

Struktura i właściwości mechaniczne złączy doczołowych ze stopów magnezu spawanych metodą MIG

Structure and mechanical properties of MIG welded butt-joints of magnesium alloys

Streszczenie

W artykule przedstawiono ocenę struktury i właściwości mechanicznych doczołowych złączy z odlewniczych stopów magnezu AZ91, AM-Lite i AM50 spawanych metodą MIG. Jako gaz osłonowy zastosowano mieszkankę argonu i helu. Oceniano makro- i mikrostrukturę przy zastosowaniu mikroskopu świetlnego i elektronowego mikroskopu skaningowego na zglądach metalograficznych wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku spawania. Przeprowadzono analizę rozkładów pierwiastków stopowych przy zastosowaniu elektronowego mikroskopu skaningowego. Ocenę właściwości mechanicznych wykonano na podstawie rozkładów mikrotwardości w złączy oraz wytrzymałości na zginanie i rozciąganie złączy.

Ocena wykazała, że możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości złączy doczołowych ze stopów magnezu wykonanych metodą MIG. Odnotowano śladowe ilości porów w obszarze złącza.

Abstract

The paper presents the structure and mechanical properties of butt joint analysis of as-cast magnesium alloys AZ91, AM-Lite, AM50 welded with the use of MIG method. As the shielding gas the mixture of argon and helium is used. The macro- and microstructure on the cross-sections of perpendicular to welding direction using optic microscope and scanning electron microscope is analyzed. The surface analysis of main alloying elements with the use of scanning electron microscope is made. The mechanical properties of joints on the basis of microhardness distribution in the joints and bending and tension strength of joints.

The results show the high quality butt joints of magnesium with the use of the MIG method is possible to achieved, however the presence of some pores are also observed.

Wstęp

Od wielu lat obserwuje się wzrost zainteresowania przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego i elektro- nicznego stopami metali lekkich. M.K. Kulecki wskazuje na konieczność zwrócenia uwagi na możliwość zastosowania stopów magnezu w samochodach w celu ograniczenia ich masy, emisji CO₂ oraz zużycia paliwa [1]. Jednocześnie wskazuje, że stopy magnezu

są najlżejsze spośród metali lekkich, do których należą jeszcze aluminium i tytan. Ich gęstość wynosi ok. 1,8 g/cm³, a stosunek wytrzymałości do ciężaru właściwego jest znacznie wyższy niż dla stali.

Czysty magnez nie znajduje zastosowań konstrukcyjnych mimo dobrej przewodności cieplnej, wysokiego współczynnika tłumienia drgań i hałasu, oraz podatności na odlewanie, obróbkę plastyczną i skrawanie [1÷3]. Przyczyną są niższe niż dla aluminium właściwości wytrzymałościowe i odporność korozyjna, będąca skutkiem wysokiego powinowactwa do tlenu oraz rozpuszczalności magnezu w wodzie [4, 5]. Znaczną poprawę właściwości wytrzymałościowych uzyskuje się w stopach magnezu z dodatkiem aluminium i cynku jako pierwiastków stopowych. Dodatek manganu wpływa

Mgr inż. Lechosław Tuz, dr hab. inż. Andrzej Kolasa, prof. PW – Politechnika Warszawska, **dr inż. Tomasz Pfeifer** – Instytut Spawalnictwa, Gliwice.

na poprawę odporności korozyjnej stopów magnezu [6]. Stosowane są również inne pierwiastki stopowe wpływające na właściwości stopów, umożliwiające ich zastosowanie m.in. w elementach narażonych na pracę w podwyższonej temperaturze (do 300°C) przez dłuższy okres.

Rozwój stopów magnezu wynika z zainteresowania tymi metalami ośrodków przemysłowych i badawczych poszukujących nowych zastosowań. Istotne są dwa główne kierunki prowadzonych prac, a mianowicie: produkcja odlewów cienkościennych i grubościennych oraz rozwój metod łączenia elementów wykonanych ze stopów magnezu, jak również naprawa i regeneracja odlewów skomplikowanych i drogich elementów silników lotniczych. Procesy łączenia i regeneracji muszą gwarantować powtarzalność uzyskiwanych połączeń oraz powinny być podatne na mechanizację i/lub automatyzację. [1, 2, 6]. Wymagania te uzyskiwane są w przypadku np. spawania laserowego [3, 7, 8]. Wiele publikacji porusza również problematykę związaną ze spawaniem stopów magnezu elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego (TIG) [9, 10], natomiast brakuje informacji dotyczących połączeń wykonywanych elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych (MIG). Spawanie laserowe wymaga zastosowania drogich i stacjonarnych stanowisk, natomiast metody TIG i MIG są relatywnie tanie, a urządzenia spawalnicze mogą być względnie swobodnie przenoszone. Wpłynęło to na podjęcie próby opisu właściwości mechanicznych i struktury złączy ze stopów magnezu w celu uzyskania informacji na temat możliwości zastosowania metody MIG do napraw części maszyn i urządzeń wykonywanych z tych materiałów. Do badań wytypowano trzy stopy magnezu: AZ91, AM50 i AM-Lite. Stopy AZ91 i AM50 są najbardziej rozpowszechnionymi stopami odlewniczymi, natomiast stop AM-Lite jest nowym stopem, produkowanym od 2005 r. Jego charakterystyczną cechą jest możliwość nakładania powłok galwanicznych, dlatego często znajduje zastosowanie przy wytwarzaniu cienkościennych elementów o charakterze dekoracyjnym [11].

