

Lutowanie twarde stopów magnezu

Brazing of magnesium alloys

Streszczenie

Omówiono podstawowe właściwości fizykochemiczne, lutowność i rodzaje spoiw do lutowania twardego stopów magnezu. Przedstawiono wyniki badań technologicznych lutowania płomieniowego i piecowego stopu magnezu AZ31B (MgAl3Zn1Mn0,2) spoiwami MgAl9Zn3Mn1, MgAl26Zn1Mn0,2, Al53Mg37Zn10 z użyciem nowo opracowanego w Instytucie Spawalnictwa topnika FMAG. Badania technologiczne oraz analiza jakości i właściwości wytrzymałościowych połączeń lutowanych wykazały korzystne wyniki dla spoiwa MgAl9Zn3Mn1 w przypadku lutowania płomieniowego i spoiw MgAl26Zn1Mn0,2 oraz Al53Mg37Zn10 w przypadku lutowania piecowego.

Słowa kluczowe: lutowanie, stopy magnezu

Abstract

Basic physical and chemical properties, brazeability and types of filler metals for brazing of magnesium alloys have been discussed. It has been presented the results of technological research of flame and furnace brazing of magnesium alloy AZ31B (MgAl3Zn1Mn0,2) with MgAl9Zn3Mn1, MgAl26Zn1Mn0,2, Al53Mg37Zn10 filler metals types, using newly developed flux FMAG. Technology research and analysis of the quality and strength properties of brazed joints showed favorable results for the filler metal type MgAl9Zn3Mn1 for flame brazing and filler metals types MgAl26Zn1Mn0,2 Al53Mg37Zn10 for furnace brazing.

Keywords: Brazing, magnesium

Wstęp

Magnez i jego stopy należą do metali i stopów o najniższej masie właściwej (ok. $1,7 \div 1,8 \text{ g/cm}^3$), stanowiącej 2/3 masy aluminium i 1/3 masy tytanu, a także charakteryzują się stosunkowo niską ceną. Zasoby ziemskie magnezu – udział 2,35% w skorupie ziemskiej, stawiają go na ósmym miejscu wśród innych pierwiastków chemicznych. Temperatura topnienia tego metalu wynosi $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Na powietrzu pokrywa się on stosunkowo szybko pasywacyjną warstwą tlenku MgO, której towarzyszy zwykle warstwa azotku Mg_3N_2 . Warstwy te stanowią ochronę przed dalszym jego utlenianiem się (korozją gazową). Jednak z uwagi na niższy współczynnik Pillinga – Bedwortha (określa stosunek objętości molowej tlenku do równoważnej objętości metalu) pasywacyjna warstwa tlenku na powierzchni magnezu jest mniej szczelna niż na aluminium. Niemniej jednak magnez

i jego stopy wykazują dobrą odporność na korozję tlenową w zwykłych warunkach atmosferycznych. Charakteryzują się one ponadto stabilnością przy oddziaływaniu odczynów alkalicznych, chromianowych, kwasu fluorowodorowego, a także większości związków chemicznych (węglowodorów, aldehydów, alkoholi – oprócz metylowego i etylowego, fenoli, amin, olejów itp.). Należy również podkreślić, że magnez w szeregu napięciowym metali wykazuje stosunkowo wysoki ujemny potencjał redoks, wynoszący $-2,38 \text{ V}$, co zwiększa jego skłonność do korozji elektrolitycznej w obecności innych metali i związków chemicznych (elektrolitów) [1÷3].

Właściwości mechaniczne magnezu są stosunkowo niskie (wytrzymałość na rozciąganie $120 \div 160 \text{ MPa}$, wydłużenie względne $5 \div 10\%$, twardość $35 \div 40 \text{ HB}$) [1,2]. Z tego też powodu w stanie czystym jest on rzadko stosowany w przemyśle wytwórczym. Znacznie korzystniejsze właściwości mechaniczne wyka-

Dr inż. Andrzej Winiowski, prof. nzw. IS; dr inż. Dawid Majewski – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: is@is.gliwice.pl

zują stopy tego metalu z aluminium, cynkiem, a także z dodatkiem metali ziem rzadkich oraz miedzi, krzemu, srebra (wytrzymałość na rozciąganie 300÷350 MPa, wydłużenie względne do 20%, twardość ok. 100 HB). Niektóre z tych stopów po utwardzeniu dyspersyjnym mogą konkurować w zastosowaniach praktycznych pod względem właściwości wytrzymałościowych z duralami cynkowymi, stopami tytanu, a nawet stalami nierdzewnymi. Stopy na osnowie magnezu wykazują temperaturę topnienia w zakresie 510÷650 °C, wysoki współczynnik przewodności cieplnej (ok. 50 Wm⁻¹K⁻¹), a także zdolność tłumienia drgań mechanicznych. Są one przyjazne dla środowiska, łatwo poddają się tzw. recyklingowi.

Zarówno stopy magnezu, jak również kompozyty na ich osnowie, znajdują zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, a także w produkcji sprzętu elektronicznego i AGD.

Jedną z metod łączenia tych materiałów, zwłaszcza w przypadku precyzyjnych, cienkościennych elementów, jest lutowanie.

