

Adam Grajcar
dr hab. inż., prof. PŚ
Instytut Materiałów Inżynierskich
i Biomedycznych
POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Wydział Mechaniczny Technologiczny
ul. Konarskiego 18a
44-100 GLIWICE

Tel: +48 (32) 2372933
Fax: +48 (32) 2372281
e-mail: adam.grajcar@polsl.pl

Gliwice, dn. 21.08.2018 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr. inż. Piotra Nogi pt.

“Wpływ technologii łączenia na budowę mikrostrukturalną i własności mechaniczne złączy ze stopów aluminium i stali”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Pana Prof. dr hab. inż. Tadeusza Knycha z dnia 12 lipca 2018 r., informującego, że Rada Wydziału Metali Nieżelaznych AGH powołała mnie na recenzenta pracy doktorskiej mgra inż. Piotra Nogi, w przewodzie prowadzonym w dyscyplinie „Inżynieria Materiałowa”.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska mgra inż. Piotra Nogi, napisana pod opieką promotorską Pani Prof. dr hab. inż. Marii Richert oraz promotora pomocniczego Pana dr inż. Marka Stanisława Węglowskiego, składa się z 8 rozdziałów, wśród których klasycznie wyodrębniono: wprowadzenie, przegląd literatury, cel pracy, badania własne, wyniki badań, dyskusję wyników, wnioski i bibliografię. Autor bardzo rozdrobnił nagłówki w rozdziale 5 (wyniki badań), co sprawia wrażenie raportowości ocenianej dysertacji. Wzmacnia to fakt, że w spisie treści nadużywane są skróty metod spawania wraz z oznaczeniem stopów: np. MIG 6082, TIG 6082, EBW 6082, FSW 6082, PAW 316Ti, itd. Nietypowy jest podział rozdziałów 2.3 i 2.4 na 2.3.1 i 2.4.1. Zdaniem Recenzenta podział na podrozdziały ma sens jeśli zawiera on chociaż dwie odrębne sekcje.

Praca zawiera 214 stron, chociaż rzeczywista ilość opracowania jest znacznie mniejsza. W pracy można bowiem znaleźć bardzo dużą liczbę luk, tzn. stron zapełnionych w 1/2 lub 1/3. Efektywną liczbę stron szacuję na około 170, co zresztą w moim odczuciu jest sprawniejszym i wystarczającym przedstawieniem omawianej tematyki. Autor zamieścił 53 tabele oraz 137 rysunków. Zdaniem Recenzenta ich ilość mogłaby być mniejsza bez szkody dla wartości merytorycznej rozprawy. Autor bowiem bardzo konsekwentnie podaje wynik ilustracyjny dla

każdego, indywidualnego wariantu. Czasem – ze względu na korespondencyjność wyników – można byłoby zamieścić jedynie wyniki reprezentatywne. Praca napisana jest poprawnym językiem polskim, chociaż można w niej znaleźć pewne błędy językowe oraz literowe o umiarkowanej częstości. Powyższe uwagi są natury porządkowej i nie stanowią wpływu na wartość merytoryczną ocenianej rozprawy.

Autor cytuje 235 pozycji literaturowych, obejmujących zarówno pozycje źródłowe, jak i polskie oraz zagraniczne publikacje naukowe. Odwołania obejmują klasyczne podręczniki akademickie, specjalistyczne czasopisma naukowe oraz normy. Autor odwołał się do 1 pozycji współautorskiej [3], opublikowanej w zagranicznych materiałach konferencyjnych.