W artykule przedstawiono wyniki oceny jakości złączy doczołowych ze stopów AZ91, AM-Lite i AM50 wykonanych metodą MIG przy zastosowaniu materiału dodatkowego ze stopu AZ61A. Analizowano strukturę złączy oraz ich właściwości wytrzymałościowe. Przeprowadzone badania mają charakter porównawczy, tzn. badaniom poddano najpierw właściwości stopów, a następnie odniesiono do nich właściwości złączy.

Materiały do badań

Do badań użyto trzech odlewniczych stopów magnezu: AZ91, AM-Lite i AM50 o składzie chemicznym przedstawionym w tablicy I. Materiały zostały dostarczone przez producenta w postaci gąsek odlewniczych, z których wycięto płaskowniki o wymiarach 100x50x3 mm. Połączenia wykonano wzdłuż

Tablica I. Skład chemiczny stopów magnezu: AM50, AZ91 i AM-Lite oraz drutu AZ61A (wag.)

Table I. Chemical composition of magnesium alloys: AM50, AZ91, AM-Lite and AZ61A wire (mass fraction)

Stop	Pierwiastek stopowy, %			
	aluminium (Al)	cynek (Zn)	mangan (Mn)	magnez (Mg)
AM-Lite	2,7	13,8	0,16	reszta
AZ91	9,0	0,7	0,17	reszta
AM50	5,0	0,2	0,3	reszta
AZ61A (druć elektrodowy)	5,9	0,5	0,2	reszta

najdłuższej krawędzi z materiałem dodatkowym w postaci drutu litego AZ61A o składzie chemicznym podanym również w tablicy I. Nie stosowano obróbki cieplnej materiałów i złączy.

Metodyka badań

Próby spawania metodą MIG wykonano przy zastosowaniu źródła spawalniczego Kemppi PROMig 5200 Evolution. Wykonywano złącza doczołowe z zastosowaniem materiału dodatkowego łukiem zwarciovym przy następujących parametrach procesu: prąd 74 A, napięcie 16,4 V, prędkość podawania drutu 4,6 m/min, wydatek gazu osłonowego 16 l/min. Spawano prądem stałym z polaryzacją dodatnią na elektrodzie. Jako gaz osłonowy zastosowano mieszankę 50% Ar + 50% He podawaną tylko od strony lica spoiny. Ze względu na silne utlenianie drutu niezbędne było czyszczenie końcówki elektrody każdorazowo po przerwaniu procesu. Nie stosowano podgrzewania wstępnego materiału.

Ocenę wizualną jakości uzyskanych złączy przeprowadzono nieuzbrojonym okiem, natomiast ocena struktury została przeprowadzona na zglądach metalograficznych wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku spawania przy wykorzystaniu mikroskopu świetlnego (złącza trawione – nital 4%) oraz skaningowego (złącza nietrawione). Identyfikację głównych pierwiastków stopowych w złączu wykonano wg rozkładów powierzchniowych pierwiastków (SEM).

Ocenę właściwości mechanicznych przeprowadzono na podstawie pomiarów rozkładu twardości metodą Vickersa na zglądach metalograficznych wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku spawania oraz w oparciu o statyczną próbę rozciągania i zginania złączy. Próbkę do badań wytrzymałościowych zostały wycięte w kierunku prostopadłym do osi spoiny.

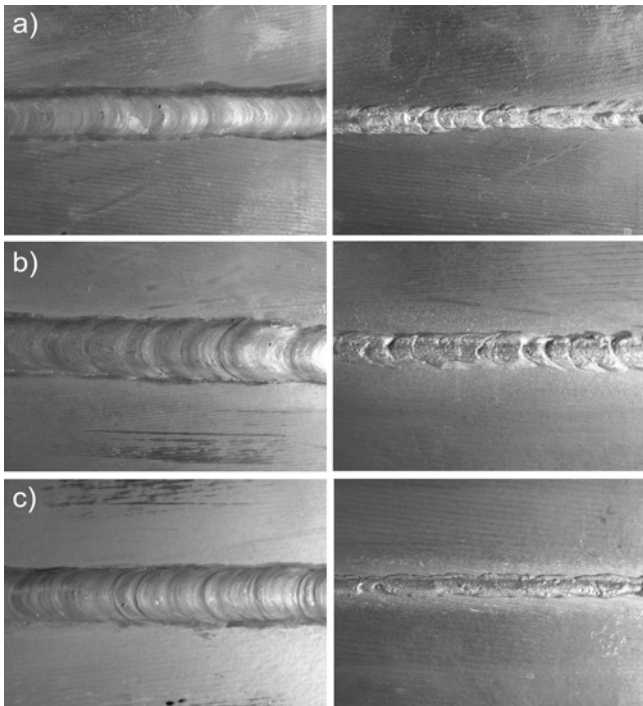
Badania mają charakter porównawczy polegający na określeniu właściwości materiału rodzimego i złączy spawanych, a w konsekwencji mają wskazać wpływ spawania łukowego elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych (MIG) na zmianę właściwości badanych stopów w obszarze złącza.

