

ZGRZEWANIE FSW STOPÓW ALUMINIUM ALMGSI(CU)

Aleksandra Węglowska¹, Marek Stanisław Węglowski¹, Jacek Pietrzak¹, Marcin Miłowanow¹, Kamil Kubik¹, Monika Mitka², Bartłomiej Płonka², Sonia Boczkal²

¹ Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa

² Łukasiewicz - Instytut Metali Nieżelaznych Oddział w Skawinie

Wprowadzenie

Stopy AlMgSi należą do najpowszechniej produkowanych i stosowanych w praktyce stopów aluminium przeznaczonych do przeróbki plastycznej. Podstawowe cechy tych materiałów to bardzo dobra odkształcalność, odporność na korozję, dobra podatność do spawania i zgrzewania. Głównymi odbiorcami tych produktów są przemysł produkcji środków transportu naziemnego, powietrznego i wodnego, budownictwo oraz elektroenergetyka. Stopy te charakteryzują się średnią wytrzymałością, przy dobrej plastyczności. Osiągana w praktyce wytrzymałość na rozciąganie po obróbce cieplnej, w zależności od składu chemicznego, mieści się zazwyczaj w granicach 280-320 MPa. Profile przeznaczone dla przemysłu motoryzacyjnego i branży transportowej charakteryzują się grubością ścianki w zakresie 1,5-5 mm. Stopy AlMgSi(Cu) dla przemysłu motoryzacyjnego są stosowane głównie w technologiach walcowania na gorąco, natomiast ich zastosowanie do procesu przemysłowego wyciskania z obróbką cieplno-plastyczną jest nowością. Z drugiej strony spawanie stopów AlMgSi(Cu) jest utrudnione, ze względu na obserwowaną porowatość oraz skłonność do powstawania pęknięć.

Odpowiedzią na potrzeby przemysłu w zakresie trwałego łączenia stopów AlMgSi(Cu) może być zastosowanie zgrzewania FSW. Proces prowadzony w stanie stałym ogranicza możliwość powstawania kruchych faz, umożliwia znaczące rozdrobnienie mikrostruktury w obszarze mieszanina materiału zgrzejny oraz zapewnia pełną powtarzalność procesu zgrzewania.

W pracy przedstawiono wyniki badań złączy zgrzewanych metodą FSW wykonanych z komercyjnie dostępnego stopu EN AW-6060, jako materiału odniesienia oraz eksperymentalnych stopów aluminium AlMgSi(Cu) o zwiększonej zawartości miedzi. Przeprowadzono badania własności mechanicznych oraz metalograficznych.

Procedura prowadzenia badań

Próby zgrzewania FSW przeprowadzono na stanowisku zbudowanym w oparciu o frezarkę pionową FYF32JU2, przy następującym zestawie parametrów zgrzewania: prędkość zgrzewania 280, 355, 450 i 560 mm/min, prędkość obrotowa narzędzia 450, 560 i 710 obr/min. Blachy były zgrzewane doczołowo; przygotowanie blach na 1. Blachy przed procesem zgrzewania były odfuszczone alkoholem izopropylowym. Do zgrzewania wykorzystano narzędzie z trzpieniem stożkowym Triflute (Rys. 1a) oraz narzędzie z trzpieniem stożkowym, klasyczne (Rys. 1b).



Rysunek 1. Widok narzędzi zastosowanych w badaniach:

a) narzędzie z trzpieniem stożkowym Triflute, b) narzędzie z trzpieniem stożkowym klasyczne

Badania przeprowadzono dla stopów EN AW-6060, oraz eksperymentalnych AlMgSi(Cu), oznaczonych symbolem 2A i 3A. Próbe rozciągania złączy zgrzewanych wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 4136:2013-05 za pomocą maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C45.105E. Pomiar twardości przeprowadzono metodą Vickersa (HV1) przy użyciu twardościomierza KB50BYZ-FA zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 22826:2021-08 na próbkach, które wcześniej były poddane badaniom metalograficznym. Próbie zginania złączy wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 5173:2010. Średnica trzpienia gnaącego oraz wymagany kąt gięcia zostały ustalone zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-2:2008. Badania metalograficzne mikroskopowe przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 17639:2013-12 przy użyciu mikroskopu świetlnego Eclipse MA 200 (Nikon) oraz FEI Inspect F50. Skład chemiczny zastosowanych stopów aluminium przedstawiono w Tabelcy 1, natomiast własności mechaniczne w Tabelcy 2.

