

**WPŁYW WARUNKÓW ZGRZEWANIA METODĄ FRICTION STIR  
WELDING NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE I JAKOŚĆ ZŁĄCZY ZE  
STOPU ALUMINIUM**

**Opracowała:**

**mgr inż. Anna Janeczek**

**Instytut Technologii Maszyn i Materiałów, Wydział Inżynierii  
Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska**

## **1. Wstęp**

Metoda zgrzewania tarcowego z przemieszaniem - Friction Stir Welding (FSW) - została opracowana w celu poprawy technologii i powtarzalności procesu spajania aluminium i jego stopów. Obserwowany obecnie gwałtowny rozwój procesu FSW z narastającą liczbą zastosowań stopów aluminium w wielu gałęziach przemysłu. Aluminium i jego stopy są wykorzystywane w przemyśle samochodowym, lotnictwie, sektorze kosmicznym oraz transportowym, głównie dzięki wysokim własnościom mechanicznym i niskiej gęstości. Obecnie metoda FSW wykorzystywana jest również do spajania metali różnoimiennych, stopów magnezu, polimerów oraz tytanu, miedzi i stali [2-6]

Metoda FSW pozwala na łączenie stopów aluminium, nie doprowadzając do temperatury topnienia, unikając przy tym znacznych zmian w strukturze i własnościach, a przede wszystkim ograniczając nagromadzenie naprężeń i odkształcenia [1]. FSW wymaga zastosowania specjalnie zaprojektowanego narzędzia, które składa się z wieńca opory i trzpienia. Obydwie części mogą być zaprojektowane w różnych kształtach i rozmiarach, dopasowując je do rodzaju i grubości zgrzewanego metalu. Kształt oraz rozmiar narzędzia wpływa na własności i wygląd złącza [7]. Podczas procesu trzpień wprowadzany w ruch obrotowy zagłębiany jest pomiędzy łączone blachy. Następnie, w celu wykonania zgrzeiny wzdłuż łączonych blach, narzędzie wprowadzane jest w ruch posuwowy, jednocześnie wykonując ruch obrotowy. Tarcie pomiędzy narzędziem a materiałem zgrzewanym doprowadza materiał do stanu plastyczności. Ruch obrotowy narzędzia pozwala na przemieszanie uplastycznionego materiału.

Zastosowanie zgrzewania FSW dla niektórych stopów aluminium zostało zbadane przez grupy naukowe z zastosowaniem różnych odmian procesu FSW. Takhak i Hussein badali zastosowanie metody FSW do zgrzewania stopów aluminium z miedzią, wykorzystując metodę Taguchiego do optymalizacji parametrów zgrzewania - prędkości zgrzewania i prędkości obrotowej [8]. Najwyższe własności mechaniczne zostały osiągnięte z parametrami: 1300 obr/min i 40 mm/min. Jandhagi i inni skupili się na wykorzystaniu stopów aluminium w złączach różnoimiennych [9]. Porównali oni zastosowanie obróbki cieplnej po procesie zgrzewania złączy AA2198-AA7475 i AA2198-AA6013. Po wyżarzaniu obydwu złączy w temperaturze ponad 560°C, zauważono wysoki rozrost ziaren i rozwarstwienia pomiędzy nimi. Proces zgrzewania FSW może być także prowadzony w ośrodku wodnym - Underwater Friction Stir Welding (UFSW). Środowisko wodne ma na celu zwiększyć możliwość kontroli przekazywania ciepła i tym samym zmniejszyć prawdopodobieństwo doprowadzenia materiału do temperatury topnienia. Dong i inni porównali wodne i standardowe - na powietrzu - środowisko zgrzewania podczas spajania stopów różnoimiennych - AA 7003-T4 - AA6060-T4 [10]. Zauważono, że podczas zgrzewania pod wodą, ziarna przyjmowały nawet dwa razy mniejsze rozmiary niż podczas zgrzewania na powietrzu, co wpływało na podwyższenie własności mechanicznych złączy.

Celem pracy była analiza wpływu kształtu narzędzia i parametrów zgrzewania na własności złączy zgrzewanych metodą FSW oraz weryfikacja możliwości zastosowania procesu do spajania stopu aluminium EN AW-3004.

## **2. Materiały i opis procesu**

Podczas badań wykorzystane zostały blachy ze stopu EN AW-3004 (AlMn1Mg1), o wymiarach 170 x 60 x 5 mm. Skład chemiczny oraz własności mechaniczne stopu zestawiono w Tab. 2.1.