Ocena wizualna

Na rysunku 1 przedstawiono lico i grań wybranych złączy doczołowych wykonanych ze stopów magnezu AZ91, AM50 i AM-Lite. Spoiny mają poprawny kształt. Na powierzchni lica spoiny widoczna jest faktura łusek, charakterystyczna dla tej metody spawania. W pobliżu spoiny, na powierzchni płaskowników, zaobserwowano liczne odpryski powstałe podczas spawania. Wzdłuż spoiny nie widać białego nalotu mogącego świadczyć o odparowywaniu cynku z obszaru złącza. Grań spoiny ma właściwy kształt. Podczas oceny wizualnej nie ujawniono niezgodności spawalniczych w postaci pęknięć zimnych i gorących oraz porowatości na powierzchni lica i grani. Występują jedynie błędy położenia płaskowników wynikające ze sposobu ich mocowania w uchwycie przed spawaniem.

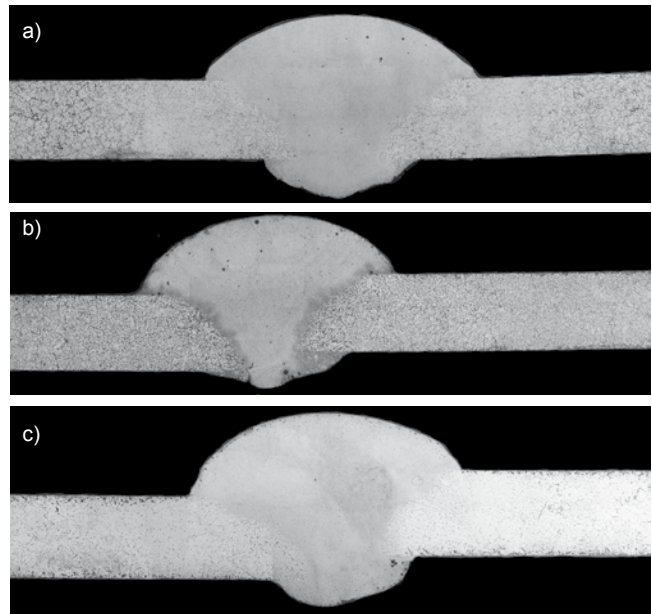
Makrostruktura złączy

Zgłady metalograficzne złączy doczołowych wykonane w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku spawania przedstawiono na rysunku 2. W badanych złączach zaobserwowano całkowite przetopienie krawędzi płaskowników oraz pełne wypełnienie obszaru złącza materiałem dodatkowym. Kształt spoin jest regularny i symetryczny. Szerokość spoin wynosi ok. 7 mm po stronie grani i ok. 12 mm po stronie lica. Linia wtopienia ma nieregularny kształt, zaburzony przez zmianę struktury dochodzącą do 1 mm w SWC. Obszar ten określono jako strefę przejściową należącą do SWC, której



Rys. 1. Lico i grań złączy doczołowych ze stopów magnezu: a) AZ91, b) AM-Lite, c) AM50

Fig. 1. Face and root of the butt joints of magnesium alloys: a) AZ91, b) AM-Lite, c) AM50



Rys. 2. Makrostruktura złączy doczołowych ze stopów magnezu: a) AZ91, b) AM-Lite, c) AM50

Fig. 2. Macrostructure of butt joint of magnesium alloys: a) AZ91, b) AM-Lite, c) AM50

całkowita szerokość dochodzi do 3 mm od teoretycznej linii wtopienia i charakteryzuje się odmiennym trawieniem niż pozostałe części złącza.

Analiza makrostruktury złączy wykazała występowanie niezgodności spawalniczych w postaci porowatości zlokalizowanych w materiale spoiny w pobliżu lica i grani. W złączach nie zaobserwowano mikropęknięć gorących i zimnych.