Stopy magnezu i ich lutowość

W zależności od sposobu wytwarzania stopy na osnowie magnezu dzieli się na odlewnicze (PN-EN 1753:2001) i przeznaczone do obróbki plastycznej (PN-EN 12438:2002). Podstawowe składniki tych stopów stanowią: aluminium (3÷11%) oraz cynk (do 5%). Aluminium zwiększa wytrzymałość i właściwości plastyczne stopów, a w przypadku stopów odlewniczych także lejność i skurcz. Oddziaływanie cynku jest podobne. Z innych dodatków stopowych: mangan

(do 0,5%), srebro (do 3%) – zwiększają wytrzymałość, odporność na korozję i spawalność, a miedź (do 3%) oraz cyrkon i metale ziem rzadkich (do 5%), np. cer, itr, neodym, lantan – sprzyjają utwardzaniu dyspersyjnego stopów [1,2,6].

Na konstrukcje lutowane zaleca się stosować stopy przedstawione w tabelicy I [1,2,4÷8]. W ostatnich latach najczęściej stosowanym stopem jako materiał lutowany jest stop AZ31B (3% Al, 1% Zn, reszta Mg) [10÷16].

Stopy magnezu należą do materiałów trudno lutowalnych. Decydują o tym m.in. [3÷9]:

- wysoka aktywność chemiczna i szybkie tworzenie w atmosferze tlenowej trwałe (energia tworzenia ok. 900 kJ/O₂ – zbliżona do tlenku aluminium) złożonej warstwy tlenkowej uzupełnionej azotkiem (MgO + Mg(OH)₂ + Mg₃N₂), co powoduje utrudnione zwilżenie spoiwem powierzchni łączonego materiału,
- stosunkowo niskie temperatury solidus stopów Mg, które tworzą możliwość wystąpienia odkształceń w procesach lutowania i zmian strukturalnych w złączach,
- niska różnica temperatur topnienia większości zalecanych spoiw i materiałów łączonych, co sprzyja łatwej możliwości nadtopienia złączy,
- możliwa niska odporność na korozję atmosferyczną złączy,
- gęstość spoiwa magnezowego zwykle niższa od topnika, co stwarza zagrożenie wtrąceń topnikowych w lutowinach,
- łatwa erozja metalu łączonego przez spoiwo – wpływa na obniżenie właściwości mechanicznych połączeń.

Lutowanie stopów magnezu wymaga zatem dobrania odpowiednich spoiw i topników oraz zastosowa-

Tablica I. Stopy magnezu zalecane na konstrukcje lutowane i ich podstawowe właściwości
Table I. Magnesium alloys recommended on brazed structures and their basic properties

Oznaczenie	Skład chemiczny nom., % mas., Mg reszta			Temperatura topn., °C	Gęstość, g/cm ³	R _m , MPa	Wydłuż. wzgl., %
	Al	Zn	inne				
AZ10A	1,2	0,4	0,2 Mn	632÷643	1,75	145	10
AZ31B	3,0	1,0	0,2 Mn	605÷630	1,77	193	14
AZ61B	6,5	1,0	–	510÷615	1,86	221	15
K1A	–	–	0,7 Mn	649÷650	1,74	55	14
M1A	–	–	1,2 Mn	648÷650	1,76	138	9
ZE10A	–	1,2	0,17 REM ¹⁾	593÷646	1,76	179	12
ZK21A	–	2,3	0,6 Zr	626÷642	1,79	228	10
QE22A	–	–	0,7 Zr 2,5 Ag 2,0 REM ¹⁾	535÷640	1,83	260	4
HK31A	–	0,3	0,7 Zr 3,3 Th	642÷648	1,84	225	9

¹⁾ metale ziem rzadkich (Ce, Nd, Pr, La)

nia możliwie niskiej temperatury i krótkich czasów nagrzewania. Podstawowe metody lutowania magnezu to lutowanie płomieniowe, piecowe, kąpielowe i indukcyjne [3÷9].

Lutowanie płomieniowe korzystnie jest prowadzić z użyciem palników na gaz propan i jego mieszanki lub na gaz ziemny i sprężone powietrze. Można oczywiście do tego celu zastosować palnik acetylenowo-tlenowy z płomieniem neutralnym. Do lutowania płomieniowego zaleca się najczęściej stop M1A (tabl. I). Wysoka trwałość tlenku magnezu i stosunkowo niska temperatura wrzenia tego metalu (1107 °C) utrudniają, a niekiedy wręcz uniemożliwiają lutowanie jego stopów w próżni i w kontrolowanych atmosferach aktywnych chemicznie. Niemniej lutuje się je piecowo, zwykle ze wspomaganiami topnikowymi, w atmosferze gazów neutralnych lub w piecach bez atmosfer kontrolowanych.

Zaleca się również, obecnie coraz rzadziej, zastosowanie do łączenia stopów magnezu lutowania kąpielowego w kąpielach topnikowych.

Magnez jest paramagnetykiem, a zatem można

lutować jego stopy indukcyjnie, chociaż sprawność nagrzewania będzie odpowiednio niższa niż w przypadku ferromagnetyków, np. stali niestopowych i niskostopowych.

