

Basınçlı Döküm Yöntemiyle Üretilmiş Mg-Cu Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Güven YARKADAŞ¹, Hüseyin ŞEVİK^{1*}

¹ Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh, Mersin Türkiye

e-posta¹: guvenyarkadas@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2065-412X>

Sorumlu yazar e-posta¹: sevik@mersin.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4592-2768>

Geliş Tarihi: 08.06.2022

Kabul Tarihi: 02.03.2023

Öz

Bu çalışmada, saf magnezyum metaline farklı ağırlık oranlarında bakır (%1, 2 ve 4) ilaveli alaşımlar kontrollü atmosfer ortamında soğuk kamaralı basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen alaşımların mikro yapı çalışmaları, için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. SEM görüntülerinde saf magnezyuma Cu ilavesi ile tane sınırlarında Mg₂Cu intermetalikliği olduğu gözlenmiştir. Sertlik ve akma mukavemeti değerlerinin bakır oranı arttıkça yükseldiği, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin ise ağırlıkça %2 Cu değerine kadar arttığı %4 bakır ilavesinde ise bu değerlerin bir miktar düştüğü tespit edilmiştir. Farklı sıcaklık ve gerilim değerlerinde yapılan sürünme testleri sonucu bakır ilavesinin artması ile sürünme direncinin arttığı elde edilen "n" ve "Q" değerlerinden sürünme mekanizmasının dislokasyon tırmanması olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Magnezyum alaşımları;
Bakır; Mekanik özellikler; Sürünme

Investigation of Mechanical Properties of Mg-Cu alloys produced by pressure die casting method

Abstract

In this study, the addition of different amount of copper (1, 2 and 4wt.%) to pure magnesium were produced by high pressure die casting under controlled atmosphere. The scanning electron microscope (SEM) was used for microstructural analysis and hardness and tensile testing machine were used for determining mechanical properties. Mg₂Cu inter metallic phase were observed through the grain boundaries on the SEM microstructural analysis. While the hardness and yield strength increased with increasing of the addition of Cu alloying element, the tensile strength and elongation raised until the addition of 2wt.% Cu and then slightly decreased. As a result of the creep tests performed at different temperature and stress, it was observed that the creep resistance increased with the increase of copper addition, and from the obtained "n" and "Q" values, it was determined that the creep mechanism was dislocation climbing.

Keywords

Magnesium alloys;
Copper; Mechanical properties; Creep.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

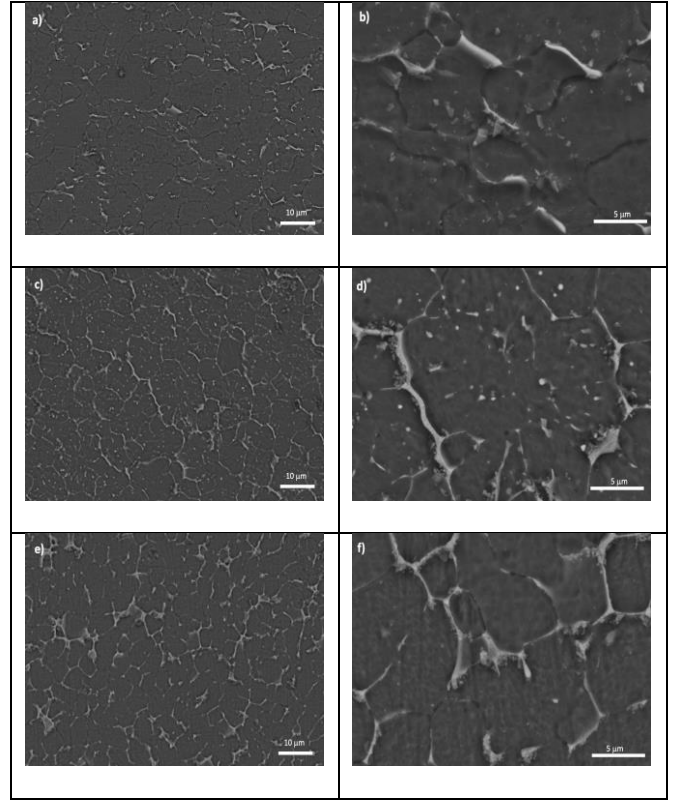
Malzeme bilimi araştırmacılarının en önemli motivasyonlarından birisi mevcut sistemlerde kullanılan malzemelerle aynı işi yapacak daha hafif malzemeler geliştirmektir. Özellikle havacılık, savunma ve otomotiv sektörü söz konusu olduğunda magnezyum alaşımları son zamanlarda üzerinde en çok durulan malzemelerdendir (Akgün,