3. Ocena doboru tematyki i zakresu pracy

Praca dotyczy badania zależności pomiędzy warunkami spawania / zgrzewania, mikrostrukturą oraz własnościami mechanicznymi stopu Al-Si-Mg w gatunku 6082 oraz stali austenitycznej gatunku AISI 316Ti. Stanowi ona część badań prowadzonych w ramach projektu PBS pt. „Dobór materiałów oraz opracowanie konstrukcji elementów przewodów klimatyzacyjnych przeznaczonych do pracy z nowym czynnikiem chłodniczym R744”. Z natury rzeczy dysertacja jest typu technologicznego, chociaż efektywnie zawarto w niej elementy poznawcze o charakterze naukowym. Oceniana praca ma więc charakter dyskusji naukowo-technologicznej, a przedstawiony problem naukowy i jego rozwiązanie lokują ją w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Celem pracy był wybór najkorzystniejszej metody spawania stopu aluminium 6082 i stali 316Ti, do zastosowania w produkcji komponentów na klimatyzatory samochodowe. Ocena obejmowała jednorodność struktury oraz własności mechaniczne. Wydaje się, że charakter pracy ma głównie aspekt użytkowy. Szkoda, że Autor nie rozbudował bardziej celu pracy o elementy o charakterze poznawczym. Co miał na myśli pisząc „jednorodność struktury”, skoro procesy spawania / zgrzewania z natury rzeczy należą do niejednorodnych. Brakuje tutaj prawdopodobnie kryterium oceny. Szerokie spektrum prezentowanych w pracy danych mikrostrukturalnych oraz własności mechanicznych na pewno daje lepszą szansę bardziej naukowego sformułowania pracy, chociażby w oparciu o dużą gamę ilościowych danych mikrostrukturalnych z analiz EBSD oraz mapingu składu chemicznego.

Praca doktorska mgra inż. Piotra Nogi wpisuje się w tematykę badań dotyczących wpływu parametrów łączenia na mikrostrukturę i własności mechaniczne złączy. Chociaż wybrane materiały oraz większość zastosowanych technik łączenia są dosyć dobrze przebadane i opisane w literaturze Autor w jednym opracowaniu dokonał kompleksowego porównania kilku metod spawania / zgrzewania i dokonał ich oceny pod względem spawalniczym i metaloznawczym, zarówno dla wybranego stopu Al, jak i stali austenitycznej.

Zakres badawczy pracy jest szeroki i poprawnie dobrany do tytułu oraz celu rozprawy. Autor przeprowadził 5 serii eksperymentów dla stopu aluminium oraz 4 serie dla próbek stalowych. W przypadku stopu 6082 zastosowano:

- spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego - MIG,
- spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego - TIG,

- spawanie wiązką elektronów - EBW,
- zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny - FSW,
- zgrzewanie tarciove konwencjonalne szybkoobrotowe.

W przypadku stali 316Ti pierwsze 3 metody były analogiczne, a dodatkowo zastosowane spawanie plazmowe - PAW. Biorąc pod uwagę oryginalność pracy, szczególne walory poznawcze obejmuje analiza wyników badań z zastosowaniem spawania wiązką elektronów, spawania plazmowego oraz zgrzewania tarciovego z mieszaniem materiału zgrzeiny.

4. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

4.1. Ocena przeglądu literatury

Przegląd literatury sporządzono na 75 stronach. Jest on poprzedzony Wprowadzeniem o zabarwieniu historycznym. Zdaniem Recenzenta Autor mógł jednak uniknąć pewnych faktów historycznych, np. „Profesor Stefan Bryła ... został rozstrzelany przez Niemców w 1943 roku w Warszawie [8]”. Przegląd piśmiennictwa ma dobry poziom naukowy. Koncentruje się wokół problematyki technik łączenia stosowanych w spawalnictwie oraz na spawalności stopów aluminium i stali austenitycznych. Techniki łączenia zawarte w punkcie 2.1 mają niepotrzebnie zbyt ni charakter podręcznikowy. Pewne, powszechnie wiadome informacje zostały niepotrzebnie przytoczone. Autor odnosi się sukcesywnie do cytowanych pozycji literaturowych. Recenzent zauważył jednak brak odniesień do pozycji [24, 47-49, 52, 53, 56, 95, 96]. W cytowanych pozycjach literaturowych jest dosyć dużo błędów literowych, np. stosowanie zamiennie małych i dużych liter, pełnych nazw i skrótów, czasami brak pełnych danych bibliograficznych.

