

dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. nadzw. PG  
Katedra Inżynierii Materiałowej i Spajania  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Gdańska  
ul. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 13 marca 2019 r.

## RECENZJA

### **rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Wojciecha Sosnowskiego pt.: „Wpływ dodatku wodoru do osłony argonowej na jakość złączy spawanych wybranych stali ferrytycznych”**

wykonanej pod opieką promotora Pana Prof. dr. hab. inż. Tadeusza Sałacińskiego oraz promotora  
pomocniczego Pana dr. inż. Jerzego Jakubowskiego  
opracowana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Produkcji  
Politechniki Warszawskiej  
z dnia 1 lutego 2019 r.

## **Wprowadzenie**

Wszystkie powszechnie stosowane procesy spawania łukowego wymagają odizolowania obszaru spawania od środowiska naturalnego. Realizowane jest to najczęściej albo poprzez spalanie substancji stanowiących otulinę elektrod i topników albo poprzez zastosowanie gazów osłonowych. Rozwój inżynierii spajania do współczesnej, zaawansowanej postaci był i jest w znacznej mierze uzależniony od postępu technicznego w dziedzinie spawalniczych gazów osłonowych. Historia spawalnictwa naznaczona jest kamieniami milowymi w postaci kolejnych procesów wykorzystujących różne gazy oraz ich mieszanki. Rodzaj gazu osłonowego stanowi również jedno z podstawowych kryteriów klasyfikacji procesów spawania oraz determinuje ich materiałowe i technologiczne obszary zastosowania.

Wodór w procesach spawania może być jednym ze składników mieszanek gazów osłonowych, ale jego obecność stanowi również zagrożenie będąc przyczyną kruchości metalu prowadzącej m.in. do formowania się pęknięć. W obawie przed nawodorowaniem stopiwa nie zaleca się używania go jako składnika gazu osłonowego podczas wykonywania złączy ze stali podatnych do pęknięcia zimnego. Z tej przyczyny jest powszechnie stosowany jako dodatek do spawania jedynie austenitycznych stali odpornych na korozję, stopów niklu i miedzionikli.

W tym świetle podjęcie tematu wykorzystania wodoru jako dodatku do osłony złączy ze stali niestopowych wykonanych metodą TIG przez Doktoranta uważam za w pełni uzasadnione, gdyż jest to zagadnienie aktualne oraz bardzo interesujące z praktycznego i naukowego punktu widzenia, a w literaturze przedmiotu badań można znaleźć jedynie nieliczne doniesienia przedstawiające wyniki badań o zbliżonym charakterze.

## **Charakterystyka i ocena formalna rozprawy**

Opiniowana rozprawa doktorska wydana jest w bardzo estetycznej formie, jej układ jest poprawny, składa się ona z siedmiu rozdziałów przedstawionych na 124 stronach (106 stron tekstu właściwego), które obejmują trzy główne części: wstęp (jeden rozdział), stan zagadnienia w świetle literatury (dwa rozdziały), badania własne (cztery rozdziały) oraz bibliografię. W pracy znajdują się również: streszczenie, słowa kluczowe, spis treści, wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, spisy tabel i rysunków oraz załączniki.

Pierwszy rozdział stanowiący wstęp zawiera informacje wprowadzające do dalej poruszanych zagadnień w aspekcie inżynierii jakości i ogólnych spawalniczych zagadnień technologicznych.

Rozdział 2 stanowi główny trzon opracowania stanu zagadnienia w świetle literatury. Doktorant przedstawia w nim początkowo klasyfikację i charakterystykę procesów spawania w osłonach gazów ochronnych (MIG/MAG oraz TIG), a następnie kontynuuje opisując klasyfikację i charakterystykę spawalniczych gazów osłonowych, co bardzo dobrze wprowadza czytelnika do aktualnego stanu wiedzy. Studium literaturowe zostało zakończone rozdziałem 3 zawierającym podsumowanie stanu zagadnienia, w którym Autor dobrze umotywował celowość podjęcia tematu. Przedstawiony stan wiedzy jest wystarczający do wprowadzenia czytelnika do części badawczej pracy, a Doktorant wykazał się dobrą znajomością zagadnień związanych z podjętym tematem. Część literaturowa jest ilustrowana autorskimi zdjęciami, co w moim odczuciu, podnosi jej atrakcyjność. Szkoda jednak, że Autor nie poświęca należytej uwagi roli wodoru w złączach spawanych, co wydaje się naturalne w przypadku podjętego tematu. Ponadto w tej części pracy stwierdziłem następujące uchybienia merytoryczne:

