

SPAWANIE ELEKTRONOWE STOPÓW ALUMINIUM ALMGSi(Cu)

Marek Stanisław Węglowski¹, Piotr Śliwiński¹, Piotr Gotkowski¹, Marcin Miłowanow¹, Kamil Kubik¹, Monika Mitka², Bartłomiej Płonka², Sonia Boczkal²

¹ Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa

² Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych Oddział w Skawinie

Wprowadzenie

Spawanie wiązką elektronów stopów aluminium charakteryzujących się małą gęstością i dobrą przewodnością cieplną, znajduje szerokie zastosowanie nawet przy produkcji przedmiotów codziennego użytku. W trakcie procesu spawania następuje usuwanie warstwy trudno topliwych tlenków, dzięki czemu zmniejsza się porowatość w spoinie. Ponadto nie następuje problemów spawanie materiałami silnie odbijającymi promieniowanie, co stanowi znaczącą przewagę w odniesieniu do spawania laserowego. Możliwa do osiągnięcia głębokość wtopienia wynosi ponad 200 mm, przy wciąż dobrym stosunku szerokości do wysokości spoiny. Stopy aluminium serii 5000 (AlMg) są dobrze spawalne przy użyciu wiązki elektronów, natomiast stopy serii 2000 (AlCu), 4000 (AlSi) i 6000 (AlMgSi) wymagają dodatkowych zabiegów, które mają na celu ograniczenie pęknięć gorących. Należy brać jednak pod uwagę, że ryzyko pęknięć gorących jest uzależnione od zawartości pierwiastków stopowych, przewodności cieplnej, naprężeń powstających w trakcie lub po procesie spawania. Inaczej sytuacja wygląda w przypadku spawania stopów serii 7000 (AlZnMg), w których parowanie cynku może powodować obniżenie lub pogorszenie własności mechanicznych złącza. Natomiast, w przypadku spawania odlewanych stopów aluminium można zaobserwować, z uwagi na dużą zawartość wodoru, skłonność do porowatości. W tym przypadku konieczne jest zastosowanie technologii spawania „wieloma” wiązkami.

Z drugiej strony przemysł motoryzacyjny poszukuje nowych lekkich stopów metali, które mogą być dostarczane w szerokim zakresie wymiarowym i które charakteryzowałyby się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi. Odpowiedzią na to zapotrzebowanie mogą być stopy AlMgSi(Cu) wytwarzane w procesie przemysłowego wyciskania z obróbką cieplno-plastyczną, co stanowi nowość w skali kraju i świata.

Poniżej przedstawiono wyniki badań złączy spawanych elektronowo wykonanych z komercyjnie dostępnych stopów EN AW-6060 i EN AW-6061 oraz eksperymentalnych stopów aluminium AlMgSi(Cu) o zwiększonej zawartości miedzi. Przeprowadzono badania własności mechanicznych oraz metalograficzne.

Procedura prowadzenia badań

Próby spawania wiązką elektronów przeprowadzono przy użyciu urządzenia model XW150:30/756 (CVE), przy następującym zestawie parametrów spawania: napięcie przyspieszające 80 kV, natężenie prądu wiązki: 25 – 37 mA, prędkość posuwu (prędkość spawania): 1000 i 2000 mm/min, natężenie prądu zarzania katody: 21 A, odległość ogniskowa: 470 mm, prąd ogniskowania: 530 mA, kształt oscylacji: kołowy, częstotliwość oscylacji: 100 Hz, amplituda oscylacji: 1 mm (zarówno w kierunku równoległym jak i prostopadłym do kierunku ruchu). Badania przeprowadzono dla stopów EN AW-6060, 6061 oraz eksperymentalnych AlMgSi(Cu). Próbę rozciągania złączy spawanych 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 badaniu metalograficznemu. Próbę zginania złączy spawanych wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15173:2010. Średnica trzpienia gnącego 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 Tabeli 1, natomiast własności mechaniczne w Tabeli 2.

