

Katowice, 06.03.2019 r.

dr hab. inż. Bożena Szczucka-Lasota, prof. PŚ

Wydział Transportu

Politechniki Śląskiej

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Sosnowskiego

pt.

**„Wpływ dodatku wodoru do osłony argonowej na jakość złączy spawanych wybranych stali ferrytycznych”**

### 1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej.

### 2. Charakterystyka rozprawy

W pracy poruszono ważny problem oceny trwałości eksploatacyjnej połączeń spawanych wykonanych ze stali wysokowytrzymałych o strukturze ferrytyczno – bainitycznej. Doktorant analizował złącza wykonane procesem TIG w osłonie mieszanek argonu z kontrolowanym zmieniającym się dodatkiem wodoru o niesymetrycznym skoku (2% H<sub>2</sub>, 5% H<sub>2</sub>, 10% H<sub>2</sub>). Eksperymenty prowadzono nad nowoczesnymi gatunkami stali o podwyższonej wytrzymałości, charakteryzujących się wysoką granicą plastyczności, ale jednocześnie wymagających przestrzegania ścisłych zaleceń technologicznych podczas spawania, zwłaszcza kontrolowania stężenia wodoru w stopiwie. W pracy sprawdzono skłonność do pęknięć zimnych oraz wpływ na jakość połączeń spawanych stali z gatunku Domex i Strenx (S500MC, S700ME, S700MCE).

Dotychczasowa wiedza o wpływie dodatku wodoru w argonowych mieszkankach osłonowych na rozwój pęknięć zwłoczných nie jest pełna. Podjęcie badań w tym zakresie jest bardzo ważne ze względu na to, że dotychczas w sposób bardzo ograniczony prowadzono badania w tym obszarze. Potwierdza to wnikliwy przegląd literaturowy przedmiotu. Analiza wpływu wodoru w mieszkankach osłonowych została prawidłowo przeprowadzona dla stali wrażliwych na pęknięcia ze względu na kruchość wodorową, co

ułatwia interpretację zjawiska. Podjęty temat rozprawy jest aktualny i celowy. Stanowi to istotny problem badawczy.

### 3. Ocena rozprawy

Recenzowana praca jest obszerna, zawiera 124 strony i składa się z części teoretycznej i badawczej. Zamieszczona bibliografia zawiera 85 pozycji literaturowych, z czego większość stanowią aktualne publikacje zagraniczne, wydane po roku 2000.

We wstępie (rozdział 1) zawarto krótkie uzasadnienie celowości podjęcia tematu pracy oraz podano dla jakich gatunków stali można stosować wodór jako składnik mieszanek osłonowych.

W rozdziale 2 pt. „Analiza literatury” Autor dokonał przeglądu aktualnych opracowań literaturowych w zakresie wpływu mieszanek gazowych na własności złącza. Analizowano mieszanki osłonowe stosowane w procesach MIG, MAG oraz TIG. Dokładnie opisano najważniejsze gazy osłonowe: argon, hel, ditlenek węgla oraz wpływ pozostałych gazów do tworzenia spawalniczych mieszanek osłonowych: tlen, azot, wodór. Przedstawiono wpływ wodoru na właściwości stalowego złącza. Podano wpływ zastosowania najważniejszych mieszanek osłonowych na kształt spoiny.

W rozdziale 3 pt. „Podsumowanie przeglądu literatury” zostały omówione zagadnienia dotyczące badań prowadzonych na obiektach rzeczywistych oraz wskazano na konieczność badania nie tylko materiałów podstawowych, ale również konieczność sprawdzenia złączy spawanych po długotrwałej eksploatacji. Z analizy przeglądu literatury wyprowadzono cel i zakres pracy, które podano w rozdziale 4.

W rozdziale 4 pt. „Cel i zakres pracy” Autor przejrzyście i poprawnie przedstawił cel i zakres pracy. Celem pracy jest określenie wpływu wodoru zawartego w mieszance osłonowej na bazie argonu na jakość złączy spawanych metodą TIG stali o strukturze ferrytyczno – bainitycznej oraz wyjaśnienie jego roli w procesie redukcji szkodliwych składników dymów spawalniczych. Tezą pracy jest stwierdzenie, że dwuprocentowy dodatek wodoru do osłony argonowej, chroniącej jeziorko ciekłego metalu, nie wpływa na występowanie wad w złączach spawanych o charakterze pęknięć wodorowych.