Możliwe jest także beztopnikowe lutowanie dyfuzyjne magnezu i jego stopów przez cienką (0,002 mm), naniesioną technikami jonowymi warstwę miedzi, niklu, srebra lub aluminium. Połączenia takie mogą jednak wykazywać kruchość i niewielką wytrzymałość – ok. 30÷50 MPa [6,7].

Spoiwa do lutowania stopów magnezu

Do znormalizowanych (AWS, ASTM, EN, JS) spoiw magnezowych należą trzy stosunkowo wysokotopliwe (temperatury likwidus 565÷599 °C) stopy magnezu z aluminium i cynkiem (poz. 1÷3, tabl. II). Ogólnie zaleca się je do lutowania płomieniowego, piecowego

Tablica II. Spoiwa do lutowania stopów magnezu
Table II. Filler metals for brazing magnesium alloys

Lp.	Oznaczenie	Skład chemiczny, Mg reszta, % wag.			Temperatura topnienia, °C	Temperatura lutowania, °C
		Al	Zn	inne		
1	BMg-1 ¹⁾ AZ92A ²⁾ Mg001 ³⁾	8,3÷9,7	1,7÷2,3	0,15÷0,5 Mn	443÷599	582÷616
2	BMg-2 ¹⁾ AZ125A ²⁾	11÷13	4,5÷5,5	–	410÷565	570÷595
3	MC3 ⁴⁾	8,3÷9,7	1,6÷2,4	do 0,1 Mn 0,25 Cu 0,3 Si	443÷599	599÷615
4	GA432	2	55	–	330÷360	495÷505
5	P430Mg	0,7÷1	13÷15	0,1÷0,5 Mn	380÷430	550÷560
6	P380Mg	2÷2,5	23÷25	0,1÷0,5 Mn	340÷380	480÷500
7	P435Mg	25÷27	1÷1,5	0,1÷0,3 Mn	435÷520	520÷560
8	P398Mg	21÷22	0,2÷0,5	0,1÷0,3 Mn 25-26 Cd	398÷415	430÷500
9 ⁵⁾	–	53	9,7	–	448	–
10	–	52	9	–	451-469	–
11	–	3,3	53,1	–	520-550	–

¹⁾ Oznac. wg AWS-A 5.8

²⁾ Oznac. wg ASTM

³⁾ Oznac. wg PN-EN ISO 17672

⁴⁾ Oznac. wg Jap. Stand.

⁵⁾ Stop eutektyczny

i kąpielowego, chociaż do lutowania płomieniowego częściej zaleca się stosowanie lutów o niższej temperaturze topnienia (stosunkowo wysokiej zawartości Al lub Zn).

Aluminium w spoiwach magnezowych podwyższa ich wytrzymałość i twardość oraz zwiększa rzadkość. Zbyt duża zawartość tego metalu sprzyja jednak obniżeniu ciągliwości spoiw (tworzeniu kruchych faz międzymetalicznych) i erozji elementów podczas lutowania (od 9% Al). Z tego drugiego powodu spoiwa o zbyt dużej zawartości aluminium (np. 20÷27%) nie nadają się do lutowania cienkościennych elementów [3÷9].

Cynk, podobnie jak aluminium, ogólnie podwyższa rzadkość i wytrzymałość spoiw magnezowych, lecz jego zawartość wyższa od 2% może powodować (choć nie zawsze) powstawanie pęknięć gorących w lutowinach. Podwyższa on też odporność korozyjną spoiw o wyższej zawartości takich zanieczyszczeń jak żelazo i nikiel [5,7,9].

Niewielki dodatek manganu w spoiwach magnezowych podwyższa ich odporność na korozję, zwłaszcza w wodzie morskiej [4÷9]. Typowe spoiwa do lutowania stopów magnezu zestawiono w tablicy II [4÷11].

Są to spoiwa na pograniczu lutów miękkich i twardych. Wytrzymałość na ścinanie wykonanych nimi połączeń stopów magnezowych nie przekracza na ogół 60 MPa. W dostępnej literaturze specjalistycznej zawarto wyniki badań nad nowymi magnezowymi, aluminiowymi i cynkowymi spoiwami do łączenia stopów magnezu [11÷16]. Należą do nich również spoiwa do lutowania topnikowego stopów magnezu, podwyższające właściwości wytrzymałościowe połączeń (w większości umożliwiając one prowadzenie utwardzania dyspersyjnego złączy), takie jak [8]:

- MgAl12Cd11Ni4 (temp. topn. 560÷580 °C), zapewniające wytrzymałość na ścinanie ok. 190 MPa dla złączy ze stopu M1A,
- AlMg25Cu3,5 (temp. topn. 448÷462 °C), zapewniające wytrzymałość na ścinanie ponad 136 MPa dla złączy ze stopu AZ31B,
- AlMg32Cu2Si1, umożliwiające uzyskanie wytrzymałości na ścinanie ok. 87 MPa dla złączy ze stopu AZ31B,
- stopy Al-Mg-Ca-Sn, Al-Mg-Ca-Zn, Mg-Al-Ca (z zawartością wapnia) odporne na pełzanie, o wytrzymałości w zakresie 190÷250 MPa (wydłużenie 3÷5%).

