

Dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Instytut Technik Wytwarzania
Zakład Inżynierii Spajania
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Warszawa, dn. 06.02.2019 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

„Właściwości użytkowe szynoprzewodów spawanych z wykorzystaniem
techniki mikro-jetowej”

Autor: mgr inż. Michał Krzysztoforski

Promotor: prof. zw. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Bożena Szczucka-Lasota, prof. PŚ

Opracowano na zlecenie Rady Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej
Uchwała nr VI/45/2018/2019

1. Treść i zakres rozprawy

Recenzowana praca dotyczy nowoczesnego nurtu naukowego modyfikacji cyklu cieplnego spajania poprzez zaawansowane, regulowane chłodzenie mikrostrumieniowe, ukierunkowane na uzyskanie specyficznych właściwości złączy spawanych stopu aluminium, z którego wykonywane są tory prądowe szynoprzewodów służące do wyprowadzania mocy z generatorów do transformatorów blokowych w elektrowniach.

Rozprawa składa się z trzynastu rozdziałów, przy czym jej zasadnicza część, opisująca badania naukowe Doktoranta obejmuje rozdziały od siódmego do jedenastego. Pozostałe części pracy to: wprowadzenie, szeroka analiza stanu zagadnienia, podsumowanie, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis literatury cytowanej w rozprawie zawierający 69 pozycji w tym cztery prace Doktoranta.

W rozdziale pierwszym autor wprowadza w problematykę eksploatacji i konstrukcji szynoprzewodów, opisuje ograniczenia technologiczne w obszarze ich wytwarzania oraz wskazuje na potrzebę opracowania nowej technologii ich spajania w kontekście ograniczenia straty przesyłu energii elektrycznej.

W rozdziale drugim autor charakteryzuje procesy spajania stosowane do wytwarzania konstrukcji z aluminium i jego stopów odnosząc się do konwencjonalnych łukowych metod spawania oraz omawia nowoczesną metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW (ang. *Friction Stir Welding*).

Rozdział trzeci poświęcono szerokiej charakteryzacji kilku odmian szynoprzewodów jako wielkogabarytowych konstrukcji ze stopów aluminium, dla których wspólnym problemem pozostają złącza spawane determinujące ich właściwości elektryczne i mechaniczne. Szeroko opisano zagadnienie właściwości spoiwa stosowanego do spawania oraz przedstawiono zasady jego wyboru z punktu widzenia oczekiwanych właściwości złącza.

W rozdziale czwartym Autor opisał innowacyjną metodę chłodzenia mikrostrumieniowego oraz przedstawił uwarunkowania jej stosowania w różnych procesach spajania jako istotny czynnik kształtowania cyklu cieplnego. Autor przeanalizował dostępne w literaturze opracowania dotyczące kształtowania właściwości spoin materiałów stalowych z zastosowaniem chłodzenia mikrostrumieniowego.

W rozdziale piątym szeroko opisano metody kształtowania struktury i właściwości fizycznych stopów aluminium w kontekście możliwości uzyskania lepszych wskaźników funkcjonowania energetycznej sieci przesyłowej.

W rozdziale szóstym podsumowano przegląd literatury. Jednoznacznie uzasadniono potrzebę kreowania nowych rozwiązań technologicznych spajania elementów konstrukcyjnych szynoprzewodów ze stopów aluminium. Wytypowano metodę MIG (ang. *Metal Inert Gas*) zmodyfikowaną o mikrostrumieniowe, punktowe chłodzenie zastosowane w celu sterowania m.in. wielkością ziarna w spoinie aluminiowej.

W rozdziale siódmym autor opisał cel i zakres pracy. Za cel postawiono zbadanie wpływu chłodzenia mikrostrumieniowego na właściwości plastyczne

i elektryczne złącza spawanych aluminium gatunku 1050 stosowanego do wytwarzania torów prądowych szynoprzewodów.

