

## WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIE ODLEWNICZYCH STOPÓW Mg-Al

J. PIĄTKOWSKI<sup>1</sup>, F. BINCZYK<sup>2</sup>

Katedra Technologii Stopów Metali i Kompozytów, Politechnika Śląska,  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, POLSKA

### STRESZCZENIE

Magnez i jego stopy, ze względu na niską masę właściwą, dobrą obrabialność, lejnosc i zdolność do nadawania kształtu oraz możliwość pełnego recyklingu, nabierają dzisiaj znaczenia dzięki wymaganiom m.in. przemysłu motoryzacyjnego. Aby wyjść na przeciw tym oczekiwaniom, artykuł stanowi krótką charakterystykę podstawowych właściwości wybranych stopów Mg-Al (rys.1 i 2).

W dalszej części, przedstawiono zastosowanie stopów magnezu oraz ich udział w produkcji tworzyw będących na wyposażeniu samochodów w dniu dzisiejszym i prognozę na przyszłość (tabl.1). W zakończeniu scharakteryzowano podstawowe sposoby odlewania stopów magnezu, ze szczególnym uwzględnieniem odlewania ciśnieniowego.

*Key words: magnesium alloys, strength, use, fusion and casting.*

### 1. WŁAŚCIWOŚCI STOPÓW Mg-Al

Rozwój rynku urządzeń elektronicznych związany ze wzrastającym zapotrzebowaniem na coraz lżejsze pojazdy i ręczne narzędzia, wielokrotnie zwiększyły zapotrzebowanie handlu na odlewy ze stopów Mg oraz zwiększyły wysiłki producentów w obszarze ich badań i rozwoju. Bardzo dobre właściwości odlewnicze i skrawalnicze, wysoka wytrzymałość i sztywność oraz łatwość odzysku sprawiają, że urządzenia zawierające odlewy ze stopów Mg stanowią alternatywne rozwiązanie dla stopów Al, a także dla części z tworzyw sztucznych i kompozytów. Na skutek zastosowania odlewów ze stopów Mg, obniżono koszt produkcji skomplikowanych

---

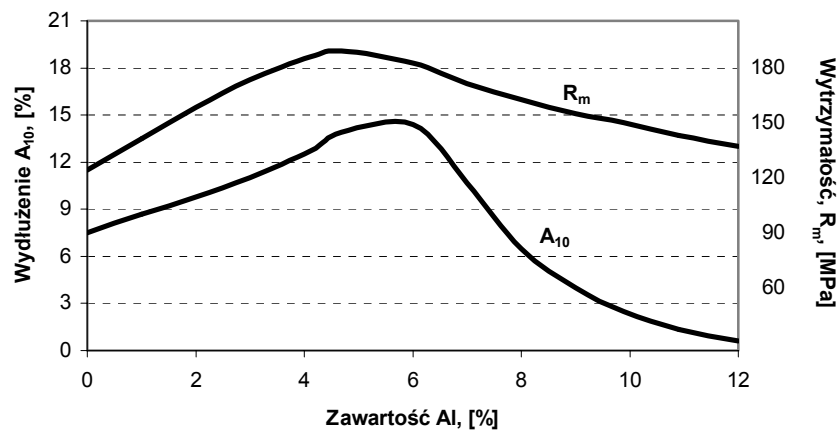
<sup>1</sup> dr inż.

<sup>2</sup> dr hab. inż. prof. Pol. Śl.

części o powtarzalnych wymiarach oraz cienkich ściankach (często poniżej 1,0 cm grubości) bez kosztownych, drugorzędnych operacji. Dzięki temu, stopy na osnowie magnezu od wielu lat znajdują się w centrum zainteresowania wielu ośrodków naukowo-badawczych [1].

Odlewnicze stopy magnezu charakteryzują się małą gęstością ( $\sim 1,74\text{g/cm}^3$ ) (magnez jest lżejszy prawie 5 razy od miedzi, 4,5 razy od żelaza i 1,5 razy lżejszy od aluminium), oraz dobrą lejnością i niskim skurczem. Ponadto, magnez nie jest agresywny w stosunku do form ze stali chromowej, dlatego żywotność form i komór do wtryskiwania jest wyraźnie wydłużona. Ze względu na małą przewodność cieplną magnezu w stosunku do Al, można uzyskiwać odlewy o znacznie cieńszych ściankach. Na uwagę zasługuje również korzystna relacja wytrzymałości do gęstości, odporność na korozję, dobra obrabialność, zdolność do nadawania kształtu, duże zasoby magnezu w wodzie morskiej i wreszcie możliwość pełnego recyklingu.

