

Wykonywanie połączeń różnoimiennych ze stopów aluminium metodami spawania łukowego i FSW

Aleksandra Węglowska, Janusz Rykała, Tomasz Pfeifer, Jacek Pietrzak

1. Wstęp

Stopy konstrukcyjne aluminium, zwłaszcza typu Al – Mg (seria 5xxx), Al – Mg – Si (seria 6xxx), znajdują szerokie zastosowanie w takich obszarach przemysłu i gospodarki jak lotnictwo i astronautyka, transport, motoryzacja, chemia, budownictwo. Decydują o tym ich właściwości eksploatacyjne: niska gęstość, wysoka odporność na korozję, stosunkowo wysokie właściwości wytrzymałościowe, wysoka przewodność cieplna i elektryczna [1 – 5]. Stopy aluminium charakteryzują się względnie niską ceną, możliwością pełnego odzyskiwania materiału po zniszczeniu lub zużyciu konstrukcji oraz brakiem odpadów zanieczyszczających środowisko. Stanowią one często osnowę nowoczesnych materiałów kompozytowych. Rozwój zastosowań stopów aluminium o wysokich właściwościach eksploatacyjnych wymaga doskonalenia już istniejących i opracowywania nowych technologii ich łączenia, są to bowiem materiały trudnospalalne. Coraz częściej wysokowytrzymałe stopy aluminium stosuje się na elementy płyt chłodzących i elementy konstrukcyjne silników elektrycznych, np. obudowy. Ograniczona spawalność tych stopów może być przyczyną powstawania niezgodności spawalniczych, a w konsekwencji zniszczenia elementu konstrukcyjnego.

2. Spawalność stopów aluminium

Techniczne stopy aluminium można podzielić na dwie grupy: stopy do przeróbki plastycznej oraz stopy odlewnicze. Stopy do przeróbki plastycznej obejmują szereg stopów z magnezem, manganem, cynkiem, miedzią itp., o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych i spawalniczych, których wzrost własności wytrzymałościowych uzyskuje się, w zależności od głównego składnika stopowego, poprzez umacnianie wydzieleniowe lub umacnianie poprzez zgniot. Do najbardziej popularnych stopów do przeróbki plastycznej, utwardzalnych dyspersyjnie, zaliczyć można stopy aluminium z magnezem i krzemem [1 – 5].

Na spawalność aluminium i jego stopów wpływają następujące właściwości:

- duże powinowactwo do tlenu – powstająca na powierzchni aluminium ściśle przylegająca do tej powierzchni oraz bardzo trwała chemicznie powłoka tlenkowa o ciężarze właściwym wyższym od aluminium ($3,9 \text{ g/cm}^3$) utrudnia (powoduje brak wtopienia, wtrącenia tlenkowe, porowatość itp.) lub wręcz uniemożliwia spawanie,
- wysoka przewodność cieplna – utrudnia miejscowe stopienie metalu oraz powoduje bardzo szybkie krzepnięcie spoiw i stygnięcie złącza,

Streszczenie: Przedstawiono wyniki badań spawania TIG i MIG oraz zgrzewania FSW złączy z blach ze stopu aluminium EN AW-6082, EN AW 5754 oraz odlewniczego stopu EN AC-43200. Scharakteryzowano stopy Al-Mg oraz Al-Mg-Si i ich spawalność. W ramach realizowanych badań przeprowadzono dobór warunków spawania i zgrzewania różnoimiennych stopów aluminium. Złącza poddano badaniom wizualnym, metalograficznym makroskopowym, penetracyjnym (złącza spawane) oraz własności mechanicznych w statycznej próbie rozciągania i zginania (złącza zgrzewane FSW). Na podstawie wyników badań realizowanych w Łukasiewicz – GIT oceniono, że jakość złączy spawanych zależy od przygotowania elementów do spawania, natomiast złączy zgrzewanych od parametrów zgrzewania i ustawienia stopów Al w złączu względem ruchu obrotowego narzędzia.

