

Prof. dr hab. inż. Janusz Szpytko
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 11.02.2019

RECENZJA

pracy doktorskiej mgra inż. Piotra Woźnego pt. *Badanie wpływu parametrów spawania stopu aluminium AW 5754 metodą TIG na jakość spoiny*

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Piotra Woźnego pt. *Badanie wpływu parametrów spawania stopu aluminium AW 5754 metodą TIG na jakość spoiny* jest pismo prof. dr. hab. inż. Józefa Żurka, zastępcy Przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Technicznych Wojsk Lotniczych w Warszawie z dnia 06.12.2018 roku (bez l.dz.). Praca posiada charakter zwartego opracowania w formie papierowej i obejmuje 132 strony, została opublikowana przez Wydawnictwo Instytutu Technicznych Wojsk Lotniczych w Warszawie, Warszawa, 2018).

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Józef Błachnio, Instytut Technicznych Wojsk Lotniczych w Warszawie, promotorem pomocniczym jest: płk. dr hab. inż. Krzysztof Dragana.

2. Analiza przedłożonego opracowania wraz z uwagami

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje 7 rozdziałów, a ponadto: wykaz ważniejszych oznaczeń, symboli i skrótów oraz literaturę. Rozprawę należałoby uzupełnić o streszczenia pracy w językach polskim i angielskim.

W rozdziale 1 (*Wstęp*) Autor formułuje problem naukowy i praktyczny w postaci ustalenia zależności jakościowych i ilościowych pomiędzy parametrami procesu spawania metodą TIG (ang. *Tungsten Insert Gas*; spawanie lukowe w osłonie helu, argonu, mieszanki helu i argonu), a niezgodnościami spawalniczymi i wytrzymałością spoiny elementu ze stopu aluminium z magnezem przeznaczonego do przeróbki plastycznej. Formułuje ponadto uzyskane w rezultacie przeprowadzonych badań wyniki: ustalenie optymalnych warunków technologicznych spawania, opracowanie metody jakościowego i ilościowego doboru parametrów procesu spawania, rezultatem których są: polepszenie właściwości mechanicznych spawu, zmniejszenie liczby niezgodności spawalniczych, zwiększenie wytrzymałości połączenia spawanego na rozciąganie. Zidentyfikowane zagadnienie stanowi istotny praktycznie zorientowany problem naukowy.

Rozdział 2 (*Analiza problematyki spawania aluminium oraz niezawodności spawalniczych elementów samolotu manewrowego*) obejmuje z wykorzystaniem literatury analizę zagadnienia jakości spawania:

1. stopów aluminium w kontekście: zastosowania stopów aluminium (z uwzględnieniem materiału i oceny spawalności), metody spawania stopów aluminium, możliwych wad i niezgodności spawalniczych;
2. metodą TIG, z uwzględnieniem: charakterystyki spawania i wyróżnieniem problemów występujących podczas procesu spawania;

3. w kontekście niezawodności spawanych elementów samolotu manewrowego, wyrażonej uszkodzeniami połączeń spawanych powstających w procesie eksploatacji samolotu manewrowego, z uwzględnieniem ich podatności degradacyjnej;

Rozdział 3 (*Cel, teza i zakres pracy*) jest logicznie spójny i wskazuje sformułowanie problemu, motywację jego podjęcia oraz zastosowanie praktyczne.

Zalozonym przez Autora celem pracy jest zapewnienie bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji konstrukcji spawanych (zastosowanie: elementy konstrukcyjne maszyn i urządzeń, w szczególności: samolotów, statków, samochodów, innych maszyn roboczych) w rezultacie spełnienia wymogów technologicznych (kryteria oceny: spełnienie warunków wytrzymałości i plastycznych własności połączenia) poprzez dobór parametrów spawania mających wpływa na jakość i wytrzymałość połączenia. Wybrany do analizy materiałem spoiwa są stopy aluminium, charakteryzujące się znaczną odpornością korozyjną i chemiczną, małą masą właściwą połączenia spawanego. Do badań połączenia spawanego stosowane są metody: nieniszczące (tomografia komputerowa, radiografia cyfrowa), niszczące (badania wytrzymałościowe: statyczna próba rozciągania dla złącz czolowych).