W celu udowodnienia tezy nakreślano poprawny plan badań. Do badań wytypowano stale o podwyższonej wytrzymałości z gatunku Domex i Strenx (S500MC, S700ME, S700MCE) wrażliwych na pęknięcia zimne. Zaproponowano sprawdzenie wpływu mieszanek osłonowych do badań na bazie argonu zawierające odpowiednio 2% H<sub>2</sub>, 5% H<sub>2</sub>, 10% H<sub>2</sub>). Postanowiono zbadać skłonność złączy spawanych (badanymi mieszankami gazowymi) do pęknięć zimnych w próbie TEKKEN. Postanowiono przeprowadzić badania wytrzymałości doraźnej na rozciąganie i wykonać badania udarności, twardości i badania fraktograficzne.

W rozdziale 5 zbadano wpływ zmieniającej się zawartości wodoru w mieszankach na właściwości złącza. W próbie Tekken dla wszystkie trzech badanych gatunków stali (S500MC, S700ME, S700MCE) nie stwierdzono pęknięć przy zastosowaniu badanych argonowych mieszanek osłonowych (zawierających 0%, 2%, 5%, 10% wodoru). Na podstawie przeprowadzanych badań makrostrukturalnych zauważono, że każda z badanych mieszanek ma wpływ na kształt spoiny. Zauważono, że głębokość wtopienia spoiny wzrasta wraz ze wzrostem zawartości wodoru w argonowej mieszance osłonowej.



Następnie przeprowadzono próbę doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złączy badanych stali S500MC, S700ME, S700MCE przy zastosowaniu gatunków stali (S500MC, S700ME, S700MCE) przy zastosowaniu 3 badanych argonowych mieszanek osłonowych (zawierających 0%, 2%, 5% wodoru). Podczas spawania stali S500MC zważono, że wartość wydłużenia względnego była najkorzystniejsza przy zastosowaniu 5% wodoru w mieszance osłonowej. Podczas spawania stali S700ME, zauważono, że wartość wydłużenia względnego była najkorzystniejsza przy zastosowaniu 2% wodoru w mieszance osłonowej. Podczas spawania stali S700MCE, zważono, że wartość wydłużenia względnego była na podobnym poziomie przy zastosowaniu 2% lub 5% wodoru w argonowej mieszance osłonowej. We wszystkich badanych przypadkach wydłużenie względne było na wyższym poziomie po spawaniu z argonowymi mieszankami osłonowymi zawierającymi wodór niż po spawaniu z zastosowaniem argonowej osłony gazowej bez dodatku wodoru.

Kolejnym etapem badań była próba zginania, która wypadła korzystnie dla wszystkich badanych stali i mieszanek osłaniających. Wartości wytrzymałości na zginanie próbek spawanych nie różniły się znacząco od próbek z materiału rodzimego, co świadczy o prawidłowo dobranych procesach spawalniczych.

Bardzo ważnym elementem badań było przeprowadzenie badań udarności. Pierwsza z badanych stali S500MC charakteryzowała się wysoką udarnością w temp  $-30^{\circ}\text{C}$  (zachowanie 3 klasy udarności). Zastosowanie 2% wodoru w mieszance gazowej nie gwarantuje podwyższenia udarności w stosunku do spawania z zastosowaniem argonu jako gazu osłonowego. Zastosowanie 5% wodoru w mieszance gazowej jest najkorzystniejsze, gdyż znacznie podwyższa udarność w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$  z 65 J do 98 J.

Druga z badanych stali S700MC charakteryzowała się dużo niższą udarnością w temp  $-30^{\circ}\text{C}$ . Zastosowanie 2% wodoru w mieszance gazowej nie gwarantuje zachowania 3 klasy udarności. Zastosowanie 5% wodoru w mieszance gazowej wyraźnie podwyższa udarność w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$  w stosunku do spawania w osłonie czystego argonu. Udarność złącza po spawaniu z zastosowaniem 5% wodoru w mieszance osłonowej jest na poziomie materiału rodzimego, co wskazuje na poprawne wytypowanie procesu spawalniczego.