Słowa kluczowe: spawanie łukowe, zgrzewanie FSW, stopy aluminium, połączenia różnoimienne

JOINING OF DISSIMILAR ALUMINIUM ALLOYS USING ARC WELDING METHODS AND FRICTION STIR WELDING

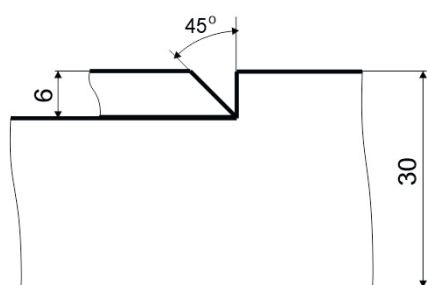
Abstract: Results of TIG, MIG and FSW welding technologies of joints made of EN AW-6082, EN AW 5754 aluminum alloy sheets and EN AC-43200 casting alloy are presented. This article briefly presents the characteristics of Al-Mg and Al-Mg-Si alloys and their weldability. As part of the research welding conditions for dissimilar aluminum alloys were selected. The joints were subjected to the visual and penetrant tests (TIG, MIG joints), light microscopy examination as well as tensile and bend tests (FSW joints). Based on the test results obtained in Łukasiewicz – GIT, it was found that the quality of arc welded joints depends on the preparation of the elements for welding, while the quality of FSW joints depends on the welding parameters and the positioning of Al alloys in the joint in relation to the rotational movement of the tool.

Keywords: arc welding, FSW, welding of aluminum alloys, aluminum alloys, dissimilar joints

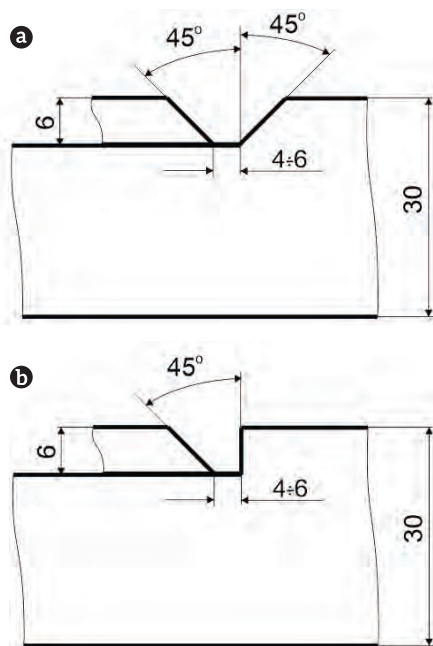
- wysoka rozszerzalność cieplna i duży skurcz – sprzyjają powstawaniu naprężeń i odkształceń oraz pęknięć w połączeniach,
- niska wytrzymałość w temperaturze powyżej 500°C – sprzyja deformacjom konstrukcji w temperaturach spawania, duża

zdolność w stanie ciekłym do rozpuszczenia gazów – sprzyja porowatości w spoinach,

- brak barw nalotowych podczas nagrzewania – utrudnia ocenę temperatury nagrzania złącza,
- tworzenie przez składniki stopowe niskotopliwych faz (mieszanki eutektyczne), co w warunkach występowania naprężeń wynikających z wysokiej rozszerzalności cieplnej i dużego skurczu metalu sprzyja powstawaniu gorących pęknięć krystalizacyjnych w spoinie i likwacyjnych w strefie wpływu ciepła.



Rys. 1. Schemat przygotowania do spawania met. TIG złącza doczołowego blachy ze stopu EN AW-6082 o grubości 30 mm z blachą ze stopu EN AC-43200 o grubości 6 mm; ukosowanie na „1/2 V”



Rys. 2. Schemat przygotowania do spawania met. TIG złącza doczołowego blachy ze stopu EN AW-6082 o grubości 30 mm z blachą ze stopu EN AC-43200 o grubości 6 mm: a) ukosowanie na „1/2 V” z odstępem, b) ukosowanie na „V” z odstępem