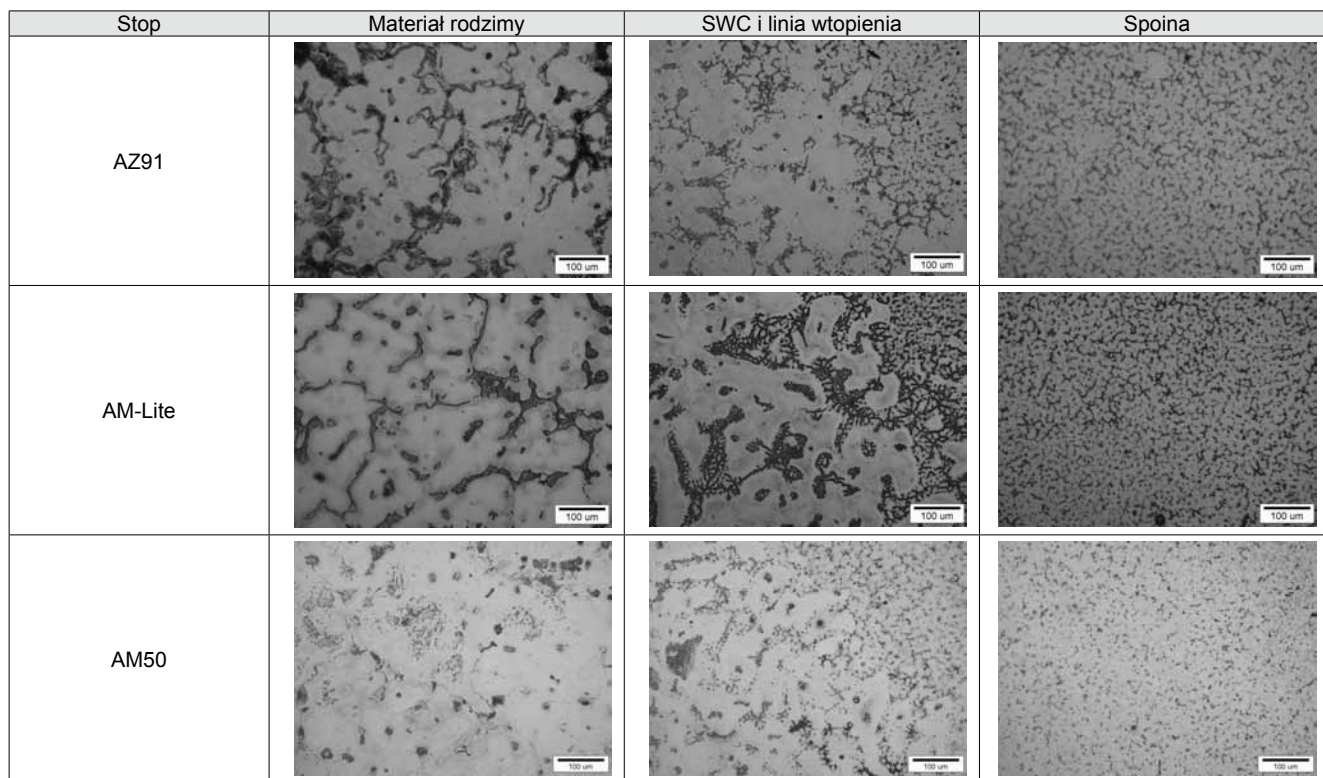
Mikrostruktura złączy

Struktura stopów użytych do badań jest typową odlewniczą strukturą niewykazującą ukierunkowania dendrytów wynikającego z kierunku odprowadzania ciepła w procesie odlewania. Nie odnotowano zmian w strukturze materiału rodzimego przed i po wykonaniu złączy metodą MIG. W oparciu o [12] i analizę powierzchniowego rozkładu pierwiastków chemicznych przy zastosowaniu elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM) zidentyfikowano elementy struktury materiału rodzimego, który składa się z dużych ziaren odpowiadających fazie α -Mg i pomiędzy nimi γ -Mg₁₇Al₁₂ w przypadku stopów AZ91 i AM50 oraz AM-Lite γ -Mg₁₇Al₁₂ i α -MgZn w stopie. Faza δ odpowiadająca fazie bogatej w mangan występuje we wszystkich stopach w postaci wydzielań ze zwiększoną zawartością aluminium i manganu.

Analiza mikrostruktury złączy wykazała znaczne rozdrobnienie ziarn w obszarze spoiny w porównaniu z materiałem rodzimym zarówno przy linii wtopienia, jak i w obszarze stopiwa. Struktura w całej objętości spoiny jest jednorodna.