Ze względu na to, że czysty magnez charakteryzuje się stosunkowo niskimi właściwościami mechanicznymi, stopy magnezu wzbogaca się najczęściej aluminium, cynkiem i manganem. Dodatek aluminium dochodzi do  $\sim 11\%$ , natomiast w przypadku stopów przeznaczonych do przeróbki plastycznej, dodatek ten wynosi  $\sim 9\%$ . Aluminium wpływa korzystnie na właściwości mechaniczne i antykorozyjne stopów magnezu, znacznie poprawia ich plastyczność i moduł sprężystości. Najwyższą wytrzymałość  $R_m$  uzyskuje się po wprowadzeniu do stopu  $\sim 5\%$  Al, a maksymalne wydłużenie uzyskuje stop po wprowadzeniu  $\sim 6\%$  dodatku aluminium. Wpływ aluminium na właściwości wytrzymałościowe stopów Mg-Al przedstawiono na rysunku 1 [2].



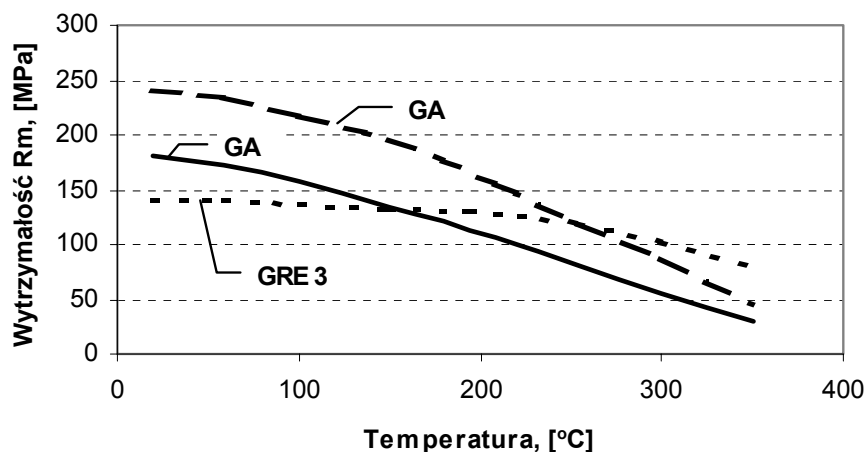
Rys.1. Wpływ dodatku aluminium na wytrzymałość na rozciąganie oraz plastyczność odlewniczych stopów Mg-Al [2]

Fig.1. The influence aluminium alloy on the strength and plasticity of casting Mg-Al alloys [2]

Drugim, co do ilości dodatkiem stopów Mg-Al jest cynk. Powoduje on podwyższenie twardości, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia. Wpływa również na poprawę właściwości odlewniczych, a zwłaszcza leżności. W stopach technicznych, zawartość cynku nie przekracza na ogół ~6%, jednak maksymalny zespół właściwości wytrzymałościowych uzyskuje się po wprowadzeniu ~5% Zn.

Mangan w stopach Mg-Al stosuje się najczęściej w ilościach ~2%. Wpływa on korzystnie na podwyższenie odporności na korozję oraz poprawę właściwości mechanicznych w typowych dla tych stopów warunkach eksploatacji. O wiele większe zastosowanie znalazł mangan w stopach potrójnych Mg-Al-Zn, w których zawartość cynku wynosi do ~0,5%. Stopy te odporne są na pękanie na gorąco, wykazują dobrą skrawalność i spawalność oraz wytrzymałość na zmienne obciążenia. Z tego względu, stopy tej grupy mogą być stosowane na odlewy o dużej masie, pracujące w ciężkich warunkach oraz w bezpośrednim kontakcie z morską wodą do temperatury ~120°C.