Z powyższych względów przy spawaniu aluminium i jego stopów należy zapewnić: eliminację warstwy tlenkowej i ochronę strefy łączenia przed utlenieniem (czyszczenie chemiczne, „czyszczenie katodowe” w łuku elektrycznym, osłony gazów neutralnych), stosowanie źródeł ciepła o dużej koncentracji i zachowanie sztywności konstrukcji (sczepianie, oprzyrządowania pomocnicze). Podstawową przyczyną obecności pęcherzy gazowych jest zmienna i zróżnicowana rozpuszczalność gazów (H₂) w metalu spoiny w stanie ciekłym i stałym, stosunkowo szybkie krzepnięcie metalu spoiny a także obecność wilgoci lub zanieczyszczeń organicznych w obszarze spawania. Dlatego ważne jest usunięcie zanieczyszczeń z rowka spawalniczego, unikanie spawania w warunkach wysokiej wilgotności, a także stosowanie czystych i osuszonych spoiw i gazów osłonowych. Bardzo ważnym aspektem w przypadku spawania łukowego elementów ze stopów aluminium o większych grubościach (powyżej 10 mm) jest odpowiednie ukosowanie rowka, tak aby zapewnić dobrą widoczność podczas procesu spawania. Metodą łączenia, która zyskuje na popularności jest zgrzewanie tarciove FSW (z ang. *Friction Stir Welding*). Metoda nie wymaga stosowania materiałów dodatkowych i gazów osłonowych oraz nie doprowadza do topienia materiałów zgrzewanych, co zapobiega występowaniu porowatości i pęknięć gorących w złączach [6 – 8]. Zaletą tej metody jest również brak konieczności ukosowania blach, możliwość łączenia materiałów trudnospawalnych i niespawalnych. Konstrukcje zgrzewane metodą FSW wykazują mniejsze odkształcenia niż w przypadku metod spawania łukowego.

3. Przebieg badań i wyniki

W ramach realizowanych prac przeprowadzono badania spawania łukowego metodą TIG i zgrzewania metodą FSW elementów aluminiowych stanowiących kadłub chłodzący, stosowany na obudowy silników elektrycznych.

Celem badań w obszarze spawania było określenie wpływu sposobu przygotowania złącza obudowy silnika z płaszczem na przebieg procesu spawania i możliwość wykonania połączenia. Aby właściwie zasymulować spawanie

reklama

płatka (blacha o grubości 6 mm ze stopu EN AC-43200) do obudowy silnika (blacha o grubości 30 mm ze stopu EN AW-6082), konieczne było wyfrezowanie odpowiedniego obszaru na głębokość 6 mm w elemencie reprezentującym materiał kadłuba. Proces spawania doczołowego blach rozpatrzono w trzech wariantach – z ukosowaniem 6 mm blachy do kąta 45° i bez odstępu między blachami (tzw. ukosowanie na „1/2 V”, rys. 1); z ukosowaniem 6 mm blachy do kąta 45° i odstępem (4 ÷ 6 mm) między blachami („1/2 V”, rys. 2a), a także z ukosowaniem obu elementów (blacha 30 mm tylko na głębokości 6 mm) na „V” i odstępem (rys. 2b).

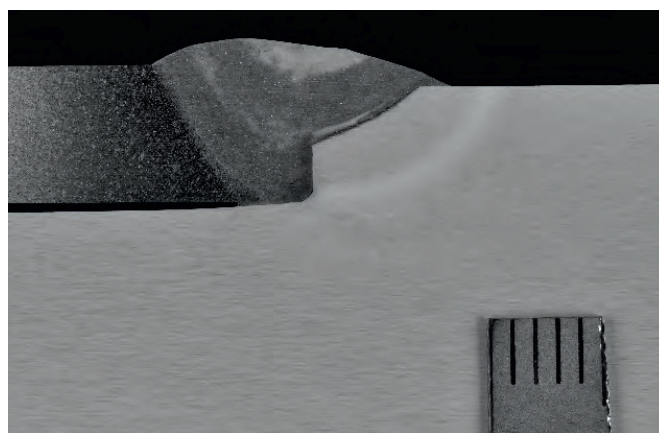
Badania technologiczne spawania ww. wariantów zostały zrealizowane z wykorzystaniem metody TIG.

Wykonane połączenia poddano badaniom wizualnym, penetracyjnym i metalograficznym makroskopowym. Przeprowadzone badania nieniszczące wykazały, że możliwe jest wykonanie wszystkich rozpatrywanych rodzajów złączy spawanych metodą TIG w poziomie jakości B wg wymagań normy PN-EN ISO 10042. Badania makroskopowe wykazały, że ukosowanie tylko jednego z elementów złącza skutkuje powstawaniem niezgodności typu brak przetopu, która jest niezgodnością niedopuszczalną w żadnym poziomie jakości. Zdjęcia zglądów metalograficznych wykonanych połączeń przedstawiono na rys. 3 i 4.