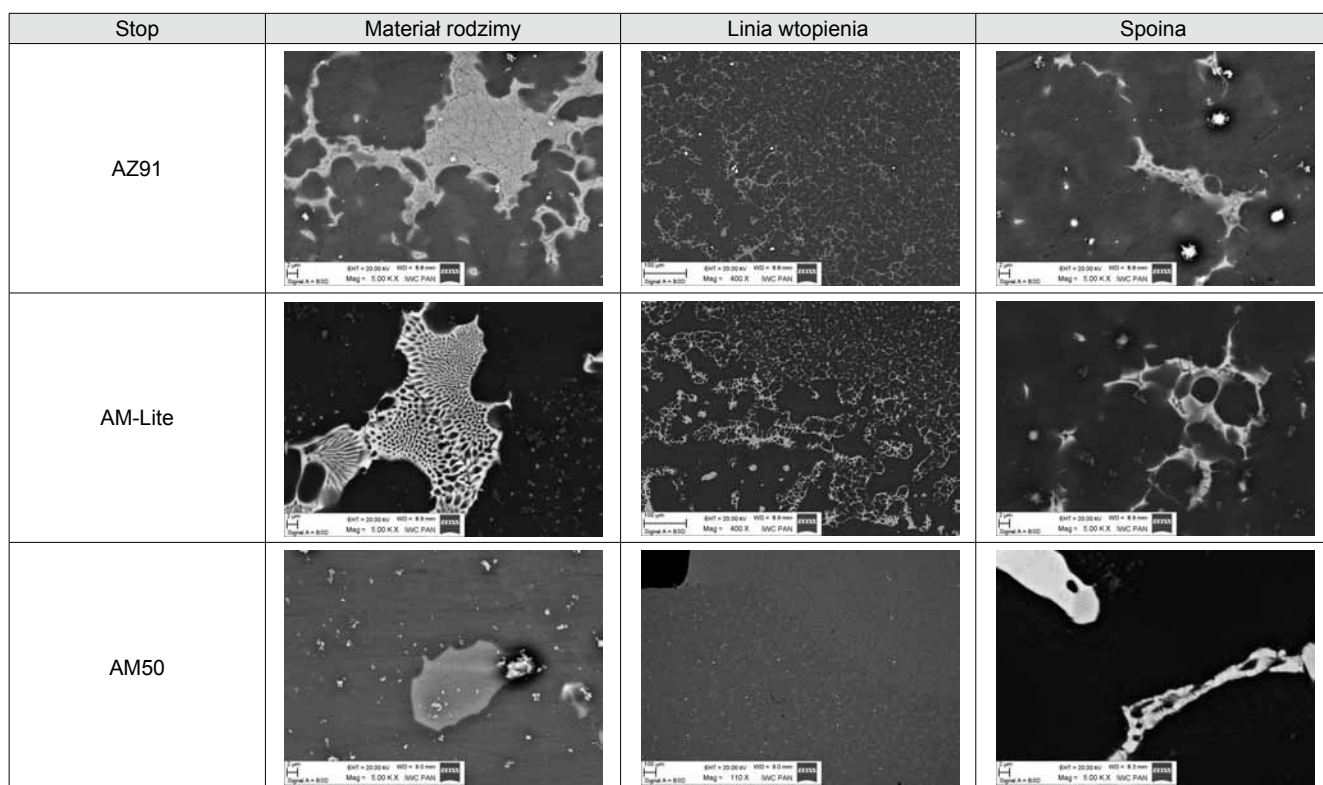
SWC ma szerokość ok. 3 mm, przy czym w odległości do ok. 1 mm od linii wtopienia obserwowano obszar o charakterze przejściowym, w którym pomiędzy ziarnami materiału rodzimego, w fazie $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ (stopu AZ91

i AM50) oraz $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ i $\alpha\text{-MgZn}$ (stop AM-Lite), nastąpiło nierównomierne rozdrobnienie struktury (rys. 3). Przy linii wtopienia jest ono znaczne, natomiast dalej od linii wtopienia stopień rozdrobnienia ziarn ulega zmniejszeniu.



Rys. 3. Mikrostruktura złączy doczołowych ze stopów AZ91, AM-Lite i AM50

Fig. 3. Microstructure of butt joint of AZ91, AM-Lite and AM50 alloys



Rys. 4. Analiza SEM złączy doczołowych ze stopów AZ91, AM-Lite i AM50

Fig. 4. SEM analysis of butt joint of AZ91, AM-Lite and AM50 alloys

Tablica II. Analiza SEM składu chemicznego złączy doczołowych ze stopów AZ91, AM-Lite i AM50 (% wag.)

Table II. SEM chemical composition analysis of butt joint of AZ91, AM-Lite and AM50 alloys (mass fraction)

Stop	Strefa złącza	Aluminium (Al)	Cynk (Zn)	Mangan (Mn)	Magnez (Mg)
AZ91	materiał rodzimy	28,42	0,46	-	reszta
	spoina	26,36	0,65	-	reszta
AM-Lite	materiał rodzimy	19,45	10,37	-	reszta
	spoina	24,78	4,44	-	reszta
AM50	materiał rodzimy	26,79	-	0,26	reszta
	spoina	26,75	-	0,16	reszta

W celu dokładnego opisu struktury obszaru spoiny i SWC przeprowadzono analizę SEM w pobliżu linii wtopienia (rys. 4). W obszarze linii wtopienia stopów AZ91 i AM-Lite widać podłużne ziarna zwrócone w kierunku prostopadłym do linii wtopienia, natomiast w stopie AM50 struktura jest podobna do struktury spoiny. Obszar spoiny charakteryzuje się strukturą drobnodziarnistą o zbliżonej wielkości ziaren. Analiza SEM rozkładów powierzchniowych głównych pierwiastków stopowych w materiale rodzimym i spoinie wykazała różnice składu chemicznego wskazanego w normach. Wyniki powierzchniowych rozkładów dla badanych stopów przedstawiono w tablicy II. Wyniki te wskazują na nieznaczną zmianę składu chemicznego pomiędzy materiałem rodzimym i spoiną. Jasne punkty widoczne na rysunku 4 przedstawiającym linię wtopienia są wydzieleniami fazy δ .