Zaleca się również stosowanie do lutowania stopów magnezu past galowych (mieszanki galu z Mg, Zn, Cd, Sn), występujących w temperaturach pokojowych jako ciekłe zawiesiny, a po podgrzaniu do temperatury lutowania 150÷600 °C zapewniających połączenia o temperaturze rozlutowania w zakresie 250÷500 °C. Gal po podgrzaniu tworzy bowiem z materiałami łączonymi i pozostałymi składnikami spoiw roztwory stałe o wyższej topliwości [7,16].

Topniki do lutowania stopów magnezu

Topniki do lutowania magnezu i jego stopów stanowią głównie mieszaniny związków chemicznych, charakteryzujących się wysoką aktywnością chemiczną. Oparte są one najczęściej na trójskładnikowych mieszaninach typu: CaCl₂ – LiCl – NaCl, CaCl₂ – LiCl – KCl lub LiCl – KCl – NaCl. Zawierają również niekiedy fluorki i florogliniany (NaF, ZnF₂, Na₃AlF₆) [4÷7]. Temperatury ich topnienia i aktywności mieszczą się w zakresie 400÷600 °C. Topniki te są zalecane do stosowania w postaci proszków lub past (zawiesin) alkoholowych. W Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach opracowano w ostatnim okresie nowy topnik (FMAG) do powyższego celu o następującym składzie recepturowym, w % wag. [17]:

KCl – 39%, LiCl – 38%, CaCl₂ – 15%, NaF – 8%

Wszystkie wymienione topniki wymagają po lutowaniu usunięcia ze złączy korozjotwórczego żuźla potopnikowego.

Badania technologiczne lutowania płomieniowego i piecowego połączeń zakładkowych ze stopu AZ31B oraz ocena jakości połączeń

W Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach przeprowadzono badania technologiczne nad lutowaniem stopu magnezu AZ31B (MgAl₃Zn₁Mn_{0,2}) [18]. Do lutowania zastosowano nowo opracowany w Instytucie topnik FMAG oraz następujące spoiwa:

- MgAl₉Zn₃Mn₁ (M001 wg PN-EN ISO 17672:2010, BMg-1 wg AWS A 5.8 – temp. topn. 443÷599 °C),
- MgAl₂₆Zn₁Mn_{0,2} (temp. topn. 435÷520 °C),
- Al₅₃Mg₃₇Zn₁₀ (temp. topn. 448 °C).

Badania poprzedzono dokonaniem oceny zwilżalności łączzonego materiału przez powyższe spoiwa przy udziale nowo opracowanego topnika. Zastosowano do tego celu próbę rozplątności spoiw na materiale łączonym, z wykorzystaniem płomieniowego nagrzewania (palnik acetylenowo – tlenowy) próbek. Na próbkach tych w postaci płytek o wymiarach 30x40x6,3 mm, o odpowiednio wytrawionej chemicznie powierzchni, układano kształtkę lutu i próbkę topnika (w ilości ok. 0,2 g). Proces nagrzewania próbek (palnikiem od dołu) kończono po upływie 5 s od momentu stopienia lutu. Po zakrzepnięciu lutu próbki schładzano w zimnej wodzie, stosując tzw. uder termiczny, powodujący usunięcie żuźla potopnikowego (oddzielenie go od powierzchni metalu w wyniku różnicowanej rozszerzalności cieplnej).

Jako miarę rozpląwności (zwilżalności) przyjęto [3]:

- wielkość powierzchni rozpląwnienia lutu (mierzona za pomocą obróbki graficznej wykonanego zdjęcia próbki) oraz współczynnik:

$$K_p = (P_{sr} - P_o) / P_o \quad (1)$$

gdzie: P_{sr} – średnia arytmetyczna wielkość powierzchni rozpląwnienia lutu, mm^2 ; P_o – powierzchnia płaskiego rzutu kulistej próbki spoiwa o objętości V na płaszczyznę podłoża, obliczona wg wzoru:

$$P_o = [(3/4 \pi) V]^{2/3} \quad (2)$$

- wysokość warstwy lutu po rozpląwnieniu (mierzona mikromierzem z dokładnością do 0,01 mm) oraz współczynnik:

$$K_H = [(D_o - H_{sr}) / D_o] \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie: D_o – teoretyczna średnica kropli lutu o objętości V w przypadku braku zwilżenia obliczona ze wzoru:

$$D_o = 1,2V^{1/3} \quad (4)$$

Wyniki przeprowadzonych prób rozpląwności przedstawiono w tablicy III, natomiast na rysunku 1 pokazano próbki po badaniach.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników (tabl. III) można zauważyć, że najlepszymi współczynnikami

rozpląwności K_p i K_H charakteryzuje się lut $MgAl9Zn3Mn1$, wykazujący stosunkowo dużą powierzchnię rozpląwnienia – 208,19 mm^2 . Nieco gorszymi właściwościami lutowniczymi charakteryzuje się spoiwo $MgAl26Zn1Mn0,2$ (powierzchnia rozpląwnienia 150,87 mm^2). Natomiast najgorszą rozpląwność (powierzchnia rozpląwnienia zaledwie 100,29 mm^2) uzyskano dla spoiwa $Al53Mg37Zn10$.

