

Prof.zw. dr hab. inż. Zbigniew Stradomski
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Politechnika Częstochowska
Armii Krajowej 19
42-200 Częstochowa

Częstochowa 2017-07-29

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Chudzińskiego pod tytułem „**Analiza własności strukturalnych i mechanicznych połączeń spawanych w obiektach wielkogabarytowych ze stali superdupleks**” wykonanej pod opieką promotora Pana dra hab. inż. Dariusza Borońskiego, prof. nadzw. UTP we współpracy z Panem dr inż. Krzysztofem Ciechackim jako Promotorem Pomocniczym, opracowana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy na podstawie pisma z dnia 21 czerwca 2017 roku, Pana Dziekana Prof. dr hab. inż. Janusza Semprucha.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROBLEMATYKI ROZPRAWY

Tematyka recenzowanej pracy wpisuje się w nurt aktualnych badań związanych z wdrażaniem do konstrukcji inżynierskich nowoczesnych materiałów, określanych mianem funkcjonalnych, o ściśle zdeterminowanych właściwościach i przeznaczonych do określonych zastosowań. Jest to obecnie dominujący trend zarówno w *inżynierii materiałowej i metalurgii*, dyscyplinach zajmujących się opracowywaniem nowych materiałów jak i *budowie i eksploatacji maszyn* wykorzystujących te tworzywa w projektowaniu maszyn i konstrukcji.

Stanowiąca przedmiot badań stal super duplex SAF 2507 (X2CrNiMoN25-7-4; 1.4410 wg EN-PN..) należy do grupy innowacyjnych, nieustannie modyfikowanych pod względem składu chemicznego i technologii wytwarzania materiałów odpornych na korozję, niezastąpionych w wielu gałęziach przemysłu, szczególnie energetycznego, okrętowego, petrochemicznego czy budowie magazynów i zbiorników dla mediów o wysokiej aktywności chemicznej. Korzystne właściwości mechaniczne i użytkowe, szczególnie stali ferrytyczno-austenitycznych (dupleks) zastępują wykonywane dotychczas z innych tworzyw elementy i konstrukcje, gwarantując znaczne wydłużenie czasu eksploatacji, obniżenie mocy napędów czy zmniejszenie gabarytów urządzeń oraz obniżenie ich masy. Ciągłe, jednym z podstawowych parametrów doboru materiałów przez konstruktorów jest ich cena, jednak dla wielu odbiorców o wiele istotniejszy jest całkowity okres eksploatacji LCC-Life Cycle Cost, decydujący o rzeczywistych kosztach materiałów, a uwzględniający również konserwacje i wymianę części oraz postojów i napraw elementów. Wysoka odporność erozyjno-korozyjna gwarantuje wyższą niezawodność elementów pomp odpowiedzialnych za 15% zużycia energii elektrycznej w Europie.

Należy dodać, że stopy żelaza, w tym głównie stal stanowią ciągle ponad 93% wszystkich produkowanych w świecie metali i nadal zużycie wyrobów stalowych na mieszkańca jest ważnym parametrem charakteryzującym ekonomiczny rozwój kraju, a truizmem, lecz wartym powtarzania jest fakt, że stopy żelaza są materiałami, które w dającej się przewidzieć perspektywie są nie do zastąpienia.

Uwzględniając powyższe przesłanki recenzent potwierdza zarówno aktualność jak i zasadność podjętej przez mgr inż. Marcina Chudzińskiego problematyki stanowiącej przedmiot badań recenzowanej pracy.

Chciałbym dodać, że ta problematyka badawcza jest mi szczególnie bliska gdyż od wielu lat zajmuję się optymalizacją mikrostruktury i właściwości użytkowych stali i staliw typu duplex.

2. OCENA WARTOŚCI MERYTORYCZNYCH PRACY

Praca doktorska mgr inż. Marcina Chudzińskiego ma charakter doświadczalny, z tradycyjnym dla tego typu opracowań układem, to znaczy studium literaturowym oraz częścią badawczą. Rozprawa obejmuje 126 stron druku, w tym 57 rysunków, 38 tabel oraz spisu bibliografii zawierającego 163 pozycje, wśród nich 3 współautorskie Doktoranta.

