



Rzeszów, 06.06.2022 r.

**Prof. dr hab. inż. Antoni Władysław Orłowicz**  
Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska  
Al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów, Polska

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej**

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

**pracy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Grączewskiego na zlecenie  
Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Bydgoskiej, zgodnie z pismem z dnia 09 maja 2022 roku**

### **Dane ogólne**

Przedłożona do recenzji rozprawa składa się z 6 rozdziałów zawierających w części zasadniczej 112 stron tekstu, 77 rysunków i 29 tabel. Wykaz literatury zawiera 122 pozycje związanej z pracą.

Wybór tematu rozprawy jest trafny, ponieważ stopy aluminium znajdują coraz większe zastosowanie na konstrukcje wytwarzane dla potrzeb budownictwa, przemysłu stocznioowego, czy też przemysłu motoryzacyjnego.

## Uwagi wstępne

Postępujący rozwój spawalnictwa uwarunkowany jest w ogromnej mierze rozwojem urządzeń spawalniczych dających nowe możliwości modelowania przebiegów prądowych. Jest to bardzo ważne z uwagi na sposób przenoszenia ciekłego metalu do jeziora spawalniczego, co z kolei wywiera wpływ na sposób odprowadzania z niego ciepła, a poprzez to na kształtowanie się mikrostruktury. Daje to szerokie możliwości pozyskania nowej wiedzy dotyczącej wpływu zastosowanych wartości parametrów procesu technologicznego spawania na mikrostrukturę, a poprzez to na właściwości użytkowej złączy spawanych.

Należy mieć przy tym na uwadze, że w przypadku szeregu materiałów, na etapie ich przygotowania i w procesie spawania trzeba uwzględnić ich charakterystyczne właściwości. Takimi materiałami są również stopy aluminium.

Są one podatne na utlenianie. Tworząca się na powierzchni łączonych elementów i na materiałach dodatkowych warstwa tlenku  $Al_2O_3$ , utrudnia wykonanie poprawnego złącza spawanego. W związku z tym na etapie ich przygotowania do spawania należy je odtłuścić i wytrawić w roztworach soli metali alkalicznych dla usunięcia tlenku aluminium, a następnie poddać zabiegowi pasywacji ich powierzchni poprzez trawienie w roztworach kwasu siarkowego lub azotowego, a następnie opłukać i wysuszyć, celem zabezpieczenia przez pochłanianiem wodoru. Trwałość tego zabezpieczenia ocenia się na 24 godziny.

Technika spawania stopów aluminium jest odmienna od techniki spawania stali. Wynika to ze znacznie wyższego przewodnictwa elektrycznego i cieplnego, co utrudnia nagrzewanie i nadtapianie stopów aluminium. Wyższa wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej i większy skurcz sprzyjają powstawaniu naprężeń spawalniczych i związanych z tym odkształceń konstrukcji spawanych, a w skrajnych przypadkach pęknięć. Duża rozpuszczalność wodoru w ciekłym stopie skutkuje tworzeniu porowatości gazowej w spoinach. Silne powinowactwo do tlenu skutkuje powstawaniem na lustrze ciekłego metalu tlenku aluminium. Jego temperatura topnienia jest zdecydowanie wyższa od temperatury topnienia stopów aluminium. Dodatkowo gęstość tego tlenku jest wyższa od gęstości ciekłego stopu, co skutkuje jego tonieniem w jeziorce ciekłego metalu.

Tlenki aluminium na lustrze i w jeziorce ciekłego metalu utrudniają przepływ ciepła. Na tlenkach w jeziorce ciekłego metalu zakotwiczą się pęcherzyki gazowe. Po

zakrzepnięciu spoiny uwięzione w niej tlenki obniżają właściwości mechaniczne złączy spawanych i podwyższają podatność spoin do pęknięcia.