Właściwości mechaniczne

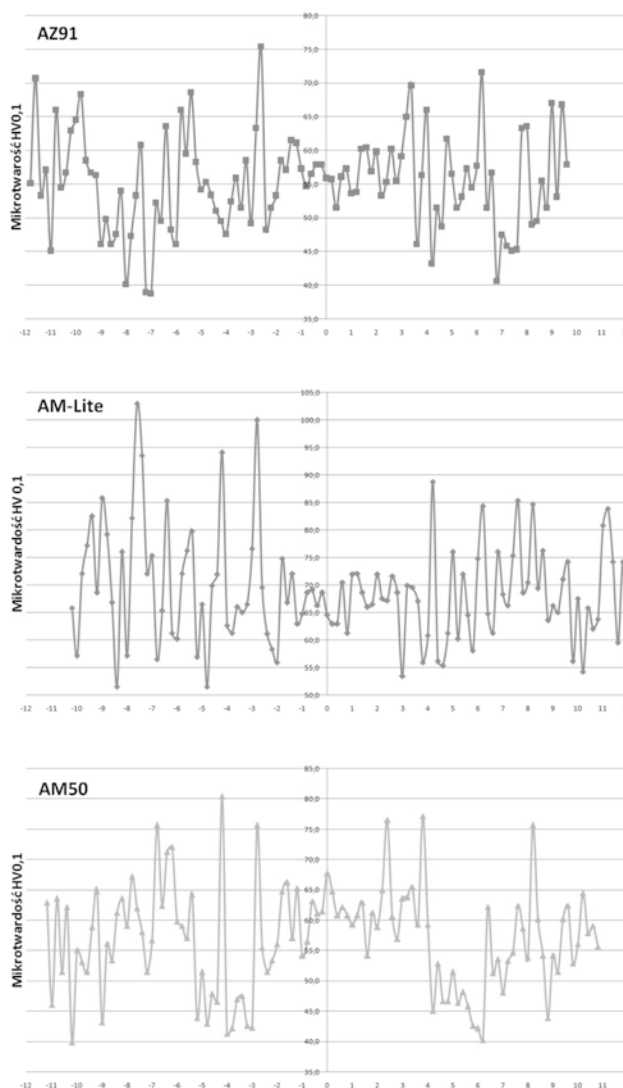
Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 981 mN dla złączy wszystkich stopów zastosowanych w badaniach. Pomiary twardości wykonywano na zglądach metalograficznych nietrawionych w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku spawania w odległości 1 mm od powierzchni górnej materiału rodzimego. Odciski wykonywano co 0,2 mm w materiale rodzimym na odcinku pomiarowym ok. 22 mm.

Pomiary ujawniły nierównomierny rozkład twardości w całym złączu, przy czym rozrzut wyników w materiale rodzimym jest znacznie większy niż w obszarze spoiny (rys. 5). W celu określenia wpływu twardości na właściwości mechaniczne uzyskanych złączy określono średnią twardość w każdym obszarze oraz wyznaczono jej ekstremalne wartości. Wyniki podano w tablicy III.