Rzadziej, w stopach magnezu stosuje się dodatek krzemu (tylko w stopach odlewniczych) i cyrkonu. Stopy Mg-Al z cyrkonem charakteryzują się wysoką wytrzymałością i plastycznością (wydłużenie może dochodzić nawet do ~20%) [2]. Wieloskładnikowe stopy magnezu z cyrkonem i innymi metalami cechują się dobrą wytrzymałością na zmęczenie w temperaturze otoczenia i w temperaturze podwyższonej (do ~150°C). Cechą znamionową stopów magnezu z cyrkonem jest to, że nie wykazują skłonności do tworzenia mikroporowatości, a właściwości mechaniczne nie ulegają zmianie nawet przy dużych różnicach w grubości ścianek odlewów pracujących w temperaturze do ~150°C [2]. Zmianę właściwości wytrzymałościowych stopów Mg w podwyższonej temperaturze przedstawiono na rysunku 2 [2].



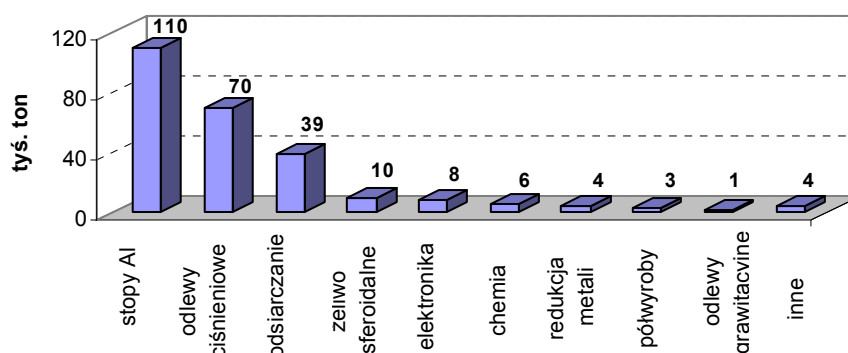
Rys.2. Wpływ temperatury na właściwości wytrzymałościowe ( $R_m$ ) stopów magnezu: GA8 (MgAl8ZnMn), GA3 (MgAl3ZnMn) i GRE3 (MgRE3Zr) [2]

Fig.2. The influence on the mechanical properties magnesium alloys: GA8 (MgAl8ZnMn), GA3 (MgAl3ZnMn) i GRE3 (MgRE3Zr) [2]

## 2. ZASTOSOWANIE STOPÓW Mg-Al

Ze względu na korzystną, wzajemną relację właściwości mechanicznych w stosunku do własności odlewniczych, stopy magnezu uważane są za interesujące tworzywa konstrukcyjne nowej generacji. Takie gałęzie przemysłu jak: transport, przemysł lotniczy, kosmonautyka, aparatura automatyczna i robotyka, a zwłaszcza przemysł motoryzacyjny – wykazują coraz szersze zainteresowanie tymi tworzywami. Stopy magnezu zawierające itr oraz pierwiastki ziem rzadkich mogą być zastosowane w technice budowy samolotów w następnym tysiącleciu [7].

Dobre właściwości mechaniczne, zdolność do tłumienia drgań, odporność na korozję oraz możliwość odzyskiwania powodują, że odlewy ze stopów magnezu są konkurencyjne dla części z tworzyw sztucznych i mogą być ich dobrym zamiennikiem. Dodatkowym atutem stopów magnezu (obok właściwości charakterystycznych dla metali), jest niewielka masa, porównywalna do tworzyw sztucznych termoplastycznych, co zwiększa jeszcze bardziej zastosowanie stopów na bazie magnezu jak np.: pokrywy małych komputerów, zapalniczek, osłon chłodnic samochodowych itd. Zastosowanie magnezu i jego stopów przedstawiono na rysunku 3.