Nazwa	Si		Fe		Cu		Mn		Mg		Cr		Zn		Ti		Inne		Al
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
EN AW-6060	0,3	0,6	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,35	0,6	0,05	0,15	0,1	0,15	0,15				Reszta
2A		1,2		0,0		0,8		0,6		0,8		0,25		0,0		0,02			Reszta
3A		1,2		0,0		1,2		0,6		0,8		0,4		0,0	0,02			Reszta	

Tabelca 1. Skład chemiczny stopów aluminium, wag. %

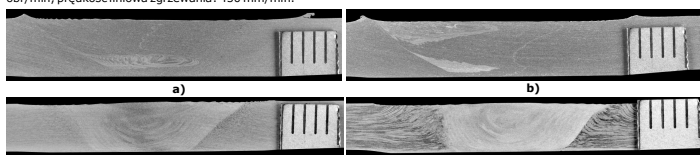
Stop	Wymiar		Wytrzymałość na rozciąganie		Granica plastyczności 0,2 %		Wydłużenie A50
	Min	Max	Min	Max	MPa	% min	
EN AW-6060	5	25	170*		140*	6*	
2A		5		252		15,4	
3A		5		303		12,6	

*na podstawie wymagań normy

Tabelca 2. Własności mechaniczne stopów aluminium

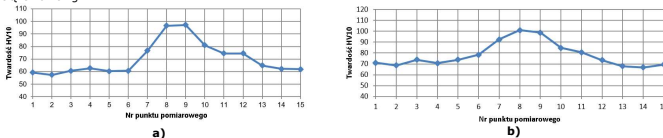
Wyniki badań i dyskusja

Na rysunku 2 przedstawiono makrostrukturę złączy zgrzewanych FSW dla wybranych parametrów zgrzewania. Na podstawie analizy wyników badań zgrzewania FSW blach ze stopu EN AW 6060 T6 stwierdzono, że dla wszystkich zastosowanych warunków zgrzewania (narzędzie oraz parametry zgrzewania) złącza spełniają założenia projektowe. Złącza charakteryzowały się ciągłością materiałową w całym obszarze zgrzewania; nie stwierdzono występowania niezgodności. Na podstawie oceny wyników badań zgrzewania FSW blach ze stopu EN AW 6060 stwierdzono, że do procesu zgrzewania eksperymentalnych stopów AlMgSi(Cu) zastosowano narzędzie stożkowe klasyczne (rys. 1b) oraz parametry zgrzewania: prędkość obrotowa narzędzia: 710 obr/min, prędkość liniowa zgrzewania: 450 mm/min.



Rysunek 2. Makrostruktura złączy zgrzewanych FSW dla dwóch narzędzi roboczych. Parametry zgrzewania: ω = 710 obr/min, v_z = 450 mm/min: a) 6060 Triflute, b) 6060 stożkowe klasyczne, c) 2A stożkowe klasyczne, d) 3A stożkowe klasyczne

Przeprowadzone badania metalograficzne wykazały, że również w złączach ze stopów 2A i 3A przedstawionych na rysunku 2 c, d) nie wykryto niezgodności zgrzewalniczych. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów twardości metodą Vickersa przy obciążeniu 10 kg.



Rysunek 3. Rozkład twardości na przekroju złączy z nowych stopów Al zgrzewanych FSW:

a) 2A - narzędzie stożkowe klasyczne, b) 3A - narzędzie stożkowe klasyczne

Pomiary twardości wykazały, iż wraz ze wzrostem zawartości miedzi w stopie aluminium twardość rośnie. Dla stopu 2A (Cu 0,8%) – 98 HV10, natomiast dla stopu 3A (Cu 1,2%) – 104 HV10. Ponadto można zaobserwować wyraźny wzrost twardości w zgrzejnie w porównaniu do materiału rodzimego. Jest to spowodowane znacznym rozdrobnieniem ziarna w obszarze bezpośredniego oddziaływania narzędzia roboczego.

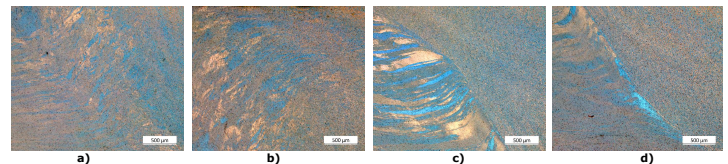
Wytrzymałość złączy ze stopu EN AW-6060 wynosi od 147,1 MPa do 153,3 MPa. Wyniki próby rozciągania złączy dla stopów przedstawiono w Tabelcy 3. Do obliczenia kryterium wytrzymałości (0,8×R_m MR) użyto najniższej wartości zbadanej wytrzymałości na rozciąganie dla danego stopu. Przeprowadzone próby rozciągania wykazały, że dla wszystkich złączy kryterium akceptacji zostało spełnione. Złącza charakteryzują się wytrzymałością wyższą niż 80% wytrzymałości danego stopu. Ponadto zaobserwowano, że zerwanie dla stopów 2A i 3A w trakcie próby nastąpiło poza zgrzejnią. Wykazano również, że wraz ze wzrostem zawartości miedzi wytrzymałość złączy rośnie, co jest zbieżne z wynikami pomiarów twardości złączy.