W obszernym obejmującym 40 stron studium literatury, Doktorant dokonał przeglądu najistotniejszych zagadnień ściśle związanych z tematyką rozprawy.

W rozdziale 1, po krótkim przeglądzie historycznym rozwoju stali duplex, Autor przedstawia koncepcję dysertacji opartą o specyficzne wymagania stawiane wielkogabarytowemu obiektowi magazynowemu wykonywanemu w warunkach poza warsztatowych, obejmującą wybór optymalnej technologii spawania oraz analizę wpływu określonego sposobu łączenia na mikrostrukturę i własności mechaniczne oraz korozyjne konstrukcji. Przedstawiony na rysunku 1 obszar zagadnień objętych rozprawą dobrze precyzuje i uzasadniania założenia badawcze i aplikacyjne.

Rozdział 2 zawiera charakterystykę stali ferrytyczno-austenitycznych (duplex) ze szczególnym uwzględnieniem przesłanek opracowywania coraz nowszych materiałów, obecnie już piątej generacji. W tej części przeglądu bibliograficznego przedstawiono również rolę i oddziaływanie składu chemicznego na właściwości użytkowe, a szczególnie odporność na korozję determinowaną równoważnikiem PRE. Szczególnie starannie, wsparte wynikami własnych badań i doświadczeń, opracowano zagadnienia dotyczące mikrostruktury stali i złączy spawanych oraz procesy wydzieleniowe związane z chłodzeniem lub cyklem cieplnym spawania, a decydujących o finalnych własnościach mechanicznych i technologicznych

produktu. Należyta uwagę poświęcono szczególnie szkodliwym wydzieleniom fazy σ , kruchości związanej ze spinodalnym rozpadem ferrytu oraz wieloaspektowej roli azotu, również w procesach spawania. Opracowane na podstawie danych literaturowych tabelaryczne zestawienia własności fizycznych, mechanicznych i odporności korozyjnej w odniesieniu do referencyjnego materiału jakim jest stal austenityczna pozwalają określić zakres zastosowań oraz warunki konkurencyjności stali dupleks. Podsumowaniem tego fragmentu opracowania jest analiza korzyści stosowania stali dupleks w aspekcie redukcji masy i związanych z tym kosztów materiałowych oraz trwałości eksploatacyjnej determinowanej zjawiskiem korozji wżerowej.

W rozdziale 3 dokonano przeglądu technologii szczególnie zalecanych do spawania stali dupleks. Problemem, który przez dziesiątki lat ograniczał szersze stosowanie tej grupy stali w konstrukcjach były ograniczenia spawalności metalurgicznej związane ze zmianami i przemianami strukturalnymi materiału rodzimego i dodatkowego, a będące wynikiem procesu spawania. Prezentując problem krystalizacji spoiny, procesy wydzieleniowe zachodzące w stalach dupleks w czasie chłodzenia oraz parametry energetyczne spawania determinowane energią liniową łuku i szybkością chłodzenia w określonych zakresach temperatur, ze szczególnym uwzględnieniem gatunku 2507, Doktorant potwierdził bardzo dobre przygotowanie teoretyczne do prowadzenia badań i prac aplikacyjnych.

Przedstawione w dalszej części tego rozdziału metody spawania wybrane zostały pod kątem możliwości ich wykorzystania do stali dupleks. Dostatecznie podstawowe wiadomości charakteryzujące wybrane procesy łączenia oraz zalety i wady prezentowanych metod okazały się jednak w pełni wystarczające do późniejszego, przedstawionego w rozdziale 4 wyboru technologii łączenia stali dupleks w produkcji wielkogabarytowych obiektów.

