

**NOWE ODLEWNICZE STOPY Mg-Al-RE**T. RZYCHON<sup>1</sup>, A. KIELBUS<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Politechnika Śląska, Katedra Nauki o Materiałach, Katowice, ul. Krasińskiego 8

## STRESZCZENIE

Odlewnicze stopy magnezu Mg-Al-RE są nową grupą stopów przeznaczonych do odlewania ciśnieniowego. Potencjalne zastosowanie tych stopów obejmuje głównie elementy przeznaczone do pracy w temperaturze wyższej od 150°C. W artykule przedstawiono wyniki badań mikrostruktury odlewniczych stopów magnezu AE44 i AE63 metodami mikroskopii świetlnej, skaningowej i rentgenowskiej analizy fazowej. Stwierdzono, że mikrostruktura stopu AE44 charakteryzuje się obecnością roztworu stałego  $\alpha$ -Mg z wydzieleniami faz międzymetalicznych  $Al_{11}RE_3$  i  $Al_3RE$ . Zwiększenie zawartości aluminium, przy równoczesnym zmniejszeniu zawartości pierwiastków ziem rzadkich wpływa na zmniejszenie udziału objętościowego fazy  $Al_3RE$ .

*Keywords: magnesium alloy, AE44, AE63, microstructure, die casting,*

**1. WPROWADZENIE**

Odlewnicze stopy magnezu są atrakcyjnym materiałem konstrukcyjnym ze względu na korzystne właściwości mechaniczne, małą gęstość i dobrą odporność korozyjną. Znajdują coraz szersze zastosowanie obejmujące głównie przemysł lotniczy, samochodowy i aeronautykę. W ostatnich latach obserwuje się duże zainteresowanie stopami posiadającymi zarówno dobre właściwości odlewnicze, umożliwiające wykorzystanie metod odlewania ciśnieniowego, jak i również dobrą odporność na pełzanie do temperatury 200 °C. Do stopów spełniających te wymagania zalicza się stopy z grupy Mg-Al-Sr, Mg-Al-Ca, Mg-Al-Si oraz Mg-Al-RE (Ce, La, Nd). Obecność aluminium zapewnia dobrą leżność oraz umocnienie roztworowe, natomiast pozostałe składniki stopowe tworzą fazy międzymetaliczne z magnezem lub z aluminium

---

<sup>1</sup> mgr inż., [tomasz.rzychon@polsl.pl](mailto:tomasz.rzychon@polsl.pl),

<sup>2</sup> dr inż., [andrzej.kielbus@polsl.pl](mailto:andrzej.kielbus@polsl.pl)

o wysokiej temperaturze topnienia przyczyniając się do poprawy właściwości mechanicznych w podwyższonych temperaturach [1-2].

Pozytywny wpływ pierwiastków ziem rzadkich na odporność na pełzanie stopów magnezu, po raz pierwszy stwierdzono w latach trzydziestych XX wieku, jednak przeszkodą w opracowaniu komercyjnych gatunków był wysoki koszt wytwarzania. Pod koniec ubiegłego stulecia opracowano ekonomiczne metody uzyskiwania pierwiastków ziem rzadkich pozwalające na zredukowanie kosztów. W rezultacie obserwuje się ponowne zainteresowanie stopami Mg-Al-RE [3-4].

Wprowadzenie 2% masowych mieszaniny pierwiastków ziem rzadkich (mischmetal) do stopu magnezu zawierającego około 4% wag. aluminium powoduje podwyższenie temperatury pracy z około 120°C do 150°C. Jest to związane z obecnością w mikrostrukturze faz  $Al_{11}RE_3$  lub  $Al_4RE$ , które charakteryzują się wysoką stabilnością termodynamiczną. Ich utworzenie zapobiega powstawaniu fazy  $Mg_{17}Al_{12}$ , negatywnie wpływającej na odporność na pełzanie stopów magnezu. Powyżej temperatury 150 °C w stopie AE42 (4% Al, 2% RE) obserwuje się nieodwracalną przemianę polegającą na rozpadzie fazy  $Al_{11}RE_3$  ( $Al_4RE$ ) na fazy  $Al_2RE$  i  $Mg_{17}Al_{12}$ . Dodatkowo obserwuje się mikrosegregację aluminium w obrębie ziaren roztworu stałego, w wyniku której, w obszarach przy granicy ziarna występuje silne przesylenie tym składnikiem stopowym. Prowadzi to do wydzielania fazy  $Mg_{17}Al_{12}$  podczas eksploatacji w podwyższonych temperaturach. Dalszy rozwój tych stopów jest zatem związany z poszukiwaniem rozwiązań pozwalających na zwiększenie stabilności fazy  $Al_{11}RE_3$ . Sądzi się, że stosunek La:Nd w mieszaninie RE oraz uzyskanie drobnoziarnistej struktury może opóźnić proces rozpadu tej fazy [6]. Innym sposobem podwyższenia temperatury pracy jest zwiększenie zawartości pierwiastków ziem rzadkich i ograniczenie zawartości aluminium, przy czym ostatnie rozwiązanie jest niekorzystne ze względu na znaczne pogorszenie lejułości [5-7].