Oznaczenie próbki	Własności wytrzymałościowe R _m [Mpa]	Średnia wytrzymałość R _{0,2} [Mpa]	Kryterium akceptacji MPa	Uwagi
2A/1	203,9	203,4	201,6	Zerwanie poza zgrzejnią
2A/2	201,1			Zerwanie poza zgrzejnią
2A/3	205,1			Zerwanie poza zgrzejnią
3A/1	251,7	250,9	242,4	Zerwanie poza zgrzejnią
3A/2	251,1			Zerwanie poza zgrzejnią
3A/3	250,0			Zerwanie poza zgrzejnią

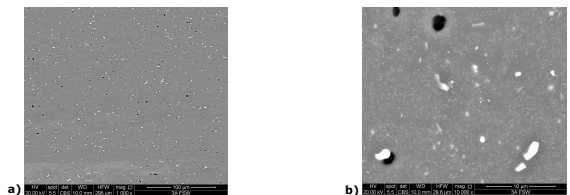
Tabelca 3. Wyniki próby rozciągania złączy spawanych

W ramach pracy badawczej przeprowadzono również próby gięcia złączy. Średnica trzpienia gnaącego oraz wymagany kąt gięcia zostały ustalone zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-2:2008, dla stopu 2A – 25 mm, 3A-30 mm. Próby gięcia przeprowadzono na rolce. Zaobserwowano, że dla złączy ze stopu 2A wszystkie próbki uzyskały kąt gięcia 180°, natomiast dla złączy ze stopu 3A dwie próbki pękły w zgrzejnie.

Badania metalograficzne mikroskopowe (mikroskopia świetlna oraz SEM) nie wykazały niezgodności materiałowych w skali mikro w badanych obszarach. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wyniki dla złączy ze stopu 2A i 3A, wykonanych narzędziem klasycznym przy użyciu mikroskopu świetlnego. Natomiast na rysunku 5 i 6 przy wykorzystaniu mikroskopii skaningowej.

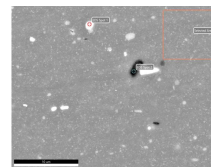


Rysunek 4. Mikrostruktura LM dla stopu 2A: a), b) oraz stopu 3A: c), d)



Rysunek 5. Mikrostruktura SEM dla stopu 3A w zgrzejnie przy różnych powiększeniach

Przeprowadzona analiza EDS wykazała, że w obszarze zgrzejny można ujawnić fazy Mg₂Si (ciemniejsze obszary) oraz fazy Q (jaśniejsze obszary). Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe wyniki dla stopu 3A.



Pierwiastek	Miejsce analizy wag. %		
	Obszar 1	Punkt 1	Punkt 2
Mg K	1,8	2,7	21,7
Al K	94,8	74,4	61,8
Si K	1,3	7,4	15,0
Mn K	0,5	8,2	0,5
Cu K	1,1	1,5	0,6
Cr K	0,5	2,7	0,4

Rysunek 6. Wyniki analizy EDS w zgrzejnie dla stopu 3A

Wnioski

W ramach pracy badawczej opracowano technologię zgrzewania FSW i wykonano złącza ze stopów aluminium EN AW-6060, dostępny komercyjnie oraz eksperymentalnych AlMgSi(Cu), opracowanych w ramach projektu.

Na podstawie badań sformulowano następujące wnioski:

- zastosowanie zgrzewania FSW umożliwiła uzyskanie złączy bez niezgodności, spełniających wymagania wytrzymałościowe; wytrzymałość złączy jest wyższa niż 80% wytrzymałości materiału rodzimego,
- wraz ze wzrostem zawartości miedzi twardość w zgrzejnie rośnie: dla stopu 2A (Cu 0,8%) – 98 HV10, natomiast dla stopu 3A (Cu 1,2%) – 104 HV10,
- wraz ze wzrostem zawartości miedzi wytrzymałość złączy spawanych rośnie: dla stopu 6060 – 153,3 MPa, dla stopu 2A – 203,4 MPa, natomiast dla stopu 3A – 250,9 MPa,
- analiza EDS wykazała, że w obszarze zgrzejny dla stopów 2A i 3A można ujawnić obecność fazy Mg₂Si oraz fazy Q.

Podziękowania

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu TECHMASTRATEG pt. „Opracowanie technologii wyciskania kształtowników z ultra-wytrzymałych stopów AlMgSi (Cu)” - EXALCO. Numer umowy TECHMATSTRATEG-III/0040/2019.



Kontakt:

dr inż. Aleksandra Węglowska
Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa
ul. Bl. Czesława 16-18
tel. +48 32 33 58 329
44-100 Gliwice
www.is.lukasiewicz.gov.pl
aleksandra.weglowska@is.lukasiewicz.gov.pl

63. MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA SPAWALNICZA

18-20 PAŹDZIERNIKA 2022 r. | KATOWICE



SPAWALNICTWO W SIECI NOWYCH MOŻLIWOŚCI