- Podrozdział 2.1.3.7 zatytułowany „Inne gazy stosowane w spawalnictwie” nie powinien stanowić podrozdziału 2.1.3 („Gazy atmosferyczne stosowane w spawalnictwie”). Logiczne i umotywowane merytorycznie byłoby nadanie mu numeru 2.1.4.
- Strona 11: „Zaznaczyć należy, że poziomy jakości według niezgodności spawalniczych złączy spawanych ustala się na podstawie normy PN–EN ISO 5817.” Cytowana norma dotyczy jedynie stali, aluminium i tytanu.
- Strona 14: „podgrzewaniem w czasie procesu”. Podgrzewanie wstępne jest zabiegiem technologicznym wykonywanym przed procesem spawania, a w jego trakcie temperaturę jedynie się utrzymuje na określonym poziomie.
- Strona 16: „Przy wyższych wartościach natężenia prądu i zastosowaniu mieszanek osłonowych, których bazą jest argon, transfer metalu w łuku zmienia się z grubo- na drobnokropłowy, natryskowy (rys. 2 i 3).” Na rysunkach 2 i 3 pokazano złącza spawane, na których nie widać oczywiście transportu metalu w łuku.
- Strona 19: „spoin graniowych” powinno być: „ściegów graniowych”.
- Strona 20: argon 5.0 zawiera 99,999% Ar, a nie 99,995% Ar. Również zapis „4,5” jest niepoprawny.
- Strona 20: zamiast „w pozycji pułapowej i sufitowej” powinno być: „w pozycji okapowej i pułapowej”.
- Strona 20: „Wysoka energia łuku ma bezpośrednie przełożenie na napięcie powierzchniowe jeziora spawalniczego, a to z kolei na ułatwioną **rafinację** gazów z kąpieli metalicznej, powodujących porowatość złącza.” Prawidłowym terminem jest np.: „wydzielanie”.
- Strona 24: wartości energii jonizacji z tablicy 1 nie są zgodne z wartościami podanymi w tekście na stronach 21 (O) i 22 (H).
- Strona 25: „Wspomnieć należy, że metodami MIG/MAG można spawać drutami rdzeniowymi samosłonowymi. Zawierają one w rdzeniu składniki gazotwórcze spełniające taką samą funkcję jak otulina elektrod.” Doktorant sugeruje, że decydującym mechanizmem służącym odizolowaniu obszaru spawania jest proces gazotwórczy całkowicie pomijając fakt odizolującego oddziaływania żużla.
- Strona 25: „Z kolei propan często stosuje się do lutowania, głównie miękkiego lub w połączeniu z tlenem do lutowania lutami twardymi. Ze względu na właściwości nawęglające, propanu nie stosuje się w spawalnictwie.” Tradycyjnie i formalnie spawalnictwo obejmuje również lutowanie.
- Strona 25: „Mieszanki gazowe mogą mieć właściwości utleniające lub redukujące.” Mieszanki Ar+He są obojętne chemicznie.
- Strona 26: „w pozycjach uprzywilejowanych”. Nie stosuje się takiego terminu.

- Strona 37: „rentgenografia”. Poprawny termin w odniesieniu do badań NDT złączy spawanych to „radiografia”.
- Strona 37: „Naprężenia powodują nieciągłości zarówno materiału spoiny, jak i strefy wpływu ciepła (SWC).” Naprężenia działające w kierunku grubości złączy są przyczyną formowania się pęknięć lamelarnych w materiale rodzimym.
- Strona 38: Przedstawiona klasyfikacja pęknięć nie obejmuje pęknięć technologicznych: wyżarzeniowych oraz eksploatacyjnych: korozyjnych i wodorowych będących skutkiem kruchości wodorowej zewnętrznej.
- Strona 38: „Podobnie można zabezpieczyć się przed **pęknięciami technologicznymi**, zarządzając np. odpowiednio częste przeglądy urządzeń lub okresową wymianę eksploatowanych części.” Okresowe przeglądy i wymiana eksploatowanych części może zabezpieczyć przed **skutkami pęknięć eksploatacyjnych**.
- Pod niektórymi rysunkami podano błędne źródła (np. rys. 12).