Ochrona jeziorca ciekłego stopu aluminium przed skutkami utleniania jest realizowana z zastosowaniem topników, które rozpuszczają tlenek aluminium i pozwalają utworzyć żużel o temperaturze topienia niższej od temperatury topienia materiału rodzimego. Żużel ma niską gęstość, co pozwala na jego wypływanie na powierzchnię jeziorca ciekłego metalu.

Wygodniejszą i skuteczną metodą ochrony jeziorca ciekłego metalu przed dostępem tlenu jest atmosfera ochronna z gazu obojętnego, takiego jak argon. Jest ona stosowana w metodzie spawania TIG i MIG.

Argon musi charakteryzować się wysoką czystością. Obecność w nim tlenu ogranicza się do 0,03%. Z uwagi na możliwości powstania tlenku aluminium ważny jest wydatek gazu osłonowego. Zbyt mały może skutkować nie pełną ochroną jeziorca ciekłego metalu, a zbyt duży może skutkować turbulencjami przepływu argonu i zasycaniem powietrza.

Metodę spawania elektrodą wolframową TIG stosuje się do łączenia elementów ze stopu aluminium o grubości do 6 mm.

Z uwagi na możliwość usuwania ewentualnie tworzącego się tlenku aluminium na powierzchni jeziorca ciekłego metalu korzystne jest stosowanie prądu przemiennego o przebiegu prostokątnym. Gdy elektroda ma potencjał dodatni, następuje rozbijanie i usuwanie warstewki tlenku z jeziorca ciekłego metalu, ale równocześnie elektroda ulega silnemu nagrzananiu.

Gdy elektroda ma potencjał ujemny to następuje intensywne wprowadzanie ciepła do jeziorca ciekłego metalu. Dłuższy czas trwania cyklu cieplnego z taką polaryzacją wpływa na wzrost sprawności cieplnej procesu, czyli wzrost udziału ciepła wprowadzonego do jeziorca, w całej ilości ciepła wytworzonego w łuku elektrycznym.

Do spawania elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego (metoda MIG) stosuje się prąd stały o dodatniej biegunowości. Taka biegunowość zapewnia przebieg procesu rozbijania tlenku aluminium na lustrze jeziorca ciekłego metalu i silne nagrzewanie elektrody topliwiej.

Przy łączeniu tą metodą grubszych elementów istnieje niebezpieczeństwo uzyskania szerokiej strefy wpływu ciepła, na skutek dłuższego czasu jego wprowadzania.

Towarzyszą temu większe jego przepływy w głąb materiału rodzimego. Efektem tego jest rozrost ziaren w spoinie i w strefie wpływu ciepła. Skutkuje to obniżeniem właściwości mechanicznych stopu oraz obniżenie odporności konstrukcji na obciążenia cykliczne zmienne.

Z punktu widzenia technologa spawalnika pracującego w przemyśle ważne jest pozyskanie nowej wiedzy dotyczącej wpływu wartości parametrów spawania, konstrukcji ze stopów aluminium, na właściwości użytkowe złączy spawanych.

Z tego względu podjęcie pracy zmierzającej do określenia wpływu wartości parametrów spawania metodą MIG na wytrzymałość i trwałość zmęczeniową konstrukcji ze stopu aluminium stosowanych w budownictwie, przemyśle stoczniowym, czy też motoryzacji, jest trafne i uzasadnione.

Na dodatkowe podkreślenie zasługuje fakt, że pracę taką podejmuje technolog-spawalnik, który pracuje w branży spawalniczej.