Niedogodności zauważone przez Autora w rezultacie analizy wybranej literatury i własnych obserwacji procesu eksploatacji przedmiotowych konstrukcji spawanych obejmują następujące konkluzje: istniejące procedury doboru parametrów procesu spawania nie są precyzyjne; istnieje uzależnienie jakości spoiny od kwalifikacji spawacza; metoda badania jakości połączenia spawanego na podstawie oceny istnienia wad zewnętrznych spoiny nie jest wystarczająca i wymaga oceny możliwych wad wewnętrznych niemożliwej do realizacji na stanowisku spawalniczym. Autor sformułował również możliwe do uzyskania oszczędności w przypadku eliminacji zauważonych niedogodności: zmniejszenie zużycia materiału przeznaczonego do wykonania spawów próbnych, zmniejszenie liczby prób wytrzymałościowych

W rezultacie powyższych Autor sformułował tezę pracy w postaci: *istnieje możliwość modernizacji procesu spawania stopu aluminium metodą TIG poprzez taki dobór parametrów, który zapewni minimalizację wad mikrostruktury spoiny oraz zwiększy jej wytrzymałość na statyczne rozciąganie*. Następnie określił cel naukowy (*ustalenie zależności i związków pomiędzy parametrami procesu spawania metodą TIG a niezgodnościami spawalniczymi i wytrzymałością spoiny elementu ze stopu aluminium z magnezem*) oraz cel aplikacyjny (*modernizacja procesu spawania metodą TIG stopu aluminium z magnezem AW 5754 w celu minimalizacji niezgodności spawalniczych ocenianych nieniszczącymi metodami tomografii komputerowej i radiografii cyfrowej oraz zwiększenie wytrzymałości spoiny*).

Cel, teza i zakres pracy są sformułowane prawidłowo i w sposób dojrzały.

Rozdział 4 (*Dobór parametrów spawania oraz spoiwa w celu polepszenia jakości spawania próbek wykonanych metodą TIG*). Przedmiotem badania jakości spawania były próbki w postaci blachy o grubości 6 mm ze stopu aluminium z magnezem EN AW 5754 H22 umocnionych przez walcowanie i częściowo wyżarzonych, dla połączenia spawanego doczołowego z użyciem 2 gatunków spoiwa (druć spawalniczy AlMg3, AlMg5). Badania wykonano dla 5 połączeń (SPI – SPV) metodą TIG dla 7 próbek każdego połączenia, do wykonania których zaproponowano różne warianty parametrów procesu spawania (natężenie prądu, przepływ gazu osłonowego dla argonu, prędkość spawania, charakterystyka stopu spawalniczego; częstotliwość prądu dla elektrody wolframowej była stała). Scenariusz przedmiotowych badań przedstawiono na rysunkach (4.3.-4.7.) oraz zestawiono w tabelach (4.3.-4.7.). Następnie dokonano ocen wizualnych spoin oraz zestawiono ujawnione ich niezgodności zewnętrzne. Przedmiotem oceny były: technologia spawania w realizacji jakości spoiny, parametry spawania, warunki spawania (s.55). W rezultacie przeprowadzonych badań sformułowano zalecenia

w zakresie zmian parametrów spawania w Instrukcji Technologicznej Spawania (tabela 4.8, s.63-64).

Rozdział 5 (*Badanie mikrostruktury połączeń spawanych metodą tomografii komputerowej i radiografii cyfrowej – ocena jakości spawów oraz niezgodności spawalniczych*).

Wady spawalnicze ujawnione w rezultacie badań z użyciem tomografii komputerowej. Na rysunkach 5.9.-5.23 (s.72-79) przedstawiono wyniki badań z użyciem tomografii komputerowej dla 3 próbek wykonanych i opisanych w rozdziale 4 pracy dla połączeń z użyciem spoin typu SPI – SPV. Zaobserwowane niezgodności spawalnicze w polu powierzchni i maksymalnej wysokości niezgodności przedstawiono w tabelach 5.2 (s.80), które były następnie porównane z wymaganiami określonymi w normach PN-L-01426, PN-ISO-5817 (rys.5.24-5.29) oraz przedmiotem analizy i syntezy (s.85-87).