Najbardziej wartościowy poznawczo w moim odczuciu jest podrozdział 2.3.1. Spawanie stopu 6082. Część ta jest napisana w pewnym kontraście do podręcznikowego charakteru pozostałych podrozdziałów. Autor dokonuje tutaj dojrzałej dyskusji naukowej dotyczącej różnych aspektów spawania stopów aluminium (głównie 6082). Cytuje wkład poszczególnych autorów i formułuje główne problemy badawcze dotyczące spawalności stopów aluminium. Na uwagę zasługuje także ciekawie napisany punkt 2.1.5. Zgrzewanie tarciove z mieszaniem materiału zgrzeiny, co wskazuje że ta aktualna problematyka ma wciąż duży potencjał badawczy.

4.2. Ocena zastosowanej metodyki badawczej

Metodyczna część pracy nie budzi zastrzeżeń. Autor dał się poznać jako dobry eksperymentator. Wykonał złącza doczołowe sześcioma różnymi metodami (5 metod dla stopów Al oraz 4 metody dla stali), biorąc pod uwagę różną ilość ciepła dostarczaną do spoiny / zgrzeiny. Następnie poprawnie dobrał techniki badawcze do charakterystyki mikrostruktury i własności mechanicznych wykonanych złączy. Widoczny jest duży nakład pracy eksperymentalnej i metodycznej przy realizacji kolejnych etapów pracy. Zastosowane metody badawcze obejmowały:

- szczegółowe badania mikrostrukturalne: mikroskopia świetlna, skaningowa i transmisyjna wraz z badaniami składu chemiczną metodą EDS,
- rentgenowską analizę fazową jakościową,

- badania ilościowe z zastosowaniem techniki EBSD,
- badania nieniszczące: wizualne, penetracyjne, radiologiczne,
- badania niszczące: próba rozciągania, próba zginania, pomiar twardości.

Niektóre opisy metodyczne są bardzo lakoniczne, np. etap przygotowania próbek (4.1.2) lub opis rentgenowskiej analizy fazowej.

4.3. Ocena uzyskanych wyników badań i ich dyskusji

Autor słusznie rozpoczął od charakterystyki materiałów w stanie wyjściowym. Dla tych stanów odniesienia, a także dla kolejnych 9 wariantów wykonanych połączeń konsekwentnie prezentuje zestaw kompletnych wyników, tzn. makrostruktury i mikrostruktury zarejestrowane w mikroskopie świetlnym i skaningowym, mapy rozkładu pierwiastków zarejestrowane przy pomocy przystawki EDS oraz analizy punktowe składu chemicznego pomocne przy identyfikacji wydzielań. Mikrostruktura jest identyfikowana konsekwentnie w 3 różnych strefach złącza, tzn. w licu, w grani oraz przy linii wtopienia, co daje pełny obraz zmian mikrostrukturalnych wywołanych cyklami cieplnymi łączenia o różnej intensywności dostarczanej energii. Na uwagę zasługuje bardzo dobre opanowanie techniki trawienia zarówno stopów Al, jak i stali austenitycznej. Dzięki mappingowi składu chemicznego i punktowym analizom EDS oraz odniesieniom literaturowym poprawnie zidentyfikowano fazy Mg_2Si i $Al(FeMn)Si$, stanowiące wydzielenia w badanym stopie Al. Tym samymi technikami dowiedziono obecność ferrytu w stali gatunku 316Ti.

Udział ferrytu zidentyfikowanego wcześniej w badaniach metalograficznych mikroskopowych (także techniką EBSD) w złączach ze stali 316Ti wyznaczono metodą magnetyczną. Jego obecność potwierdzono także techniką dyfrakcji rentgenowskiej, podobnie jak rodzaj wydzielań występujących w stopie aluminium. Ciekawych danych ilościowych dotyczących rozkładu wielkości ziarn w poszczególnych strefach złącza oraz orientacji krystalograficznej dostarczyły wyniki badań EBSD. Jednakże ich analiza jest dosyć uboga i na pewno powinna być bardziej uszczegółowiona w przypadku zamiaru publikacji wyników badań. Komplementarnych danych (dla wybranych wariantów badanych złączy) odnośnie cech mikrostrukturalnych ziarn w poszczególnych strefach złącza dostarczyły dane uzyskane z użyciem przystawki do transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Do szczególnie cennych należy zaliczyć wyniki ilustrujące efekty odkształcenia wprowadzone metodą zgrzewania z mieszaniem materiału zgrzeiny, chociaż interpretacje dotyczące rozwoju struktury dyslokacyjnej mogą mieć jedynie charakter spekulacyjny, w odniesieniu do podobnych wyników badań dostępnych w literaturze.