W rozdziale 4 Doktorant przybliżył szereg zagadnień technicznych związanych z budową wielkogabarytowych zbiorników magazynowych, a dotyczących rozwiązań konstrukcyjnych, budowlanych, spawalniczych oraz korzyści ekonomicznych wynikających z zastąpienia stali austenitycznej stalą typu dupleks. Uwzględniając redukcję grubości blach przy zastosowaniu stali superdupleks oraz specyfikę pozycji spawania w analizowanej konstrukcji, na podstawie licznych danych literaturowych, również własnych, w oparciu o 8 wybranych kryteriów (spawanie w warunkach pozawarsztatowych, pozycje przymusowe, stopień przemieszania spoiny z materiałem, jakość spoin, podatność na powstawanie wad, wydajność stapiania, koszt materiałów dodatkowych oraz obecność gazu osłonowego) zestawionych w tabeli 6, Doktorant dokonał kompleksowej oceny przydatności cytowanych wcześniej metod spawania. Przedstawione w rozdziale 5 podsumowanie przeglądu literatury

zawiera wnioski i spostrzeżenia, które ułatwiły Doktorantowi sformułowanie tez i celów pracy oraz określenie zakresu badań własnych.

Opracowany przegląd literatury oceniam bardzo wysoko zarówno pod względem merytorycznym jak i edytorskim i uważam, że rozdział ten spełnił swą rolę w opiniowanej pracy doktorskiej.

Część badawczą dysertacji rozpoczyna rozdział 6, w którym Doktorant przedstawił następujące tezy:

- Półautomatyczna metoda spawania stali superdupleks - drutem proszkowym w osłonie gazu aktywnego (136 wg PN-EN ISO 4063) jest odpowiednia i najbardziej wydajna do kompleksowego wykonania, w warunkach budowy, obiektu wielkogabarytowego typu płaszcz zbiornika magazynowego
- Istnieją ograniczone zakresy energii liniowej spawania metodą 136 pozwalające na uzyskanie struktur złączy spawanych stali superdupleks SAF 2507 w warunkach budowy i pozycjach przymusowych PC i PF (wg PN-EN ISO 6947) o własnościach mechanicznych spełniających kryteria zdefiniowane w normach związanych z budową i eksploatacją zbiorników magazynowych oraz założone cele o charakterze poznawczym i aplikacyjnym.
- Zbadanie mikrostruktury stref złączy spawanych metodą 136 blach ze stali superdupleks w odniesieniu do użytych energii liniowych spawania, a także własności mechanicznych złączy (twardości i udarności) w odniesieniu do ich mikrostruktury. Analizie tej poddano złącza wykonane w pozycjach spawania występujących w obiekcie typu płaszcz zbiornika magazynowego.
- Analiza wpływu spawania na zmianę własności mechanicznych i korozyjnych całego obiektu – zbadano i porównano ze sobą wytrzymałość na rozciąganie, udarność oraz odporność korozyjną całych złączy oraz materiału rodzimego.
- Porównanie wydajności spawania możliwymi do zastosowania według przeglądu literatury, metodami spawania: 141, 111 i 136. Analizę tę przeprowadzono dla złączy blach tej samej grubości wykonanych w tej samej, najbardziej czasochłonnej pozycji spawania PF.
- Praktycznym celem badań było sformułowanie zaleceń dotyczących projektowania technologii spawania obiektów wielkogabarytowych ze stali superdupleks wykonywanych w warunkach pozawarsztatowych metodą 136, uwzględniających

wpływ energii liniowej spawania i cyklu cieplnego na mikrostrukturę złącza oraz jego własności mechaniczne i korozyjne.

Celowo przytoczyłem zawarte w pracy zadania badawcze aby podkreślić niezmiernie szeroki i ambitny zakres prac eksperymentalnych zrealizowanych przez Doktoranta, a które obejmowały:

- wykonanie w kierunku wzdłużnym i poprzecznym do kierunku walcowania blach, wielościęgowych spoin wraz z rejestracją parametrów energetycznych umożliwiającą wyznaczenie energii liniowej spawania oraz szybkości chłodzenia złącza w zakresie kształtowania mikrostruktury w stali superdupleks dla metod 136, 111 i 141,
- przeprowadzenie metodami nieniszczącymi (optyczne, penetracyjne oraz radiograficzne) oraz makroskopowymi i próbą zginania ogólnospawalniczych badań jakościowych złącz,
- badania mikrostruktury wraz z mikroskopową komputerową analizą obrazu,
- dyfrakcję rentgenowską z analizą fazową,
- badania wytrzymałości na rozciąganie, twardości i udarności oraz fraktograficzne i mikrofraktograficzne z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej,
- badania korozyjne.

