

Prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki

Szczecin, 28 czerwca 2016

Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie
Instytut Inżynierii Materiałowej
Al. Piastów 19, 70 - 310 Szczecin

OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Krzysztofa Samsona

**pt: „Wpływ warunków spawania na właściwości
złączy różnoimiennych stali odpornych na korozję”**
wykonanej pod opieką naukową promotora
dr hab. inż. Jerzego Łabanowskiego, prof. PG

opracowana zgodnie z §6.3 oraz §6.4 Rozporządzenia MENiS z dnia 3 października 2014 roku na podstawie pisma Prodziekana ds. Nauki Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej Dr hab. inż. Marka Szkodo, prof. nadzw. PG z dnia 31 maja 2016 roku w oparciu o uchwałę Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej.

Charakterystyka ogólna rozprawy

Praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Samsona na temat „Wpływ warunków spawania na właściwości złączy różnoimiennych stali odpornych na korozję” stanowi próbę opisu wpływu materiału rodzimego i dodatkowego oraz parametrów spawania na spawalność stali austenitycznej ze stałą ferrytyczno-austenityczną - duplex.

Spawalność stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej i ferrytyczno-austenitycznej duplex może być ograniczona w różnym stopniu w zależności od rodzaju stali takimi czynnikami, jak:

- uczulenie na korozję międzykrystaliczną w złączach stali chromowo – niklowej austenitycznej,
- nieprawidłowa proporcja ferrytu i austenitu w stalach ferrytyczno - austenitycznych,
- odkształcenia cieplne wskutek wysokiego współczynnika rozszerzalności cieplnej stali chromowo – niklowych austenitycznej (1,5 x wyższego niż stali niestopowej) i małej przewodności cieplnej (2 x niższej niż stali niestopowej),
- wydzielanie się faz wtórnych mogących niekorzystnie wpływać na właściwości mechaniczne i korozyjne stali,
- pękanie na gorąco złączy spawanych.

Wymienione ograniczenia spawalności stali austenitycznej i ferrytyczno-austenitycznej - duplex uwarunkowane są składem chemicznym materiału rodzimego i dodatkowego oraz warunkami spawania i parametrami cyklu cieplnego spawania i mogą się sumować w przypadku złączy jednej stali z drugą.

Warunki i parametry spawania mają szczególne znaczenie w przypadku złożonego cyklu cieplnego spawania, jaki ma miejsce np.:

- w czasie spawania wielościegowego z dużą liczbą ściegów,
- procesów naprawczych wadliwych spoin,
- napawania regeneracyjnego.

W warunkach złożonego cyklu cieplnego spawania ukształtowana wcześniej spoina i strefa wpływu ciepła podlegać może bowiem wielokrotnym, złożonym i często nie do końca zbadanym przemianom struktury decydujących o właściwościach złącza.

Szybkość nagrzewania, szybkość chłodzenia i w konsekwencji czas, w jakim spoina i strefa wpływu ciepła znajduje się w ważnym ze względu na procesy wydzieleniowe przedziale temperatur 1200 – 500 °C zależne od energii liniowej spawania, temperatury międzyściegowej, wymiarów spawanego elementu, i warunków zewnętrznych, mają istotny wpływ na proces konstytuowania się końcowej mikrostruktury spoiny i strefy wpływu ciepła. Czynniki te mają też wpływ na takie parametry struktury spoiny i strefy wpływu ciepła stali, jak wielkość ziarna, rodzaj i udział składników fazowych, właściwości mechaniczne i fizykochemiczne złącza.

Ważnym problemem w obszarze zastosowania wysokostopowych stali odpornych na korozję w przemyśle okrętowym jest ich odporność na różne rodzaje korozji, szczególnie wżerową i naprężeniową, którym Doktorant poświęcił w rozprawie specjalną uwagę.

Istotnym ograniczeniem spawalności austenitycznej stali Cr-Ni odpornej na korozję jest korozja międzykrystaliczna w wyniku uczulenia w czasie spawania prowadzącego do zubożenia granic międzyziarnowych w chrom.

Korozji międzykrystalicznej w stali austenitycznej zapobiega się przez zmniejszenie zawartości węgla do granicznej rozpuszczalności tego pierwiastka w austenicie, zwykle poniżej 0,03% przez wytapianie stali w próżniowym procesie świeżenia kąpeli tlenem VOD (Vaccum Oxygen Decarburization).

Korozji międzykrystalicznej w stalach austenitycznych zapobiega również wprowadzenie do stali pierwiastków o większym powinowactwie do węgla niż chrom, tj. Ti lub Nb.

