

Prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn
Katedra Ruchu Drogowego
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej
Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8
40-019 Katowice
e-mail: Tomasz.Wegrzyn@polsl.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Grączewskiego nt.

„Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa złączy spawanych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-5754”

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja opracowana została na podstawie prośby zawartej w piśmie od Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z dnia 9 V 2022.

2. Uwagi wstępne

Procesy spawania należą do jednych z podstawowych procesów do wytwarzania wyrobów i konstrukcji aluminiowych. Od jakości wykonanych złączy spawanych zależy trwałość eksploatacyjna konstrukcji i bezpieczeństwo ich użytkowania. Znane są awarie konstrukcji będące wynikiem nieprawidłowo prowadzonych procesów wytwarzania. Całkowita eliminacja wszystkich możliwych do wystąpienia błędów i nieprawidłowości jest w przypadku procesów spawania stopów aluminium niemożliwa. Dla uzyskania prawidłowego złącza spawanego ze stopów aluminium istotne jest właściwe zaprojektowanie całej konstrukcji, prawidłowy dobór materiałów zarówno konstrukcyjnych jak i dodatkowych, prawidłowo zaprojektowany i realizowany proces technologiczny, doświadczenie i kwalifikacje personelu wykonującego bezpośrednio spajanie, dobór i prowadzenie odpowiednich metod kontroli jakości.

Wszelkie próby zmierzające do podwyższania jakości procesów spawania stopów aluminium jest bardzo zasadne. Jednym z kierunków prowadzonych w tym zakresie badań jest możliwość dobierania drutów elektrodowych ze względu na skład chemiczny stopu i ustalenie energii liniowej spawania.

Zaproponowany przez Doktoranta wpływ energii liniowej na właściwości i jakość złącza spawanego na przykładzie stopu aluminium z magnezem (EN AW 5754) jest w pełni zrozumiały i uzasadniony. Osiągnięciem naukowym pracy jest wyznaczenie wpływu ilości wprowadzonego ciepła Q na właściwości złączy w warunkach obciążeń

statycznych i zmiennych wynikające ze zmiany struktury materiału na przykładzie spawanego stopu EN AW-5754. Dużą rolę w prawidłowej interpretacji wyników odgrywa przeprowadzenie analizy zdjęć makro i mikrostruktury. Tematykę rozprawy, jak i jej zakres należy ocenić jako aktualne, stanowiące ważny krok na drodze projektowania spawanych konstrukcji z różnych stopów aluminium.

3. Charakterystyka i ocena rozprawy

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Andrzej Grączewski podjął próbę zbadania efektów zastosowania różnej energii liniowej podczas spawania. Zakres pracy obejmował badania struktury złącza, twardości powierzchniowej, właściwości mechanicznych złącza w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych.

Rozprawa jest podzielona na 6 rozdziałów, całość liczy 123 strony, zawiera spis literatury obejmujący 95 pozycji. Analizowano ważne i aktualne pozycje literaturowe krajowe i zagraniczne. Na uwagę zasługuje duża ilość publikacji wydanych po 2000. Literaturę dobrano właściwie. Układ rozprawy jest prawidłowy, typowy dla tego rodzaju opracowań, tzn. składa się z przeglądu literatury, przeprowadzenia badań rozpoznawczych, sformułowania tezy rozprawy, celu i wykonaniu badań zasadniczych prowadzących do udowodnienia tezy, dokładnego opisu przeprowadzonych badań, opracowania ich wyników, precyzyjnego podsumowania wraz z wnioskami. W rozprawie można zauważyć racjonalne zaplanowanie eksperymentu, prawidłowy dobór procesu spawalniczego, jak również staranne i dokładne opracowanie uzyskanych wyników badań rzeczywistych.

W rozdziale 1. pt. „Wstęp” zawarto wprowadzenie dotyczące charakterystyki, projektowania, możliwości łączenia różnych stopów aluminium. Podano najważniejsze informacje na temat właściwości stopów aluminium ze wszystkich grup materiałowych i ich zastosowań, ze szczególnym uwzględnieniem serii 5xxx (stopów aluminium z magnezem), którymi się Doktorant zajmował.

W rozdziale 2. pt. „Spajanie stopów aluminium” Autor dokonał dokładnego przeglądu opracowań literaturowych w zakresie stanu wiedzy dotyczącego procesów spawania stopów aluminium z różnych grup materiałowych. Przeanalizował czynniki wpływające na spawalność stopów aluminium z uwzględnieniem serii 5xxx. Doktorant przedstawił wpływ najważniejszych parametrów spawania stopów aluminium w różnych procesach produkcyjnych. Autor scharakteryzował wpływ doboru procesu spawalniczego na własności mechaniczne i jakość złączy spawanych ze stopów aluminium. Relacje te przedstawiono pod kątem doraźnej wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości zmęczeniowej.