**Wpływ warunków zgrzewania metodą Friction Stir Welding na własności mechaniczne i jakość złączy  
ze stopu aluminium**

**Opracowała: mgr inż. Anna Janeczek**

**SYMPOZJUM KATEDR I ZAKŁADÓW SPAWALNICTWA**  
**pt. Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych**

Tab. 2.1. Skład chemiczny i własności mechaniczne stopu EN AW-3004 wg normy PN-EN 573-3:2019-12 i EN 4852: 2016 + A1:2018

Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)	Si (%)	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)	Wytrzymałość na rozciąganie, Rm (MPa)	Wydłużenie, A50 (%)
0.80-1.30	1.00-1.50	≤0.70	≤0.30	≤0.25	≤0.25	reszta	≥155	≥16

Proces wykonywany był na frezarce, z zastosowaniem samodzielnie wytworzonego narzędzia z wymiennym trzpieniem. Do badań wykorzystane zostały trzpienie o kształcie cylindrycznym oraz stożkowym, obydwa gwintowane.

Wykonano 15 złączy, w tym pięć z nich z zastosowaniem trzpienia stożkowego oraz dziesięć z trzpieniem cylindrycznym. Zgrzewanie doczołowe wykonano w pozycji podolnej (PA). Trzpień wprowadzono na 4.5 mm w materiał zgrzewany.

Parametry procesu zostały dobrane na podstawie badań wstępnych. Najpierw wykonano pięć złączy z trzpieniem stożkowym ze stałą wartością prędkości obrotowej - 475 obr/min oraz zmienną wartością prędkości zgrzewania (posuwu). Taki sam zestaw parametrów zastosowano do wykonania kolejnych pięciu złączy, zmieniając trzpień na cylindryczny. W celu porównania wpływu parametrów na własności złączy, wykonano pięć dodatkowych złączy z trzpieniem cylindrycznym i ze stałą prędkością zgrzewania - 300 mm/min, natomiast zmienną prędkością obrotową. Zestaw parametrów przedstawiono w Tab. 2.2.

Tab. 2.2. Parametry zgrzewania

Symbol próbki	Prędkość zgrzewania [mm/min]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Kształt trzpienia	
S1	150	475	Stożkowy	
S2	235			
S3	300			
S4	375			
S5	475			
C1	150	300	Cylindryczny	
C2	235			
C3	300			
C4	375			
C5	475			
C6	300			155
C7				205
C8				290
C9				360
C10				680

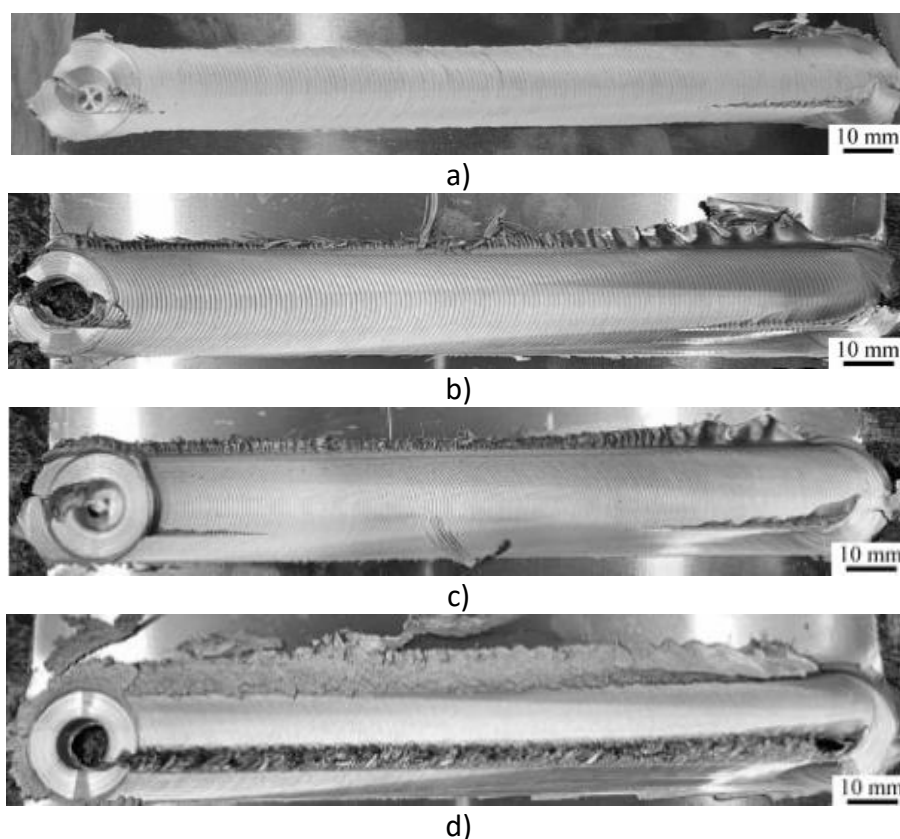
**Wpływ warunków zgrzewania metodą Friction Stir Welding na własności mechaniczne i jakość złączy ze stopu aluminium**

Opracowała: mgr inż. Anna Janeczek

Następnie złącza zostały poddane badaniom nieniszczącym i niszczącym: wizualnym (VT) oraz statycznej próbie rozciągania.