Tablica III. Mikrotwardość złączy

Table III. Microhardness of joints values

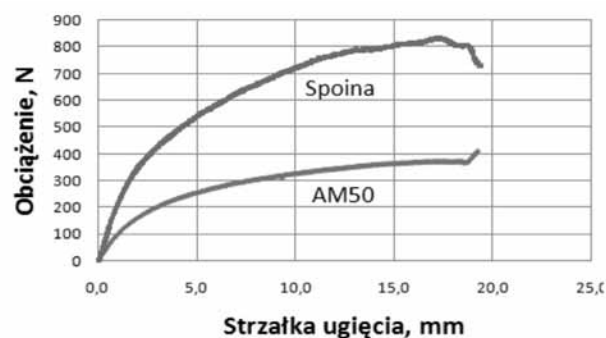
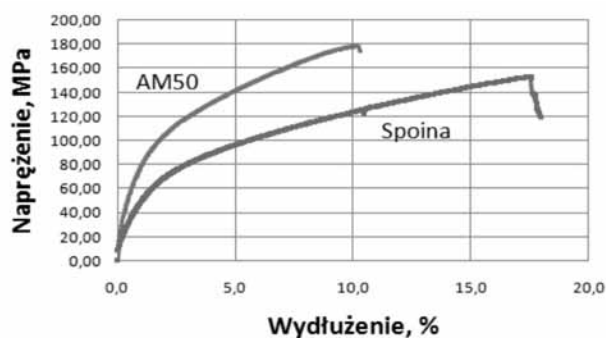
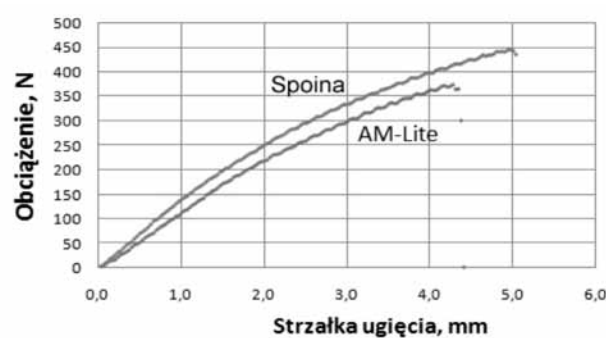
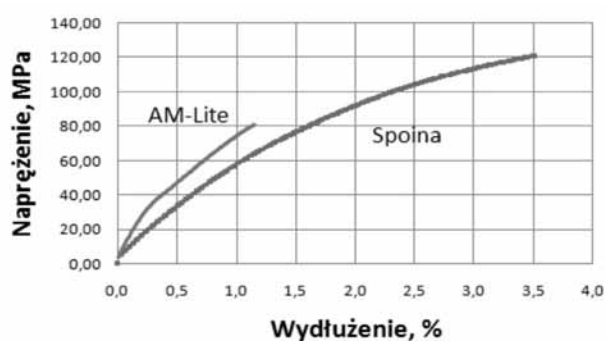
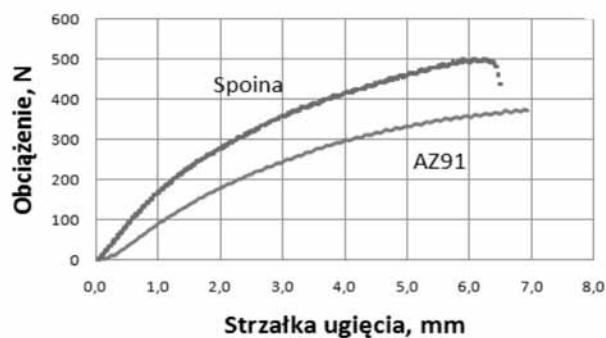
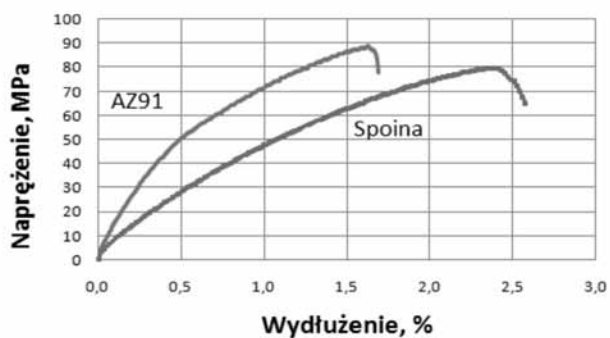
Stop	Strefa złącza	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
AZ91	materiał rodzimy	55,0	8,1	38,7	75,4
	SWC	55,0	4,3	48,2	60,2
	spoina	57,0	2,7	51,5	61,5
AM-Lite	materiał rodzimy	69,5	10,6	51,5	103,0
	SWC	67,3	11,2	53,4	100,0
	spoina	67,7	3,8	61,3	74,8
AM50	materiał rodzimy	55,5	9,3	39,9	80,5
	SWC	55,0	12,5	42,3	76,6
	spoina	60,9	3,8	54,2	67,8



Rys. 5. Rozkłady twardości w złączach
Fig. 5. Distribution of hardness in the joints

Wykonane zostały próby statycznego rozciągania i zginania płaskowników z badanych stopów oraz złączy spawanych. Próby prowadzono do momentu pęknięcia próbek. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki dla próby statycznego rozciągania. Odnotowano wzrost wytrzymałości i wydłużenia złączy w stosunku

do materiału rodzimego. Pęknięcie próbek następowało w materiale rodzimym dla wszystkich badanych stopów. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki statycznej próby zginania wskazujące na wzrost strzałki ugięcia dla wszystkich złączy. Pęknięcie próbek odnotowano w materiale rodzimym.



Rys. 6. Wyniki statycznej próby rozciągania
Fig. 6. Results of static tensile strength test

Rys. 7. Wyniki statycznej próby zginania
Fig. 7. Results of static bending strength test

Podsumowanie

Próby spawania stopów magnezu AZ91, AM-Lite i AM50 wskazują na użyteczność zastosowania metody MIG do wykonywania połączeń doczołowych przy zastosowaniu drutu elektrodowego o składzie chemicznym zbliżonym do łączonych materiałów. Spoiny mają kształt regularny i symetryczny oraz nie wykazują skłonności do pęknięć gorących i zimnych. W pobliżu lica i grani zaobserwowano śladowe ilości porowatości. Spoina charakteryzuje się strukturą droбноziarnistą o zbliżonej wielkości ziarn

i składzie chemicznym zbliżonym do materiału rodzimego. Wzrost mikrotwardości w obszarze spoiny oraz wytrzymałości i wydłużenia świadczy o znacznie lepszych właściwościach mechanicznych spoiny niż materiału rodzimego. Brak pęknięć w SWC podczas testów wytrzymałościowych może skłaniać do wniosku o poprawie właściwości mechanicznych w tym obszarze na skutek zmian wywołanych jako wynik cyklu cieplnego spawania.