Na główną i najobszerniejszą część pracy składa się opis badań własnych. W rozdziale 4 przedstawiono cele, tezę i zakres pracy. Teza pracy brzmi: **„Dwuprocentowy dodatek wodoru do osłony argonowej, chroniącej jezioro ciekłego metalu, nie wpływa na występowanie wad w złączach spawanych o charakterze pęknięć wodorowych.”**

Następnie Autor przedstawił charakterystykę zastosowanych materiałów podstawowych (strony 42-46) oraz metodykę badawczą (strony 46-48). Do przeprowadzenia eksperymentów Pan mgr inż. Wojciech Sosnowski wybrał 3 gatunki stali walcowanych cieplno-mechanicznie: S500ML, S700MC i S700MC E. Są to stale coraz powszechniej stosowane na konstrukcje spawane, a ich spawalność jest wciąż obiektem badań i tematem publikacji naukowych.

Rozdziały 5.3-5.5 (strony 49-101) poświęcone są prezentacji wyników badań. Doktorant racjonalnie podzielił ich opis na 3 główne etapy: badania skłonności stali do tworzenia pęknięć zimnych próbą Tekken, badania ergonomiczne wpływu rodzaju mieszanki osłonowej na jakość powietrza oraz badania nieniszczące i niszczące złączy spawanych zrealizowane zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-1.

Prace eksperymentalne oceniam jako dobrze zaplanowane, chociaż biorąc pod uwagę postawione cele, szeroki zakres prac i różny poziom (wg mojej subiektywnej oceny) ich ważności wydaje mi się, że badania środowiskowe powinny zostać przedstawione na końcu. Ponadto, realizacja badań skłonności do tworzenia pęknięć zimnych wymaga oznaczenia ilości wodoru dyfundującego (w stopiwie albo spoinie) jako jednego z trzech, obok kruchej struktury i naprężeń pozostających, podstawowych determinantów zjawiska.

Ten fragment rozprawy ogólnie należy ocenić jako poprawny, jednak nasunęły mi się następujące uwagi merytoryczne:

- Strona 44: W tablicy 4 zamiast: „Udarność” powinno być: „Praca łamania”, o czym świadczy przedstawiona jednostka (J).
- Strona 51 i 52: Na rys. 13 nie można zaobserwować szerokości SWC. Wymaga to przeprowadzenia badań metalograficznych. Natomiast na przedstawionych zdjęciach widoczne są barwy nalotowe.
- Strona 53: Nieprawidłowy opis: „Zgłady spoiny testowej próby TEKKEN ze stali S500ML”. Powinno być np.: „Zgłady złącza spawanego TEKKEN ze stali S500ML”. Podobny błąd występuje w podpisach rys. 44-46.

Ostatnie dwa, w sumie czterostronicowe, merytoryczne rozdziały (6 i 7) zawierają dyskusję wyników badań oraz wynikające z niej wnioski.

Bibliografia obejmuje 96 pozycji, w tym sześć artykułów naukowych, których Doktorant jest współautorem. Dużym atutem, moim zdaniem, jest ułożenie spisu literatury w systemie oddzielającym artykuły i książki od norm i adresów internetowych. Natomiast zastrzeżenia budzi merytoryczne przygotowanie spisu literatury i jej wykorzystanie. W bibliografii Doktorant przytacza jedynie pozycje polskojęzyczne. Nie wszystkie z nich zostały zacytowane w treści pracy. Ponadto nie wszystkie przytaczane w treści normy znalazły się w zamieszczonym na końcu spisie.