2018; Gökçe, 2020; Demir, 2019; Mayyas, 2012; Blawert, 2004; Pekgülyüz 2003). Kitlesel üretimi çelikten sonra başlayan alüminyum alaşımları zaman içerisinde geliştirilerek özellikle havacılık ve mobil uygulamalarda önemli oranda çeliğin yerini almıştır, magnezyum alaşımlarının geliştirilmesi ile de magnezyum çelik ve alüminyum alaşımlarının yerine kullanılma potansiyeli doğmuştur. Magnezyum çelikten %77 alüminyumdan ise %33 daha hafiftir. Spesifik mukavemeti ise bu üçü

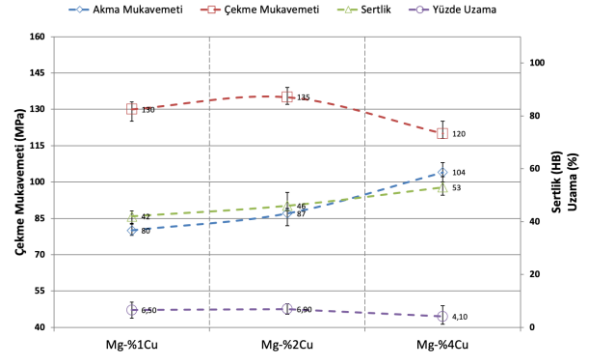
Üretilen alaşımların makro sertlik deneyleri Brinell sertlik (HB) skalasında Brooks marka sertlik cihazı (31.25/2.5/30) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşım örneğinin sertliği okunan on değer ortalaması şeklinde alınmıştır. Üretilen alaşımların çekme ve sürünme deneyleri 10 KN'luk RAAGEN marka çekme cihazında yapılmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında ve çekme hızı 0.2 mm/min olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin hesaplanması için 4 adet numune kullanılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması sonuç olarak kabul edilmiştir. Sürünme deneyleri 10 KN'luk sürünme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney koşulları 30-40 ve 50 MPa gerilme değerleri ve 150, 175 ve 200°C sıcaklık olarak belirlenmiştir. Her bir deney şartı 4 defa tekrarlanarak ortalaması alınmıştır.

3. Bulgular

Mg-Cu ikili denge diyagramı göz önüne alındığı zaman, Mg içerisinde oda sıcaklığında bakır çözünürlüğünün olmadığı görülmekte, bu nedenle Mg-Cu ikili alaşımları Mg_2Cu intermetalığı içermektedir (ASM Handbook). Mg-1Cu, Mg-2Cu ve Mg-4Cu alaşımlarının mikroyapı görüntüsü Şekil 2(a-f)'de görülmektedir. Şekil 2'den görüldüğü gibi, saf magnezyuma Cu ilavesi ile tane sınırlarında Mg_2Cu intermetalığı oluşmuştur. Ağırlıkça %2 Cu ilavesiyle Mg_2Cu intermetalığı bazı yerlerde tane sınırları boyunca oluştuğu görülmektedir. Ağırlıkça %4 Cu ilavesinde ise ilave olarak Mg_2Cu intermetalığının levhasal bir şekilde de oluştuğu görülmektedir (Şekil 2(e)). Ayrıca basınçlı döküm yöntemiyle üretilen alaşımların tane boyutları kendi içerisinde farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada da her üç alaşımın mikroyapısında bazı yerlerinde daha büyük tanelerin varlığına rastlanmıştır.



Şekil 2. a-b) Mg-%1Cu, c-d)Mg-%2Cu ve e-f) Mg-%4Cu alaşımlarının SEM görüntüsü.