### 3. Wyniki badań

Wybrane złącza przedstawiono na Rys. 3.1. W niektórych złączach zaobserwowano wypływkę materiału. Dotyczy to przede wszystkim złączy wykonanych z zastosowaniem trzpienia cylindrycznego. Poza tym, jedynie w złączu C10 zaobserwowano brak połączenia, co może wskazywać na zbyt wysoką wartość prędkości obrotowej w stosunku do prędkości zgrzewania. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, wzrasta ilość generowanego ciepła, czego wynikiem może być doprowadzenie materiału do temperatury topnienia. Zaobserwowano również niepełne przemieszanie materiału pod koniec złączy C7, C8 i C9.



Rys. 3.1. Złącza zgrzewane metodą FSW: a) S5, b) C5, c) C9, d) C10

Wyniki statycznej próby rozciągania przedstawiono na Rys. 3.2. Porównując wpływ zastosowanego trzpienia na wytrzymałość złączy, znacznie wyższą wytrzymałość na rozciąganie otrzymano przy użyciu trzpienia cylindrycznego. Każde ze złączy wykonanych z trzpieniem cylindrycznym przewyższa minimalną wartość wytrzymałości na rozciąganie materiału rodzimego. Jednak w przypadku trzpienia o kształcie stożkowym, jego zastosowanie nie gwarantuje wytrzymałości na rozciąganie zbliżonej do materiału rodzimego.

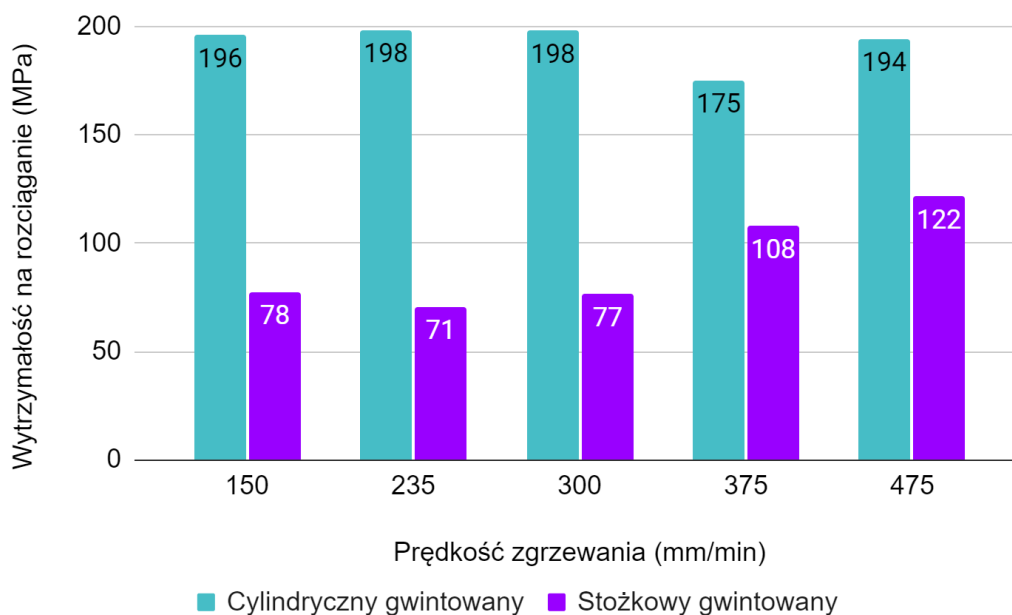
W przypadku porównania parametrów spawania, przy prędkości obrotowej równej 475 obr/min, wartości prędkości zgrzewania w przedziale od 150 do 475 mm/min, nie mają znacznego wpływu na wytrzymałość na rozciąganie. Wyjątek stanowi złącze C4, dla którego wynik jest niższy od pozostałych, natomiast nadal przekracza minimalną wartość wytrzymałości materiału