#### **Uwagi edycyjne:**

Do najważniejszych usterek technicznych występujących w rozprawie można zaliczyć:

- Ważniejsze oznaczenia i skróty: skrót „MMA” jest umiejscowiony niezgodnie z przyjętym porządkiem alfabetycznym.
- Ogólną zasadą ułatwiającą lekturę jest przywoływanie rysunków w tekście umieszczonym przed rysunkiem. W pracy rysunki często są przywoływane później. Niektóre rysunki nie są przytoczone w tekście (np. rys. 53, 55, 56).
- Strona 26: drugi akapit stanowi powtórzenie informacji ze stron 19 i 20.
- Tablice 3 i 4 zawierają powtórzenia informacji o wartościach równoważników węgla i zawartości C.
- Tablica 5 jest niepotrzebna, skoro wszystkie wartości w poszczególnych kolumnach są identyczne. Można je wymienić w tekście.
- Strona 57: trzeci akapit stanowi opis teoretyczny, który powinien znajdować się w pierwszej części pracy. Podobnie pierwsze trzy akapity ze strony 65 oraz praktycznie cała treść ze stron 56-59.
- Rysunek 20 jest niepotrzebny, jest niewyraźny i nie jest przytoczony w tekście.
- Na rysunkach zglądów makroskopowych złączy próbných (strony 93-96) brakuje skali. Nie podano również nazwy odczynnika do trawienia.

Stwierdziłem również kilkanaście błędów interpunkcyjnych oraz literówek, z których niektóre wynikły prawdopodobnie z funkcji autokorekty edytora tekstu.

Praca napisana jest językiem przystępnym, jednak pojawiają się w kilku jej miejscach zwroty w pierwszej osobie (strona 17: „mamy do czynienia”) i zwroty nietechniczne, np.: „Przyczyn takiego stanu rzeczy może być wiele, szczególnie wówczas, gdy wystąpią one razem.” (strona 12), „stali...kwasoodpornych”(strona 17).

#### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Analizując zakres i treść pracy stwierdzam, że wpisuje się ona jednoznacznie w dyscyplinę naukową: Budowa i Eksploatacja Maszyn. Pracę uważam za interesującą i merytorycznie wartościową. Doktorant prawidłowo zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy. Doktorant zaplanował i przeprowadził obszerne i komplementarne badania doświadczalne zmierzające do zweryfikowania możliwości zastosowania wodoru jako składnika gazu osłonowego do spawania stali niestopowych. Autor prawidłowo zinterpretował wyniki badań i sformułował wnioski. Za szczególnie wartościowe wyniki analiz należy uznać wykazanie, że w warunkach przeprowadzonych eksperymentów 2% dodatek wodoru do mieszanki osłonowej nie powoduje wzrostu skłonności badanych stali do pęknięcia zimnego. Wszystkie te osiągnięcia zostały poparte badaniami o szerokim zakresie, co potwierdza bardzo dobre przygotowanie metodologiczne Doktoranta oraz jego duży potencjał jako pracownika naukowo-badawczego.

Dyskusja wyników badań stanowiąca podsumowanie rozprawy jest napisana poprawnie i dotyczy wszystkich zaprezentowanych w pracy badań. Mankamentem w moim odczuciu jest niepodjęcie w podsumowaniu próby skonfrontowania efektów pracy z wynikami z literatury.

Na podstawie analizy wyników badań Pan mgr inż. Wojciech Sosnowski sformułował prawidłowe wnioski. Podsumowując, pod względem formalnym i merytorycznym rozprawę oceniam jednoznacznie pozytywnie, pomimo przedstawionych uwag i wątpliwości. Wszystkie powyższe uwagi omówiłem bezpośrednio z Doktorantem.

## Uwagi

Poniżej wyszczególniam uwagi i pytania ogólne, które nasunęły mi się podczas lektury pracy. Bardzo proszę o odpowiedzi i komentarze do wymienione zagadnień.