W rozdziale ósmym Autor przedstawił wyniki badań rozpoznawczych, aluminiowych złączy spawanych chłodzonych mikrostrumieniowo. Opisano autorskie stanowisko badawcze wyposażone w inżektor mikrostrumieniowy, zaprojektowany i wykonany na potrzeby prowadzonych eksperymentów. Przeanalizowano uwarunkowania występowania siły elektrodynamicznej występującej w stanie zwarcia o charakterze udarowym, obciążającej mechanicznie konstrukcję. Opisano wpływ wybranych czynników technologicznych: metoda spawania, grubość złącza, odległość pomiaru oraz gatunek spoiwa na przewodność spoiny. Wskazano na spoiwo jako czynnik istotnie wpływający na tę właściwość. Wykonano badania termowizyjne trzech wariantów szyn prądowych ze spoinami spawanymi w różnych warunkach, obciążonych prądem o natężeniu 2 kA. Opisano pomiary strat mocy czynnej na poszczególnych spoinach oraz pomiary oporności próbek złączy spawanych z zastosowaniem chłodzenia mikrostrumieniowego.

W rozdziale dziewiątym Autor postawił tezę „Wykonanie spoin z użyciem techniki mikrostrumieniowej w konstrukcji szynoprzewodów zapewni lepsze właściwości mechaniczne połączeń spawanych oraz obniży straty własne mostów szynowych”.

W rozdziale dziesiątym autor opisuje badania zasadnicze rozprawy, oparte na zaplanowanym eksperymencie, uwzględniające dobór parametrów chłodzenia mikrostrumieniowego, badania przewodności metodą prądów wirowych, badania wytrzymałości na rozciąganie oraz badania strukturalne.

W rozdziale jedenastym przeprowadzono analizę i sformułowano równanie regresji. Na podstawie wartości współczynników regresji określono kierunek zależności oznaczanych wartości od zmiennych parametrów chłodzenia.

2. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Praca dotyczy istotnego zagadnienia kształtowania struktury i właściwości złączy spawanych aluminiowych torów prądowych szynoprzewodów służących do wprowadzania mocy z generatorów do transformatorów blokowych w elektrowniach.

Podjęta tematyka jest interesująca naukowo w punktu widzenia spawalności stopów aluminium oraz ma istotne znaczenie dla obniżenia strat przesyłowych energii elektrycznej.

W związku z powyższym wybór tematyki uważam za uzasadniony zarówno ze względów naukowych jak i utylitarnych.

3. Ocena merytoryczna

Doktorant obrał ambitny cel, którym było opracowanie warunków innowacyjnego mikrostrugowego chłodzenia złącza podczas spawania metodą MIG aluminium, w celu kształtowania istotnych właściwości z punktu widzenia warunków eksploatacji torów prądowych szynoprzewodów. Należy przyznać, że jest to wyjątkowy sposób kształtowania cyklu cieplnego spawania.

Autor rozprawy postawił tezę „Wykonanie spoin z użyciem techniki mikrostrumieniowej w konstrukcji szynoprzewodów zapewni lepsze właściwości mechaniczne połączeń spawanych oraz obniży straty własne mostów szynowych”.

Celem potwierdzenia zasadności zastosowania technologii chłodzenia mikrostrugowego podczas spawania aluminium przeprowadzono badania wstępne, rozpoznawcze, obejmujące:

- zaprojektowanie i wykonanie inżektora mikrostrumieniowego,
- badania oporności spoin,
- opis wpływu metody spawania i innych zmiennych procesu na przewodność elektryczną spoin,
- badania termowizyjne spoin szynoprzewodów obciążonych prądem,
- ocenę wpływu gatunku gazu chłodzącego na oporność spoiny,
- badania nieniszczące złączy spawanych wykonanych użyciem chłodzenia mikrostrumieniowego.

Wykazano, że zasadne jest stosowanie przedmiotowego chłodzenia, gdyż może prowadzić do zwiększenia przewodności elektrycznej spoiny.

W celu udowodnienia postawionej tezy przeprowadzono następujące badania:

- badanie przewodności elektrycznej metodą prądów wirowych spoin

chłodzonych mikrostrumieniowo,

- badanie wytrzymałości na rozciąganie spoin chłodzonych mikrostrumieniowo,
- analizę wpływu liczby strug i ciśnienia wypływu gazu chłodzącego oraz odległości inżektora mikrostrumieniowego od palnika spawalniczego na przewodność elektryczną i właściwości mechaniczne spoin,
- badanie mikrostruktury spoin chłodzonych mikrostrumieniowo,
- wykonano rentgenowską analizę fazową.