Wady spawalnicze ujawnione w rezultacie badań z użyciem radiografii cyfrowej. Na rysunkach 5.33.-5.37 (s.90-92) przedstawiono wyniki badań z użyciem radiografii cyfrowej dla 3 próbek wykonanych i opisanych w rozdziale 4 pracy dla połączeń z użyciem spoin typu SPI – SPIII (rys. rys. 5.33.-5.35) oraz dla 7 próbek dla połączeń z użyciem spoin typu SPIV – SPV (rys. rys. 5.36.-5.37). W rezultacie przeprowadzonych badań sformułowano wnioski w zakresie zaobserwowanych niezgodności spawalniczych w próbkach.

Zaobserwowane niezgodności spawalnicze zidentyfikowane w rezultacie badań z użyciem radiografii cyfrowej porównano z rezultatami badań z użyciem tomografii komputerowej.

W rozdziale 6 (*Badanie połączenia spawanego na statystyczne rozciąganie oraz mikrotwardość*) przedstawiono wyniki badania połączeń spawanych (wykonanych próbek) na statystyczne rozciąganie oraz mikrotwardość.

Statyczne próby rozciągania połączeń spawanych wykonanych ze stopu aluminium EN AW 5754 przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi normami. Wyniki badań rozciągania dla próbki numer 1 dla połączeń typu SPI, SPII, SPIII, SPIV, SPV, przedstawiono odpowiednio na rys. rys. 6.5-6.7-6.9-6.11-6.13, natomiast tomogram połączenia, odpowiednio na rys. rys. 6.6-6.8-6.10-6.12-6.14.

Statyczna próba rozciągania wykonana dla materiału rodzimego oraz spoin doczołowych umożliwiła określenie właściwości wytrzymałościowych wykonanych połączeń spawanych metodą TIG. Na podstawie otrzymanych wyników z próby rozciągania określono wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności i wydłużenie.

Wyniki wykonanych uśrednionych badań na 7 próbkach dla 5 typów połączenia przedstawiono w tabeli 6.1 (s.102). Następnie przeprowadzono przedmiotową dyskusję uzyskanych wyników badań.

Z użyciem wyników uzyskanych z badań (statyczna próba rozciągania) zestawionych w tabeli 6.1., opracowano następnie charakterystyki zależności granicy plastyczności próbki R_m w funkcji jej wydłużenia $\cdot L$ pod obciążeniem oraz wytrzymałości na rozciąganie R_e w funkcji jej wydłużenia $\cdot L$ (rys. rys. 6.15-6.16) dla 5 wykonanych typów połączenia i 7 próbek.

Z użyciem wyników uzyskanych z przedmiotowych badań (niezgodności spawalnicze w mikrostrukturze spoiny wyrażone polem powierzchni i maksymalną wysokością niezgodności) zestawionych w tabeli 6.2., opracowano następnie charakterystyki zależności granicy plastyczności próbki R_m w funkcji powierzchni niezgodności w mikrostrukturze spoiny oraz wytrzymałości na rozciąganie R_e w funkcji powierzchni niezgodności w mikrostrukturze spoiny (rys. rys. 6.17-6.18) dla 5 wykonanych typów połączenia i 3 rodzajów próbek (relacje

pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie z niezgodnościami spawalniczymi w mikrostrukturze spoiny).

Zaobserwowane niezgodności spawalnicze w polu powierzchni i maksymalnej wysokości niezgodności zestawione w tabelach 6.1.-6.2. były następnie porównane z wymaganiami określonymi w normach PN-L-01426, PN-ISO-5817 (tabela 6.3. rys.6.19) oraz były przedmiotem oceny udziału niezgodności w objętości spoiny (tabela 6.4., rys. rys. 6.20-6.21.).