Podczas prowadzenia prób rozpląwności zaobserwowano, że oba spoiwa magnezowe $MgAl9Zn3Mn1$ i $MgAl26Zn1Mn0,2$ dobrze zwilżają stop AZ31B, natomiast spoiwo aluminiowe $Al53Mg37Zn10$ należy mechanicznie pobudzić do zwilżenia, przez przebicie (np. cienkim drutem) błonki tlenkowej, otaczającej kulistą postać lutu po stopieniu. Dopiero wówczas następuje rozpląwnienie się lutu i zwilżenie materiału podstawowego.

Stosując spoiwa: $MgAl9Zn3Mn1$, $MgAl26Zn1Mn0,2$, $Al53Mg37Zn10$ oraz topnik FMAG, wykonano próby lutowania płomieniowego i piecowego złączy zakładkowych ze stopu magnezu AZ31B ($MgAl3Zn1Mn0,2$).

Złącza próbne (wielkość zakładki ok. 5 mm) wykonywano z płytek o wymiarach 30x40x6,3 mm.

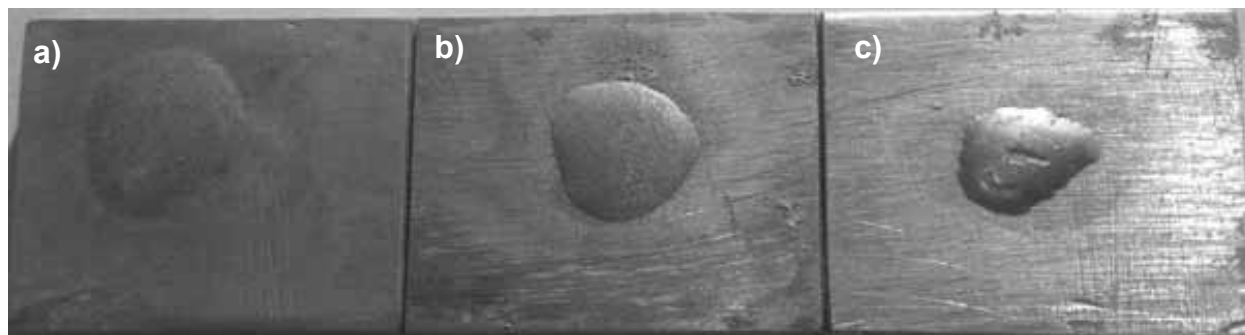
Powierzchnię próbek przed badaniami wytrawiono chemicznie w 10% roztworze HNO_3 , natomiast źródło ciepła w badaniach stanowił płomień typowego palnika tlenowo – acetylenowego z nasadką o wydajności 160 dm^3/h acetyleny oraz komorowy piec oporowy RHF1400 firmy Carbolite.

Tablica III. Wyniki prób rozpląwności spoiw na powierzchni stopu magnezu (AZ31B) z zastosowaniem topnika FMAG

Table III. The test results of the filler metals flow on the surface magnesium alloy (AZ31B) using FMAG flux

Rodzaj spoiwa	Rozpląwność ¹⁾					
	P_{sr} , mm^2	S_p , mm^2	K_p	H_{sr} , mm	S_H , mm	K_H , %
MgAl9Zn3Mn1	208,19	19,25	5,93	0,57	0,06	88,91
MgAl26Zn1Mn0,2	150,87	8,98	3,64	0,82	0,05	84,05
Al53Mg37Zn10	100,29	7,13	2,09	1,12	0,05	78,21

¹⁾ P_{sr} – wartości średnie powierzchni rozpląwnienia (z 3 pomiarów); S_p – odchylenie standardowe powierzchni rozpląwnienia spoiwa; $P_o = 32,46 \text{ mm}^2$; H_{sr} – wartości średnie wysokości warstwy lutu po rozpląwnieniu (z 3 pomiarów), S_H – odchylenie standardowe wysokości warstwy lutu po rozpląwnieniu; $D_o = 5,14 \text{ mm}$.



Rys. 1. Próbki po badaniach rozpląwności na podłożu magnezowym AZ31B z zastosowaniem lutu: a) $MgAl9Zn3Mn1$, b) $MgAl26Zn1Mn0,2$, c) $Al53Mg37Zn10$

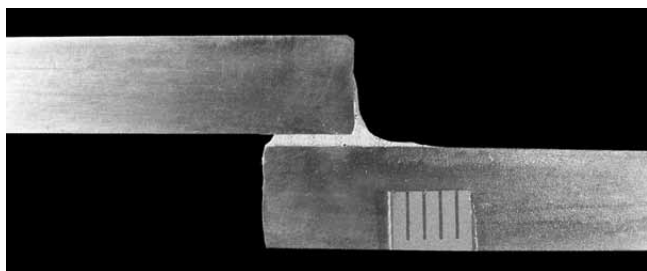
Fig. 1. The samples after testing of flow properties on the surface of magnesium alloy AZ31B using brazing filler metals: a) $MgAl9Zn3Mn1$, b) $MgAl26Zn1Mn0,2$, c) $Al53Mg37Zn10$

