

Struktura złączy doczołowych odlewniczych stopów magnezu

Structure of butt joint of as-cast magnesium alloys

Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę struktury złączy odlewniczych stopów magnezu, wykonanych trzema metodami spajania: zgrzewaniem tarciovym z mieszanym materiałem zgrzeiny (FSW), spawaniem laserowym przy zastosowaniu lasera CO₂ oraz spawaniem łukowym w osłonie gazu obojętnego elektrodą wolframową (TIG). Oceniano makro- i mikrostrukturę złączy doczołowych przy zastosowaniu mikroskopu optycznego z układem cyfrowej rejestracji obrazu.

Do badań zastosowano dwa stopy magnezu: AZ91 i AM-Lite, w których cynk i aluminium stanowią główne dodatki stopowe. Materiałem wyjściowym były gąski odlewnicze, które sfrezowano na określony wymiar, a następnie wycięto z nich płaskowniki o grubości 3 mm.

Przeprowadzona ocena wykazała, że możliwe jest uzyskanie złączy ze stopów magnezu o wysokiej jakości. Odnotowano jednak śladowe ilości porów w obszarze złącza.

Abstract

The paper presents the structure of butt joints analysis of magnesium alloys welded with the use of friction stir welding (FSW), CO₂ laser and tungsten arc method. The macro- and microstructure on the cross-sections perpendicular to the welding direction using optic microscope with image recording device have been analyzed.

Two types of die-cast magnesium alloys: AZ91 and AM-Lite are used in the research. The main alloying elements of the alloys are zinc and aluminum. The materials as ingot are delivered by manufacturer and then they are cut in plate samples of 3 mm thickness.

The structure analysis show that achieved quality butt joints of magnesium alloys is possible to achieve, however the presence of some pores are also observed.

Wstęp

Stopy lekkie, charakteryzujące się właściwościami zbliżonymi do tradycyjnych materiałów takich jak stal, czy aluminium, coraz częściej stosowane są w przemyśle samochodowym i lotniczym [1÷3]. Wśród metalowych materiałów konstrukcyjnych stopy magnezu, o gęstości ok. 1,8 g/cm³, są jednymi z najlżejszych. Stopy te są lżejsze o ok. 30% od aluminium i czterokrotnie lżejsze od stali, przy czym stosunek wytrzymałości do ciężaru właściwego jest znacznie wyższy dla stopów magnezu niż dla stali.

Znaczący wpływ na właściwości użytkowe stopów magnezu mają dodatki stopowe, gdyż czysty magnez

charakteryzuje się dobrą przewodnością cieplną, wysokim współczynnikiem tłumienia drgań i hałasu, wysoką podatnością na odlewanie, obróbkę plastyczną i skrawanie [1÷3], lecz znacznie niższymi niż aluminium właściwościami mechanicznymi i odpornością korozyjną [4], wynikającą z wysokiego powinowactwa magnezu do tlenu oraz rozpuszczalności magnezu w wodzie [5]. Dodatki stopowe, takie jak aluminium, cynk, mangan, pierwiastki ziem rzadkich, znacznie poprawiają te właściwości i umożliwiają zastosowanie części wykonanych ze stopów magnezu w konstrukcjach, gdzie istotnymi parametrami są: masa konstrukcji i siły bezwładności [6].

Wyroby stosowane w przemyśle samochodowym i elektronicznym oraz wyroby o charakterze dekoracyjnym są wykonywane głównie metodą odlewania ciśnieniowego, natomiast dla przemysłu lotniczego metodą odlewania w formach piaskowych. Wytwarzane elementy wymagają jedynie obróbki wykańczającej realizowanej metodami skrawania wybranych powierzchni

Mgr inż. Lechosław Tuz, dr inż. Paweł Kołodziejczak, dr hab. inż. Andrzej Kolasa, prof. PW
– Politechnika Warszawska.

montażowych. Łączenie części wykonanych ze stopów magnezu jest ograniczone, gdyż obecnie są stosowane tylko połączenia rozłączne.