Duża ilość materiału ilustracyjnego i konsekwencja prezentowania kompletnych wyników badań dla każdego wariantu nie zawsze są w zgodności z analizą uzyskanych wyników badań. Niektóre analizy są zbyt pobieżne i nie wyczerpują w pełni prezentowanego materiału graficznego. Niedosyt budzi np. brak próby podziału wydzielań pierwotnych i wtórnych w stanie wyjściowym dla stopu Al oraz brak określenia udziału tych cząstek, zaniechanie analizy dystrybucji Cr i Mo do ferrytu oraz Ni do austenitu (na podstawie mapingu). Rysunki są zazwyczaj podpisywane dosyć lakonicznie, nie uwzględniając szczegółów tam przedstawianych, np. Rys. 36. Mikrostruktura stopu 6082. Mikroskopia świetlna / Rys. 37. Mikrostruktura stopu 6082 T651. Mikroskopia skaningowa.

Charakterystyczne jest także branżowe nazewnictwo badanych stopów, np. stop serii 6082 w stanie T651, które zbyt często dominuje opis, a w efekcie brak wyjaśnienia istoty procesów zachodzących np. podczas starzenia tych stopów.

W końcowej części pracy wykonane złącza poddano badaniom własności mechanicznych na podstawie których wnioskowano o efektywności złącza. Cennych danych dostarczają przestrzenne wykresy twardości dające rozeznanie co do zmian twardości w całej objętości złącza. Autor odnosi wyniki badań własności mechanicznych do obserwowanych zmian mikrostrukturalnych oraz dokonuje dostatecznej konfrontacji wyników z danymi literaturowymi. Dalsza dyskusja prowadzona jest w rozdziale 6 (Dyskusja wyników). Jest ona przeprowadzona na dobrym poziomie naukowym. Skupiono się głównie na tematyce efektywności złącza, co ma związek z celem recenzowanej pracy doktorskiej. Szczegółowo podsumowano analizy dotyczące zmian własności mechanicznych, natomiast nieco mniej uwagi poświęcono zmianom typu mikrostrukturalnego. W podobnej konwencji zaprezentowano wnioski z badań. Stwierdzono, że optymalną metodą spawania badanego stopu aluminium jest metoda MIG, natomiast dla stali austenitycznej jest to metoda MIG oraz TIG.

4.4. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

Ogólnie pracę doktorską mgra inż. Piotra Nogi oceniam pozytywnie. Podczas jej lektury nasuwają się pewne pytania dyskusyjne oraz szczegółowe (natury edycyjnej oraz inne drobne uwagi), który wyrażam poniżej:

Uwagi dyskusyjne:

- Istotne byłoby podanie udziału cząstek w stopie aluminium w stanie wyjściowym. Czy Autor jest w stanie oszacować udział cząstek pierwotnych oraz cząstek wydzielonych podczas starzenia? W pracy nie można znaleźć parametrów temperaturowo-czasowych przesycania i starzenia, które determinują ich udział i mają wpływ na realizowane cykle spawalnicze.
- Jaka jest ewolucja cząstek w stopie Al podczas spawania? Autor podaje pewne fragmentaryczne dane dotyczące ich wielkości i ilości. Brak jest natomiast podsumowującego zestawienia, jak wygląda ewolucja tych cząstek (tzn. udział, wielkość, ewentualna koagulacja) w trakcie cyklu spawalniczego pomiędzy różnymi metodami. Jakie są pewne wspólne tendencje dla wszystkich metod oraz wyraźne różnice?
- Jak kształtuje się udział i wielkość cząstek w poszczególnych strefach złącza?
- W pracy zaniechano dyskusji związanej ze wzbogaceniem ferrytu w Cr i Mo oraz jego zubożeniem w Ni. Istotną byłaby wiedza, jak problem ten kształtuje się pomiędzy różnymi technikami spawania?