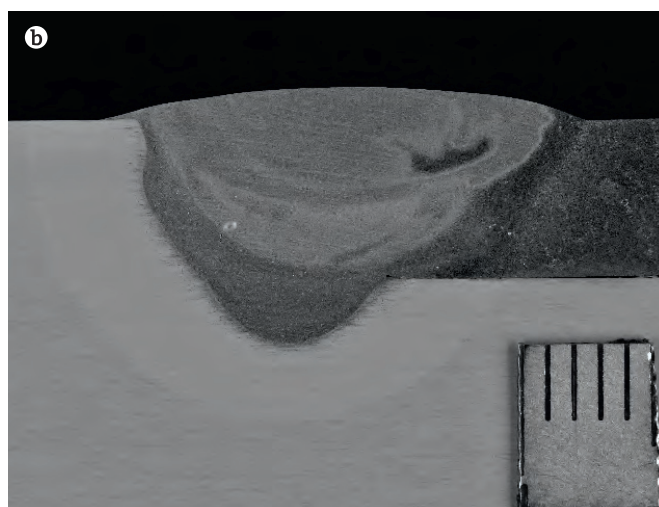
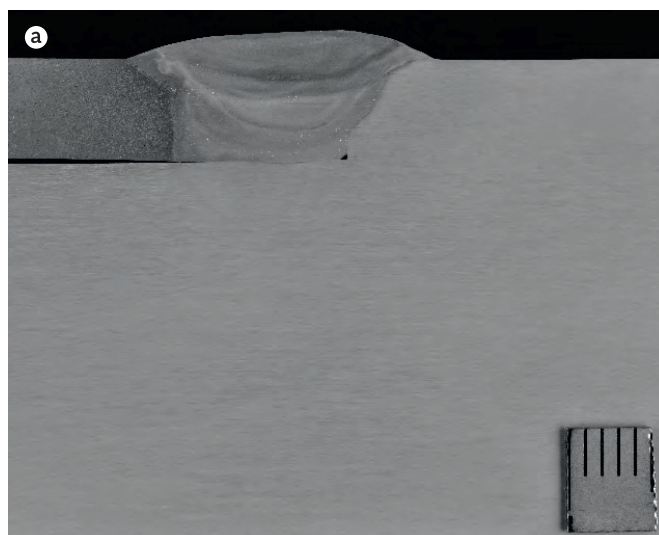
Badania zgrzewania metodą FSW prowadzono na stanowisku zbudowanym na bazie frezarki sterowanej numerycznie typu FNE 50NC, produkcji AVIA S.A. W badaniach zastosowano narzędzie wykonane ze stali narzędziowej SW7M składające się z wieńca opory o średnicy 22 mm z naciętą na powierzchni spiralą oraz trzpienia w kształcie stożka o długości 5,5 i 6,5 mm (rys. 5).

W badaniach zastosowano stopy aluminium EN AW 5754 (PA11) oraz EN AW 6082 T6 (PA4). W pierwszym etapie badań, w celu określenia własności mechanicznych zgrzewano doczołowo płyty z ww. stopów aluminium o grubości 6,0 mm. Wytrzymałość złączy oceniono na podstawie badań mechanicznych w statycznej próbie rozciągania zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 4136:2013-05 oraz próbie zginania zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 5173:2010. Zastosowano parametry zgrzewania: prędkość obrotowa narzędzia $\omega = 891$ obr./min, prędkość liniowa zgrzewania $v_{zg} = 240, 300, 460$ mm/min.

Podczas zgrzewania stop EN AW 6082 ustawiono po stronie natarcia, natomiast stop EN AW 5754 po stronie spływu. W drugim etapie badań, w celu określenia trajektorii ruchu narzędzia, zgrzewano kadłuby składające się z płyty dolnej o grubości 30 mm ze stopu EN AW 6082 i płaszczka zewnętrznego z blachy ze stopu EN AW 5754 o grubości 6,0 mm. Złącza zgrzewane doczołowo oraz złącza zgrzewane doczołowo na zakładkę (korpus + płyta zewnętrzna) zostały poddane badaniom wizualnym oraz metalograficznym badaniom mikroskopowym z zastosowaniem mikroskopu optycznego. Na podstawie wyników badań wizualnych złączy doczołowych blach oceniono, iż wszystkie złącza charakteryzowały się ciągłością materiałową. Na powierzchni lica zgrzein nie stwierdzono występowania niezgodności. Na podstawie analizy wyników badań metalograficznych oceniono, iż zgrzeiny przyjmują charakterystyczny dla



Rys. 3. Makrostruktura złącza doczołowego blach ze stopu EN-AW-6082 (≠ 30 mm) + EN AC-43200 (≠ 6 mm), ukosowanie „1/2 V”. Traw. Keller