Odporne na korozję międzykrystaliczną są także stale austenityczne z niewielką zawartością względną ferrytu wysokochromowego α . W tym przypadku węgliki $M_{23}C_6$ tworzą się na granicy międzyfazowej α/γ , przy czym węgiel czerpany jest z całej objętości austenitu, a chrom z ferrytu wysokochromowego, bez zubożenia granic międzyfazowych w ten pierwiastek.

Krystalizacja stopów Fe + 18% Cr zawierających ponad 8%Ni zaczyna się od tworzenia roztworu stałego α , który w reakcji z roztworem ciekłym wzbogaconym w Ni krystalizuje pod postacią fazy γ . Stąd wymienione stopy bezpośrednio po zakrzepnięciu mają strukturę mieszaniny faz $\alpha + \gamma$.

Austenit w porównaniu z ferrytem ma większy współczynnik rozszerzalności cieplnej i skurcz w procesie krzepnięcia oraz mniejsze przewodnictwo cieplne. Może to być przyczyną skłonności stali austenitycznych do tworzenia pęknięć

krystalizacyjnych podczas spawania, która zanika przy obecności w strukturze spoin około 3 do 8% ferrytu wysokochromowego.

Ferryt w porównaniu z austenitem wykazuje większą rozpuszczalność fosforu i tlenu oraz przyczynia się do tworzenia mniejszej ilości wtrąceń niemetalicznych na jednostkowej długości granic międzyfazowych α/γ .

Na objętość względną ferrytu wysokochromowego i austenitu ma wpływ skład chemiczny, przede wszystkim równowaga składników ferryto- i austenitotwórczych materiałów rodzimych i dodatkowych oraz warunki i parametry spawania.

Duża szybkość odprowadzenia ciepła ze spoiny przez łączone elementy powoduje, że spoina oraz strefa wtopienia nie uzyskują po zakrzepnięciu a nawet po ochłodzeniu do temperatury pokojowej struktury równowagowej i cechują się niejednorodnością składu chemicznego. Sprzyja to zachowaniu w spoinie pewnej ilości metastabilnej fazy α .

Wymienione uwarunkowania metalurgiczne są już zdefiniowane ale w konkretnych zestawieniach materiałów rodzimych i dodatkowych oraz parametrach geometrycznych złącza spawane mogą wymagać dalszych badań.

W swych rozważaniach mgr inż. Krzysztof Samson koncentruje się na problematyce spawalności stali austenitycznej zestalą ferrytyczno-austenityczną. Tematyka ta dobrze wpisuje się w obszar zainteresowań badawczych zespołu kierowanego przez promotora pracy Pana dr hab. inż. Jerzego Łabanowskiego, prof. PG.

Problematyka właściwego doboru warunków i parametrów spawania stali specjalnych jest wciąż aktualna i stanowi dobrą tematykę dla rozprawy doktorskiej.

Znajdujące się w obszarze zainteresowań budowy i eksploatacji maszyn oraz inżynierii materiałowej i inżynierii spajania, problemy doskonalenia metod spawania stali specjalnych są atrakcyjne od strony badawczej i słusznie zostały obrane jako przedmiot pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Samsona.

Ocena rozprawy

Rozprawa podzielona została na dziesięć rozdziałów, obejmujących: wstęp, analizę aktualnego stanu wiedzy dotyczącego rozwoju i charakterystyki stali odpornych na korozję oraz ich spawalności, prezentację metodyki badań własnych oraz ich wyników, podsumowanie oraz wnioski. Rozprawa zawiera również streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, wykaz cytowanej literatury i wykaz norm oraz cztery załączniki w których umieszczono wstępne procedury spawania.

Objętość rozprawy wynosi 155 stron zawierających 114 rysunków i 43 tablice. Wykaz cytowanej literatury obejmuje 105 pozycji. Znajduje się w nim 5 pozycji, których Doktorant był współautorem. Cytowane materiały źródłowe dotyczą problematyki rozprawy i w zdecydowanej większości są aktualne.

W swych rozważaniach mgr inż. Krzysztof Samson koncentruje się na problematyce spawania łukiem krytym pod topnikiem blach ze stali austenitycznej ze stalą ferrytyczno-austenityczną. W pracy doktorskiej Autor przeprowadza liczne

próby spawania w różnorodnych warunkach a wytworzone złącza poddaje licznym badaniom.