Uwagi szczegółowe:

- Te same nazwy tabel 6 i 7; te same podpisy rysunków 63 i 64
- Strona 87. Błędne odwołanie do mapy rozkładu pierwiastków – jest: rys. 37, a powinno być: rys. 38

- Od strony 150 Autor prawdopodobnie przesunął numery odwołań literaturowych o 1 pozycję, tzn. zamiast [213], powinno być [212], itd.
- Brak podania płaszczyzn na dyfraktogramach rentgenowskich, rys. 102 i 103
- Strona 196; zbędny pierwszy akapit (wtrącenie) bez związku z opisem.

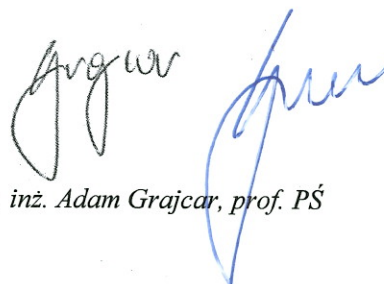
Poruszone uwagi mają głównie charakter dyskusyjny oraz porządkowy i tym samym nie umniejszają mojej pozytywnej oceny pracy doktorskiej mgra inż. Piotra Nogi.

5. Wniosek końcowy

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Nogi zaliczam udokumentowane rozwiązanie problemu naukowego obejmującego porównanie zmian mikrostrukturalnych stopu Al-Si-Mg oraz stali austenitycznej w gatunku 316Ti dla różnych metod spawania / zgrzewania. Autor przeprowadził serię eksperymentów wymagających wiedzy i umiejętności analizy wyników dotyczących spawalniczych aspektów inżynierii materiałowej. Na szczególną uwagę zasługuje wykazanie zmian udziału ferrytu w różnych strefach złącza dla różnych metod łączenia wprowadzających różną ilość energii i korespondencyjnych zmian twardości złącza. Istotne znaczenie poznawcze ma także analiza rozwoju struktury złącza w jego różnych strefach i cech mikrostrukturalnych w zależności od zastosowanej metody spawania, determinującej wielkość ziarn osnowy oraz stopień dyspersji wydzieleni umacniających w stopie Al. Na uwagę zasługuje interdyscyplinarność podjętej problematyki oraz wysoki poziom warsztatu naukowego, w zakresie kompleksowej analizy wyników skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej, mapingu składu chemicznego, badań rentgenowskich, a także metody EBSD.

Podsumowując osiągnięcia pracy doktorskiej mgra inż. Piotra Nogi biorę pod uwagę, że Autor rozwiązał oryginalny problem naukowy, sprowadzający się do kompleksowego porównania zmian mikrostrukturalnych i własności mechanicznych złączy spawanych / zgrzewanych ze stopu Al-Si-Mg oraz stali austenitycznej z kilkuprocentowym udziałem ferrytu, poddanych łączeniu w warunkach różnej ilości wprowadzonej energii. Dowiódł, że zmiany mikrostruktury i własności mechanicznych zależą istotnie od zastosowanej metody łączenia, a końcowe kryteria jakościowe spełnia jedynie 1 metoda dla stopu Al oraz 2 metody dla stali austenitycznej.

Rozwiązanie problemu naukowego wymagało dużej wiedzy teoretycznej z zakresu metaloznawstwa stopów metali nieżelaznych i stali austenitycznych oraz ich spawalności, metodycznego prowadzenia eksperymentu przy użyciu zaawansowanej aparatury naukowo-badawczej oraz umiejętności prowadzenia pracy naukowej i wyciągania właściwych wniosków. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że mgr inż. Piotr Noga spełnia wymagania określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r., wobec czego wnioskuję do Rady Wydziału Metali Nieżelaznych AGH o dopuszczenie mgra inż. Piotra Nogi do publicznej obrony.



dr hab. inż. Adam Grajcar, prof. PŚ