**Wpływ warunków zgrzewania metodą Friction Stir Welding na własności mechaniczne i jakość złączy  
ze stopu aluminium**

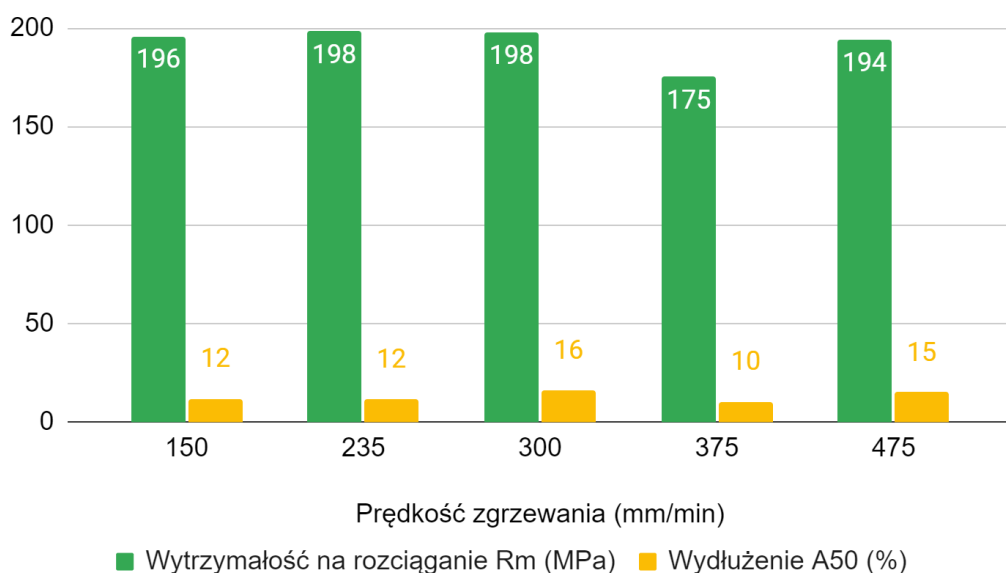
Opracowała: mgr inż. Anna Janeczek

rodzimego. Zmiana prędkości zgrzewania ma jednak wpływ na wartość wydłużenia. Najwyższe wartości otrzymano dla próbek C3 i C5.

Z badań wynika, że duże znaczenie ma dobór prędkości obrotowej. Tylko wartości 290 oraz 475 obr/min zapewniły wytrzymałość na rozciąganie na poziomie wyższym od wartości materiału rodzimego. Natomiast wartość wydłużenia jest akceptowalna jedynie dla złączy wykonanych z prędkością obrotową 475 obr/min.



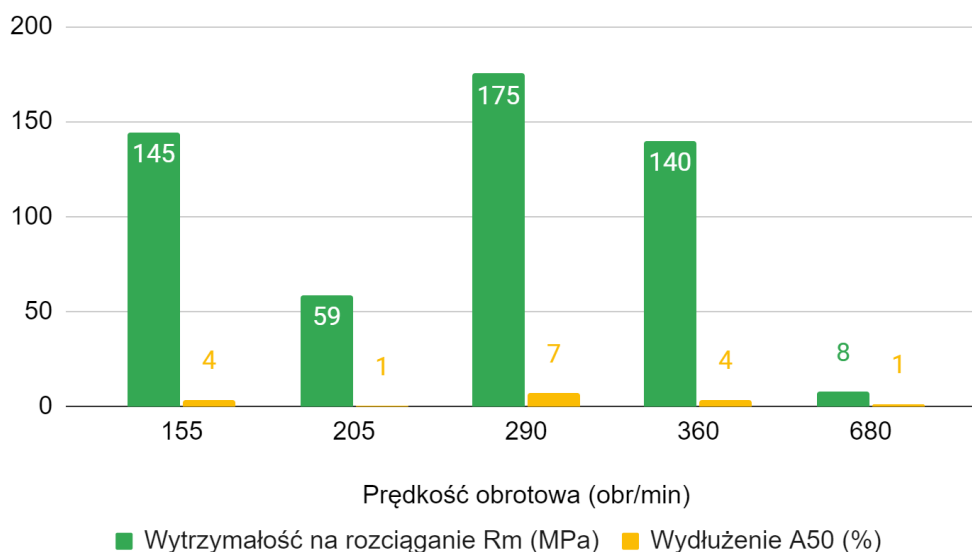
a)



b)

**Wpływ warunków zgrzewania metodą Friction Stir Welding na własności mechaniczne i jakość złączy ze stopu aluminium**

Opracowała: mgr inż. Anna Janeczek



c)