Şekil 3. Alaşımların sertlik, akma, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri

Bakır ilaveli alaşımların sertlik, akma ve çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri Şekil 3'de görülmektedir. Mg-%1Cu, Mg-%2Cu ve Mg-%4Cu alaşımlarının sertlik değeri 42, 46 ve 53 Brinell olarak bulunmuştur. Akma mukavemeti değerleri sırasıyla 80, 87, 104 MPa, çekme mukavemeti ise 130, 135 ve 120MPa olarak bulunmuştur. Yüzde uzama ise %6.5, 6.9 ve 4,1 olarak tespit edilmiştir. Ağırlıkça %2Cu ilavesiyle çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinde artış gözlenmiş fakat daha fazla bakır

ilavesi ile her iki değerinde düştüğü gözlenmiştir. Tan ve ark. yapmış olduğu çalışmada Mg alaşımına ağırlıkça %2.5 Cu ilavesi gerçekleştirmiş ve çekme mukavemeti değerini 145 MPa, yüzde uzama değerini de %8.1 olarak rapor etmiştir (Tan 2021).

Bakır ilavesi ile sertlik ve akma mukavemetinin artışının ana nedenleri tane boyutundaki azalma ve tane sınırında ikincil intermetalik miktarının artışı olarak değerlendirilebilir. Tane boyutunun azalmasıyla tane sınırları artmış ve dislokasyon hareketlerini kısıtlamıştır. Ayrıca mevcut intermetalik miktarının artması da dislokasyon hareketlerini engelleyici görev görmüştür. Fakat ağırlıkça %4 Cu ilavesi ile ikincil intermetalik morfolojisinin levha yapısına dönüşmesi ve tane sınırları boyunca kesintisiz oluşması çatlak oluşumu ve ilerlemesinde baskın rol oynamış ve bu durumun hem çekme mukavemeti hem de yüzde uzama değerlerinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 3.1. 50MPa ve farklı sıcaklıklarda ((a) 150°C, (b) 175°C ve (c) 200°C) Mg-xCu alaşımların sürünme deney sonuçları.

(a) 150°C	Mg-%1Cu	Mg-%2Cu	Mg-%4Cu
Sürünme hızı (1/Saniye)	6.4x10 ⁻⁵	1.3x10 ⁻⁵	0.8x10 ⁻⁵
Kırılma zamanı (saat)	47.9	83.1	143.5
(b) 175°C			
Sürünme hızı (1/Saniye)	2.3x10 ⁻³	0.84x10 ⁻³	6.4x10 ⁻⁴
Kırılma zamanı (saat)	32.23	49.37	87.3
(c) 200°C			
Sürünme hızı (1/Saniye)	2,15x10 ⁻²	6.47x10 ⁻³	2.11x10 ⁻³
Kırılma zamanı (saat)	0.37	2.65	8.12

Bakır ilaveli Mg alaşımına farklı sıcaklık ve 50 MPa sabit gerilmeye yapılan sürünme deneyi sonucu elde edilen sürünme hızı ve kırılma zamanı verileri tablo 3.1'de gösterilmektedir. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi Mg-%1Cu alaşımının 150°C sıcaklıkta

sürünme hızı 6.4×10^{-5} (s⁻¹) ve kırılma zamanı 47.9 saat olarak bulunmuştur. Mg-%2Cu ve Mg-%4Cu alaşımları için ise sürünme hızı sırasıyla 1.3×10^{-5} ve 0.8×10^{-5} , kırılma zamanı ise 83.1 ve 143.5 saat olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerlerden görüldüğü üzere, bakır ilavesi ile sürünme direncinde iyileşme görülmüştür. Benzer sonuçlar 175°C ve 200°C sıcaklık ve 30MPa gerilim altında da elde edilmiştir.