### **Merytoryczna ocena rozprawy doktorskiej**

Pierwszy rozdział pracy jest przeglądem literatury wskazującym na wzrost światowej produkcji stopów aluminium z uwagi na ich zastosowanie wynikające z bardzo korzystnych właściwości użytkowych takich jak wysoka wartość ilorazu wytrzymałości na rozciąganie do gęstości, odporność na korozję, wysoka przewodność elektryczna, wysoka przewodność cieplna, możliwość recyklingu. Następnie Kandydat omawia właściwości użytkowe i zastosowania blach wykonanych ze stopów aluminium. Szczególną uwagę zwraca na dobrze spawalne stopy aluminium serii 5XXX, w postaci blach, które charakteryzują się wysokimi właściwościami mechanicznymi i wysoką odpornością na korozję, co jest ważne w przypadku wymaganej wysokiej trwałości eksploatacyjnej konstrukcji budowlanych i konstrukcji pracujących w warunkach oddziaływania wody morskiej. Omawia wpływ składu chemicznego na właściwości technologiczne i użytkowe tych materiałów konstrukcyjnych. Szczególną uwagę zwraca na stop EN AW-5754. Blachy z tego stopu charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi, wysoką wytrzymałością zmęczeniową, bardzo dobrą odpornością korozyjną i dobrą spawalnością. Informacje o ich zastosowaniu ilustruje zdjęciami konstrukcji.

Kolejny rozdział dotyczy metod spajania stopów aluminium. Ten rozdział nie jest do końca zrozumiały dla czytelnika, z punktu widzenia zestawienia różnych informacji potrzebnych do realizacji pracy. Na przykład nie jest jasne po co omawiano spawanie gazowe (podrozdział 2.1.3.) i spawanie łukowe elektrodą otuloną (podrozdział 2.1.4.), a także po co zaprezentowano podrozdział 2.3. pt. „Sposób wykluczania niezgodności spawalniczych”. Informacji tych nie wykorzystano ani nie rozwinięto w trakcie badań własnych.

W podrozdziale 2.4. „Ilość wprowadzonego ciepła w złącze spawane. Energia liniowa spawania” jest wiele usterek typu niejasne sformułowania i błędna terminologia takich jak np. wielkość prądu spawania, stwardnienie w SWC, zjawiska opadowe. Brakuje mi informacji o eksperymentalnych badaniach ilości ciepła wprowadzonego do nadtapianego materiału.

W podrozdziale 2.5. „Wpływ metody spawania na wytrzymałość i trwałość złącza” wykonano przegląd literatury dotyczący wpływu metody spawania TIG i MIG na rozkład twardości w złączach spawanych i na właściwości mechaniczne. Część informacji dotyczy również problematyki niezgodności spawalniczych. W rozdziale tym spodziewałem się rozważań prowadzonych według schematu skład chemiczny-warunki krystalizacji-mikrostruktura-właściwości mechaniczne. Praktycznie pominięto problematykę mikrostruktury, ograniczając to zagadnienie głównie do rozmiarów ziaren. W rozdziale tym pojawiło się wiele sformułowań, które należałoby skorygować. Na przykład: wzmocnienie roztworu stałego przez magnez, spawanie metodą MIG dużym prądem stopu aluminium, określono parametry spawania metodą TIG, badania mikrotwardości spoin również potwierdzają wpływ niezgodności spawalniczych na ich wartość, morfologię ziaren, szerokość strefy wpływu ciepła, wielkość wydzieleni i ich charakter oraz związane z nimi wady spawalnicze są kluczowymi cechami metalurgicznymi, metoda TIG z czystym Al jako wypełniaczem odnotowały najmniejszą twardość w spoinie, dzięki drobnoziarnistej strukturze proces TIG dominuje nad spawaniem MIG pod względem właściwości mechanicznych, wyższa od temperatury jeziora łukowego, spawanie metodą MIG było lepsze pod względem wytrzymałości na rozciąganie, w pozycji płaskiej, zjawisko procesu spawania, węższa geometria złącza, porowatość .... występuje ..... na skutek odrzucenia wodoru podczas krzepnięcia, ilość energii cieplnej dostarczonej do materiału, która kształtuje mikrostrukturę materiału spoiny.