W pierwszej części rozprawy – w rozdziałach 1 - 5 dotyczących przeglądu literatury Doktorant charakteryzując aktualny stan wiedzy dotyczący problemów spawania, stanowiącej przedmiot rozważań stali austenitycznej i ferrytyczno - austenitycznych, problematykę spawania stali różnorodnych, w tym przegląd literatury światowej dotyczący właściwości złączy różnorodnych stali austenitycznych ze stalą ferrytyczno-austenityczną oraz wymagania dotyczące spawania wyrobów płaskich oraz rur ze stali austenitycznych oraz ferrytyczno-austenitycznych zawartych w przepisach Towarzystwa Det Norske Veritas dopuszczających 7 gatunków stali austenitycznych oraz 2 gatunki stali ferrytyczno-austenitycznych do budowy statków i konstrukcji offshore.

Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia oraz podsumowania literatury zawarte w rozdziale 6 doprowadzają do stwierdzenia, że w dostępnej literaturze informacje dotyczące spawalności różnorodnych stali niestopowych oraz stali austenitycznej ze stalą ferrytyczno - austenityczną są niewystarczające i nie w pełni wyjaśniają związki pomiędzy strukturą, a właściwościami.

Problem naukowy rozprawy Doktorant ujął w tezie dotyczącej możliwości spawania automatycznego łukiem krytym stali austenitycznej ze stalą ferrytyczno - austenityczną duplex z zastosowaniem do wydajnego łączenia blach grubych stosowanych w budowie konstrukcji morskich, których właściwości złącza spełniają wymagania okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych.

Jako cel pracy użytkowy pracy Doktorant przyjął określenie przydatności spawania automatycznego łukiem krytym do wysokowydajnego spawania blach grubych ze stali o różnych strukturach, austenitycznej oraz ferrytyczno-austenitycznej.

Celem naukowym pracy była analiza wpływu warunków spawania stali różnorodnych na kinetykę przemian strukturalnych w złączu, a szczególnie procesów wydzieleniowych zachodzących w spoinie oraz strefie wpływu ciepła oraz ustalenie związków struktury i właściwości mechanicznych oraz odporności korozyjnej złączy.

Podczas realizacji i opracowania wyników badań Doktorant zastosował prawidłowo dobraną, opisaną w rozdziale 7 metodykę badań i właściwie dobrane metody eksperymentalne stosowane w inżynierii materiałowej oraz budowie i eksploatacji maszyn.

Zakres pracy obejmował wykonanie złączy spawanych doczołowych blach o grubości 15 mm ze stali 1.4462, X2CrNiMoCuN22-5-3 oraz 1.4404, X2CrNiMo17-12-2 metodą SAW z różną ilością wprowadzonego ciepła (od 1,2 do 3,5 kJ/mm) oraz różnym ukosowaniem krawędzi z zastosowaniem materiałów dodatkowych: drutu elektrodowego o średnicy 3,2 mm ESAB OK. Autrod 16.86 (22Cr9Ni3Mo) i topnika ESAB OK. Flux 10.93 SAW dla ściągów wypełniających oraz drutu proszkowego o średnicy 1,2 mm BOEHLER CN 22/9 N-FD i gazu ochronny typu M21(82 % Ar + 18% CO₂).

Wykonane złącza poddano badaniom nieniszczącym (VT, PT i RT) oraz badaniom niszczącym obejmującym:

- ocenę mikrostruktury i składu chemicznego obszarów złączy metodami: mikroskopii świetlnej (LM), mikroskopii skaningowej (SEM), elektronowej mikroskopii prześwietleniowej, pomiarów udziału ferrytu w strukturze i mikroanalizy (EDS),
- ocenę właściwości mechanicznych złączy metodami: statycznej próby rozciągania, próby zginania, próby udarności i pomiarów twardości,
- ocenę odporności korozyjnej złączy metodami: badań potencjału krytycznego korozji, badań odporności na korozję wżerową, badań podatności na korozję naprężeniową.

Efektem przeprowadzonych eksperymentów były wyniki szczegółowej analizy spawania stali o różnych mikrostrukturach, austenitycznej z ferrytyczno - austenityczną z zastosowaniem proponowanych materiałów dodatkowych. Określił też wpływ warunków spawania tych stali na kinetykę przemian mikrostruktury i procesów wydzieleniowych zachodzących w spoinie oraz strefie wpływu ciepła złączy oraz wpływ mikrostruktury złącza na jego właściwości mechaniczne i odporność korozyjną.

Doktorant wykazał, że spawanie automatyczne łukiem krytym stali różnorodnych, austenitycznej AISI 316L ze stalą ferrytyczno - austenityczną duplex 2205 może być zastosowane do wydajnego łączenia blach grubych a właściwości mechaniczne tak uzyskanych złączy spełniają wymagania okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych, co dowodzi słuszności postawionej w rozprawie tezy naukowej.

