnią się temperaturami topnienia, np. stal i tytan, racjonalnym wydaje się zastosowanie hybrydowej techniki spajania polegającej na wykonaniu złącza techniką FSW warstwy materiału odznaczającego się niższą temperaturą topnienia, a następnie wykonanie złącza wiązką promieniowania laserowego materiału odznaczającego się wyższą temperaturą topnienia. Co legło u podstaw wyboru zastosowanych metod GMAW i GTAW, pociągających za sobą znaczące ryzyko imperfekcji złącza i obecności kruchych faz intermetalicznych?
- 2) Z uwagi na dostarczenie do badań plateru stal SA 516 Gr.60/Ti Gr.1 o grubości (14+2) mm w stanie po zgrzewaniu wybuchowym i pierwszej obróbce cieplnej oraz prostowaniu, w celu określenia wpływu obróbki cieplnej na zmiany w mikrostrukturze strefy złącza po wybuchowym zgrzewaniu wykorzystano fragmenty plateru stal P265/Ti Gr.1 o grubości (65+5) mm. Materiał ten poddano badaniom wpływu obróbki cieplnej na zmiany w mikrostrukturze strefy złącza zgrzewanego oraz zmiany właściwości korozyjnych po pierwszej i drugiej obróbce cieplnej. W pracy zabrakło jednak krytycznej oceny takiego podejścia i komplementarnej oceny obserwowanych zmian badanych właściwości obydwóch laminatów.
- 3) Uzyskane wyniki badań właściwości mechanicznych połączeń spawanych badanego laminatu stal niskowęglowa-tytan jednoznacznie wskazują na zadawalające efekty zastosowania opracowanej technologii spawania. Wyniki te pozwalają jednak na wnioskowanie o skuteczności realizacji tego typu złączy użytkowanych w warunkach obciążeń statycznych. Zastosowanie opracowanej technologii spawania pociąga za sobą konieczność zbadania zmęczeniowego zachowania się uzyskanych połączeń ze szczególnym uwzględnieniem wpływu różnorodnych czynników na ich zmęczeniowe pękanie. Dotyczy to zwłaszcza czynników strukturalnych, geometrycznych, temperaturowych i naprężeniowych. Przełomy zmęczeniowe są wyjątkowo wartościowym źródłem informacji o charakterze poznawczym i użytkowym. W pracy zabrakło choćby pilotażowych badań właściwości zmęczeniowych tego typu połączeń.

Pewne uwagi mogą również budzić kwestie o mniejszym znaczeniu, natury edytorskiej, a dotyczące na przykład:

- licznej grupy pojedynczych liter pozostawionych na końcach wierszy,
- kończenia punktów/podpunktów rysunkami (np.: rys. 1.2, rys. 1.7, rys. 1.10 i inne),
- anglojęzycznego opisu rysunku zaczerpniętego z literatury (rys. 1.12),
- wprowadzenia niepraktykowanej, mieszanej numeracji w postaci „3.1)” – str. 51⁸ i „3.2)” - str.51¹⁰,
- pozostawienia tytułu podpunktu, jako ostatniego wiersza na stronie (np.: str. 54, str. 120),
- przenoszenia części tabeli na następną stronę (np. Tabela nr 9 na str. 126-127).

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy w tekście, które przekazano bezpośrednio Autorowi do wykorzystania podczas przygotowywania publikacji.

Przytoczone uwagi nie wpływają na ogólnie wysoką ocenę poziomu recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Autor wykazał się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych oraz bardzo dużą wiedzą w zakresie nowoczesnych technologii spajania metali, a do jego oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) Ocenę wpływu czasu trwania wyżarzania odprężającego na grubość strefy reakcji dyfuzyjnych w obszarze złącza stal niskowęglowa-tytan uzyskanego metodą wybuchową.
- 2) Potwierdzenie roli węglików tytanu, powstałych w wyniku dyfuzji węgla z materiału bazowego, jako blokady dyfuzyjnej ograniczającej dalsze niekorzystne procesy dyfuzyjne w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego procesu spawania badanego plateru.
- 3) Ustalenie wpływu zidentyfikowanych w pracy poprawnych parametrów wyżarzania odprężającego na mikrostrukturę, naprężenia własne i wybrane właściwości mechaniczne wytworzonego plateru stal niskowęglowa-tytan, w tym: mikrotwardość, wytrzymałość na ścinanie i wytrzymałość na zginanie oraz na odporność korozyjną.
- 4) Opracowanie technologii napawania naprawczego materiału nakładanego stali niskowęglowej platerowanej wybuchowo tytanem o grubości 2 mm zapewniającej uzyskanie napoin o wysokiej jakości, nie wywierających negatywnego wpływu na właściwości wytrzymałościowe plateru.

- 5) Określenie wpływu zastosowanych metod spawania GTAW i GMAW wraz z postprocesowym wygrzewaniem odprężającym na mikrostrukturę, wybrane właściwości mechaniczne i odporność na korozję doczołowych złączy spawanych rozpatrywanego plateru.
- 6) Skuteczna implementacja wymienionych powyżej metod spawania w opracowanym procesie technologicznym spawania doczołowego złącza stali platerowanej wybuchowo tytanem implikująca nowe możliwości zastosowania tego typu platerów w budowie aparatury chemicznej i procesowej.

4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej wyżej oceny rozprawy Pana mgr inż. Marcina Szmula wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- Doktorant posiada umiejętność zaprojektowania złożonych zadań naukowych i zagadnień praktycznych oraz ich realizacji nowoczesnymi metodami,
- podjęte w rozprawie trudne zadania zostały zrealizowane na wysokim poziomie,
- przeprowadzone analizy skomplikowanych zjawisk, opracowanie wyników i forma wniosków nie budzą istotnych zastrzeżeń,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria materiałowa”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Marcina Szmula pt.: *„Nowe technologie spawania stali platerowanej wybuchowo tytanem stosowanej w budowie aparatury procesowej”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku oraz dodatkowo Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Jednocześnie wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. Aleksandra Krupkowskiego Polskiej Akademii Nauk o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych badań, poziom naukowy oraz potencjał aplikacyjny rozprawy doktorskiej wnioskuję o jej wyróżnienie.