W rozdziale 3. pt. „Hipoteza badawcza, cel i zakres rozprawy” Autor zaproponował tezę badawczą, która zakłada, że „Ilość energii cieplnej zużytej do wykonania złącza spawanego ze stopu aluminium EN AW-5754 wpływa na jego wytrzymałość i trwałość zmęczeniową”. Autor prawidłowo i precyzyjnie przedstawił plan badań zasadniczych prowadzących do udowodnienia tezy rozprawy. Dodatkowo autor wskazał cel naukowy pracy, który polega na analizie własności złącza ze stopu EN AW-5754 wykonanego różnymi energiami liniowymi.

W rozdziale 4. pt. „Badania doświadczalne” Autor przeprowadził badania służące do udowodnienia tezy. W tym celu starannie i z wykorzystaniem nowoczesnych technik wykonano badania makro i mikrostruktury. Analizowano wielkość ziarna i charakter zarodkowania ziarna w warunkach spawalniczych dla złączy wykonanych trzema różnymi energiami liniowymi. Następnie przedstawiono wyniki badań twardości w strefach złączy wykonanych trzema różnymi energiami liniowymi. Kolejnym etapem badań była analiza doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złączy wykonanych trzema różnymi energiami liniowymi. Analizowano umowną granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie względne i przewężenie. Ostatnim etapem badań zasadniczych były badania trwałości zmęczeniowej. Zakres badań obejmuje przede wszystkim wyznaczenie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie, trwałości zmęczeniowej, analizy twardości i mikrostruktury całego obszaru złącza spawanego. Wartości energii liniowych wykonywanych złączy celowo mieszczą się poza zakresem zalecanych parametrów spawalniczych w zakresie mniejszych i większych wartości. Wybór tego obszaru badawczego jest bardzo uzasadniony, gdyż pozwala to na poszerzenie wiedzy na temat własności złączy aluminiowych. Prawidłowo zaplanowano parametry eksperymentu i w sposób przejrzysty przedstawiono rezultaty badań. Uzyskano dużą ilość wyników badań, które w następnym rozdziale zostały poddane szczegółowej analizie.

W rozdziale 5 pt. „Analiza wyników badań” zestawiono i analizowano wyniki wszystkich wykonanych badań eksperymentalnych. Zaprezentowano w nim krzywe rozciągania wszystkich badanych złączy, sposób niszczenia próbek oraz zestawienie właściwości mechanicznych na podstawie statycznej próby rozciągania.

Bardzo dokładnie przeanalizowano wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej. Na podstawie wykresów trwałości zmęczeniowej złączy spawanych wyznaczono wykładnik potęgi m stosowany we wzorze opisującym wykres trwałości zmęczeniowej w układzie bilogarytmicznym. Przeprowadzono analizę trwałości zmęczeniowej w zależności od ilości wprowadzonego ciepła na wybranych poziomach naprężeń maksymalnych. Wyniki te wykazały dużą korelację na niskich poziomach naprężeń, która malała wraz ze wzrostem poziomu naprężenia maksymalnego. Jest to ważne spostrzeżenie, gdyż pozwala na oszacowanie parametrów spawania wpływających na bezpieczeństwo konstrukcji aluminiowej pracującej w obszarze naprężeń zmiennych

bliskich granicy zmęczenia. Poprawnie analizowano rozkład twardości całego złącza dla wszystkich badanych próbek. Powiązano wyniki badań twardości z wynikami badań zmęczeniowych. Ostatni etap analizy stanowiły badania strukturalne. Analizowano wielkość ziarna i sposób krystalizacji spoiny w zależności od wartości energii liniowej. Badania mikrostruktury złączy przeprowadzono z wykorzystaniem metod cyfrowej analizy obrazu. Skoncentrowano się na dokładnej obserwacji i analizie strefy wpływu ciepła i linii wtopienia. Wyznaczono średnią wielkość ziarna dla każdego z badanych złączy wykonanych różną energią liniową. Analiza metalograficzna została wykonana na wysokim poziomie. Powiązano efekty wszystkich uzyskanych badań. Najkorzystniejsza struktura korespondowała z najmniejszą energią liniową, co potwierdziło efekty badań mechanicznych (twardość, wytrzymałość na rozciąganie, trwałość zmęczeniowa).

