

# Spawanie stopu magnezu AM20 laserem CO<sub>2</sub>

WOJCIECH KALITA  
PAWEŁ KOŁODZIEJCZAK  
JACEK HOFFMAN

TOMASZ MOŚCICKI  
ZYGMUNT SZYMAŃSKI

Stopy na osnowie magnezu są najlżejszymi metalicznymi materiałami konstrukcyjnymi. Jednakże ich zastosowanie w przemyśle samochodowym i lotniczym było do niedawna ograniczone, głównie z uwagi na takie właściwości, jak niski moduł sprężystości, ograniczona wytrzymałość i odporność na pełzanie w podwyższonych temperaturach, duża aktywność chemiczna i słaba odporność korozyjna [1]. Choć rozpuszczalność pierwiastków stopowych, takich jak: Al, Cu, Zn, Mn i pierwiastki ziem rzadkich w magnezie jest dość ograniczona, to niewielkie procentowo dodatki tych metali znacznie poprawiają zarówno własności mechaniczne, jak i chemiczne uzyskanych stopów w porównaniu z czystym magnezem. Czynnikiem hamującym wprowadzenie nowych stopów magnezu w przemyśle środków transportu był brak badań rozwijających techniki produkcji stopów, które pozwoliłyby uzyskać właściwą mikrostrukturę, m.in. brak porów, a także badań rozwijających technologie umożliwiające ich wykorzystanie jako elementów konstrukcyjnych (np. technologie odlewnicze). W ostatnich latach pojawiła się pilna potrzeba rozwoju tych badań. Można wymienić trzy główne przyczyny wzrostu zainteresowania technikami produkcji nowych stopów i metodami ich obróbki:

- zaostrożenie wymagań dotyczących ochrony środowiska (emisja gazów wydechowych, hałas) [2],
- wprowadzenie ostrych wymagań dotyczących bezpieczeństwa transportu (dodatkowe wzmocnienia, strefy kontrolowanego zgniotu, układy hamowania) [3],
- konkurencyjność na rynku produkcji środków transportu skłoniła do wytwarzania oszczędniejszych

---

*Dr inż. Wojciech Kalita, dr Jacek Hoffman, mgr inż. T. Mościcki, doc. dr hab. Z. Szymański są pracownikami Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, a mgr inż. P. Kołodziejczak jest pracownikiem Instytutu Technologii Materiałowych PW.*

---

w eksploatacji, a jednocześnie bardziej komfortowo wyposażonych i trwalszych pojazdów (np. klimatyzacja, ochrona antykorozyjna).

Przy wykorzystaniu tradycyjnych materiałów wymienione czynniki prowadzą do znacznego zwiększenia masy środków transportu, nawet o ponad 30% [1]. W rezultacie skłoniło to producentów środków transportu do zastępowania elementów stalowych częściami ze stopów aluminium, a obecnie stopów magnezu (ok. 30% lżejszymi od stopów aluminium przy zachowaniu jednakowych wymiarów). Stąd, niewielkie do lat 70. zastosowanie tych ostatnich w jednostkowych elementach (obudowa skrzyni biegów, Volkswagen [3]) zwiększyło się w końcu lat 90. do wielu układów wytwarzanych na potrzeby kilkunastu firm samochodowych, głównie w postaci odlewów otrzymywanych metodą odlewania ciśnieniowego (pokrywy, miska olejowa itp.) [4]. Z tego względu w 1997 r. ponad 80% zapotrzebowania na stopy magnezu stanowił stop AZ91 [1, 3], którego głównymi dodatkami stopowymi są aluminium i cynk (oznaczenie wg normy Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego: EN-MB21120 [5]). Rozwój technik wytwarzania stopów magnezu i badań ukierunkowanych na poprawę ich własności spawalniczych spowodował zainteresowanie ośrodków badawczych opracowaniem technologii ich spawania i wykorzystania jako elementów konstrukcyjnych w środkach transportu. Z uwagi na własności tych stopów (łatwopalność, chemiczna aktywność) i wymagania dotyczące zadowalającej jakości połączenia wykonanego w elemencie konstrukcyjnym jedynie technologia spawania wiązką laserową i elektronową jest odpowiednia do tego celu. Stąd, obserwuje się w ciągu ostatnich kilku lat pojawienie się publikacji dotyczących laserowego spawania stopów magnezu [6–9]. Opublikowane wyniki badań dotyczą stopów stosowanych obecnie w konstrukcjach samochodowych i lotniczych. Wyniki te obejmują głównie stopy grupy MgAlZn (dodatkami stopowymi są aluminium i cynk) oraz grupy MgZnCu (gdzie dodatkami są cynk i miedź). Niewielkie jest dotąd zainteresowanie stopami grupy MgAlMn, których głównymi dodatkami stopowymi są aluminium i mangan. Jednakże własności tych stopów, a w szczególności wysoka odporność na korozję wywołowaną przez słoną wodę [10] skłaniają do przewidywań, że w latach 2001–2010 nastąpi kilkakrotny wzrost zapotrzebowania na stopy tego rodzaju [1], szczególnie stosowane na elementy karoserii.