Literatür incelendiği zaman sürünme mekanizmalarından difüzyon sürünmesi genel olarak magnezyum alaşımlarında görülen bir mekanizma değildir. Buna karşın, esas öneme sahip olan dislokasyon sürünmesi ve tane sınırı kaymasıdır (Pekgülyüz 2013; Luo 2004)

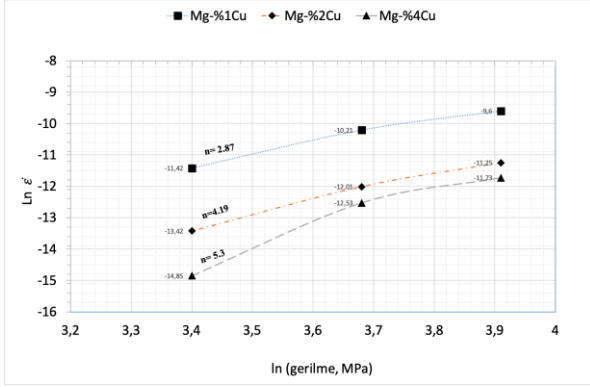
Tane sınırı kayması yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarının kısmi ergimesi veya yumuşaması ile ilişkilidir. Bu durum sınır fazlarının düşük ısı direncinden ve sınır alanlara yakın dağılmış veya karmaşık oluşlarından ve yerel çözünen/çökelti bileşenleri ve dislokasyonlardan dolayı meydana gelir. Tane sınırı kayması esnasında, taneler birbiri üzerinde herhangi bir deformasyon oluşturmadan kayarlar. Tane sınırı kayması alüminyum içeren magnezyum döküm alaşımlarının düşük sürünme direnci için ana sorun olarak görülür.

Dislokasyonlar malzemenin plastik deformasyonuna neden olur. Dislokasyon genel olarak oda sıcaklığında malzeme içerisindeki çeşitli bariyerlerin (çökeltiler, tane sınırları, diğer dislokasyonlar gibi) önünde birikerek deformasyon sertleşmesine neden olurlarken, yüksek sıcaklıklarda, dislokasyonlar bu bariyerleri dislokasyon tırmanması ana mekanizması vasıtasıyla aşarlar.

Yüksek gerilme (20-100MPa) ve sıcaklık(100-250°C) değerlerinde Mg alaşımlarının sürünme hızı ($\dot{\epsilon}$) aşağıdaki Arrhenius denklemi ile tanımlanır. Aktivasyon enerjisi "Q" sabit gerilmeye $\ln(\dot{\epsilon})$ 'e karşı $1/T$ eğrisi ile hesaplanır.

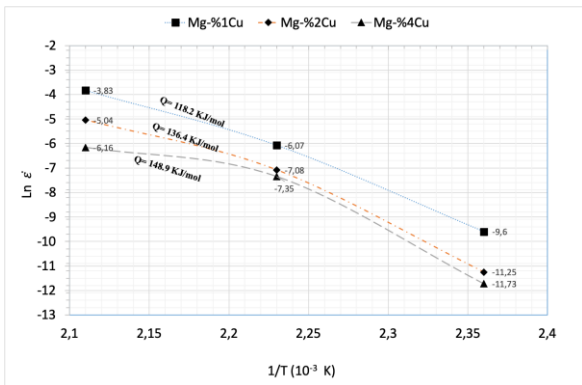
$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

Burada A malzeme sabiti, Q sürünme için aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti (8.314 J/mol.K⁻¹), T mutlak sıcaklık ve “n” gerilime üssü olarak tanımlanır[5].



Şekil 4. 150°C sıcaklıkta için Mg-xCu alaşımlarının ln (ε) ‘e karşı 1/T eğrisi. (Plot of ln ε vs. ln σ for determining the stress exponent for the Mg-xCu alloys at 150°C.)

Şekil 4. 150°C sıcaklıkta deneysel alaşımların “n” değerini hesaplamak için ln (ε) ‘e karşı 1/T eğrisini göstermektedir. Şekil 4’den elde edilen “n” değerleri Mg-%1Cu, Mg-%2Cu ve Mg-%4Cu alaşımları için sırasıyla 2.87, 4.19 ve 5.3 olarak bulunmuştur. Şekil 5’de 30 MPa gerilme altında farklı sıcaklıklarda (150, 175 ve 200°C) deneysel alaşımların Arrhenius eğrileri görülmektedir. Arrhenius eğrileri kullanılarak Mg-%1Cu, Mg-%2 Cu ve Mg-%4Cu alaşımları için hesaplanan aktivasyon enerjileri sırasıyla 118.2, 136.4 ve 148.9 kJ/mol’dür.