Opis obiektu badań, którymi były testowe złącza spawane doczołowo blach o grubości 8 mm wykonane w warunkach symulujących plac budowy płaszcza zbiornika magazynowego, program i metodykę badań oraz uzyskane wyniki przedstawione zostały w rozdziałach 7 i 8. Ten liczący 42 strony fragment opracowania zawiera zarówno szczegóły metodologiczne licznych prób i badań jak i obszerną dokumentację uzyskanych wyników, w tym rejestrowanych parametrów energetycznych spawania i cykli cieplnych spawania umożliwiającą wyznaczenie energii liniowej łuku oraz średnich szybkości chłodzenia w krytycznych dla stali superdupleks zakresach temperatury 1200-800°C i 1000-600°C, własności mechanicznych, udarności w temperaturze +20°C i -20°C, rentgenowskiej analizy fazowej, mikrostruktury i analizy obrazu oraz wyniki testów korozyjnych.

Uwagę recenzenta zwraca bardzo częste odwoływanie się nie tylko do norm, wytycznych i zaleceń producentów ale i danych literaturowych, umożliwiającą konfrontację i ocenę uzyskanych wyników.

Analizę wyników badań oraz podsumowanie i wnioski, stanowiące najważniejszy element każdej pracy badawczej przedstawiony został w 12 stronicowym opracowaniu w rozdziałach 9 i 10. Ograniczenie ilości podstawowego materiału badawczego do dobrze uzasadnionej danymi zestawionymi w tabeli 6 technologii spawania FCAW (136) oraz pozycji spawania PF i PC i grubości blachy 8 mm bazującej na kalkulacji zgodnej z normą PN-EN 14015 (dla założonych

wymiarów konstrukcji) znakomicie ograniczyło ilość wyjściowego materiału badawczego, który poddano kompleksowym i komplementarnym badaniom szczegółowym. Autor uchronił się przed poszerzaniem badań o techniki, często bardzo nowoczesne, które jednak niewiele wnoszą do założonej koncepcji badawczej. Zastosowany układ pomiaru i rejestracji parametrów energetycznych i termicznych spawania wykorzystujący miernik mocy HT 9022 oraz pirometr IR 2200-50D umożliwiły wyznaczenie najważniejszych dla dalszych badań parametrów – liniowej energii łuku oraz średnich szybkości chłodzenia w newralgicznych dla stali superdupleks zakresach temperatury 1200-800°C i 1000-600°C, decydujących o jakości i mikrostrukturze złącza, a więc i własnościach mechanicznych, technologicznych, korozyjnych złącza, a zrealizowanych w dalszych badaniach metodami weryfikacyjnymi jakości spin (wizualna, radiograficzna i penetracyjna), metalograficznymi – makro- i mikroskopowymi, fraktografii i mikrofraktografii elektronowej (SEM), dyfrakcji rentgenowskiej, badaniami własności mechanicznych i testami korozyjnymi.

Przykłady wyników badań zamieszczone w części doświadczalnej nie pozostawiają wątpliwości co do rzetelności Badacza.