Podjęto badania nad technologią laserowego spawania stopów na osnowie magnezu, do wstępnych prób wykorzystano stop AM20 (ozn. wg [5] jako EN-21210). Stop ten, uzyskiwany przez odlewanie, ma skład i własności przedstawione w tab. I [11]:

TABELA I. Skład chemiczny i własności stopu AM20 (EN-MB21210)

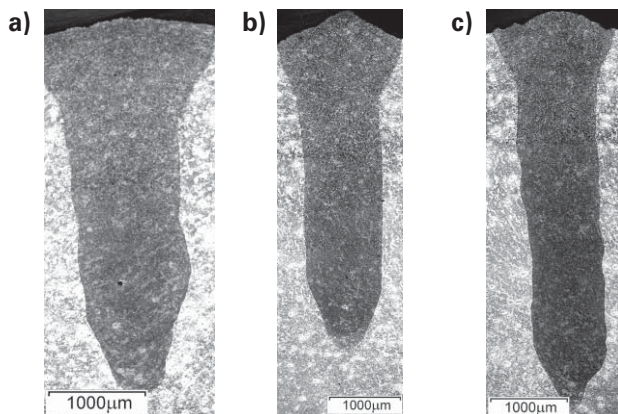
Skład chemiczny, %				Własności			
Al	Mn	Zn	Mg	gęstość, kg/m <sup>3</sup>	temperatura topnienia, °C	przewodność cieplna, W/Km	twardość Brinella
1,8–2,4	min. 0,2	max. 0,2	reszta	1,75 × 10 <sup>3</sup>	638	94	45

### Metodyka doświadczalna

Próbki w kształcie płaskowników o grubości 8 mm naświetlano na stanowisku złożonym z lasera CO<sub>2</sub> o mocy maksymalnej 2,5 kW, emitującego wiązkę o modzie bliskim TEM<sub>10</sub>, i sprzężonego z nim stołu o programowanych osiach. Wiązkę lasera doprowadzano do materiału układem składającym się z polaryzatora kołowego, zwrotnic i głowicy ogniskująco-nadmuchowej. Przetapianie wykonywano przemieszczając próbki względem wiązki zogniskowanej soczewką ZnSe o ogniskowej 5" na powierzchni materiału. Stosowano dwa gazy osłonowe: argon bądź hel, doprowadzane na powierzchnię próbek współosiowo z wiązką, z regulowanym wydatkiem z dyszy głowicy. Naświetlania próbek realizowano zmieniając moc lasera w zakresie od 1,5 kW do 2,5 kW dobierając prędkość przesuwu tak, by uzyskać maksymalną głębokość przetopienia. Ze względu na ograniczenie mocy użytego lasera do 2,5 kW średnia gęstość mocy nie przekraczała ok. 6 MW/cm<sup>2</sup>. W związku z tym dla próbek o grubości 8 mm nie uzyskano pełnej penetracji kanału parowego (przetopienia na wskroś).