Şekil 5. 50 MPa gerilme altında farklı sıcaklıklarda (150, 175 ve 200°C) Mg-xCu alaşımlarının Arrhenius eğrileri.

Arrhenius curves of Mg-xCu alloys at different temperatures (150, 175 and 200°C) under 50 MPa stress.

Şekil 5.’de görüldüğü gibi, Mg-%1Cu alaşımı için elde edilen aktivasyon enerji değeri (50 MPa/150-200°C şartlarında) yayınım sürünmesi (pipe difüzyon(92kJ/mol)) veya cross slip (100kJ/mol) ve magnezyum latis self-difüzyon (135 kJ/mol) değerleri arasında bulunmuştur. Bakır ilavesinin artması ile aktivasyon enerjisi değerleri ise her iki mekanizmadan daha yüksek bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatür ile uyumlu olmak ile beraber artan bakır ilavesi ile etkin sürünme mekanizmasını belirlemek bir miktar güçlük oluşturmaktadır (Pekgülyüz 2003; Luo 2004; Nami 2010; Zhang 2017). Çünkü genel olarak yüksek gerilim üssü (6 ve daha üstü) power-law breakdown(güç kanunu) rejimini baskın kılar (Mo 2018) fakat bakır ilaveli Mg alaşımlarından elde edilen gerilim üssü değerleri “6” değerinden daha küçüktür. Buna karşın aktivasyon enerjileri self difüzyon değerinden yüksektir. Yongqing ve ark. yapmış oldukları çalışmada Mg-5Sn alaşımına ağırlıkça %1 Cu ilave etmişler ve 175°C sıcaklıkta 35-75 MPa gerilim aralığında gerçekleştirdikleri sürünme deneyleri sonucunda gerilim üssünü 2.92 olarak bulmuşlardır. Yongqing ve ark. elde ettiği sonuçlar neticesinde baskın sürünme mekanizmasını dislokasyon tırmanması ve tane sınırı kayması olarak rapor etmişlerdir. Sonuç olarak, bu çalışma da bakır ilaveli Mg alaşımlarının sürünme özelliklerinde etkin mekanizma muhtemelen dislokasyon tırmanması olarak tanımlanabilir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada saf magnezyum metaline farklı ağırlık oranlarında bakır ilave edilmiş ve çeşitli Mg-Cu alaşımları soğuk kamaralı basıncılı döküm ile üretilmiştir. Elde edilen alaşımlara mikroyapı analizi ve mekanik testler uygulanmıştır. Sonuç olarak, saf magnezyum metaline Cu ilavesi ile tane sınırlarında Mg₂Cu intermetalığının oluştuğu gözlenmiştir. Bakır ilavesi magnezyum metalinin sertlik ve akma mukavemetini iyileştirirken ağırlıkça %2 Cu

ilavesinden sonra hem çekme mukavemeti hem de yüzde uzama değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Sürünme direncinin ise bakır ilavesi artması ile iyileştiği gözlenmiştir.