Uzyskane Wyniki pomiarów przewodności i wytrzymałości na rozciąganie oraz badania metalograficzne jednoznacznie potwierdziły celowość zastosowania chłodzenia mikrostrugowego w procesie spawania aluminium. W przeprowadzonych badaniach, złącza wykonane bez dodatkowego chłodzenia, charakteryzowały się najniższą przewodnością elektryczną oraz najwyższą wytrzymałością na rozciąganie. Potwierdzono, że zastosowanie dodatkowego chłodzenia wpływa korzystnie na właściwości elektryczne i plastyczne spoin. Dzięki przeprowadzonej analizie statystycznej wykazano, że regulowane parametry chłodzenia mikrostrugowego – liczba strug, wartość ciśnienia gazu chłodzącego i odległość inżektora mikrostrugowego od uchwyty elektrodowego, w istotny sposób wpływają na badane właściwości spoin. Dobór odpowiednich wartości istotnych statystycznie parametrów chłodzenia zapewnia możliwość sterowania strukturą spoiny oraz uzyskanie odpowiednich właściwości plastycznych i elektrycznych.

Wykonano badania metalograficzne oraz wytrzymałościowe uzyskanych złączy, które charakteryzowały się właściwościami spełniającymi wymagania stawiane w praktyce przemysłowej, potwierdzając możliwość ich komercyjnego zastosowania.

Obszerny opis badań, prezentację i analizę uzyskanych wyników zakończono podsumowaniem i planami dalszych prac, które oceniam pozytywnie.

Po wnikliwym zapoznaniu się z treścią rozprawy stwierdzam, że analiza stanu zagadnienia, plan badań, metodyka i realizacja badań, dobór aparatury naukowo-badawczej oraz opracowanie wyników, prezentują wysoki poziom merytoryczny, a sformułowane przez autora cele pracy zostały zrealizowane w planowanym zakresie.

Do zalet pracy zaliczam kompleksowe ujęcie badanego problemu kształtowania struktury spoin pod wpływem chłodzenia mikrostrumieniowego, poprawność metodologiczną wynikającą ze struktury opracowania, poprawność metodyczną w rozwiązywaniu zadań cząstkowych.

Autor wykazał się szeroką, interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania badań oraz interpretacji uzyskanych wyników. W wielu fragmentach pracy można dostrzec świadomość naukową i duże doświadczenie technologiczne autora. Dobrze oceniam analizę wyników badań, jest kompleksowa.

4. Uwagi do pracy

W pracy występują nieliczne niedoskonałości gramatyczne, językowe i stylistyczne nie mające wpływu na merytoryczną stronę opracowania. Zastosowane w pracy nazewnictwo jest generalnie poprawne.

Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym.

1. Autor nie zdecydował się uwzględnić w badaniach zasadniczych spoiwa Al99,Ti5, którego wpływ na zwiększenie przewodności spoiny w stosunku do spoiny wykonanej spoiwem AlSi5 był istotny i został potwierdzony na etapie badań wstępnych.
2. Przewodność elektryczna określonego metalu powiązana jest m.in. z jego budową fazową, strukturalną oraz rodzajem defektów sieci krystalicznej i natężeniem ich występowania. Oporność elektryczna związana jest z rozpraszaniem strumienia elektronów (generowanego polem elektrycznym w przewodniku) m.in. na defektach powierzchniowych w postaci granic ziaren, których udział objętościowy rośnie wraz rozdrobnieniem struktury. Wskazuje to na odwrotną zależność wielkości ziarna i przewodności niż zaobserwowana przez Doktoranta.
3. W pomiarach przewodności spoin nie uwzględniono różnego przekroju czynnego spoin (geometria lica i grani badanych spoin jest różna), mogącego mieć istotny wpływ na rejestrowane wartości.

5. Wnioski końcowe

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje bardzo dobry poziom merytoryczny, zawiera wiele elementów nowości i oryginalności oraz wnosi wkład w rozwój kształtowania struktury i właściwości fizycznych złączy spawanych aluminium poprzez kontrolowane chłodzenie podczas spawania. Ponadto stwierdzam, że Autor wykazał się szeroką interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych, umiejętnością krytycznej oceny uzyskanych wyników, co świadczy o predyspozycjach do realizacji prac badawczych.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska opracowana przez Pana mgr. inż. Michała Krzysztoforskiego pt. „Właściwości użytkowe szynoprzewodów spawanych z wykorzystaniem techniki mikro-jetowej” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie Budowa i eksploatacja maszyn.