Następnie przeprowadzono badania mikrotwardości połączenia spawanego z użyciem metody Vickers'a. Pomiary przeprowadzono na 5 próbach dla każdego rodzaju spawu (7) przyjmując wyniki jako uśrednione. Zestawienie wyników pomiarów mikrotwardości połączenia spawanego wzdłuż ścieżki od lica do grani spoiny oraz wzdłuż ścieżek od spoiny przez strefę wpływu ciepła od materiału rodzimego, wykonane zgodnie z przedmiotowymi normami, przedstawiono w tabeli 6.5. i na rys.6.24. Zależności parametru granicy plastyczności próbki R_m od wyników pomiaru twardości spoin w przekrojach poprzecznych złączy spajanych przedstawiono na rys.6.25. Zależności parametru wytrzymałości na rozciąganie R_e od wyników pomiaru twardości spoin przedstawiono na rys.6.26. Zależności parametru twardości spoin od wartości współczynnika udziału niezgodności w objętości spoiny przedstawiono na rys.6.27.

Korelacje pomiędzy wynikami badania twardości spoin a wytrzymałością (granicy plastyczności próbki R_m , wytrzymałością na rozciąganie R_e) oraz udziałem niezgodności w objętości spoiny zestawiono w tabelach 6.6.-6.7.

W rezultacie przeprowadzonych badań sformułowano wnioski obejmujące następujące stwierdzenia: próba rozciągania złączy spawanych wykonanych metodą TIG potwierdza wpływ niezgodności spawalniczych na wartość parametrów wytrzymałościowych połączenia; analiza współczynnika korelacji wielorakiej wykazuje zależność pomiędzy twardością spoiny a jej wytrzymałością i udziałem niezgodności w spoinie.

Rozdział 7 obejmuje podsumowanie wykonanych prac i wnioski końcowe. Autor stwierdził i wykazał, że sformułowane cele naukowy i aplikacyjny zostały zrealizowane. Brak w pracy jednoznacznego stwierdzenia o realizacji sformułowanej tezie pracy, natomiast potwierdzający wniosek jest oczywisty jako rezultat realizacji sformułowanych celów pracy oraz sformułowanych przez Autora oryginalnych osiągnięć (s.124).

Autor sformułował wnioski końcowe, podkreślając że będący przedmiotem badań wpływ parametrów procesu spawania na powstawanie niezgodności spawalniczych ograniczone w pracy do wybranych (gatunku spoiwa, prędkości przepływu gazu osłonowego, balansu i natężenie prądu spawania), nie wyczerpuje dalszych badań ukierunkowanych na doskonalenie jakości procesu spawania w funkcji niedogodności spawalniczych i wytrzymałości spoin oraz metod ich badań.

Rozdział *Literatura* obejmuje wykaz 116 pozycji, w tym 6 z udziałem współautorskim Autora pracy doktorskiej: sprawozdanie z prac ITWL (2), Problemy Badań i Eksploatacji Techniki Lotniczej (1), Studies and Proceedings of Polish Association for Knowledge Management (1), Journal of KONIN (1), Aviation Advances and Maintenance (1).

Pytania do rozprawy doktorskiej:

1. proszę wyjaśnić wprowadzone na s.32, 12wg; s.37, 6wg, pojęcie *niesprawności eksploatacyjnej*;
2. proszę wyjaśnić wprowadzone na s.32, 14wd, pojęcie *niezgodności spoin*;
3. proszę wyjaśnić pojęcie *wskaznika podatności eksploatacyjnej* (s.47, 6wd) i *wskaznika niezawodności* (s.49, 1wg) w sensie realizacji procedur wykonawczych połączeń

- spawalniczych;
4. proszę wyjaśnić dlaczego nie przebadano wszystkich wykonanych próbek (po 7 odpowiednio dla 5 połączeń typu SPI – SPV metodą TIG, rozdział 5) z użyciem tomografii komputerowej i radiografii cyfrowej;
 5. proszę wyjaśnić wprowadzone na s.117, 4wd, stwierdzenie *wynik jest istotny statystycznie*;
 6. proszę przedstawić algorytm badań wpływu parametrów spawania stopu aluminium AW 5754 metodą TIG na jakość spoiny;
 7. proszę przedstawić projekt udoskonalonej (w rezultacie przeprowadzonych badań) *Instrukcji Technologicznej Spawania* metodą TIG elementu wykonanego ze stopu EN AW 5251.