5. Kaynaklar

- ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams v.3, pp. 305-1108, 1999.
- Akgün M., Demir H., Çiftçi İ., 2018. Mg₂Si partikül takviyeli magnezyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, **21**, 645-650.
- Baghani A., Khalilpour H., Miresmaeili S., 2020. Microstructural evolution and creep properties of Mg-4Sn alloys by addition of calcium up to 4 wt.%. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **30**, 896-904.
- Blawert C., Hort N, Kainer K. U., 2004. Automotive applications of magnesium and its alloys. *Transactions Indian Institute Metal*, **57**, 397-408.
- Demir İ. D. K., Uygur İ., AZ63 Magnezyum Alaşımının Korozyon Direncine Kriyojenik İşlemin Etkisi. *Journal of Advanced Technology Science*, **8**, 1-8, 2019.
- Friedrich H, Schumann S, 2001. Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology*, **117** (3): 276-281, 2001.
- Gökçe A., 2020. Toz Metalurjisi Yöntemiyle Mg-Sn Alaşımı Üretimi ve Karakterizasyonu. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, **8**, 112-119.
- Jiang Z. , Jiang B. , Zeng Y., Dai J. , Pan F., 2015. Role of Al modification on the microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-6Ce alloys. *Materials Science and Engineering A*, **645**, 57-64.
- Mayyas A., Qattawi A., Omar M., Shan D., 2012. Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 1845-1862.
- Malik K. N. B., 2017. Effect of high-pressure die casting on casting on structure and properties of Mg-5Al-0.4Mn-xRE (x=1, 3 and 5 wt.%) experimental alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **694**, 841-847.
- Khalilpour H., Miresmaeili S., Baghani A., 2016. The microstructure and impression creep behavior of cast Mg-4Sn-4Ca alloy. *Materials Science and Engineering A*, **652**, 365-369.
- Liu H., Chen Y., Tang Y., Wei S., Niu G., 2007. The microstructure, tensile properties and creep behaviour of as-cast Mg-(1-10)%Sn alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **440**, 122-126.
- Li S., Tang B., Zeng D., 2007. Effects and mechanism of Ca on refinement of AZ91D alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **437**, 317-327.
- Luo, A.A. 2004. Recent magnesium alloy development for elevated temperature applications. *International Materials Review*, **49**, 13-40.
- Mo, N., Tan, Q., Bermingham, M., Huang, Y., Dieringa, H., Hort, N., Zhang, M., 2018. Current development of creep-resistant magnesium cast alloys: A review. *Materials and Designs* **155**, 422-442.
- Nami, B., Razavi, H., Mirdamadi, S., Shabestari, S.G., Miresmaeili, S. M. 2010. Effect of Ca and Rare Earth Elements on Impression Creep Properties of AZ91 Magnesium Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **41**, 1973-82.
- Pekguleryuz M. O. , Kaya A., 2003. Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced Engineering Materials*, **12**, 866-878.
- Pekguleryuz, M. Kainer K., Kaya A. (Eds.). 2013. Fundamentals of Magnesium alloys Metallurgy, Woodhead Publishing, Cambridge, sayfa: 173, 301-302, 317, 322.
- Poddar P., Sahoo K., Mukherjee S., Ray A., 2012. Creep behaviour of Mg-8%Sn and Mg-8%Sn-3%Al-1%Si alloys. *Materials Science and Engineering A*, **545**, 103-110.
- Sun S. H., Sun B. Z., 2018. Investigation of structure, morphology and orientation of precipitates in Mg-Bi alloy. *Materials Characterization*, **140**, 129-133.
- Tan W. , Li T., Li S. , Fang D. , Ding X. , Sun J., 2021. High strength-ductility and rapid degradation rate of as-

cast Mg-Cu-Al alloys for application in fracturing balls. *Journal of Materials Science and Technology*, **94**, 22-33.

Yongqing T., Yungui C., Sufen X., Wucheng D., Chunming W., Xia L., 2014. Microstructure, mechanical properties and compressive creep behavior of as-cast Mg-5Sn-(0-2)Cu alloys. *Rare Metal Materials and Engineering*, **43**, 1291-1295.

Zhu S. M., Gibson M. A. , Nie J. F., Easton M. A. , Abbott T. B, 2008. Microstructural analysis of the creep resistance of die-cast Mg-4Al-2RE alloy. *Scripta Materials*, **58**, 477-480.

Zhang J., Leng Z. , Zhang M. , Meng J. , Wu R. , 2011. Effect of Ce on microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of high-pressure-die-cast Mg-4Al-based alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 1069-1078.

Zhang D., Bu F., Li X., Guan K. 2017. Effects of minor Sr addition on the microstructure, mechanical properties and creep behaviour of high pressure die casting AZ91-0.5RE based alloy. *Materials Science and Engineering A*, **693**, 53-59.