Nazwa	Si		Fe		Cu	Mn		Mg		Cr	Zn		Ti	Inne	Al
	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	0,35	0,6	0,05	0,15	0,1	0,15	Reszta		
EN AW-6061	0,4	0,8	0,7	0,15	0,40	0,15	0,8	1,2	0,04	0,35	0,25	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		

Tabela 1. Skład chemiczny stopów aluminium, wag. %

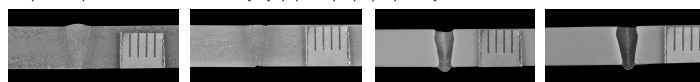
Stop	Wymiar		Wytrzymałość na rozciąganie		Granica plastyczności 0,2 %		Wydłużenie A50	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	% min	% max
EN AW-6060	5	25	170*		140*		6*	
EN AW-6061	3	6	290*		240*		10*	
2A	5	5	252		110		15,4	
3A	5	5	303		139		12,6	

*na podstawie wymagań normy

Tabela 2. Własności mechaniczne stopów aluminium

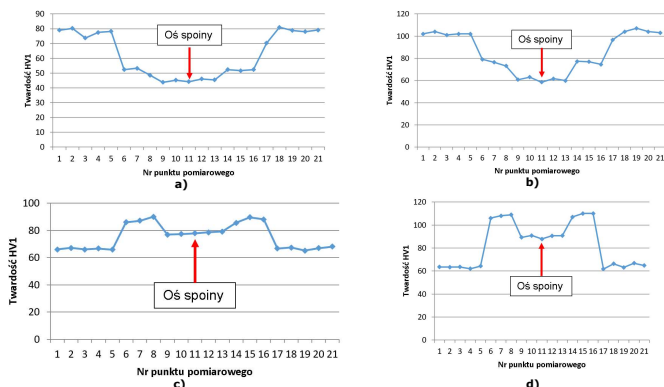
Wyniki badań i dyskusja

Na rysunku 1 przedstawiono makrostrukturę złączy spawanych przy użyciu wiązki elektronów.



Rysunek 1. Makrostruktura złączy spawanych przy użyciu wiązki elektronów, a) 6060, b) 6061, c) 2A, d) 3A

Przeprowadzone badania metalograficzne wykazały, że złącza przedstawione na rysunku 1 spełniają poziom jakości B zgodnie z wymaganiami badawymi w normie PN-EN ISO 13919-2:2021-07. Spoiny mają typowy kształt dla procesu spawania elektronowego. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów twardości metodą Vickersa przy obciążeniu 1 kg.



Rysunek 2. Twardość w złączach spawanych przy użyciu wiązki elektronów, a) 6060, b) 6061, c) 2A, d) 3A

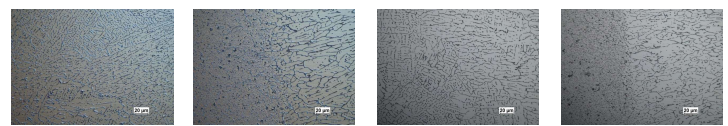
Pomiary twardości wykazały, iż wraz ze wzrostem zawartości miedzi w stopie aluminium twardość rośnie. Dla stopu 6060 (Cu max 0,1%) twardość wynosi 44,2HV1, dla stopu 6061 (Cu max 0,4%) - 58,5HV1, dla stopu 2A (Cu 0,8%) - 77,9HV1, natomiast dla stopu 3A (Cu 1,2%) - 87,9HV1. Ponadto można zaobserwować, że dla złączy 2A i 3A w spoinie twardość jest mniejsza niż w obszarze SWC. Jest to spowodowane zmniejszeniem koncentracji pierwiastków umacniających w samej spoinie w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego spawania, a także mikrostrukturą charakterystyczną dla materiału odlewane. Wyniki próby rozciągania przedstawiono w Tabeli 3. Do obliczenia kryterium wytrzymałości (0,6xR_m) 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 60% wytrzymałości danego stopu. Ponadto zaobserwowano, że dla stopów 6060 oraz 6061 zerwanie w trakcie próby nastąpiło w spoinie, a dla stopów 2A i 3A poza spoiną. Wykazano również, że wraz ze wzrostem zawartości miedzi wytrzymałość złączy rośnie, co jest zbieżne z wynikami pomiarów twardości złączy.