Rozwój zastosowań stopów magnezu zależy od możliwości wykonywania połączeń nierozłącznych metodami spajania, przy czym złącza muszą spełniać wymagania jakościowe dotyczące odpowiednich właściwości mechanicznych przy braku porowatości oraz pęknięć gorących i zimnych. Proces łączenia musi gwarantować powtarzalność uzyskiwanych połączeń oraz powinien być podatny na mechanizację i/lub automatyzację, co jest szczególnie istotne w produkcji wielkoseryjnej [1, 2, 6]. Wymagania te spełnia, coraz częściej stosowana w przemyśle, metoda spawania laserowego [3, 7, 8]. Wydaje się jednak, że konwencjonalne metody, takie jak spawanie metodą TIG czy MIG, ze względu na niski koszt urządzeń i możliwość automatyzacji tych procesów spawania, dają możliwości prowadzenia produkcji małoseryjnej lub związanej z regeneracją i naprawami części maszyn i urządzeń [9, 10].

Metoda FSW umożliwia wykonywanie trwałych połączeń materiałów trudnospawalnych lub niespawalnych. Nieliczne badania wskazują, że możliwe jest wykonywanie złączy stopów magnezu AZ31, AZ61, AZ91, AM-Lite [11÷14].

W artykule przedstawiono wyniki oceny struktury złączy doczołowych wykonanych trzema metodami spajania: zgrzewaniem tarciovym z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW), spawaniem laserowym i spawaniem łukowym elektrodą wolframową w osłonie gazu obojętnego (TIG) stopów magnezu AZ91 i AM-Lite.

Materiały do badań

Materiałami użytymi do badań były stopy magnezu: AZ91 i AM-Lite o składzie chemicznym przedstawionym w tablicy I. Do wykonania złączy użyto płaskowników o wymiarach 100 x 50 x 3 mm wyciętych z gąsek odlewniczych.

Połączenia wykonywano wzdłuż najdłuższej krawędzi bez użycia materiału dodatkowego. Ponieważ zastosowanych w badaniach metod używa się do łączenia lub naprawy odlewów, nie przeprowadzano obróbki cieplnej w celu ujednoczenia struktury bądź poprawy właściwości mechanicznych złączy.

Tablica I. Skład chemiczny stopów magnezu: AM-Lite i AZ91 (udziały wagowe)

Table I. Chemical composition of magnesium alloys: AZ91 i AM-Lite (mass fraction)

Stop	Pierwiastek stopowy, %			
	Aluminium Al	Cynk Zn	Mangan Mn	Magnez Mg
AM-Lite	2,7	13,8	0,16	reszta
AZ91	9,0	0,7	0,17	reszta

Metodyka badań

Próby zgrzewania metodą FSW wykonano na frezarce pionowej przy zastosowaniu narzędzia specjalnego ze stali ZW7 o twardości 65 HRC. Narzędzie składało się z walcowego trzpienia o średnicy 3,5 mm i wysokości 2,5 mm oraz z opory, na której nacięta była spirala Archimedesesa. Płaskowniki umieszczano w specjalnym uchwycie zapewniających ściśle przyleganie łączonych krawędzi podczas procesu zgrzewania. Próby zgrzewania wykonano przy sterowaniu dwoma parametrami: prędkością posuwu: 140÷355 mm/min i prędkością obrotową narzędzia: 450÷1120 obr/min. Nie stosowano gazów osłonowych.

Próby spawania laserowego przeprowadzono na stanowisku złożonym z lasera CO₂ o szybkim osiowym przepływie gazu, maksymalnej mocy 6,5 kW i modzie bliskim TEM21* oraz sprzężonego z nim stołu CNC. Wiązka laserowa prowadzona była do materiału spawanego układem optycznym złożonym z polaryzatora kołowego, układu zwierciadeł i głowicy ogniskująco-nadmuchującej. Nie stosowano materiału dodatkowego. Zastosowano gazy osłonowe: od strony lica hel, a od strony grani argon. Próby wykonano przy następujących parametrach: moc spawania 2÷2,5 kW i prędkość spawania 3,5÷4,0 m/min.