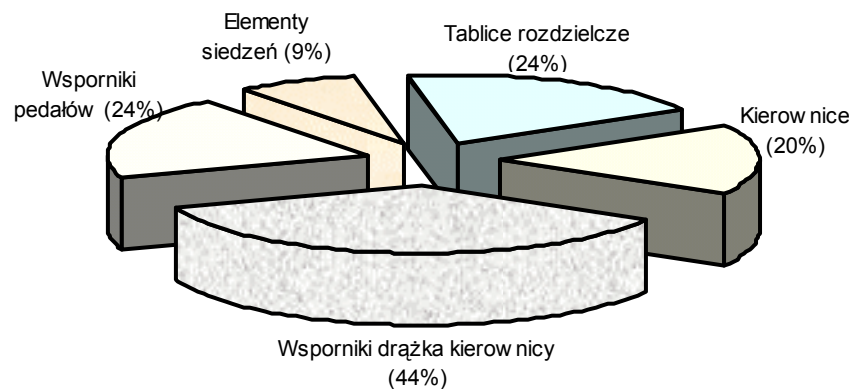


Rys.3. Zastosowanie magnezu i jego stopów [3]  
Fig.3. Use magnesium and magnesium alloys [3]

Z rysunku nr 3 wynika, że główne zastosowanie magnezu to dodatek stopowy do stopów Al, tworzywo na odlewy ciśnieniowe oraz komponent do odsiarczania. Stopy Mg w postaci odlewów ciśnieniowych stosowane są w przemyśle motoryzacyjnym, jako konstrukcje lekkie. Wykonuje się również odlewy warstwowe i kompozyty. Stopy magnezu odlewane ciśnieniowo stosowane są do przekładni silników samochodowych i coraz powszechniej stanowią substytut odlewów ciśnieniowych aluminiowych. Własności te pozwalają na zastosowanie tych stopów tam, gdzie dotychczas zastosowanie stopów magnezu było ograniczone, np. na bloki silników spalinowych,

gdzie można uzyskać duże oszczędności. Ze względu na stabilność właściwości mechanicznych i termofizycznych w podwyższonej temperaturze, oraz ze względu na mały ciężar właściwy ( $1800\div 1830\text{ kg/m}^3$ ), stopy magnezu znajdują coraz szersze zastosowanie w motoryzacji.

Już w latach 60-tych niemieckie i włoskie koncerny motoryzacyjne stosowały odlewy magnezowe. Obecnie zaczęto powszechnie wprowadzać w samochodach odlewy z magnezu. Przykładem może być międzynarodowe konsorcjum „Meridian Technologies” [7] działające w Europie, USA i Kanadzie, które przewiduje produkcję ponad 20 tysięcy ton odlewów dla motoryzacji, głównie poprzez odlewy ciśnieniowe. Takie firmy jak Audi, VW, Porsche i Daimler Benz stosują stopy magnezu m.in. w przekładniach biegowych oraz na elementy karoserii. Zastosowanie stopów magnezu w samochodzie na przykładzie Stanów Zjednoczonych przedstawia rysunek 4 [7].



Rys.4. Procentowy udział zastosowania stopów magnezu w produkcji samochodu w USA [7]

Fig.4. Percentage the use magnesium alloys in the cars to USA [7]

Oprócz amerykańskich firm motoryzacyjnych, również w Europie czołowe zakłady samochodowe korzystają ze stopów magnezu. Firma Audi zastosowała stop magnezu o symbolu AZ91HP (stop o wysokiej czystości i odporności na korozję), jako tworzywo na odlew pięciobiegowej przekładni [4].

Dotychczasowy rozwój stopów magnezu w budowie samochodów był z wielu względów ograniczony. Względę te miały raczej charakter ekonomiczny wynikające z trudności technologicznych. Stąd szereg ważnych producentów samochodów zainwestowało w rozwój technologii topienia oraz odlewania tych stopów. W ciągu najbliższych lat obserwowana będzie ekspansja tego przemysłu w Kanadzie, Izraelu, Rosji, Australii i innych. Produkcja magnezu wzrośnie z 480 tys. ton w 1998 roku do około 895 tys. ton w 2005 roku [5]. Ten rozwój spowoduje gwałtowny wzrost zastosowania ciśnieniowych stopów Mg w motoryzacji. Rosja i Chiny staną się ważnymi dostawcami dla krajów Europy zachodniej.

