

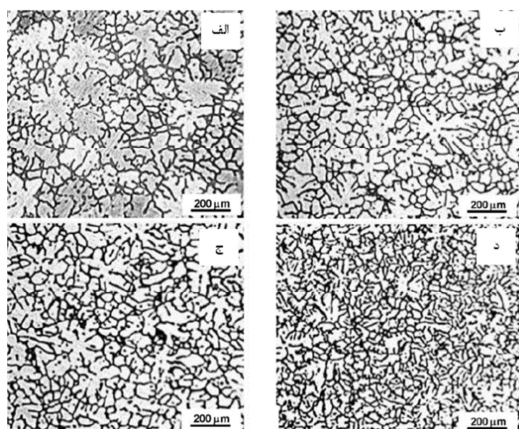
$$\varepsilon^{\circ} = \frac{V_s}{d} \approx \frac{V_s}{a}, \quad \sigma_i = 3\sigma_t$$

در رابطه (۲)، d عمق منطقه پلاستیک در زیر فرورونده می‌باشد که با استفاده از روش‌های متالوگرافی تعیین شده است که به صورت تقریبی با قطر فرورونده برابر می‌باشد. ضریب ۳ در معادله دوم برای مواد همسان‌گرد مانند منیزیم می‌باشد، برای سایر مواد این ضریب ۴-۳/۵ است [۲۱].

۲- تاثیر عناصر آلیاژی: ریزساختار و خواص خزشی

۲-۱- آلیاژ Mg-6Zn-3Cu-XRE

گلمکانیون و همکاران اثر ۱-۲-۳ درصد وزنی عناصر نادر خاکی بر ریزساختار و مقاومت خزشی آلیاژ ZC63 توسط تست خزش فرورونده در بازه دمایی ۴۲۳-۴۹۸ K تحت تنش ۷۰۰-۱۵۰ MPa طی زمان ۳۶۰۰۰ ثانیه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت خزشی آلیاژ پایه به طور قابل ملاحظه‌ای با اضافه کردن عناصر نادر خاکی بهبود می‌یابد که به ریزدانه‌شدن توسط عناصر نادر خاکی و تشکیل ترکیبات با پایداری حرارتی بالای Mg-12 RE و MgRE و Cu-2 RE می‌شود. این ترکیبات موجب استحکام‌دهی در مرزدهانه‌ها و زمینه، هنگام تغییر شکل می‌شود. تاثیر عناصر نادر خاکی بر ریزدانه‌ها ساختار را در تصاویر میکروسکوپ نوری زیر مشاهده می‌شود [۲۵].

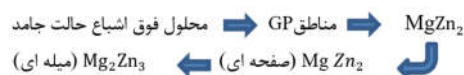


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری (الف) ZC63 1%RE (ب) ZC63 2%RE (ج) ZC63 3%RE (د) ZC63 4%RE [۲۵].

اتم‌های عناصر نادر خاکی علاوه بر این که موجب افزایش تعداد جواره‌ها می‌گردد با حل شدن در زمینه موجب شکل‌گیری ذرات Mg-RE می‌شود که به عنوان جواره‌زای فاز یوتکتیک عمل کرده و موجب افزایش کسر حجمی این فاز می‌شود.

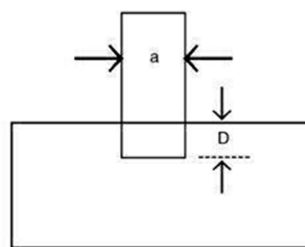
همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش عناصر نادر خاکی مورفولوژی فاز یوتکتیک به حالت توده‌ای بی‌نظم تغییر می‌یابد و همچنین ذرات بی‌نظم کروی پراکنده MgRE به عنوان ذرات پایدار در کنار دانه‌بندی مشاهده می‌شود. برای ارزیابی بهتر اثر عناصر نادر خاکی بر مقاومت خزشی آلیاژ ZC63 نمودارهای خزش ۴ عنصر را در بازه دمایی ۴۲۳-۴۹۸ K تحت تنش نرماله شده ثابت ۰/۰۳۹ $< \frac{\sigma_{imp}}{G}$ ۰/۰۲ بررسی شد [۲۵].