## 2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Przedmiotem badań były odlewnicze stopy magnezu AE44 i AE63 przeznaczone do pracy w podwyższonej temperaturze, zawierające aluminium i mieszaninę pierwiastków ziem rzadkich (RE) składającą się z 50 % ceru, 20 ÷ 35 % lantanu, 10 ÷ 20 % neodymu i 4 ÷ 10 % prazeodymu (tzw. „mischmetal”). Skład chemiczny badanych stopów przedstawiono w tabeli 1.

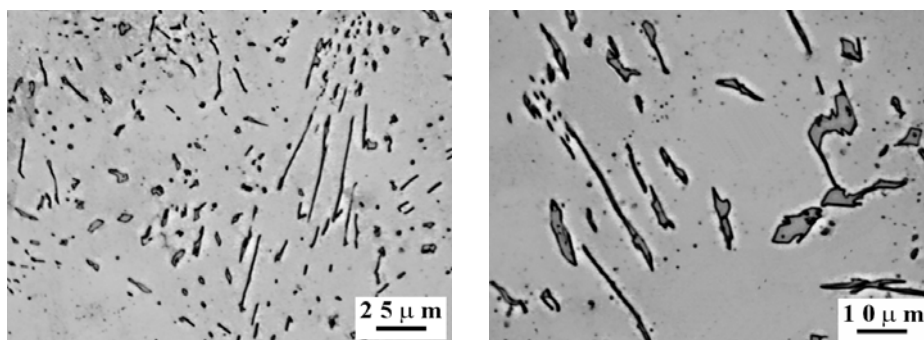
Tabela 1. Skład chemiczny badanych stopów  
Table 1. Chemical composition of investigated alloys

Stop	Stężenie, % wag.			
	Mg	Al	RE	Mn
AE44	reszta	3.98	3.95	0.35
AE63	reszta	5.81	2.75	0.15

Trawienie zglądów metalograficznych przeprowadzono w 5% kwasie octowym (AE44) i w 10% kwasie fluorowodorowym (AE63). Obserwacje mikrostruktur przeprowadzono na mikroskopie świetlnym Reichert MeF2 w polu jasnym. Mikroanalizę składu chemicznego przeprowadzono na mikroskopie skaningowym Hitachi S-3400N ze spektrometrem rentgenowskim Thermo Noran wyposażonym w SYSTEM SIX. Rentgenowską analizę fazową przeprowadzono na dyfraktometrze rentgenowskim JDX-7S firmy JEOL.

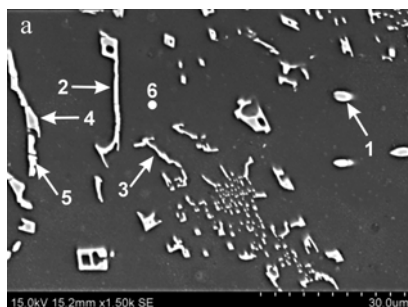
### 3. WYNIKI BADAŃ

Mikrostruktura odlewniczego stopu AE44 składa się z roztworu stałego  $\alpha$ -Mg z wydzieleniami faz międzymetalicznych o zróżnicowanej morfologii (rys. 1). Analiza składu chemicznego wykazała obecność faz bogatych w pierwiastki ziem rzadkich, głównie w cer. Biorąc pod uwagę stosunek Al/RE (około 4) można przypuszczać, że w strukturze znajduje się faza  $Al_4RE$  (rys. 2), przedstawiana także jako faza  $Al_{11}RE_3$  [7]. Charakteryzuje się ona rombowym typem sieci krystalicznej o następujących parametrach komórki elementarnej  $a = 0,4395$  nm,  $b = 1,3025$  nm,  $c = 1.092$  nm.



Rys. 1. Mikrostruktury odlewniczego stopu magnezu AE44  
Fig. 1. Microstructures of cast AE44 magnesium alloy