Analizując osiągnięcia prezentowane w literaturze, Doktorant dochodzi do wniosku, że ilość ciepła zużyta do wykonania złącza spawanego ze stopu EN AW-5754 wpływa na jego wytrzymałość i trwałość zmęczeniową. Nie informuje jednak o warunkach chłodzenia tych złączy po procesie spawania.

Dla udowodnienia tej hipotezy opracowuje materiał w postaci płyt próbnych o grubości 4 mm. Materiał ten różni się jednak pod względem składu chemicznego od składu chemicznego stopu EN AW-5754. Na bazie płyt próbnych wykonuje złącza spawane metodą MIG z zastosowaniem materiału dodatkowego w postaci drutu, który charakteryzuje się w porównaniu do materiału płyt wyższą zawartością krzemu, manganu i magnezu.

Złącza spawane wykonano stosując polaryzację DC (+) w trzech wariantach wartości parametrów spawania mieszczących się w zakresach od 28 V do 18,5 V dla średnich wartości napięcia łuku elektrycznego, od 180 A do 135 A dla średnich wartości natężenia prądu spawania, od 5,9 mm/s do 7,32 mm/s dla liniowej prędkości spawania.

W obliczeniach ilości wprowadzonego ciepła do złączy spawanych zastosował wyrażenie  $Q = \frac{kUI}{v} \cdot 10^{-3} \text{kJ/mm}^2$ , przyjmując dla wszystkich zastosowanych wartości procesu spawania taką samą wartość sprawności cieplnej  $k = 0,8$ . Obliczone wartości ilości wprowadzonego ciepła  $Q$  zawierały się w zakresie od 0,682 kJ/mm<sup>2</sup> do 0,272 kJ/mm<sup>2</sup>.

Badania metalograficzne tak przygotowanych złączy spawanych wykonano dla materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła i dla spoin. Zaprezentowano zdjęcia zglądów nietrawionych. Szkoda, że nie zaprezentowano zdjęć zglądów trawionych przy powiększeniach umożliwiających ocenę mikrostruktury, na przykład z zastosowaniem mikroskopu skaningowego z przystawką do mikroanalizy składu chemicznego pozwalającej dodatkowo na ocenę składu chemicznego faz.

Autor badał właściwości mechaniczne blach na próbkach pobranych w kierunku wzdłużnym i poprzecznym w odniesieniu do kierunku ich walcowania. Stwierdził, że próbki pobrane w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania zapewniają wyższy poziom wartości  $R_m$ ,  $R_{02}$  oraz  $E$ .

Nie znalazłem jednak informacji jakim kierunkiem walcowania charakteryzował się materiał próbek spawanych.

Z przykładowych zdjęć próbek spawanych poddanych statycznej próbie rozciągania można stwierdzić, że pękały one w strefie wpływu ciepła lub w materiale rodzimym, natomiast próbki poddane cyklicznie zmiennym obciążeniom pękały w strefie wpływu ciepła.

Wyniki badań Doktorant przedstawił tabelarycznie oraz w formie wykresów słupkowych. Podjął również próbę ustalenia związków pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie  $R_m$ , umowną granicę plastyczności  $R_{02}$ , wydłużeniem  $A_5$  i przewężeniem, a ilością ciepła wprowadzonego do złącza spawanych w procesie spawania  $Q$ . Najwyższe wartości współczynnika determinacji  $R^2$ , uzyskano dla związku pomiędzy  $R_{02}$  a  $Q$ , bo równą 0,814 oraz pomiędzy przewężeniem a  $Q$  bo 0,870 a najniższą pomiędzy wydłużeniem  $A_5$  a  $Q$ , bo równą 0,535.