Rys. 3.2. Wyniki statycznej próby rozciągania: a) porównanie wpływu kształtu narzędzia, b) stała prędkość obrotowa, c) stała prędkość zgrzewania

#### 4. Podsumowanie

Podczas badań nad procesem FSW analizowany był wpływ kształtu trzpienia narzędzia oraz parametrów zgrzewania na własności mechaniczne zgrzein. Wykonane zostało 15 złączy, które stanowiły przedmiot badań wizualnych oraz statycznej próby rozciągania. Na podstawie wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Złącza wykonane z trzpieniem cylindrycznym charakteryzowały się wypływką materiału poza zgrzeiną. W przypadku złączy wykonanych z trzpieniem stożkowym nie zaobserwowano wypływki materiału.
2. Wytrzymałość na rozciąganie złączy wykonanych z trzpieniem cylindrycznym była znacznie wyższa w porównaniu ze złączami wykonanymi z trzpieniem stożkowym.
3. Najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie zostały otrzymane przy zgrzewaniu z prędkością obrotową równą 475 obr/min.
4. Nie zauważono znaczących różnic przy zmianie prędkości zgrzewania, co może wskazywać na to, że parametr prędkości obrotowej jest kluczowy w doborze warunków zgrzewania FSW.

#### Bibliografia

- [1] Honaryar, A.; Iranmanesh, M.; Liu, P.; Honaryar, A. Numerical and experimental investigations of outside corner joints welding deformation of an aluminum autonomous catamaran vehicle by inherent strain/deformation FE analysis. Ocean Engineering 2020, 200, 106976, ISSN 0029-8018. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106976>
- [2] Dhanesh Babu, S.D.; Sevel, P.; Senthil Kumar, R.; Vijayan, V. ; Subramani J. Development of Thermo Mechanical Model for Prediction of Temperature Diffusion in Different FSW Tool Pin Geometries During Joining of AZ80A Mg Alloys. J Inorg Organomet Polym 2021, 31, 3196–3212. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01931-4>

Wpływ warunków zgrzewania metodą Friction Stir Welding na własności mechaniczne i jakość złączy ze stopu aluminium

Opracowała: mgr inż. Anna Janeczek

- [3] Pereira, M.A.R.; Amaro, A.M.; Reis, P.N.B.; Loureiro, A. Effect of Friction Stir Welding Techniques and Parameters on Polymers Joint Efficiency — A Critical Review. *Polymers* 2021, 13, 2056. <https://doi.org/10.3390/polym13132056>
- [4] Singh, V. P.; Patel, S. K.; Ranjan, A.; Kuriachen, B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: a critical review. *Journal of Materials Research and Technology* 2020, 9 (3), 6217-6256, ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.008>
- [5] Su, Y.; Li, W.; Gao, F.; Vairis, A. Effect of FSW process on anisotropic of titanium alloy T-joint, *Materials and Manufacturing Processes* 2021. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1942911>
- [6] Machniewicz, T.; Nosal, P.; Korbel, A.; Hebda, M. Effect of FSW Traverse Speed on Mechanical Properties of Copper Plate Joints. *Materials* 2020, 13, 1937. <https://doi.org/10.3390/ma13081937>
- [7] Ramana, G. V.; Yelamasetti, B.; Vardhan, T. V. Effect of FSW process parameters and tool profile on mechanical properties of AA 5082 and AA 6061 welds. *Materials Today: Proceedings* 2021, 46, Part 1, 826-830, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.801>
- [8] Takhakh, A. M.; Hussein, H. K. Experimental Investigation and Parametric Optimization of FSW for the 2024-O Aluminum Alloy Joints. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 1094, 012134. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012134>
- [9] Jandaghi, M.R.; Pouraliakbar, H.; Saboori, A.; Hong, S.I.; Pavese, M. Comparative Insight into the Interfacial Phase Evolutions during Solution Treatment of Dissimilar Friction Stir Welded AA2198-AA7475 and AA2198-AA6013 Aluminum Sheets. *Materials* 2021, 14, 1290. <https://doi.org/10.3390/ma14051290>
- [10] Dong, J.; Zhang, D.; Luo, X.; Zhang, W.; Zhang, W.; Qiu, Ch. EBSD study of underwater friction stir welded AA7003-T4 and AA6060-T4 dissimilar joint, *Journal of Materials Research and Technology* 2020, 9(3), 4309-4318, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.056>

**Wpływ warunków zgrzewania metodą Friction Stir Welding na własności mechaniczne i jakość złączy ze stopu aluminium**

Opracowała: mgr inż. Anna Janeczek