### Wyniki badań

Optymalne wyniki naświetlań pod względem głębokości przetopienia i kształtu przetopiny otrzymano dla następujących parametrów: mocy całkowitej lasera  $P$  w zakresie 1,8–2,3 kW, prędkości przesuwu  $v$  próbek: 2,5–3,5 m/min i wydatku gazu osłonowego (argonu bądź helu) z dyszy o średnicy otworu równej 6 mm wynoszącym 20–40 l/min. Ogniskowanie wiązki lasera poniżej bądź powyżej powierzchni materiału nie prowadziło do powiększenia głębokości przetopienia. Zdjęcia zglądów metalograficznych wykonanych w płaszczyźnie prostopadłej do osi przemieszczania wiązki, przedstawiające makrostruktury przetopów, pokazano na rys. 1.

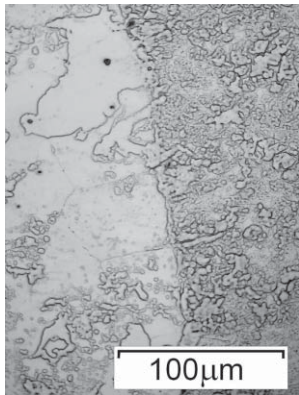


Rys. 1. Makrostruktury przetopów wykonanych na stopie magnezu AM20: a) przy mocy lasera 1,8 kW i prędkości przesuwu 2,5 m/min w osłonie argonu, b) przy mocy lasera 1,8 kW i prędkości przesuwu 2,5 m/min w osłonie helu, c) przy mocy lasera 2,3 kW i prędkości naświetlania 3,5 m/min w osłonie helu (powiększenia 50x)

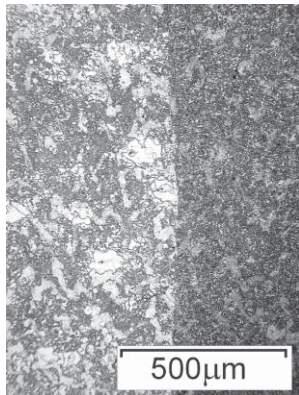
Głębokość przetopienia w przypadku zastosowania argonu jako gazu osłonowego, dla dolnego zakresu parametrów ( $P = 1,8$  kW,  $v = 2,5$  m/min) jest o ok. 25% mniejsza od głębokości osiągniętej z użyciem helu, a dla  $P = 2,3$  kW i  $v = 3,5$  m/min jest mniejsza o ponad 30%. Stosunek głębokości do średniej szerokości przetopienia, wynoszący od ok. 3,2 do 5,3, wskazuje, że przetopienia uzyskano przy charakterystycznym dla spawania laserowego efekcie kanału parowego (*keyhole*). Kielichowy kształt przekroju przetopienia w jego górnej części, pokazany na rys. 1a, obserwuje się dość często przy spawaniu różnych materiałów, gdy gazem osłonowym jest argon. Rozszerzenie spoiny w jej górnej części zmniejsza się znacznie przy spawaniu w helu i znika całkowicie przy spawaniu w warunkach obniżonego ciśnienia [12]. Rozszerzenie to jest także mniejsze przy dużych prędkościach spawania. Oznacza to, że jego przyczyną jest powstawanie obłoku plazmowego nad przetapianą powierzchnią. Rozmiary obłoku zależą od rodzaju gazu osłonowego: przy użyciu helu jest on znacznie mniejszy (niższy stopień jonizacji dla helu i lepsze chłodzenie plazmy). Nie zostało natomiast dodatkowo grzania powierzchni spawanej przez obłok plazmowy (o większych rozmiarach w przypadku argonu), czy też skutkiem rozogniskowania wiązki laserowej przez plazmę. Obie przyczyny mogą mieć swój udział: kielichowy kształt spoiny może powstawać w efekcie nałożenia się dwóch źródeł ciepła – jednego o małym natężeniu (obłok plazmowy), jak to ma miejsce przy spawaniu przewodnościowym i powoduje powstanie płytkiego jeziora spawalniczego z przepływem *Marangoniego* i drugiego o dużym natężeniu (wiązka laserowa), odpowiedzialnego za głębokie spawanie. Podobny kształt spoiny można także zaobserwować przy spawaniu wiązką elektronową w przypadku rozogniskowania wiązki [13].