Spawanie łukowe w osłonie gazów obojętnych elektrodą nietopliwą (TIG) wykonano, stosując źródła prądu przemiennego sprzęgniętego ze spawalniczym manipulatorem liniowym, na którym zamocowany był uchwyt elektrodowy. Jako gazu osłonowego użyto helu technicznego podawanego od strony lica spoiny. Zmiennymi parametrami procesu były: natężenie prądu 70÷100 A i prędkość spawania 0,2÷0,3 m/min. Płaskowniki przed spawaniem były podgrzewane do temperatury 100÷170°C, w celu uniknięcia pęknięć gorących zaobserwowanych we wcześniejszych próbach [10].

Ocenę struktury przeprowadzono na zglądach metalograficznych wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku spajania przy zastosowaniu mikroskopu optycznego. Przygotowanie zglądów metalograficznych obejmowało szlifowanie, polerowanie i trawienie powierzchni.

Makrostruktura

Na rysunkach 1÷3 przedstawiono makrostrukturę złączy wykonanych ww. metodami. Obserwowane różnice kształtu złączy wynikają z charakteru zastosowanego źródła ciepła oraz geometrii narzędzia w przypadku metody FSW.

Największe zróżnicowanie szerokości złączy obserwowano dla połączeń wykonanych metodą FSW, ponadto złącza te, pod względem budowy, różnią się od złączy spawanych, co wynika ze specyfiki metody. W złączach tych widoczny jest dodatkowy obszar – strefa wpływów termomechanicznych po obydwu stronach jądra zgrzeiny. Kształt i pole powierzchni

zgrzeiny stanowią odwzorowanie przekroju poprzecznego narzędzia, którym złącze było wykonywane. Szerokość zgrzeiny wynosi od 5 do 18 mm przy licu zgrzeiny. Analizowane złącza charakteryzują się asymetrią – pole przekroju po stronie natarcia jest ok. 20% większe niż po stronie spływu. Zgłady metalograficzne ujawniły kierunek płynięcia uplastycznionego materiału podczas procesu zgrzewania, nie zaobserwowano natomiast SWC. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe złącza zgrzewane ze stopów magnezu AZ91 i AM-Lite.

Złącza wykonane przy zastosowaniu lasera CO₂ (rys. 2) oraz metodą TIG (rys. 3) charakteryzują się regularnym i symetrycznym kształtem. Linia wtopienia w przypadku złączy spawanych laserowo jest regularna. Wzdłuż linii wtopienia po stronie materiału rodzimego

obserwowana jest zmiana struktury o szerokości ok. 1 mm – SWC. W złączach wykonanych metodą TIG zaobserwowano SWC o szerokości ok. 3 mm, linia wtopienia natomiast ma nieregularny kształt na całej jej długości. Szerokość spoin wykonanych przy zastosowaniu lasera wynosi od 0,7 mm po stronie grani do 1 mm po stronie lica. Szerokość spoin wykonanych metodą TIG wynosi 9÷10 mm dla stopu AZ91 i 10÷11 mm dla stopu AM-Lite. Kształt lica i grani dla tych metod spawania jest właściwy, przy czym w przypadku metody TIG i stopu AM-Lite zaobserwowano nieznaczne wklęsnięcie lica spoiny.

W przypadku badanych złączy nie zaobserwowano pęknięć gorących i zimnych, tylko przy stosowaniu metod spawania stwierdzono śladowe ilości porów.