Literatura

- [1] Kulecki M.K.: Magnesium and its alloys in applications in automotive industry, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 2008, 851-865.
- [2] Friedrich F., Schuman S.: Research for a „new age of magnesium” in the automotive industry, *Journal of Materials Processing Technology*, 117: 2001, 276-281.
- [3] Cao X., Jahazi M., Immarigeon J.P., Wallace W.: A review of laser welding techniques for magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 171: 2006, 188-204.
- [4] Abdel A al A.: Protective coating for magnesium alloy, *Journal of Materials and Science*, 43: 2008, 2947-2954.
- [5] Avedesian M.M., Baker H.: Magnesium and magnesium alloys, *ASM Specialty Handbook*, 1999.
- [6] Vesling F., Ryspaev T.: Effect of heat treatment on the superplasticity of magnesium alloys, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 48: 2007, 57-62.
- [7] Lehner C., Reinhart G., Schaller L.: Welding of die-casted magnesium alloys for production, *Journal of Laser Applications*; 11/5: 1999, 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.: Microstructure characteristics in TIG welded joint of Mg/Al dissimilar materials, *Materials Letters*, 61: 200, s. 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] Abbott T., Dunlop G., Sweder T., Wojciechowski S., AM-Lite – a New light weight cost effective alloy for decorative applications, *Light Metals Age*, 2006, www.am-technologies.com.au.
- [12] Atlas struktur znormalizowanych stopów odlewniczych, 1972, Instytut Odlewnictwa w Krakowie, WNT, 1972.

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.

Wydarzenia

Air Products inwestuje w Warszawie w nowoczesną napełniarnię butli

Firma Air Products, największy dostawca gazów technicznych w Polsce, ogłosiła, że inwestuje w Warszawie w napełniarnię butli gazami technicznymi. Rozbudowa obiektu o wartości 5 milionów złotych rozpoczęła się w maju 2011 r., a jego uruchomienie planowane jest w październiku tego roku. Napełniarnia, która jest zlokalizowana na Targówku Przemysłowym, osiągnie pełnię zdolności produkcyjnych w 2012 r.

Najnowsze rozwiązania technologiczne Air Products wykorzystane w zakładzie pozwolą na napełnianie pod ciśnieniem 200 bar ok. 1000 butli dziennie. Zakład będzie przystosowany do napełniania butli wszystkimi rodzajami gazów technicznych (takimi jak np. argon, tlen, dwutlenek węgla i ich mieszaniny), gazami spawalniczymi typu Linx®, należącymi do najbardziej zaawansowanej technologicznie linii gazów spawalniczych dostępnych w Polsce, a także gazami MAP (gazy używane do pakowania żywności w tzw. atmosferze modyfikowanej) przeznaczonymi dla przemysłu spożywczego oraz tlenem medycznym.

Butle napełniane pod ciśnieniem 200 bar mogą pomieścić o 50% więcej gazu niż te, które są napełniane pod ciśnieniem 150 bar, obecnie najczęściej dostępne w Polsce. Napełnianie butli pod wyższym ciśnieniem oznacza obniżenie kosztów dla użytkowników,

ze względu na mniejszą częstotliwość napełniania, co z kolei wpływa na obniżenie kosztów transportu i składowania (dwie 200-barowe butle zawierają taką samą ilość gazu, jak 3 butle 150-barowe). Ponadto butle 200-barowe pozwalają na dłuższe wykorzystywanie gazów oraz zaoszczędzenie miejsca.

Napełniarnia w Warszawie będzie obsługiwać klientów Air Products głównie z regionu Polski północnej i północno-wschodniej. Jest to piąty zakład napełniania butli gazami technicznymi Air Products w Polsce oprócz napełniarni zlokalizowanych już w: Siewierzu, Korzonku k. Kędzierzyna-Koźła, Brzegu Dolnym i Poznaniu.

W pełni skomputeryzowane linie napełniania butli zapewnią kontrolę jakości podczas całego procesu napełniania. Zakład w Warszawie miał posiadać specjalny system monitoringu (*traceability*) butli z danej partii na każdym etapie użytkowania przez klienta. Ma to szczególne znaczenie w przypadku butli z tlenem medycznym, którego wytwarzanie w Polsce, tak jak i w całej Unii Europejskiej, podlega wymaganiom Dobrej Praktyki Wytwarzania (GMP). Regulacje te nakładają obowiązek identyfikowalności butli z gazami medycznymi.

Jarosław Soroczyński