Najważniejszym, pozytywnym efektem wykonanych przetopień w podanym wyżej zakresie parametrów jest brak porów, które występują przy spawaniu stopów grupy MgAlMn [6]. Również nie zaobserwowano porowatości na dnie przetopiny występującej często przy spawaniu bez pełnej penetracji, a wynikającej ze skurczu materiału podczas krzepnięcia. Mikrostruktury próbek otrzymanych w warunkach przedstawionych na rys. 1 pokazano na kolejnych rys. 2–4. Dokładna obserwacja mikrostruktur w otoczeniu wyraźnie widocznych powierzchni rozdziału między przetopiną a materiałem rodzimym nie pozwala na stwierdzenie występowania strefy wpływu ciepła: bezpośrednio po stronie materiału rodzimego ziarna są kilkakrotnie większe od tych występujących po stronie przetopiny. Do charakteryzowania własności połączeń spawanych wykorzystywane są dwa parametry: tzw. energia liniowa [14] określana jako ilość energii dostarczanej do materiału na jednostkę długości drogi naświetlania (równa stosunkowi  $P/v$ ) lub tzw. energia właściwa [15] równa stosunkowi  $P/(v \cdot g)$ , gdzie  $g$  jest głębokością prze-



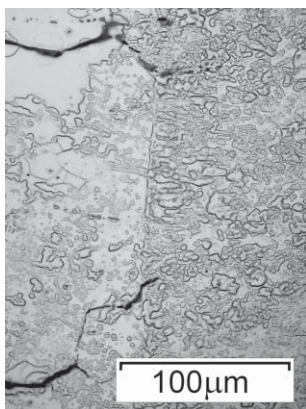


Rys. 2. Mikrostruktura próbki stopu AM20 w otoczeniu powierzchni rozdziału między przetopiną (z prawej strony) i materiałem rodzimym uzyskana przy mocy 1,8 kW i prędkości 2,5 m/min w osłonie argonu (powiększenie 500x)



Rys. 3. Mikrostruktura próbki stopu AM20 w otoczeniu powierzchni rozdziału między przetopiną (z prawej strony) i materiałem rodzimym (2 mm pod licem) uzyskana przy mocy 1,8 kW i prędkości 2,5 m/min w osłonie helu (powiększenie 100x)

topienia (grubością spoiny). Im mniej energii potrzeba do uzyskania trwałego połączenia, tym mniejsze zmiany zachodzą we własnościach materiału po obróbce: w szczególności dotyczy to wielkości strefy wpływu ciepła, mikrotwardości i własności mechanicznych. Dla przetopień wykonanych w wymienionych zakresach  $P$  i  $v$  zwrócono uwagę na osiągnięcie najgłębszego przetopienia przy możliwie niskiej wartości energii liniowej. Takie warunki spełnione są przy  $P = 2,3$  kW i  $v = 3,5$  m/min (rys. 1c), gdy



wartość energii liniowej wynosi 39,4 kJ/m. Mikrostruktura przetopienia otrzymanego w tych warunkach (rys. 4) wykazuje jednak szereg mikropęknięć rozcho-

Rys. 4. Mikrostruktura próbki stopu AM20 w otoczeniu powierzchni rozdziału między przetopiną (z prawej strony) i materiałem rodzimym uzyskana przy mocy 2,3 kW i prędkości 3,5 m/min w osłonie helu (powiększenie 500x)