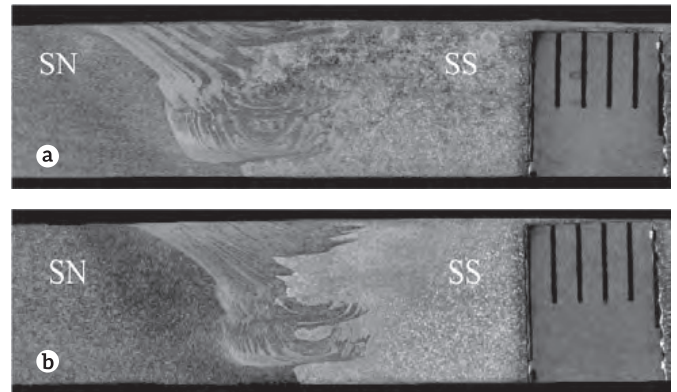
Rys. 4. Makrostruktura złącza doczołowego blach ze stopu EN-AW-6082 (≠ 30 mm) + EN AC-43200 (≠ 6 mm): a) ukosowanie „1/2 V” bez odstępu, b) ukosowanie „1/2 V” z odstępem. Traw. Keller



Rys. 5. Widok narzędzia zgrzewającego

metody FSW kształt trapezoidalny – materiał w jądrze zgrzeiny został wymieszany; od strony natarcia przyjmuje kształt koncentrycznie ułożonych kręgów lub warstw, co jest wynikiem oddziaływania narzędzia i wymuszonego ruchu mas uplastycznionego materiału. Od strony grani widoczna jest linia styku łączonych blach o długości 0,6 mm, którą wyeliminowano podczas zgrzewania kadłubów stosując narzędzie z trzpieniem o długości 6,5 mm. Wybrane wyniki badań metalograficznych przedstawiono na rys. 6. Wytrzymałość złączy w statycznej próbie rozciągania wyniosła ok. 226 MPa, co stanowi ok. 96% R_m stopu EN AW 5754 i ok. 66% R_m stopu EN AW 6082. W próbie zginania złącza ulegały pęknięciu w osi zgrzeiny lub poza zgrzeiną w stopie EN AW 5754. Tylko złącza wykonane przy $v_{zg} = 460$ mm/min osiągnęły wymagany kąt gięcia 180°.

W drugim etapie prowadzone były badania zgrzewania kadłubów chłodzących składających się z płyty głównej (korpusu) o wymiarach 1670 × 387 mm, wykonanej ze stopu EN AW 6082 o grubości 30,0 mm oraz płaszczka zewnętrznego

Rys. 6. Makrostruktura złączy. Stop EN AW 6082 od strony natarcia (SN), stop EN AW 5754 od strony spływu (SS). Prędkość zgrzewania v_{zg} : a) 240 mm/min, b) 300 mm/min. Traw. Keller

o wymiarach 1460,9 × 25,9 mm, wykonanego z blachy ze stopu EN AW 5754 o grubości 6,0 mm. W płycie głównej wyfrezowany został kanał chłodzący. W celu wzmocnienia konstrukcji, w kadłubie pomiędzy kanałami chłodzącymi znajdują się miejsca, w których wykonano zgrzeiny wzmacniające. Do wykonania korpusów chłodzących zastosowano parametry zgrzewania: $\omega = 891$ obr./min, $v_{zg} = 460$ mm/min. Podczas zgrzewania po stronie natarcia znajdował się stop EN AW 6082. Schemat budowy korpusu z kanałem chłodzącym oraz kadłuba chłodzącego po procesie zgrzewania przedstawiono na rys. 7.

Na podstawie wyników badań metalograficznych próbek pobranych w narożach złączy oceniono, iż złącza charakteryzują się ciągłością materiałową w zgrzeinie. W jądrze zgrzeiny nie stwierdzono występowania niezgodności. Materiał w miejscu przejścia narzędzia został prawidłowo wymieszany. Widoczne jest charakterystyczne ułożenie materiału w jądrze zgrzeiny w postaci tzw. „pierścieni cebuli” od strony natarcia oraz pod wieńcem. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rys. 8.