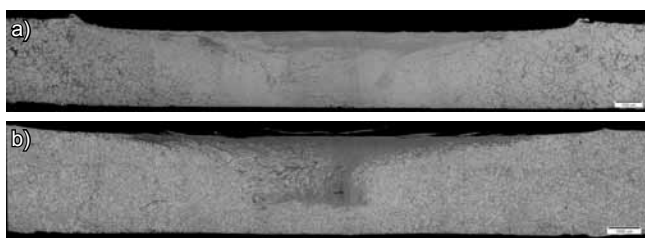
Mikrostruktura

Struktura materiału rodzimego stopów AZ91 i AM-Lite jest typową strukturą odlewniczą, w której nie zaobserwowano ukierunkowania dendrytów wynikającego z kierunku odprowadzania ciepła w procesie odlewania. Nie zaobserwowano również zmiany struktury w materiale rodzimym po wykonaniu złączy oraz w wyniku podgrzewania płaskowników przy wykonywaniu złączy metodą TIG.

Analiza mikrostruktury ujawniła znaczne rozdrobnienie ziarn we wszystkich wykonanych złączach, przy czym o ile w złączach spawanych rozdrobnienie struktury jest jednakowe w całej objętości spoiny (rys. 5, 6), to w złączach zgrzewanych zaobserwowano nierównomierne rozdrobnienie struktury pomiędzy strefą natarcia, gdzie uzyskano prawie jednorodną strukturę – a strefą spływu, gdzie wśród struktury drobnoziarnistej obserwowane są ziarna znacznej wielkości – ok. 80 μm (rys. 4). Ziarna te są dużo mniejsze od ziarn w materiale rodzimym oraz mają eliptyczny kształt, a ułożenie ich dłuższych osi jest zgodne z kierunkiem przemieszczania uplastycznionego materiału w złączu. W obszarze złączy spawanych zaobserwowano śladowe ilości porów zlokalizowanych w pobliżu lica i grani spoiny. Średnica porów nie przekraczała 80 μm. Średnia wielkość ziarna w spoinie wynosiła 2÷10 μm.

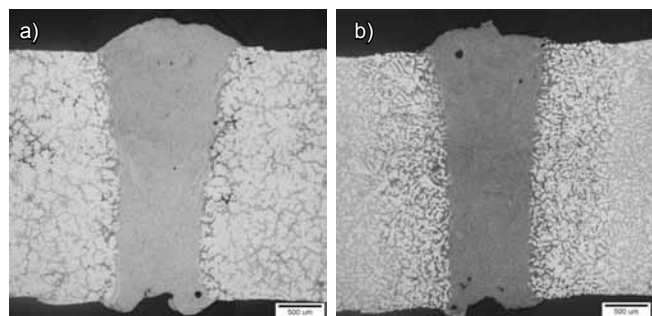
SWC miała szerokość ok. 1 mm, przy czym dla obydwu stopów w odległości ok. 0,3 mm od linii wtopienia zaobserwowano rozdrobnienie struktury pomiędzy ziarnami materiału rodzimego. Pozostały obszar miał strukturę charakterystyczną dla materiału rodzimego, ale w procesie trawienia uzyskano odmienny obraz tego obszaru – w przypadku stopu AM-Lite znacznie ciemniejszy, a dla stopu AZ91 jaśniejszy. Linia wtopienia dla złączy spawanych laserowo miała regularny kształt – obszar spoiny i SWC był wyraźnie rozgraniczony.

W złączach spawanych metodą TIG nie zaobserwowano regularnej linii wtopienia (rys. 6). pomiędzy złączem a materiałem rodzimym istnieje obszar przejściowy, gdzie między ziarnami materiału rodzimego widoczna jest rozdrobniona struktura. Szerokość tego