Trzecia z badanych stali S700MCE charakteryzowała się najwyższą udarnością w temp  $-30^{\circ}\text{C}$ . Zastosowanie 2% lub 5% wodoru w osłonowej mieszance gazowej powoduje obniżenie udarności w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$  w stosunku do zastosowania czystego argonu. Udarność złącza po spawaniu z zastosowaniem 5% wodoru w mieszance jest wyższa niż dla mieszanki zawierającej 2% wodoru.

Następnie wykonano badania makroskopowe i fraktograficzne. Zwrócono uwagę na wpływ zawartości mieszanki osłonowej na kształt spoiny. Stwierdzono brak większego rozrostu ziarna ze względu na zmieniający się kształt chemiczny mieszanki osłonowej dla wszystkich badanych stali. Badania fraktograficzne wykazały obecność korzystnych przełomów o charakterze ciągliwym dla wszystkich badanych złączy, co potwierdza wysoką udarność złącza w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Rozprawę kończy podsumowanie wyników przeprowadzonych badań i wnioski, omówione w rozdziale 6 i 7.

#### 4. Uwagi ogólne i szczegółowe

Sformułowany cel pracy jest prawidłowy, a jego określenie poprzedzone jest starannym przeglądem literaturowym. Informacje literaturowe są ważne i aktualne. W części badawczej (dobrze zaplanowanej i przeprowadzonej) Autor osiągnął postawiony cel pracy. Układ i dobór badań jest przejrzysty, logiczny, poprawny.

W pracy nasuwają się uwagi o charakterze ogólnym:

1. Nie uzasadniono w pracy niesymetrycznego kroku badawczego (dobór 0, 2, 5, 10 % wodoru w mieszance wodorowej). Nie uzasadniono dlaczego tylko w próbie Tekken stosowano 10% wodoru w osłonowej mieszance. Dlaczego nie sprawdzano tej mieszanki w dalszych badaniach (twardości, udarności, wytrzymałości)?
2. Teza zakłada, że najkorzystniejszy jest wpływ 2% wodoru w mieszance osłonowej, podczas gdy badania udarności i wytrzymałości dowodzą, że równie dobre efekty daje zastosowanie 5% wodoru w mieszance. Przypuszczalnie teza powinna zakładać, że zastosowanie wodoru w przedziale 2-5% mieszance argonowej jest bardzo korzystne do spawania wysokowytrzymałych stali ferrytyczno-bainitycznych.
3. Badania środowiska pracy przeprowadzono dla innych stali i nie służą do udowodnienia tezy.
4. Podczas przeglądu literatury przedstawia Pan rysunki z własnych badań rozpoznawczych.
5. Zajmuje się Pan stalami ferrytyczno-bainitycznymi. Tymczasem nie przedstawił Pan żadnego zdjęcia o strukturze ferrytyczno-bainitycznej w badanych złączach. Nie wiemy zatem jaki jest wpływ mieszanki na ilość ferrytu i jego odmiany morfologiczne stanowiące o wysokiej udarności w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$ .
6. Zajmuje się Pan pęknięciami zwłocznymi, kruchością wodorową, wpływem wodoru w osłonowych mieszankach argonowo-wodorowych na własności mechaniczne złącza. Nie zrobił Pan analizy zawartości wodoru w stopiwie choć analizował Pan bardzo dokładnie skład chemiczny stopiwa wszystkich badanych stali. Zawartość wodoru w badanych stopiwach wydaje się być najważniejszą informacją pozwalającą sprawdzić, czy wzrost zawartości wodoru w mieszankach osłonowych nie przekłada się na podwyższenie poziomu wodoru w stopiwie.
7. W części literaturowej nie przedstawił Pan zależności rozpuszczalności wodoru w żelazie w funkcji temperatury, co jest istotne dla zrozumienia rozpatrywanego zagadnienia.

W pracy nasuwają się uwagi o charakterze szczegółowym:

Str 12.