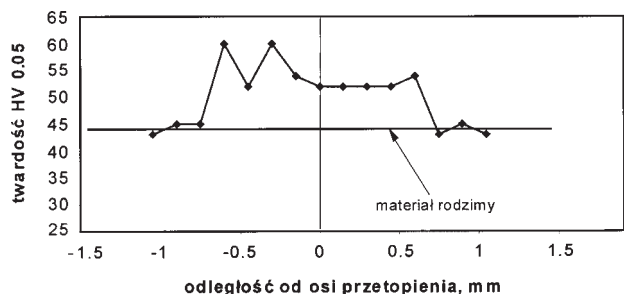
dzących się od powierzchni rozdziału w głąb materiału rodzimego, co w przypadku spawania dyskwalifikowałoby połączenie. Można przypuszczać, że jest to wynikiem krótkiego czasu naświetlania (można jego wartość określić jako stosunek średnicy plamki laserowej do prędkości skanowania, w tym przypadku wynosi ok. 3,5 ms). Przy wysokiej średniej gęstości mocy krótszy czas naświetlania wywołuje większe gradienty temperatury, zwłaszcza na granicach przetopu, co w rezultacie może prowadzić do wystąpienia mikropęknięć.

TABELA II. Twardości wybranych stopów magnezu

Twardość Brinella (HBS 1/5)			
AM20 (2%Al; 0,2%Mn)	AM50 (5%Al; 0,5%Mn)	AM60 (6%Al; 0,5%Mn)	AZ91 (9%Al; 0,9%Zn)
45	60	65	70

Stopy na osnowie magnezu cechują się niską mikrotwardością, zależną od rodzaju dodatków stopowych i ich procentowej zawartości w stopie. Przykładowe wartości przedstawiono w tab. II [10].

Rozkłady mikrotwardości próbek ze stopu AM20, o niewielkiej zawartości składników stopowych, uzyskano wykonując pomiary wzdłuż ścieżek pomiarowych biegnących prostopadle do osi przetopiny w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku przemieszczania wiązki (kierunku skanowania). Pomiary przeprowadzono na połowie głębokości przetopiny, w pierwszym etapie stosując obciążenie 0,196 N (20 G). Wykonując pomiary standardowo – co 0,10 mm, w obie strony od osi przetopienia, uzyskano dość przypadkowo uszeregowane wyniki różniące się między sobą nawet o 100%. Różnice te można wyjaśnić, gdy celowo wybierze się punkty pomiarowe w określonych miejscach: wewnątrz ziaren (jasne obszary na zdjęciach mikrostruktur), gdzie otrzymuje się niską mikrotwardość, i na ich granicach (widocznych jako ciemne linie), gdzie mikrotwardość jest nawet dwukrotnie wyższa. Ma to miejsce zarówno w materiale rodzimym, jak i w obszarze przetopienia. Z powyższych pomiarów nie można wywnioskować, czy i jakie zmiany w mikrotwardości nastąpiły po obróbce laserowej. Pokazane na rys. 2–4 mikrostruktury wskazują, że po przetopieniu uzyskano znaczne rozdrobnienie ziaren oraz zwiększenie ilości wydzielań na ich granicach w obszarze przetopiny, przypuszczalnie międzymetalicznej fazy  $Mg_{17}Al_{12}$  [16]. W związku z powyższym przeprowadzono ponowne pomiary, tym razem stosując obciążenie 0,491 N (50 G). Dla mocy lasera 1,8 kW, prędkości skanowania 2,5 m/min, z zastosowaniem helu jako gazu osłonowego otrzymano wyniki przedstawione na rys. 5. Wskazują one na ok. 20% wzrost mikrotwardości w strefie przetopienia. Podobne wyniki otrzymano dla pomiarów w pobliżu lica próbki.