Jednymi z ważniejszych osiągnięć Doktoranta jest:

- przeprowadzenie szczegółowych badań odporności na korozję wżerową i naprężeniową złączy spawanych stali austenitycznej i ferrytyczno - austenitycznej oraz wykazanie, że obszarem złącza o najniższej odporności na korozję wżerową jest materiał rodzimy stali austenitycznej AISI 316L a obszarem złącza o najniższej odporności na korozję naprężeniową jest strefa wpływu ciepła po stronie stali duplex 2205,
- przeprowadzenie szczegółowych badań udarności złączy spawanych z różnymi parametrami oraz zdefiniowanie czynników wpływających na udarność spoin złączy stali austenitycznej 316L i stali duplex 2205.

Efektem przeprowadzonych eksperymentów jest prawidłowe zrealizowanie zaplanowanego planu badań i osiągnięcie celów pracy.

Rozprawa mgr inż. Krzysztofa Samsona stanowi oryginalne opracowanie z zakresu rozwojowego i złożonego problemu metodyki analizy wyników eksperymentu z obszaru inżynierii materiałowej i inżynierii spawania, jakim jest rzetelna synteza wyników badań nieniszczących i niszczących w ocenie jakości złączy spawanych.

Przeprowadzone próby opisu wpływu warunków spawania oraz materiałów dodatkowych na strukturę i właściwości złączy spawanych wypełniają sugerowaną w podsumowaniu literatury lukę w analizowanym obszarze badań.

Rozprawa zasługuje na pozytywną ocenę, jednak w związku ze sposobem przeprowadzenia badań i przedstawienia niektórych treści może nasuwać uwagi lub pytania dotyczące niektórych jej fragmentów, np.:

1. W obszarze koncepcji rozprawy:
 - wybór złączy blach grubych ze stali odpornych na korozję o strukturze austenitycznej i ferrytyczno-austenitycznej jako przedmiot rozważań w pracy doktorskiej nie został wystarczająco uzasadniony a spawanie tych stali wydaje się mieć znaczenie marginalne, w tym w przemyśle okrętowym wobec możliwości wykonania konstrukcji wyłącznie ze stali austenityczno – ferrytycznej.
2. W obszarze koncepcji, wykonania i wyniku eksperymentu:
 - w analizie procesu spawalności badanych stali uwaga Doktoranta w zbyt dużym stopniu koncentruje się na wymaganiach Det Norske Veritas a w zbyt małym zakresie na wpływie cyklu cieplnego spawania na przemiany w obszarze złącza,
 - niezastosowanie planowania eksperymentu i matematycznego opracowania wyników badań istotnie ograniczyło możliwość uogólnienia tych wyników jako zależności funkcyjnej w obszarze opisu wpływu parametrów spawania na mikrostrukturę złączy, szczególnie wielkość i udział względny ferrytu i austenitu, wydzielenia faz wtórnych i wybrane właściwości oraz uniemożliwiło optymalizację procesu.
3. W obszarze redakcji rozprawy:
 - drobne błędy oraz nieścisłości językowe, terminologiczne i redakcyjne zaznaczyłem w manuskrypcie konstatując, że nie zmieniają istoty prezentowanych przez Doktoranta poglądów i interpretacji wyników.

Przytoczone wyżej uwagi traktuję, jako dyskusję z Doktorantem lub sugestię odnośnie problemów do uwzględnienia w publikacjach i dalszych badaniach. Nie zmieniają natomiast one mojej pozytywnej oceny całości rozprawy, którą podsumowuję we wniosku końcowym.

Wniosek końcowy

Na podstawie dokonanej oceny pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Samsona na temat „Wpływ warunków spawania na właściwości złączy różnoimiennych stali odpornych na korozję” stwierdzam, że Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów naukowych oraz prowadzenia samodzielnej pracy badawczej na dobrym poziomie z zastosowaniem licznych zaawansowanych technik i narzędzi badawczych.

Rozprawa stanowi szczegółowe, wartościowe, ambitne i rozwojowe opracowanie naukowe odnoszące się do analizowanej techniki badań nieniszczących i niszczących złączy spawanych stali specjalnych.

Dotycząca podstaw metodyki eksperymentu z obszaru badań spawalności stali austenitycznych i ferrytyczno - austenitycznej opiniowana rozprawa wypełnia w całości wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora nauk technicznych stawiane Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami.

Wobec wymienionych wyżej walorów rozprawy zwracam się do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej z wnioskiem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