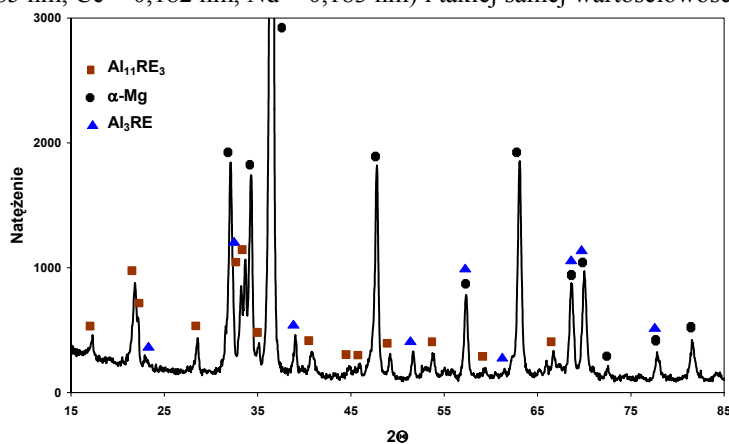
Fazy o zwiększonej zawartości neodymu (pkt 2 i 5 na rys. 2a) charakteryzują się również wyższym stężeniem aluminium i zmniejszonym stosunkiem Al/RE do ok. 3, co może wskazywać na obecność fazy  $Al_3RE$ . Zaobserwowano związek pomiędzy morfologią a składem chemicznym wydzieleni nie zawierających neodymu. Iglaste wydzielenia charakteryzują się wyższym stosunkiem lantanu do ceru (około 0,5) (pkt 3, rys., 2), podczas gdy w wydzieleniach płytkowych (pkt 4) i globularnych (pkt 1) wartość tego stosunku jest niższa (odpowiednio około 0,4 i 0,1). Analiza składu chemicznego roztworu stałego wykazała brak przesylenia pierwiastkami stopowymi (pkt 6).



Punkt	Stężenie, % at.				
	Mg	Al	La	Ce	Nd
Punkt 1	11.12	71.26	2.08	15.54	
Punkt 2	32.63	49.27	3.19	11.91	2.99
Punkt 3	28.47	57.99	4.53	9.01	
Punkt 4	38.93	49.24	3.51	8.31	
Punkt 5	11.75	64.00	4.55	16.17	3.53
Punkt 6	100				
Punkt 7	6.47	54.81		5.47	

Rys. 2. Mikrostruktury SEM i wyniki mikroanalizy składu chemicznego stopu AE44  
 Fig. 2. SEM microstructures and results of the chemical composition of the AE44 alloy

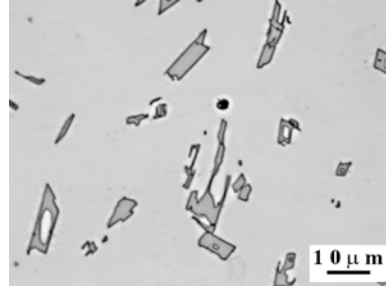
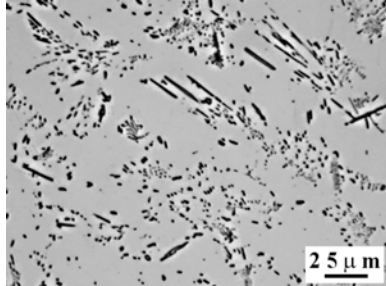
Na podstawie rentgenowskiej analizy fazowej stwierdzono, że fazy międzymetaliczne występujące w stopie AE44 (rys. 3) są fazami typu  $Al_{11}RE_3$  ( $Al_4RE$ ) oraz  $Al_3RE$ , w których atomy Ce, La i Nd zajmują wymienne pozycje w węzłach sieci krystalicznej. Wynika to ze zbliżonych wartości promieni atomowych tych pierwiastków (La = 0,185 nm, Ce = 0,182 nm, Nd = 0,183 nm) i takiej samej wartościowości.



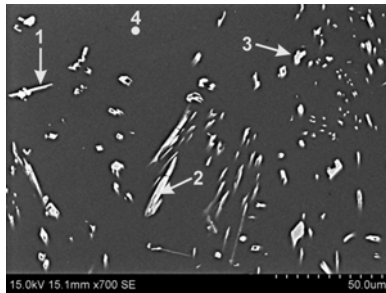
Rys. 3. Rentgenogram odlewniczego stopu magnezu AE44  
 Fig. 3. XRD pattern of the cast AE44 magnesium alloy

Mikrostruktura odlewniczego stopu AE63, podobnie jak w stopie AE44, złożona jest z roztworu stałego  $\alpha$ -Mg i z wydzielen fazy międzymetalicznych o zróżnicowanym kształcie (rys. 4). Morfologia wydzielen może sugerować obecność eutektyki wyspowej częściowo rozdzielonej, wzrastającej przy stosunkowo niedużych przechłodzeniach.

Wyniki mikroanalizy składu chemicznego wskazują na obecność fazy  $Al_{11}RE_3$  ( $Al_4RE$ ) (pkt 2, rys. 5). W przeciwieństwie do stopu AE44 nie stwierdzono obecności pozostałych pierwiastków stopowych (La, Nd) wchodzących w skład mieszaniny pierwiastków ziem rzadkich. Rentgenowska analiza fazowa wykazała obecność dwóch faz:  $\alpha$ -Mg i  $Al_{11}RE_3$  (rys. 6).