Lutowanie płomieniowe

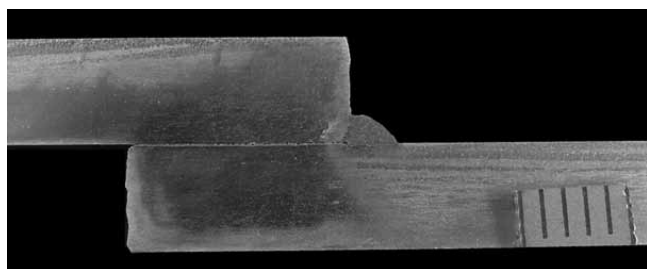
Lutowanie płomieniowe złączy zakładkowych (płytki ułożone poziomo, swobodnie bez docisku) prowadzono, dozując lut ręcznie u wylotu zakładki. Wielkość szczeliny lutowniczej pomiędzy łączonymi elementami, dystansowana odcinkami drutu ze stali nierdzewnej przed procesem lutowania, wynosiła 0,25 mm. Należy podkreślić, że omawiana próba pozwala dodatkowo na dość ostrą ocenę właściwości kapilarnych lutu w obecności topnika. Badania wykazały, że jedynie spoiwo MgAl9Zn3Mn1 bez żadnych problemów wniknęło w szczelinę kapilarną, umożliwiając uzyskanie stosunkowo dobrej jakości połączenia zakładkowego. W przypadku lutowania połączeń zakładkowych lutami MgAl26Zn1Mn0,2 oraz Al53Mg37Zn10 powierzchnię łączoną stopu AZ31B należało przed właściwym procesem lutowania wstępnie pobielać spoiwem. Spoiwa te bowiem nie wniknęły do założonej szczeliny kapilarnej.

Bezpośrednio po zakrzepnięciu lutu próbki zanurzano w zimnej wodzie, stosując tzw. udar termiczny, celem usunięcia korozjotwórczego żużla potopnikowego.

Otrzymano w ten sposób połączenia zakładkowe dla wszystkich badanych lutów. Na rysunkach 2÷4 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań makroskopowych przekrojów poprzecznych połączeń zakładkowych.



Rys. 2. Makrostruktura połączenia zakładkowego stopu magnezu AZ31B wykonanego płomieniowo lutem magnezowym MgAl9Zn3Mn1 i topnikiem FMAG, traw. roztworem kwasu octowego

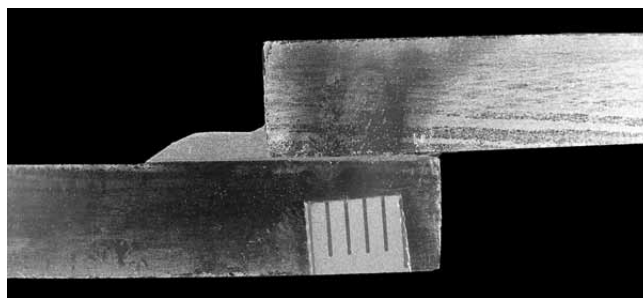


Rys. 3. Makrostruktura połączenia zakładkowego stopu magnezu AZ31B wykonanego płomieniowo lutem aluminium Al53Mg37Zn10 i topnikiem FMAG, traw. roztworem kwasu octowego

Makroskopowe badania metalograficzne wykonanych połączeń wykazały najwyższą ich jakość w przypadku stosowania spoiwa MgAl9Zn3Mn1 (rys. 2) – można zaobserwować prawidłowy wklęsły kształt menisku pachwinowej wypłytki, świadczący o dobrej zwilżalności materiału podstawowego przez lut. Połączenia zakładkowe wykonane przy zastosowaniu spoiw Al53Mg37Zn10 i MgAl26Zn1Mn0,2 również charakteryzują się stosunkowo dobrą jakością (rys. 3 i 4), jednakże ich wykonanie jest bardziej pracochłonne, gdyż jak wspomniano powyżej, przed właściwym lutowaniem elementy łączone należy wstępnie pobielać lutem. Przedstawione złącza nie wykazują istotnych niezgodności lutowniczych, zwłaszcza typu pustki.

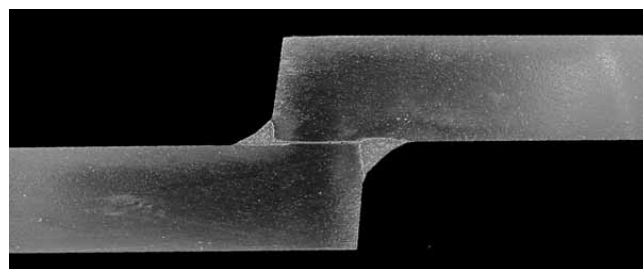
Lutowanie piecowe

Lutowanie piecowe złączy zakładkowych (płytki ułożone poziomo, z niewielkim dociskiem) prowadzono w piecu komorowym elektrycznym–oporowym RHF1400 firmy Carbolite. Wielkość szczeliny lutowniczej pomiędzy łączonymi elementami była dystansowana przed procesem lutowania drutem ze stali nierdzewnej (podobnie jak w procesie lutowania płomieniowego) i wynosiła 0,25 mm. Na końce łączone próbek nakładano taką ilość topnika, aby całkowicie