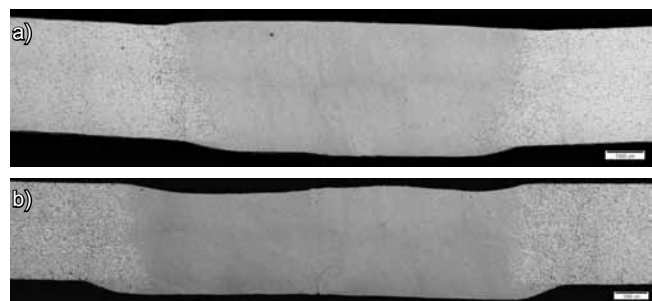
Rys. 1. Makrostruktura złączy zgrzewanych metodą FSW: a) AZ91, 560 obr/min, 224 mm/min; b) AM-Lite, 355 obr/min, 224 mm/min

Fig. 1. Macrostructure of friction stir welded joints: a) AZ91, 560 rpm, 224 mm/min; b) AM-Lite, 355 rpm, 224 mm/min



Rys. 2. Makrostruktura złączy spawanych laserem CO₂: a) AZ91, 2,5 kW, 4 m/min; b) AM-Lite, 2,5 kW, 4 m/min

Fig. 2. Macrostructure of CO₂ laser welded joints: a) AZ91, 2,5 kW, 4 m/min; b) AM-Lite, 2,5 kW, 4 m/min



Rys. 3. Makrostruktura złączy spawanych metodą TIG: a) AZ91, 70 A, 0,27 m/min, 130°C; b) AM-Lite, 80 A, 0,27 m/min, 170°C

Fig. 3. Macrostructure of TIG welded joints: a) AZ91, 70 A, 0,27 m/min, 130°C; b) AM-Lite, 80 A, 0,27 m/min, 170°C

Nr złącza	Pow.	Materiał rodzimy	SWC/SWTM	Zgrzeina, strefa spływu	Zgrzeina, strefa natarcia	Linia wtopienia
AZ91	200x					
	1000x					
AM-Lite	200x					
	1000x					

Rys. 4. Mikrostruktura złączy zgrzewanych metodą FSW
Fig. 4. Microstructure of friction stir welded joints

Pow.	AZ91			AM-Lite			
	Materiał rodzimy	SWC/LW	Spoina	Materiał rodzimy	SWC	SWC/LW	Spoina
200x							
1000x							

Rys. 5. Mikrostruktura złączy spawanych laserem CO₂
Fig. 5. Microstructure of CO₂ laser welded joints

Pow.	AZ91			AM-Lite		
	Materiał rodzimy	SWC/LW	Spoina	Materiał rodzimy	SWC	SWC/LW
200x						
1000x						

Rys. 6. Mikrostruktura złączy spawanych metodą TIG
Fig. 6. Microstructure of TIG welded joints

obszaru wynosi ok. 1 mm. Ilość drobnych ziaren maleje wraz z odległością od spoiny. W złączach tych w odległości do ok. 2,5 mm od teoretycznej linii wtopienia obserwowany jest obszar, który ulega odmiennemu trawieniu niż pozostałe części złącza, jest to obszar SWC.

Obserwacja złączy wykonanych metodą FSW nie ujawniła SWC, widoczna jest natomiast strefa wpływów termomechanicznych, niewystępująca w przypadku złączy spawanych o strukturze pośredniej między strukturą zgrzeiny po stronie spływu i materiału

rodzimego, zlokalizowana po obydwu stronach złącza (rys. 4). Ziarna w tym obszarze uległy znacznemu zdeformowaniu w wyniku przepływu ciepła z obszaru zgrzeiny i odkształceń plastycznych ziaren materiału rodzimego pod wpływem mechanicznego przemieszczania materiału w stanie uplastycznionym. Zakłada się, że SWC jest wąska i przylega bezpośrednio do SWTM oraz że w tym miejscu następuje rekryształizacja i rozdrobnienie struktury oraz jej ukierunkowanie zgodnie z kierunkiem przebiegu krystalizacji.