Zastosowanie symulacji komputerowej do optymalizacji kształtu odlewów ciśnieniowych ze stopów magnezu stanie się dominującą dziedziną nauki i rozwoju. Już dziś trwają badania nad symulacją dla skrzyni transmisyjnej do samochodu Audi, dotychczas wykonywanej ze stopu Al, optymalizacji konstrukcji dla koła ze stopu magnezu dla Volkswagena oraz symulacji krzepnięcia i naprężeń dla czterocyndrowego bloku silnika dla samochodu Audi. Zapotrzebowanie na stopy Mg będzie wzrastać równoległe ze wzrostem zastosowania na stopy Al. Udział poszczególnych materiałów w produkcji samochodów w latach 1990 do 1996 i prognozę na lata 2000 przedstawiono w tabeli 1 [5].

Tabela 1. Rodzaj materiałów stosowanych w produkcji samochodów w latach 1990 do 1996 i prognoza na lata 2000 [5]

Table 1. Kind of applied materials in production of cars in years 1990 to 1996 and prognosis onto years 2000 [5]

Rok	1990		1996	2000	2000	2000
Rodzaj materiału	[kg]	% udział	osiągnięcia [kg]		% udział	w % 1990
Stopy Fe	900	69	600	200	23	-77
Stopy Al	55	5	130	270	31	+390
Tworzywa sztuczne	115	8	170	220	26	+91
Szkło	30	2	15	-	-	-100
Pozostałe	200	16	180	120	14	-40
Stopy Mg	1	-	5	40	6	+3900
Masa razem	1301	100	1100	850	100	-35

Na podstawie danych zawartych w tabeli 1, można stwierdzić, iż przewiduje się swoisty boom zastosowania stopów Al i Mg do produkcji materiałów i tworzyw stosowanych w motoryzacji. Udział stopów Mg ma wzrosnąć prawie 40-krotnie, na rzecz zmniejszenia zastosowania stopów żelaza i szkła. Wprowadzenie tych innowacji w zastosowaniu materiałów użytych do produkcji samochodu doprowadzi prawdopodobnie do 35% zmniejszenia ogólnej masy pojazdu. Dlatego, czołowe koncerny motoryzacyjne (Ford, Audi, VW i General Motors) na całym świecie mają swój udział w rozpoczęciu procesu produkcji czystego magnezu, co sugeruje, że stopy magnezu odgrywać będą decydującą rolę w obniżaniu masy samochodów. Ze wszystkich krajów wysoko rozwiniętych, Stany Zjednoczone i Kanada wykazują największe przyspieszenie w produkcji odlewów ciśnieniowych ze stopów magnezu. Ogólnie stwierdza się, iż zapotrzebowanie producentów pojazdów na stopy magnezu wzrasta o 30% rocznie. Zakład Chryslera przewidywał, że w samochodach zastosowanie magnezu wzrośnie średnio z 3,2 kg na pojazd w 1998 roku do około 5,5 kg na pojazd w 2000 roku [6]. Jednak prognozy te nie w pełni się potwierdziły.

### 3. TOPIENIE I ODLEWANIE STOPÓW MAGNEZU

Najodpowiedniejszą temperaturę odlewania dla danego stopu magnezu można określić jedynie za pomocą metody prób i błędów. Najczęściej temperatura odlewania stopów magnezu mieści się w zakresie od 740 do 780°C w przypadku odlewania do form piaskowych. Natomiast przy wykonywaniu odlewów cienkościennych o skomplikowanych kształtach i rozwiniętych powierzchniach, temperatura zalewania może wynosić do 800°C, jednak nigdy nie powinna przekroczyć 810°C ze względu na gwałtowne utlenianie się magnezu. Podczas odlewania stopów magnezu do kokila, temperatura zalewania nie powinna przekroczyć 700°C (najczęściej od 680 do 740°C), jednak najlepsze efekty uzyskuje się przy podgrzaniu formy metalowej do temperatury ~200°C, co jest uzależnione od masy i kształtu wykonywanych odlewów [2].