Badania Doktoranta wykazały, że najwyższą trwałością zmęczeniową, w warunkach obciążeń zmiennych charakteryzowały się złącza spawane wykonane z zastosowaniem niskiej wartości prądu spawania, niskiego napięcia łuku elektrycznego i wysokiej wartości liniowej prędkości spawania. Te wartości parametrów procesu spawania pozwoliły na wprowadzenie do złącza spawanego najniższej, w stosowanym zakresie zmienności, ilości ciepła. W tym przypadku szybkość chłodzenia złącza spawanego sprzyjała silnemu rozdrobnieniu mikrostruktury w spoinie i w strefie wpływu ciepła. Efektem tego była wysoka trwałość zmęczeniowa złącza spawanego.

Naturalnym skutkiem wzrostu poziomu naprężeń zastosowanych w badaniach zmęczeniowych było obniżenie trwałości zmęczeniowej złącza spawanych. Charakter wpływu wartości parametrów spawania na ilość wprowadzonego do złącza spawanego ciepła i jego oddziaływania na szybkość chłodzenia, a poprzez to na mikrostrukturę, która decyduje o trwałości zmęczeniowej, był taki sam dla wszystkich stosowanych w badaniach poziomów maksymalnych naprężeń.

Pracę kończy rozdział „Podsumowanie i wnioski”, który jest faktycznie powtórzeniem omówienia wyników badań.

Uważam, że w pracy udało się uchwycić szereg interesujących związków pomiędzy wartościami parametrów procesu spawania i ilością wprowadzonego ciepła do złącza spawanych oraz ich wpływu na wytrzymałość na rozciąganie, umowną granicę plastyczności, wydłużenie, przewężenie oraz trwałość zmęczeniową. Chociaż uzyskane wyniki dotyczą konkretnego stopu aluminium i konkretnych stosowanych w praktyce

zakresów zmienności wartości parametrów procesu spawania, to na ich podstawie można wysnuć pewne uogólniające stwierdzenia i wnioski.

### **Uwagi szczegółowe**

- W jaki sposób opracowano materiał do badań i dlaczego różnił się on składem chemicznym w porównaniu do stopu EN AW-5754.
- Proszę wyjaśnić czy i jak sprawność cieplna procesu spawania łukiem elektrycznym zależy od wartości parametrów procesów spawania.
- Jak pobierano próbki materiału do wykonania złączy spawanych w odniesieniu do kierunku walcowania.
- Jak można wytłumaczyć uzyskanie w pewnych przypadkach podobnych wartości analizowanych właściwości złączy spawanych wykonanych przy zastosowaniu różnych wartości parametrów procesu spawania.
- W pracy występuje pewna ilość braków korektorskich dotyczących terminologii i budowy zdań.

### **Wniosek końcowy**

Praca mgr inż. Andrzej Grączewskiego pt. „Wytrzymałość i trwałość zmęczeniowa złączy spawanych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-5754” stanowi podsumowanie interesujących badań dających nową wiedzę technologom spawalnictwa. Autor jest także technologiem pracującym w firmie spawalniczej. Jest to doktorat wdrożeniowy. Praca wykazuje umiejętność autora w zakresie studiowania literatury, programowania badań i ich technicznej realizacji, choć Doktorant słabo wyeksponował aspekt strukturalny i jeszcze ma problemy z analizowaniem wyników i formułowaniu wniosków. Wnioski to uogólnienie wynikające nie tylko z wyników badań i ich analizy, ale także z konfrontacji tej analizy z dotychczasowymi wnioskami i twierdzeniami zamieszczonymi w literaturze. Doceniam fakt, że Doktorant z powodzeniem podjął próbę wykreślnego przedstawienia wyników badań i opracował zależności empiryczne wiążące ilości wprowadzonego ciepła do złączy spawanych w procesie ich wytwarzania z ich właściwościami mechanicznymi.



Wysunięte przeze mnie niedociągnięcia pracy nie przeszkadzają ustaleniu pozytywnej opinii ostatecznej.

Uważam, że praca ma wszelkie cechy rozprawy doktorskiej i spełnia wymagania określone w artykule 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, wobec czego wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'K. W. Opatowski', is located on the right side of the page.