Rys. 7. Schemat budowy korpusu z kanałem chłodzącym (a) oraz widok kadłuba po procesie zgrzewania FSW (b)



Rys. 8. Makrostruktury obszaru zgrzewania w wybranych narożnikach złącza. SN – strona natarcia, SS – strona spływu. Traw. Keller

4. Podsumowanie

Badania metalograficzne makroskopowe złączy spawanych wykazały, że w każdym przypadku spoina ma prawidłowy kształt, właściwie ukształtowane lico i grań, jednakże wtopienie w ścianki złącza zależy od sposobu przygotowania. Jeśli płyta o grubości 30 mm nie zostanie zukosowana, to bez względu na parametry nie jest możliwe uzyskanie złącza wolnego od niezgodności typu brak przetopu. Powodem tego jest wysoka przewodność cieplna aluminium, skutkująca szybkim odprowadzaniem ciepła z obszaru spawania. Połączenia w konstrukcji obudowy silnika, szczególnie miejsce „zamykania” płaszczka na kadłubie, powinny być przygotowane jako złącza doczołowe obustronnie ukosowane. Złącza bez ukosowania oraz złącza ze spoinami pachwinowymi mogą doprowadzić do powstawania niezgodności typu brak przetopu.

Na podstawie wyników badań zgrzewania oceniono, że z zastosowaniem metody FSW możliwe jest łączenie elementów korpusów chłodzących, które mogą być zastosowane docelowo jako obudowy silników elektrycznych wykonanych z różnoimiennych stopów aluminium. Przy prawidłowo dobranych warunkach zgrzewania, takich jak kształt i wymiary narzędzia, ustawienie stopów w złączu względem ruchu obrotowego narzędzia oraz parametrów zgrzewania prędkości obrotowej narzędzia i prędkości liniowej zgrzewania, złącza charakteryzują się ciągłością materiałową, bez widocznych niezgodności. Wytrzymałość połączeń z różnoimiennych stopów aluminium kształtuje się na poziomie 96% R_m stopu EN AW 5754 i około 66% R_m stopu EN AW 6082. Podczas procesu zgrzewania konieczne jest zastosowanie systemu dociskowego zapobiegającego odkształcaniu się elementów zgrzewanych.

Badania zrealizowano w ramach projektu pt. „Opracowanie metod i procesów łączenia do dedykowanych elementów obudowy silników elektrycznych i falowników”, finansowanego z Funduszu Rozwoju Instytutu w latach 2020 – 2021.

Literatura

- [1] V.R. Blewett: *Welding aluminium and its alloys. A review of applications and requirements*, *Welding & Metal Fabrication* nr 9, 1991.
- [2] L.O. Larsson, N. Palmquist: *High quality aluminium welding – a key factor in future car body production*, *Svetsaren* nr 2, 2000.
- [3] B. Irving B.: *Welding the four most popular aluminum alloys*, *Welding Journal* nr 2, 1994.
- [4] H.A. Meyer: *Why aluminium owes so much to MIG*, *Welding & Metal Fabrication* nr 6, 1979.
- [5] M. Kumagai: *Recent technological developments in welding aluminium and its alloys*, *Welding International* nr 3, 2003.
- [6] S. Sivabalan, R. Sridghar, G. Sathishkumar: *Study on mechanical behaviour of friction stir welded 6082-T6 aluminium alloys*. *Materialstoday: Proceedings*, t. 69, cz. 3, s. 944 – 949, 2022.
- [7] Gürel Çam, Selcuk Mistikoglu: *Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, nr. 23, s. 1936 – 1953, 2014.
- [8] M.I. Costa, D. Verdera, C. Leitão, D.M. Rodrigues: *Dissimilar friction stir lap welding of AA 5754-H22/AA 6082-T6 aluminium alloys: Influence of material properties and tool geometry on weld strength*. *Materials and Design*, nr 87, s. 721 – 731, 2015.

dr inż. Aleksandra Węglowska, Centrum Spawalnictwa, Grupa Badawcza Technologie Zgrzewania i Klejenia oraz Ochrona Środowiska
mgr inż. Janusz Rykała, Centrum Spawalnictwa, Grupa Badawcza Technologie Spawalnicze
dr inż. Tomasz Pfeifer, Centrum Spawalnictwa, Grupa Badawcza Technologie Spawalnicze
Jacek Pietrzak, Centrum Spawalnictwa, Grupa Badawcza Technologie Zgrzewania i Klejenia oraz Ochrona Środowiska
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, ul. K. Miarki 12 – 14, 44-100 Gliwice

artykuł recenzowany