Ze względu na trudności technologiczne podczas odlewania stopów magnezu tradycyjnymi technikami odlewniczymi (utlenianie się stopu i możliwość zapłonu), najczęściej stosuje się odlewanie ciśnieniowe w atmosferach ochronnych. Ocenia się, że dotychczasowy stan przemysłowego odlewnictwa ciśnieniowego magnezu nie spełnia wymagań ani optymalizacji topienia ani procesu odlewania. Dlatego w Niemczech zaproponowano proces topienia hermetycznie zamknięty. Przykładem jest pilotowe stanowisko otwarte ostatnio w Instytucie Odlewnictwa przy Uniwersytecie Aachen [7]. Urządzenie to połączone jest z maszyną ciśnieniową zimno komorową Buhlera, której wydajność wynosi 300 kg/h. Stopy magnezu (przede wszystkim AZ91 lub AM60) odlewane ciśnieniowo ograniczają konieczność obróbki skrawaniem, co w połączeniu z niską masą właściwą jest interesującym rozwiązaniem dla motoryzacji. Jednakże warunkiem szerszego zastosowania w przemyśle jest: obniżenie ceny magnezu; optymalizacja procesu produkcji oraz podwyższenie niskiego poziomu doświadczenia technologicznego przy jego wytwarzaniu. Tradycyjne metody odlewania zastąpiono odlewaniem tiksotropowym (proces Tixomag) i reotropowym (proces Gircast). Obie te metody stosuje się do odlewania stopów w postaci półstałej i pół zakrzepłej, zwane potocznie „galareta” [8]. Szczególnie interesująca jest metoda Tixomag, w której „odlewa się” stopy magnezu o temperaturze około 140°C niższej od temperatury topienia i zalewania magnezu [8]. Jest to szczególnie korzystne rozwiązanie techniczne, pozwalające zapobiegać zapalaniu się par magnezu w czasie jego wytapiania, co jest bardzo niebezpieczne dla odlewni i jej pracowników.

Dzięki nowoczesnym rozwiązaniom technicznym i symulacyjnym, za pomocą zintegrowanego bilansowania pozwalającego wypełnić rosnące wymagania technologiczne, ekonomiczne i ekologiczne stawiane wyrobom i procesom produkcyjnym, można dokonać optymalizacji produkcji odlewania ciśnieniowego pod kątem ochrony środowiska i opłacalności. Dokonując analizy wszystkich strumieni surowców i energii, a także związanych z tym kosztów, można ocenić oddziaływanie procesów technologicznych na otoczenie oraz wyznaczyć ich opłacalność, która stanowi bazę dla nowych rozwiązań technicznych i zmian w samych procesach, natomiast optymalizacja procesów daje pogląd na nowe obszary zastosowań i metod ich sterowania.

**LITERATURA**

- [1] Mały Poradnik Mechanika, tom I i II, wydanie 16. WNT Warszawa (1985)
- [2] Adamski Cz., Piwowarczyk T.: Metalurgia i odlewnictwo metali nieżelaznych, część I. Skrypt uczelniany AGH, Kraków (1979)
- [3] Białobrzęski A.: Odlewy ze stopów aluminium i magnezu w zastosowaniu do budowy nowoczesnych maszyn. Przegląd Mechaniczny, zeszyt nr 22, 1998
- [4] Le Gal J.: Potentialite d'emploi du magnesium en automobile. Homm.e.Found, France, 1998 nr 286
- [5] Magnesium metal in greater demand. Foundry Int. 1998, vol. 21, nr 2
- [6] Green light to 100% recycled magnesium. Foundry Tr. J. 1999 vol. 173 nr 3551
- [7] Kahn D.: Innovations for melting and casting Mg. Foundry Tr. J. 1999 vol. 173
- [8] Collot J.: Avenir de l'induction en rheoformage et thixoformage pour l'obtention de pieces industrielles en alliages de magnesium et d'aluminium a l'etat semi-solide. Homm.e.Fond. France, 1998 nr 281

**PROPERTIES AND USES OF  
THE FOUNDRY MAGNESIUM ALLOYS**

**SUMMARY**

Magnesium and his alloys, in view of low proper mass, best steal work, and ability to transmissions of shape as well as possibility of full recycling, meaning thanks gather today requirements among others motor industry. To go out on against these expectations, article makes up short character of basic propriety of choose magnesium alloys (Fig. 1 and Fig. 2).

In further part, uses of alloys of magnesium as well as theirs part were introduced in production of being materials on equipment of cars in today day and prognosis onto future (Table 1). In end basic ways of casting of alloys of magnesium were use, with special regard of pressure casting.

Recenzował Prof. Józef Gawroński