Rys. 5. Mikrotwardość  $HV_{0,05}$  w obszarze przetopienia (ok.  $\pm 0,7$  mm) i w materiale rodzimym dla stopu AM20 przy mocy lasera 1,8 kW, prędkości skanowania 2,5 m/min i w osłonie helu

## Wnioski

W wyniku wstępnych badań laserowego naświetlania stopu magnezu AM20 otrzymano głębokie przetopienia próbek, wskazujące na penetrację materiału z efektem kanału parowego. Wykonane badania makro- i mikrostruktury pozwoliły na określenie

optymalnych parametrów procesu: przy mocy lasera równej od 1,8 do 2,1 kW, prędkości przetapiania od 2,5 do 3,0 m/min i zastosowaniu helu jako gazu osłownego otrzymano najgłębszą penetrację próbek bez wystąpienia porów i mikropęknięć przy prawie równoległych ściankach przetopu. W rezultacie znacznego rozdrobnienia ziaren i wzrostu wydzielań na ich granicach zaobserwowano ok. 20% wzrost mikrotwardości w obszarze przetopienia w stosunku do materiału rodzimego.

#### LITERATURA

1. *Mordike B.L., Ebert T.*: Magnesium. Properties – applications – potential. *Mat. Sci. Eng.*, Vol. A302/2001, pp. 37–45.
2. *Aghion E., Bronfin B., Eliezer D.*: The role of the magnesium industry in protecting the environment. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117/2001, pp. 381–385.
3. *Friedrich H., Schumann S.*: Research for a „new age of magnesium” in the automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117/2001, pp. 276–281.
4. *Longworth S. J. P.*: The Bolting of Magnesium Components in Car Engines. Dissertation for the degree of Master of Philosophy to the Univ. of Cambridge, August 2001.
5. Norm EN 1753 adopted by the Comité Européen de Normalisation on 1 May 1997, cyt. za Official Journal of the European Communities, 7.11.1998.
6. *Weishait A., Galun R., Mordike L.*: CO<sub>2</sub> Laser Beam Welding of Magnesium-Based Alloys. *Welding Journal*, Vol. 77, No. 4, 1998, pp. 149–154.
7. *Dhahri M., Masse J. E., Mathieu J. F., Barreau G., Autric M.*: CO<sub>2</sub> Laser Welding of Magnesium alloys. *Proc. SPIE (High-Power Lasers in Manufacturing)*. Vol. 3888/ 2000, pp. 725–732.
8. *Dhahri M., Masse J. E., Mathieu J. F., Barreau G., Autric M.*: Laser Weldability of WE43 Magnesium Alloy for Aeronautic Industry. *Proc. LANE 2001*, pp. 297–310.
9. *Haferkamp H., Goede M., Bormann A., Cordini P.*: Laser Beam Welding of Magnesium Alloys – New Possibilities using Filler Wire and Arc Welding. *Proc. Lane 2001*, pp. 333–338.
10. *Welding Handbook*, Vol. 3, Part 1, Chapter 2: Magnesium and magnesium alloys. VIII ed., Ed.: W.R.Oates, American Welding Society.
11. DITTA MUSTO SRL, Via Molise 26/28, Osteria Grande, Italy ([www.dittamusto.it](http://www.dittamusto.it)).
12. *Verwaerde A., Fabbro R., Deshors G.*: Experimental study of continuous CO<sub>2</sub> laser welding at subatmospheric pressures. *J. Appl. Phys.*, Vol. 78 (5)/1995, pp. 2981–2984.
13. *Stone H.J., Roberts S.M., Reed R.C.*: A Process Model for the Distortions Induced by the Electron-Beam Welding of a Nickel-Based Superalloy. *Metal. Mater. Trans.*, Vol. 30A/2000, pp. 2261–2273.
14. *Czujko T., Przetakiewicz W., Kalita W., Hoffman J.*: Struktura i własności mechaniczne złączy stopów Al-Li wykonanych techniką laserową. *Przegląd Mechaniczny* nr 13-14/1996, ss. 18 - 21.
15. *Steen W. M.*: Laser Material Processing. Springer Verlag 1991.
16. *American Society for Metals Handbook*, vol. 9: Metallography and Microstructures. 9th Edition; Ed.: John Newby, Oct. 1989.