Punktem wyjścia doboru parametrów energetycznych były dane literaturowe wskazujące, że rekomendowana ilość wprowadzanego ciepła winna mieścić się w przedziale 0,5-1,5 kJ/mm, a temperatury międzyścięgowej 100-200°C. Zastosowane w badaniach przymusowe pozycje spawania pionowa PF oraz naścienna PC wiążą się odpowiednio z najwyższą i najniższą energią liniową spawania, których wartości jak widać są bardzo ograniczone. Zastosowane wielkości napięcia łuku, natężenia prądu i prędkości spawania umożliwiły uzyskanie założonych parametrów energetycznych, co przedstawiono w tabeli 16 i na rysunkach 31 i 45. Zmiany w przebiegach cykli cieplnych spowodowały uzyskanie złączy o silnie zróżnicowanych mikrostrukturach, jednak jak przedstawiono w tabelach 34 i 35 oraz na rysunku 45 udział ferrytu, określony przy zastosowaniu komputerowej analizy obrazu i rentgenowskiej analizy fazowej, mieści się w przedziale 30-70%, a więc wartościach uznawanych za graniczne, ze względu na własności wytrzymałościowe i udurowienie oraz odporność korozyjną stali superdupleks. Zestawione na rysunkach 32 i 33 zależności energii liniowej łuku od szybkości chłodzenia w zakresach temperatury 1200-800°C i 1000-600°C umożliwiają prognozę ryzyka rozrostu ziarna w spoinie, wydzielania się fazy σ i zbyt wysokiego udziału ferrytu w SWC, zależnie od stosowanej energii liniowej. Zastosowany w pracy zakres energii liniowej łuku, przy temperaturze międzyścięgowej nie wyższej niż 100°C gwarantuje, uzyskanie właściwości mechanicznych spełniających wymagania norm z zakresu budowy i eksploatacji zbiorników magazynowych. Również analiza czasów i wydajności spawania metodami FCAW (136),

GTAW (141) i SMAW (111) wykazała, że w najtrudniejszej i najbardziej czasochłonnej pozycji spawania PF uzyskano w stosunku do referencyjnej - 136, odpowiednio ponad 10-cio i 5-cio krotnie wyższą wydajność spawania, co przedstawiono na rysunkach 56 i 57.

Recenzent uznaje, że przedstawione wyniki badań oraz ich analiza w pełni potwierdzają prawdziwość i realizację tez postawionych w dysertacji.

Równie istotnymi zarówno z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia są wnioski szczegółowe, zamieszczone na 105 i 106 stronie opracowania.

Walory użytkowe recenzowanej pracy doktorskiej zostały potwierdzone przez Doktoranta w końcowym fragmencie opracowania dotyczącym wykorzystania wyników i doświadczeń w budowie jednego z nielicznych w Europie powłokowego obiektu wielkogabarytowego ze stali superdupleks.

Równie interesujące są kończące opracowanie zamierzenia badawcze Doktoranta, wśród nich te dotyczące krzywych przejścia materiału w stan kruchy oraz bardziej kompleksowych badań korozyjnych.

Uważam, że opracowanie rozdziałów 9 i 10 stanowi potwierdzenie dojrzałości naukowej i badawczej Doktoranta, umiejętności przeprowadzenia właściwej, wnikliwej analizy uzyskanych wyników oraz zdolności formułowania wniosków i spostrzeżeń.

3. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Niezależnie od oceny wartości merytorycznych pracy i oryginalnych wniosków, recenzowana rozprawa nie jest pozbawiona niedociągnięć, z których część ma charakter dyskusyjny. Moje uwagi szczegółowe przedstawione zostaną chronologicznie, bez nadawania im szczególnej rangi:

Uwaga generalna. Doktorant nagminnie stosuje oznaczenia handlowe, firmowe czy cyfrowe w odniesieniu do przytaczanych w pracy gatunków stali duplex. Oczywiście systematyka cyfrowa jest znormalizowana i bardzo pomocna przy komputerowym przechowywaniu danych, katalogowaniu, dystrybucji, nie nawiązuje jednak do składu chemicznego, który w niniejszej dysertacji ma istotne znaczenie. Dlatego dla porządku (tak jak ja to zrobiłem na wstępie recenzji) szczególnie w pracy naukowej należało podać oznaczenie badanej stali wg PN-EN 10088-1:2007, tym bardziej że gatunek SAF 2507 ma swój odpowiednik w przytoczonej normie.

str. 14 – określenie „powłoka pasywna” jest niestosowane w inżynierii powierzchni. W odniesieniu do stali odpornych na korozję stosuje się określenie warstwa pasywna, które Doktorant używa np. na stronie 20, 34 ...