Symbol stopu	Numer próbki	Prędkość spawania, mm/min	Wytrzymałość na rozciąganie R _m , MPa	Kryterium akceptacji MPa	Miejsce zerwania		
6060	1.1	1000	165,9	110,5	spoina		
	1.2		165,3		spoina		
	2.1		162,2		spoina		
	2.2	2000	164,8		spoina		
	1.1		230,3		spoina		
	1.2		225,0		spoina		
6061	2.1	2000	230,1	188,5	spoina		
	2.2		226,1		spoina		
	1.1		247,8		poza spoiną		
	A1	1.1	1000		235,4	163,7	poza spoiną
		1.2			231,6		poza spoiną
		2.2			228,8		poza spoiną
A2		1.1	1000	244,1	197,3		poza spoiną
		1.2		249,1			poza spoiną
		2.1		258,9			poza spoiną
	2.2	2000	261,2	poza spoiną			

Tabela 3. Wyniki próby rozciągania złączy spawanych

W ramach pracy badawczej przeprowadzono również próby gięcia złączy. Średnica trzpienia gnącego 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 (PN-EN ISO 5173:2010 rozdział 6.2.2 rys. 15). Zaobserwowano, że na jednej z komplety 4 próbek pobranych ze złączy spawanych wykonanych ze stopów 2A (1000 i 2000 mm/min) i 3A (1000 i 2000 mm/min) ujawniono w badaniu na zginanie pęknięcia o długości powyżej 3 mm. Na pozostałych próbkach nie stwierdzono niezgodności spawalniczych.

Badania metalograficzne mikroskopowe (mikroskopia świetlna oraz SEM) nie wykazały niezgodności materiałowych w skali mikro w badanych obszarach. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki dla złączy ze stopu 2A i 3A wykonanego przy prędkości 2000 mm/min przy użyciu mikroskopu świetlnego. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono wyniki przy wykorzystaniu mikroskopii skaningowej.



Rysunek 3. Mikrostruktura LM dla stopu 2A, a) spoina, b) SWC, i 3A c) spoina, d) SWC



Rysunek 4. Mikrostruktura SEM dla stopu 2A, a) spoina, b) SWC

Przeprowadzona analiza EDS wykazała, że w obszarze spoin można ujawnić fazy Mg₂Si (ciemniejsze obszary) oraz Cu (jaśniejsze obszary). Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wyniki dla stopu 2A



Rysunek 5. Wyniki analizy EDS w spoinie dla stopu 2A

Wnioski

W ramach pracy badawczej opracowano technologię i wykonano złącza spawane ze stopów aluminium EN AW-6060, 6061 dostępnych komercyjnie oraz eksperymentalnych AlMgSi(Cu) opracowanych w ramach projektu. Na podstawie badań sformulowano następujące wnioski:

- zastosowanie wiązki elektronów umożliwiło uzyskanie złączy spawanych bez niezgodności spawalniczych spełniających wymagania wytrzymałościowe,
- wraz ze wzrostem zawartości miedzi twardość w spoinie rośnie, dla stopu 6060 (Cu max 0,1%) twardość wynosi 44,2HV1, dla stopu 6061 (Cu max 0,4%) - 58,5HV1, dla stopu 2A (Cu 0,8%) - 77,9HV1, natomiast dla stopu 3A (Cu 1,2%) - 87,9HV1,
- wraz ze wzrostem zawartości miedzi wytrzymałość złączy spawanych rośnie, dla stopu 6060 - 163,5 MPa, dla stopu 6061 - 228,2 MPa, dla stopu 2A - 241,6 MPa, natomiast dla stopu 3A - 260,05 MPa,
- analiza EDS wykazała, że w obszarze spoin można ujawnić fazy Mg₂Si oraz Cu.

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 TECHMASTRATEG-III/0040/2019.



Kontakt:

dr inż. Marek St. Węglowski
Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa
ul. Bl. Czesława 16-18
tel. +48 32 33 58 236
44-100 Gliwice
Marek.Weglowski@is.lukasiewicz.gov.pl

63. MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA SPAWALNICZA

18-20 PAŹDZIERNIKA 2022 r. | KATOWICE



SPAWALNICTWO W SIECI NOWYCH MOŻLIWOŚCI