W rozdziale 6. pt. „Podsumowanie i wnioski” przeprowadzono analizę wszystkich uzyskanych wyników badań mechanicznych i analizy komputerowej. Rozdział zawiera zebranie prawidłowych wniosków. Wyniki badań potwierdzają tezę pracy, która zakłada, że energia liniowa ma zasadniczy wpływ na strukturę i właściwości spawanego aluminiowego złącza na przykładzie stopu EN AW-5754.

4. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe

Całkowita koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta starannie i poprawnie, a jej realizację oceniam pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest obszerna, przejrzysta i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Dotyczy to zwłaszcza kompleksowego podejścia do badań mechanicznych i cyfrowej analizy obrazu. Doceniam zwłaszcza trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, rzeczowy sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta. Szata graficzna rozprawy jest bardzo profesjonalnie dopracowana. W trakcie analizy rozprawy nasunęły mi się trzy uwagi o charakterze ogólnym i trzy uwagi szczegółowe nie mające wpływu na wysoką ocenę merytoryczną pracy.

Do uwag ogólnych zaliczam:

1. W literaturze panuje duża rozbieżność dotycząca sposobu przedstawienia wykresów równowagowych Al-Mg. Dotyczy to zwłaszcza obszaru występowania fazy beta i jej struktury stechiometrycznej. Wg różnych autorów międzymetaliczna faza beta ma strukturę Al_3Mg_2 , $Al_{140}Mg_{89}$ lub Al_8Mg_5 . Autor powinien zamieścić w rozprawie wykres równowagowy Al-Mg, na którym się oparł w badaniach i powinien ustosunkować się do braku spójnego poglądu nt. fazy beta.
2. Autor podaje: „Podczas spawania łukowego w osłonie gazów ochronnych ze stopów Al-Mg dochodzi do powstania gruboziarnistej struktury materiału spoiny, a także dokonuje się rekrystalizacja struktury materiału

spawanego oraz zmiany właściwości mechanicznych w strefie wpływu ciepła”. O jakie fazy chodzi (alfa, beta, alfa i beta)?

3. Autor podaje (str 64): „Na rysunkach od 4.5 do 4.10 przedstawiono zdjęcia makro- i mikroskopowe złączy spawanych pobranych z płyt próbných wykonanych metodą spawania 131 z różną wartością ilości wprowadzonego ciepła Q. Wstępna analiza wyników wskazuje na zróżnicowanie struktury materiału w strefie wpływu ciepła (SWC) oraz w spoinie (S). Zmiany strukturalne we skazanych obszarach mogą wpływać na właściwości złącza spawanego”. Czy chodzi o fazę alfa, beta, alfa i beta?

Do uwag szczegółowych zaliczam:

1. Na stronie 14 zamiast terminu „ciężarówek” proponuję podawać „pojazd ciężarowy”.
2. Brak spacji przy podawaniu wartości temperatury (np. str 14)
3. W opracowaniach technicznych nie pisze się w 1 osobie (np.: „Ciekawostką jest, jeżeli zastosujemy prąd pulsacyjny możemy spawać metodą”).

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Grączewskiego nt. „Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa złączy spawanych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-5754 jest ważną pracą naukowo-badawczą o aktualnej tematyce. Praca doktorska wyraźnie reprezentuje dyscyplinę „Inżynieria Mechaniczna” wg nowej klasyfikacji. Na podkreślenie zasługują także osiągnięcia naukowe w zakresie poprzedniej dyscypliny „Budowa i Eksploatacja Maszyn”, będące przedmiotem wcześniejszej działalności naukowej Doktoranta.

Niepodważalnym walorem pracy jest opracowanie nowego rozwiązania dotyczącego wpływu energii liniowej podczas spawania stopów aluminium z magnezem na właściwości mechaniczne i strukturę stopu. Podjęty w pracy temat jest ważny i wnosi wkład w rozwój konstrukcji aluminiowych i dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna”. Doktorant postawił tezę, dla udowodnienia której wykonał liczne badania rzeczywiste i poszerzył obszar badań metodami analizy cyfrowej. Postawiona teza została przejrzyście i poprawnie udowodniona. Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Pomimo wymienionych uwag ogólnych i szczegółowych, nie wpływających na wysoką wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Autor osiągnął cele postawione w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale również użyteczne. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (z dnia 14 III 2003 (Dz. U. 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Uważam, że praca nadaje się do wyróżnienia.



Katowice, 18 V 2022 r