1. Jaka jest struktura badanych stali? Doktorant nazywa je zamiennie „ferrytycznymi” albo „ferrytyczno-bainitycznymi”. Czy stale te można nazywać zamiennie „stalami o podwyższonej wytrzymałości” i „wysokiej wytrzymałości”? A może (jak na stronie 49) „mikrostopowymi”?
2. Strona 14: „GTAW jako pojęcie szersze obejmuje również inne procesy spawania w osłonie wszystkich rodzajów gazów osłonowych i ich mieszanek.” Jak należy rozumieć to zdanie?
3. Na stronie 19 Autor pisze: „Wysoka temperatura topnienia tlenków utrudnia prawidłowe prowadzenie procesu. Natomiast cykliczne zmiany kierunku przepływu prądu powodują roztapianie metalu w pierwszej fazie i roztwarzanie anodowe tlenków aluminium w drugiej.” Proszę o wyjaśnienie, jak należy to rozumieć.
4. Strona 27: Jak można wytłumaczyć stwierdzenie: „Gazy aktywne wchodzą w reakcję z ciekłym metalem, w wyniku czego uzyskuje się spoiny o określonych właściwościach mechanicznych i plastycznych oraz odporne na korozję.”?
5. Strona 38: „pęknięcia zimne (wodorowe) powstają w temperaturze poniżej 300 °C, wskutek między innymi tzw. kruchości wodorowej. Pęknięcia obciążonych ustrojów spawanych mogą powstawać z powodu degradacji, spowodowanej gromadzeniem się i wnikaniem wodoru atomowego, powodującego zmiany zarówno w strukturze, jak i wyglądzie metalu”. Jak należy to rozumieć?
6. Strona 43 i 44: Doktorant nie podał wzoru na równoważnik węgla  $C_{ET}$ , co utrudnia jego interpretację. W spisie skrótów podaje, że jest to wskaźnik wyliczany „wg Thyssen Stahl AG”. Czy jest to ten sam równoważnik, który wskazany jest w normie PN-EN 1011?
7. Strona 47 i 48 (opis procedury wykonywania próbek): Nie podano: kąta i odległości palnika od powierzchni blachy oraz średnicy dyszy jako tych czynników, które mogą mieć wpływ na jakość osłony gazowej. Czy w dyszy zamontowano soczewkę regulującą przepływ gazu? Jaki był gatunek elektrody i jej średnica? W instrukcji WPS zamieszczonej w Załączniku 1 również brakuje tych informacji.
8. Proszę o skomentowanie niejednoznaczności wynikającej z wartości energii liniowej podanej w tabelicy 5 i obserwacji opisanej na stronie 52: „Wskutek wysokiej energii liniowej wynikającej z wyższej mocy łuku spawalniczego, następowało znacznie głębsze wtapienie w materiał, a to z kolei skutkowało „wydłużaniem” łuku spawalniczego”.
9. Dlaczego założono poziom jakości C? Badane gatunki stali stosowane są na konstrukcje odpowiedzialne, czy więc nie jest uzasadnione przyjęcie poziomu B?

Wymienione usterki nie umniejszają wysokiej oceny, na którą zasługuje, w moim przekonaniu, przedstawiona do recenzji rozprawa, a część uwag ma stanowić przyczynek do dyskusji i, mam

nadzieję, okaże się pomocna w dalszych badaniach nad wpływem składu mieszanek gazowych na jakość złączy spawanych.

### **Wniosek końcowy**

Rozprawa jest oryginalna i ma charakter zarówno poznawczy, jak i wdrożeniowy, gdyż jej wyniki zostały zastosowane w praktyce. Autor wykazał się samodzielnością w planowaniu, realizacji badań i interpretacji ich wyników. Dojrzałość badawczą Pana mgr. inż. Wojciecha Sosnowskiego potwierdza dobór szerokiego spektrum właściwych, różnorodnych, a jednocześnie komplementarnych metod badawczych, które umożliwiły osiągnięcie celu pracy i sformułowanie wniosków oraz wdrożenie wyników pracy do zastosowań przemysłowych. Na podkreślenie zasługuje duże doświadczenie Doktoranta w zakresie stosowania mieszanek gazowych i jego zaangażowanie w poszukiwanie nowych rozwiązań, które mogą poprawić jakość złączy bez jednoczesnego obniżania spawalności stali.

Na tej podstawie stwierdzam, że opiniowana praca doktorska pod tytułem „Wpływ dodatku wodoru do osłony argonowej na jakość złączy spawanych wybranych stali ferrytycznych” spełnia w pełni wymagania określone w Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule Naukowym w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z dnia 16 kwietnia 2003 roku poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Wojciecha Sosnowskiego do publicznej obrony w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Sporządził:

*Dariusz Fjodor*