Rys. 4. Makrostruktura połączenia zakładkowego stopu magnezu AZ31B wykonanego płomieniowo lutem magnezowym MgAl26Zn1Mn0,2 i topnikiem FMAG, traw. roztworem kwasu octowego

Fig. 4. Macrostructure of magnesium alloy AZ31B overlap joint made by flame brazing with magnesium filler metal type MgAl26Zn1Mn0,2 and flux FMAG, etch. acetic acid



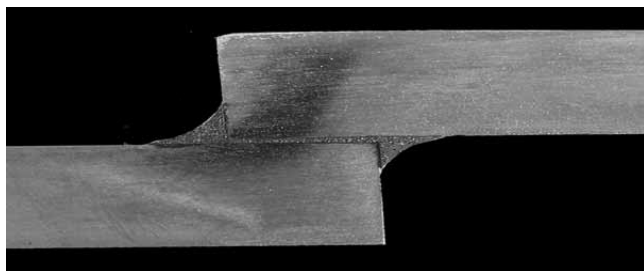
Rys. 5. Makrostruktura połączenia zakładkowego stopu magnezu AZ31B wykonanego piecowo lutem aluminium Al53Mg37Zn10 i topnikiem FMAG, traw. roztworem kwasu octowego

Fig. 5. Macrostructure of magnesium alloy AZ31B overlap joint made by furnace brazing with aluminium filler metal type Al53Mg37Zn10 and flux FMAG, etch. acetic acid

osłonić strefę łączenia. Lut w postaci odcinka drutu o wymiarach $\varnothing 3 \times 30$ mm układano przy krawędzi połączenia zakładkowego. Całość tak przygotowanej próbki ogrzewano w piecu komorowym w czasie 25-30 min w temperaturze: 605 °C dla spoiwa MgAl9Zn3Mn1 oraz odpowiednio 585 °C dla spoiw Al53Mg37Zn10 i MgAl26Zn1Mn0,2. Temperatury te zostały ustalone dla poszczególnych spoiw na podstawie wstępnych prób rozpoznawczych lutowania. Próbki z zakrzepnitym lutem po ostudzeniu z piecem do temperatury ok. 400 °C wyjmowano z pieca i zanurzano w zimnej wodzie, stosując uder termiczny celem usunięcia korozjotwórczego żużla potopnikowego.

O ile w przypadku lutowania płomieniowego udało się uzyskać połączenia zakładkowe dla wszystkich wytypowanych spoiw, o tyle w przypadku lutowania piecowego uzyskano połączenia zakładkowe wyłącznie dla lutów MgAl26Zn1Mn0,2 i Al53Mg37Zn10. Wyżej topliwe spoiwo MgAl9Zn3Mn1 w temperaturze poniżej 605°C nie ulegało bowiem stopieniu, natomiast materiał podstawowy (stop AZ31B) już w tej temperaturze zapalał się i uniemożliwiał dalsze lutowanie.

W przypadku lutów Al53Mg37Zn10 i MgAl26Zn1Mn0,2 uzyskano połączenia charakteryzujące się dobrą jakością. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki przeprowadzonych jakościowych badań makroskopowych ich przekrojów poprzecznych. Zaobserwować można prawidłowy wklęsły kształt menisku pachwinowej wypłytki (zarówno z jednej, jak i drugiej strony



Rys. 6. Makrostruktura połączenia zakładkowego stopu magnezu AZ31B wykonanego piecowo lutem magnezowym MgAl26Zn1Mn0,2 i topnikiem FMAG, traw. roztworem kwasu octowego

Fig. 6. Macrostructure of magnesium alloy AZ31B overlap joint made by furnace brazing with magnesium filler metal type MgAl26Zn1Mn0,2 and flux FMAG, etch. acetic acid

Wnioski

Magnez i jego stopy należą do materiałów o trudnej lutowalności, o czym świadczą ograniczone możliwości technologiczne ich lutowania oraz konieczność stosowania specjalistycznych spoiw oraz topników lutowniczych.

Lutowane połączenia zakładkowe o dobrej jakości ze stopu magnezu AZ31B można uzyskać zarówno w wyniku lutowania płomieniowego, jak i piecowego z użyciem opracowanego w Instytucie Spawalnictwa topnika FMAG oraz spoiwa MgAl9Zn3Mn1

złączy) świadczący o dobrej zwilżalności materiału podstawowego przez lut. Połączenia te nie wykazują istotnych wewnętrznych niezgodności lutowniczych.

Statyczna próba na ścinanie połączeń lutowanych

W celu określenia właściwości mechanicznych połączeń zakładkowych stopu magnezu AZ31B, wykonanych płomieniowo wytypowanymi spoiwami (MgAl9Zn3Mn1, MgAl26Zn1Mn0,2 i Al53Mg37Zn10), z zastosowaniem topnika FMAG, przeprowadzono statyczne próby ich ścinania.

Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej firmy Instron 4210. W celu zapewnienia osiowości obciążenia, eliminującego zginanie połączenia (połączenie zakładkowe jednostronne), zastosowano elementy korygujące osiowe zamocowanie próbek w uchwytach. W tablicy IV przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie złączy zakładkowych w ujęciu statystycznym.

Analizując wyniki statycznej próby ścinania połączeń lutowanych przedstawione w tablicy IV można stwierdzić, że najwyższą wytrzymałość (63 MPa) wykazały połączenia wykonane lutem Al53Mg37Zn10. We wszystkich przypadkach zerwanie próbek wystąpiło w połączeniu lutowanym na granicy lutownicy z materiałem lutowanym.

Tablica IV. Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie lutowanych złączy zakładkowych ze stopu AZ31B

Table IV. The results of the shear strength of lap brazed joints of alloy AZ31B

Rodzaj spoiwa	Wytrzymałość na ścinanie R_p , MPa	
	Wartość średnia ¹⁾	Odchylenie standardowe
MgAl9Zn3Mn1	47,6	2,4
MgAl26Zn1Mn0,2	57,2	5,7
Al53Mg37Zn10	63,6	6,1

¹⁾ wynik średni z pięciu pomiarów

w przypadku lutowania płomieniowego i spoiw typu MgAl26Zn1Mn0,2 lub Al53Mg37Zn10 w przypadku lutowania piecowego.

Makroskopowe badania metalograficzne złączy zakładkowych ze stopu magnezu AZ31B, lutowanych lutami: MgAl9Zn3Mn1, MgAl26Zn1Mn0,2 oraz Al53Mg37Zn10 potwierdziły ich dobrą jakość.

Wytrzymałość na ścinanie połączeń ze stopu magnezu AZ31B, lutowanych lutami: MgAl9Zn3Mn1, MgAl26Zn1Mn0,2 oraz Al53Mg37Zn10 kształtuje się w zakresie 50÷60 MPa.

Literatura

- [1] Dobrzański L. A.: Metaloznawstwo opisowe stopów metali nieżelaznych. Wyd. Politechniki Śl., Gliwice, 2008.
- [2] Tokarski M.: Metaloznawstwo metali i stopów nieżelaznych w zarysie. Wyd. Śląsk, 1985.
- [3] Praca zbiorowa: Poradnik Inżyniera. Spawalnictwo. T. 1 i 2. WNT Warszawa, 2004/2005.
- [4] Praca zbiorowa: Brazing Handbook. Wyd. 5. AWS, Miami, Florida, 2007.
- [5] Schwartz M.: Brazing. Wyd. 2. ASM International, Materials Park, Ohio, 2003.
- [6] Praca zbiorowa: Spravočnik po pajkie. Mašinostrojenje, Moskva, 2003.
- [7] Laško S.V., Laško N.F.: Pajka mettallov. Mašinostrojenje. Moskva, 1988.
- [8] Shapiro A. E.: Brazing of magnesium alloy and magnesium matrix composites for automotive and aerospace application. <http://www.ctia.com.cn/TungstenNews/Print.asp?ArticleID=22463>.
- [9] Shapiro A. E.: Brazing of magnesium alloy and magnesium matrix composites. Welding Journal nr 10, 2005, s. 33-43.
- [10] Luo A.A.: Magnesium: Current and potential automotive applications. JOM, nr 2, 2002, s. 42-48.
- [11] Bobzin K., Lugscheider E., Ernst F., Jager D., Schlegel A., Rosing J.: A look at the development of magnesium – based filler metals. Welding Journal nr 3, 2008, s. 38-40.
- [12] Watanabe T., Komatsu S., Oohara K.: Development of flux and filler metal for brazing magnesium alloy AZ31B. Welding Journal nr 3, 2005, s. 37-40.
- [13] Liu L., Wu Z.: Microstructure and interfacial reactions of soldering magnesium alloy AZ31B. Materials Characterization 61, 2010, s. 13-18.
- [14] Ma L., Qiao P., Long W., He D., Li X.: Interface characteristics and mechanical properties of the induction brazed joint of magnesium alloy AZ31B with Al – based filler metal. Materials and Design 37, 2012, 465-469 s.
- [15] Ma L., He D., Li X., Jiang J.: Microstructure and mechanical properties of magnesium alloy AZ31B brazed joint using a Zn-Mg-Al filler metal. J. Mater. Sci. Technol., 26, 8, 2010, s. 743-746.
- [16] Markova I.K., Pietrunin I.E., Grzimalski L.L.: Isledovanie sposobu pajki magnievych splavov. Svaročnoje Proizvodstvo nr 3, 1974, s. 57-61.
- [17] Majewski D.: Badania nad topnikiem do twardego lutowania stopów magnezu. Praca badawcza IS nr Gg-38/St-311, 2012.
- [18] Majewski D., Winiowski A.: Lutowanie twarde stopów magnezu. Praca badawcza IS nr Cc-55.2 /ST-318.2, 3013.

Miesięczne i roczne spisy treści oraz streszczenia artykułów opublikowanych w Przeglądzie Spawalnictwa są dostępne na stronie internetowej:

www.pspaw.pl

przegląd
SPAWALNICTWA
Welding Technology Review