str. 16, 18, 21, 76, 77, 87-89, 94, 95 – brak oznaczenia składu odczynnika trawiącego stosowanego do ujawniania mikrostruktury w podpisie rysunków. Nie znalazłem tych informacji również w tekście. Sygnalizuję, że brak odczynnika trawiącego w opisie mikrostruktury jest istotnym uchybieniem, gdyż istnieje szereg odczynników, w różnicowany sposób ujawniających mikrostrukturę, również barwą. Uważam, że tak istotne dla badanej stali fazy z rysunku 9 (austenit wtórny, faza σ , azotki chromu) należało przedstawić przy większych powiększeniach. Uwzględniając formatowanie tekstu do druku należy stosować znaczniki długości umożliwiające nawet przy zmianach liniowych powiększenia określenie rzeczywistych wielkości. O ile jednak rysunek 9 z części literaturowej można traktować jako poglądowy, o tyle w badaniach mikrostruktury w dysertacji, istniała potrzeba wykonania bardziej dogłębnej analizy, którą być może zrealizowano, ale nie zamieszczono w opracowaniu. Jak Doktorant słusznie zauważył na stronie 20, w stalach superdupleks w porównaniu ze stalami duplex wydzielanie fazy σ następuje w znacznie krótszym czasie i stąd większe prawdopodobieństwo jej wystąpienia. Należało więc zastosować znacznie większe powiększenia, minimum 500x oraz zwrócić uwagę na granice ferryt/austenit, gdyż to właśnie na nich zarodkuje i wzrasta faza σ , stanowiąca jeden z podstawowych problemów w omawianych stalach. Podobny problem wystąpić mógł w komputerowej analizie obrazu, gdyż po binaryzacji drobne, często o dużej dyspersji, wydzielienia tej fazy, mogły zostać zliczone jako granice ziarna. Podkreślam, że błąd wyznaczonych udziałów obu podstawowych składników mikrostruktury byłby nieistotny, nie mający wpływu na wyznaczone przez Autora zależności, gdyż ilość powstającej w tych warunkach fazy σ jest nieznaczną, a jej rozkład selektywny, to jednak jej obecność zawsze wpływa na właściwości złącza, szczególnie odporność korozyjną,

str. 24 – myślę, że chodzi o „teksturę krystalograficzną”, a nie „strukturę krystalograficzną”,

str. 24 – skutkują także ... (błąd gramatyczny),

str. 96 – dywagacje odnośnie wytrzymałości spoiny oraz SWC są zbędne,

str. 101 – myślę, że zaostrzenie warunków badań korozyjnych w stosunku do zaleceń normy nie było najszcześniejsze, bo chociaż temperatura próby była o 20°C niższa od CPT badanej stali, to jednak 80–cio krotne różnice w roztwarzaniu materiału rodzimego i spoiny stawiają następny problem, wymagający pogłębionej analizy mikroskopowej przyczyn takiego stanu rzeczy.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską mgra inż. Marcina Chudzińskiego pod tytułem „**Analiza własności strukturalnych i mechanicznych połączeń spawanych w obiektach wielkogabarytowych ze stali superdupleks**” oceniam bardzo pozytywnie. Zawiera bardzo wartościowy i dobrze udokumentowany materiał badawczy mieszczący się w dyscyplinie *budowie i eksploatacji maszyn* oraz dowodzi sprawności eksperymentatorskiej Autora. Na wyróżnienie zasługuje duża wiarygodność uzyskanych wyników i ich właściwe opracowanie oraz analiza. Uważam, że założone cele pracy zostały zrealizowane, a wnioski zostały sformułowane prawidłowo i w pełni wynikają z uzyskanych wyników badań własnych.

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne nie zmieniają pozytywnej oceny dysertacji i jednoznacznie stwierdzam, że opiniowana praca doktorska spełnia wszelkie wymagania określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U. nr 65 z dnia 16 kwietnia 2003 roku poz. 595 z późniejszymi zmianami). Na tej podstawie stawiam wniosek do Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy o dopuszczenie mgra inż. Marcina Chudzińskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej pod tytułem „*Analiza własności strukturalnych i mechanicznych połączeń spawanych w obiektach wielkogabarytowych ze stali superdupleks*”