Podsumowanie

Próby łączenia stopów magnezu AZ91 i AM-Lite wykazały, że możliwe jest wykonanie połączeń zgrzewanych metodą FSW i spawanych metodą TIG i laserem CO₂ o wysokiej jakości, wolnych od wad spawalniczych takich jak zimne i gorące pęknięcia oraz porowatość. Niezbędne jest jednak zachowanie szczególnych warunków wykonywania połączeń, tzn. w przypadku zgrzewania metodą FSW stabilne zamocowanie łączonych elementów, w przypadku spawania laserowego dobre przyleganie łączonych elementów oraz ochrona grani i lica spoiny przed dostępem tlenu, a w przypadku zastosowania metody TIG prowadzenie procesu w helu jako gazie osłonowym i wstępne podgrzewanie płaskowników w celu uniknięcia pęknięć gorących i zimnych.

Wymiary złączy oraz ich kształt różnią się od siebie w zależności od zastosowanych metod łączenia. W obszarze złącza we wszystkich przypadkach obserwowano rozdrobnienie struktury, przy czym w złączach zgrzewanych nierównomierne po stronie spływu. Złącza spawane mają regularny, symetryczny kształt. W SWC zaobserwowano częściowe rozdrobnienie struktury w pewnej odległości od spoiny, natomiast w dalszej części nie stwierdzono różnic w strukturze w porównaniu z materiałem rodzimym, chociaż obszary te częściowo były ujawniane po trawieniu złączy. Kształt lica i grani spoin oraz zgrzein jest właściwy.

Literatura

- [1] Kulecki M.K., 2008, Magnesium and its alloys in applications in automotive industry, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 851-865.
- [2] Friedrich F. Schuman S., 2001, Research for a „New age of magnesium” in the automotive industry, *Journal of Materials Processing Technology*, 117: 276-281.
- [3] Cao X., Jahazi M., Immarigeon J.P., Wallace W., 2006, A review of laser welding techniques for magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 171: 188-204.
- [4] Abdel Aal A., 2008, Protective coating for magnesium alloy, *Journal of Materials and Science*, 43: 2947-2954.
- [5] Avedesian M.M., Baker H., 1999, Magnesium and magnesium alloys, *ASM Specialty Handbook*.
- [6] Vesling F., Ryspaev T., 2007, Effect of heat treatment on the superplasticity of magnesium alloys, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 48: 57-62.
- [7] Lehner C., Reinhart G., Schaller L., 1999, Welding of die-casted magnesium alloys for production, *Journal of Laser Applications*; 11/5: 206-210.
- [8] Kołodziejczak P., Kalita W., Kolasa A., Spawanie stopów magnezu wiązką lasera CO₂, *Prace naukowe, Mechanika z. 215*, s. 97-109.
- [9] Peng L., Yajiang L., Haoran G., Juan W., 2007, Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mg/Al dissimilar materials, *Materials Letters*, 61: 1288-1291.
- [10] Tuz L., Kołodziejczak P., Kolasa A., Struktura złączy stopów AZ91 i AM-Lite wykonanych metodą TIG, *Przegląd Spawalnictwa*, 12/2010, s. 41-43.
- [11] Tuz L., Kołodziejczak P., Kolasa A., Struktura złączy ze stopów magnezu wykonanych metodą FSW, *Prace naukowe, Mechanika z. 230*, s. 135-146.
- [12] Padmanaban G., Balasubramanian V., 2009, Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – an experimental approach; *Materials and Design*; 30: 2647-2656.
- [13] Darras B.M., Khraisheh M.K., Abu-Farha F.K., Omar M.A., 2007, Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 191: 77-81.
- [14] Tuz L., Kołodziejczak P., Kolasa A., 2009, Zgrzewanie tarcio-we metodą FSW stopów magnezu AZ91 i AM-Lite, *Przegląd Spawalnictwa*, 11: 41-43.

Materiały do badań zostały udostępnione przez: dra Christiana Kettlera, Advanced Magnesium Technologies (Australia) i Polmag Sp. z o.o. (Polska). Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2011 jako projekt badawczy nr N N508 582739.