Niezręczne sformułowanie: „Nieodpowiednia spawalność materiałów może prowadzić do wytwarzania wadliwych konstrukcji”



Str 17

„Do łączenia konstrukcji ze stali austenitycznych stosuje się mieszankę argonu z niewielkim dodatkiem wodoru. Powoduje on obniżenie napięcia powierzchniowego jeziora, wskutek czego nie powstają lokalne podtopienia krawędzi łączonych detali [11]”.

Powtórzenie informacji ze strony 12 i 17. Nie podano jaka jest zawartość wodoru w tej mieszance? Jest to istotne wobec zastosowania mieszanek wodorowych w badaniach Doktoranta. Należy pamiętać, że zawartość wodoru w stopiwie austenitycznym powinna być także kontrolowana, gdyż zbyt duże stężenie siarki, wodoru i tlenu sprzyja pęknięciom w stalach austenitycznych, duplex i superduplex.

Str. 18.

„Stale niskowęglowe spawa się w osłonie czystego argonu, głównie dlatego, że nie ma zbyt wielu możliwych do zastosowania mieszanek”.

Proszę o uzasadnienie tego poglądu

Str. 19

„Gazami bazowymi są: argon, hel i dwutlenek węgla. Druga grupa to gazy dodatkowe, które stosuje się do komponowania mieszanek spawalniczych, chroniących łuk spawalniczy i ciepłe jezioro. Są to: tlen, wodór oraz azot”.

Z tego sformułowania wynikałoby, że tlen i azot chronią ciepłe jezioro (przed dostępem powietrza, którego głównymi składnikami są azot i tlen), tymczasem oba gazy spełniają zupełnie inną rolę w mieszankach. Proszę podać jaka jest rola tlenu, a jaka azotu w mieszankach?

Str. 31

„Dodatek tlenu stabilizuje łuk spawalniczy, dając możliwość spawania z większymi prędkościami. Niestety czysty tlen sprawia, że szybciej wypalają się składniki stopowe w stali. Wokół złącza pojawiają się tlenki”.

Proszę podać, gdzie „wokół złącza” konkretnie tworzą się tlenki.

Str. 32

„Mieszanki tego typu stosuje się głównie do spawania wyrobów ze stali niestopowych lub niskostopowych”.

Wg aktualnej normy stale niestopowe to były stale niskowęglowe i niskostopowe

Str. 33

„Wodór w warunkach normalnych występuje w postaci cząsteczkowej ( $H_2$ ), jest to dla niego postać obojętna energetycznie. W takiej postaci występuje w związkach chemicznych jak np.  $H_2SO_4$  czy  $H_2S$ ”.

Mało precyzyjna informacja. Z tego co Pan napisał wynika, że w każdym związku chemicznym są zawsze dwa atomy wodoru. Istotnie, w postaci cząsteczkowej wodór występuje jako gaz ( $H_2$ ). W związkach chemicznych wodór jest pierwiastkiem jednowartościowym. Ilość atomów wodoru w danym związku chemicznym zależy od wartościowości pierwiastka, z którym wchodzi w reakcję chemiczną, przykładowo  $KOH$ ,  $H_2O$ ,  $H_3PO_4$ ,  $CH_4$ , itd.

Str. 54 rys 18

Głębokość wtopienia dla 2%  $H_2$  i 5%  $H_2$  jest identyczna (budzi wątpliwość)

Str. 100

Twardość 2 dla 2%  $H_2$  i 5%  $H_2$  porównywalna. Proszę o komentarz

## 5. Ocena końcowa pracy

Podjęty w pracy temat jest aktualny i ważny. Badania wykonane przez Doktoranta w ramach pracy stanowią ważny wkład w aktualny stan wiedzy. Doktorant jasno sformułował cel pracy, dla realizacji którego wykonał liczne i prawidłowe badania. Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej wyników badań. Należy podkreślić dużą wartość naukową i użyteczną rozprawy. Uwagi ogólne i szczegółowe nie mają wpływu na wysoką merytoryczną ocenę pracy.

## 6. Wniosek końcowy

Doktorant wykazał się dobrą znajomością technik pomiarowych i umiejętnościami prowadzenia badań z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych oraz analizy uzyskiwanych wyników. Opiniowana przeze mnie praca doktorska spełnia wszystkie ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony przed Radą Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

*B. Szlachetko-Losko*