W konkluzji stwierdzam, że sformułowane teza i cele rozprawy są aktualne, i wpisują się w nurt prac naukowo-badawczych realizowanych w jednostkach naukowo-badawczych na świecie w zakresie doskonalenia eksploatowanych konstrukcji spawanych, w szczególności z właściwościami krytycznymi, w rezultacie spełnienia wymogów technologicznych poprzez dobór parametrów spawania mających wpływ na jakość i wytrzymałość połączenia.

3. Uwagi ogólne

Przedmiot pracy jest aktualny i istotny z uwagi na aktualne aspekty naukowe i aplikacyjne. Podjęta w pracy tematyka stanowi interesujące ujęcie zagadnienia i byłoby właściwe jej rozwijanie w przyszłości przez Autora. Pracę wykonano pod względem językowym i redakcyjnym starannie.

Autor pracy wykazał, że posiada wiedzę w zakresie formułowania problemu badawczego, prowadzenia i metodologii badań eksploatacyjnych oraz wnioskowania i prezentacji wyników i przedmiotowych konkluzji. Na uwagę zasługuje duży zakres wykonanych badań (wielkość badanej próby) i ich prezentacja, co świadczy o dużej pracowitości Kandydata.

Powyższe upoważniają do wniosku o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

4. Wnioski

Recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgra inż. Piotra Woźnego pt. *Badanie wpływu parametrów spawania stopu aluminium AW 5754 metodą TIG na jakość spoiny*, jest interesującym, aktualnym i istotnym z uwagi na praktyczne potrzeby rynku dokumentem w zakresie metodyki badań wpływu parametrów spawania stopu aluminium AW 5754 metodą TIG na jakość spoiny oraz opracowania przedmiotowej *Instrukcji Technologicznej Spawania*.

W pracy dowiedziono możliwość opracowania i praktycznego użycia nowego ulepszanego sposobu prowadzenia procesu spawania stopu aluminium metodą TIG poprzez właściwy dobór parametrów, który zapewni minimalizację wad mikrostruktury spoiny oraz zwiększy jej wytrzymałość na statyczne rozciąganie, co wykazano na przykładzie badań spoin będących rezultatem procesu spawania metodą TIG stopu aluminium z magnezem AW 5754. Wskazano również na możliwość uzyskania wymiernych korzyści jakościowych i ilościowych w rezultacie wdrożenia opracowanego nowego sposobu prowadzenia procesu spawania. Powyższe stanowią istotne osiągnięcie naukowe i aplikacyjne Autora, zasługujące na wyróżnienie recenzowanej pracy.

W przywołaniu Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami, w tym: Dz. U. z 2016 r. poz. 882 i 1311; Dz. U. z 2017 r. poz. 859) stwierdzam, że:

1. rozprawa doktorska została przygotowywana przez mgra inż. Piotra Woźnego pod opieką promotora prof. dra hab. inż. Józef Blachnio, pracownika Instytutu Technicznych Wojsk Lotniczych w Warszawie, promotorem pomocniczym jest: plk. dr hab. inż. Krzysztof Dragan, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i problemu technologicznego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn (art. 13 ust. 1),
2. recenzowana rozprawa doktorska ma formę zwartej maszynopisu/ książki (art. 13 ust. 2),
3. rozprawa doktorska nie posiada streszczeń w językach polskim i angielskim (art. 13 ust. 6 Ustawy),

W konkluzji stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Woźnego pt. *Badanie wpływu parametrów spawania stopu aluminium AW 5754 metodą TIG na jakość spoiny* oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony (art. 14. ust. 1 Ustawy).

11.02.2019