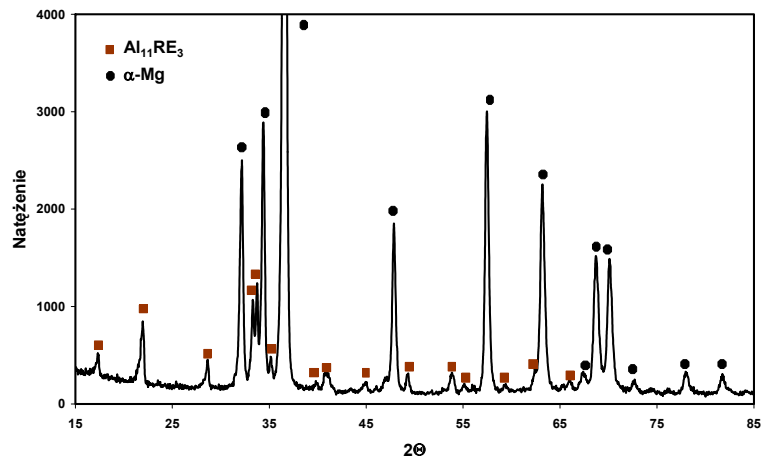


Rys. 4. Mikrostruktury odlewniczego stopu magnezu AE63  
 Fig. 4. Microstructures of cast AE63 magnesium alloy



Lp.	Stężenie, % at.		
	Mg	Al	Ce
Punkt 1	45.32	49.05	5.63
Punkt 2	33.55	51.93	14.52
Punkt 3	46.77	49.18	4.05
Punkt 4	98.59	1.41	

Rys. 5. Mikrostruktura odlewniczego stopu magnezu AE63, SEM  
 Fig. 5. Microstructure of the cast AE63 magnesium alloy, SEM



Rys. 6. Rentgenogram odlewniczego stopu magnezu AE63  
 Fig. 6. XRD pattern of the cast AE63 magnesium alloy

#### 4. PODSUMOWANIE

Stop AE63 charakteryzuje się dwufazową mikrostrukturą składającą się z przesyconego roztworu stałego  $\alpha$ -Mg i wydzielen fazy  $Al_{11}RE_3$ , zawierającej Ce i La. Zmniejszenie zawartości aluminium i zwiększenie stężenia pierwiastków ziem rzadkich powoduje dodatkowo pojawienie się w strukturze fazy  $Al_3RE$  (stop AE44), posiadającej oprócz ceru i lantanu także neodym. Ponadto w stopie AE44 obserwuje się cząstki o dużej zawartości manganu i brak przesyconia roztworu stałego pierwiastkami stopowymi. Morfologia wydzielen zależy od wzajemnego stosunku La/Ce. Wbudowywanie się atomów lantanu w sieć krystaliczną fazy  $Al_{11}RE_3$  prowadzi do ukształtowania wydzielen o iglastej morfologii.

#### PODZIĘKOWANIA

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy zamawiany PBZ-KBN-114/T08/2004.

#### LITERATURA

- [1] Luo A.A.: International Materials Review, Vol. 49, No. 1, 2004.
- [2] Pekguleryuz M., Baril E.: Materials Transactions, Vol. 42, No. 7 (2001) s. 1258-1267.
- [3] Saddock N. D., Suzuki A. Wu K., et al.: Magnesium Technology 2005, Edited by N.R. Neelameggham, H.I. Kaplan and B.R. Powell, TMS, 2005, s. 121-126.
- [4] Bakke P., Westengen H.: Magnesium Technology 2005, Edited by N.R. Neelameggham, H.I. Kaplan and B.R. Powell, TMS, 2005, s. 291-296.
- [5] Powell B. R., Rezhets V., Balogh M. P., Waldo R. A.: JOM 51 (8), 2002, pp. 34-38
- [6] Baril E., Labelle P., Pekguleryuz M. O.: JOM 61 (11), 2003, pp. 34-39.
- [7] Yizhen Lü, et al.: Materials Science and Engineering, A278, 2000, s. 66-76

#### THE NEW CAST Mg-Al-RE MAGNESIUM ALLOYS

##### Summary

Cast AE44 and AE63 magnesium alloys are the new group for use to die casting. Potential application these alloys consists mainly elements, which can work at elevated temperature above 150 °C. In this paper are presented results of microstructural examinations of magnesium alloys. The microstructure of these alloy was investigated by using light microscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. Microstructure of the AE44 alloy consisted of primary  $\alpha$ -Mg grains and precipitations of  $Al_{11}RE_3$  and  $Al_3RE$  phases. The increase aluminum content and decrease rare earths elements lead to microstructure consisted supersaturation  $\alpha$ -Mg and precipitations  $Al_{11}RE_3$  phase.

Recenzował: Prof. Jan Cwajna