آلیاژهای منیزیم با هدف توسعه پایداری ساختار در دمای بالا مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند [۱۰-۱۲]. سیستم آلیاژی Mg-Zn به علت دارا بودن قابلیت رسوب سخت شوندگی توسط عملیات پیرسازی از اهمیت زیادی برخوردار است [۱۳، ۱۴]. در این آلیاژها عنصر روی در مقایسه با آلومینیوم استحکام محلول جامد بیشتری ایجاد می‌کند اما حلالیت آن کمتر است [۱۵، ۱۶]. براساس دیاگرام فازی Mg-Zn، مراحل رسوب‌گذاری در این سیستم به شرح زیر است [۱۷، ۱۸]:



۲-۱- آزمون خزش فرورونده

در آزمون خزش فرورونده از یک فرورونده با شکل‌های مختلف استفاده می‌شود [۱۹]. در این آزمایش می‌توان به حالت خزش پایدار با اعمال نیروی ثابت رسید [۲۰، ۲۱]. با توجه به اینکه در حین این آزمون با تغییر شرایط دمایی و نرخ کرنش تغییری در ابعاد نمونه ایجاد نمی‌شود لذا نسبت به آزمایش خزشی کششی بسیار ساده تر می‌باشد [۲۲]. به صورت نمادین در شکل ۱ نحوه کارکرد این دستگاه نشان داده شده است. نمودار عمق فرورونده D برحسب زمان بر روی مانیتور نمایش داده می‌شود [۲۱]. این آزمایش نسبت به آزمایش کششی خزش مزایایی دارد از جمله: (۱) انجام تست تحت نیروی ثابت، (۲) دما و تنش برای خزش حالت پایدار را می‌توان با یک نمونه به دست آورد، (۳) به علت عدم وجود ناحیه سوم خزشی، انجام آزمایش برای مواد ترد نیز امکان پذیر است. (۴) در این روش اطلاعات بیشتر نسبت به تست خزش کششی به دست می‌آید، به عنوان مثال در بعضی نمونه‌ها مانند بررسی ساختار جوش یا تاثیر مرزدهانه‌ها در تعیین و کنترل مکانیزم‌های خزشی این روش آزمایش عملکرد بهتری نشان می‌دهد [۲۲، ۲۳].



شکل ۱- شکل شماتیک تست خزش فرورونده [۲۱]

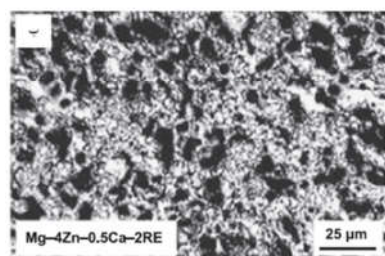
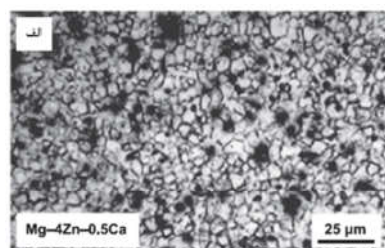
یک پارامتر مشخصه مهم جهت توصیف خزش، توان تنشی (n) برای نرخ خزش حالت پایدار در معادله توان خزشی می‌باشد که به صورت معادله (۱) می‌شود [۲۴].

$$n = \frac{\Delta \ln \dot{\varepsilon}}{\Delta \ln \sigma_t} = \frac{\Delta \ln V_s}{\Delta \ln \sigma_i} \quad (1)$$

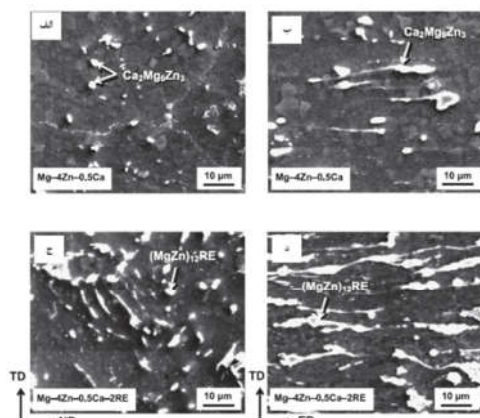
$\dot{\varepsilon}$ نرخ خزش کششی، σ_t تنش اعمال شده در تست خزش کششی، V_s سرعت فرورونده در حالت پایدار تست خزش فرورونده و σ_i تنش فرورونده در تست خزش فرورونده در تست خزش فرورونده است [۲۱]. رابطه (۲) ارتباط بین پارامتر تنش و کرنش در هر دو نوع روش تست خزش را نشان می‌دهد.

$$(2)$$

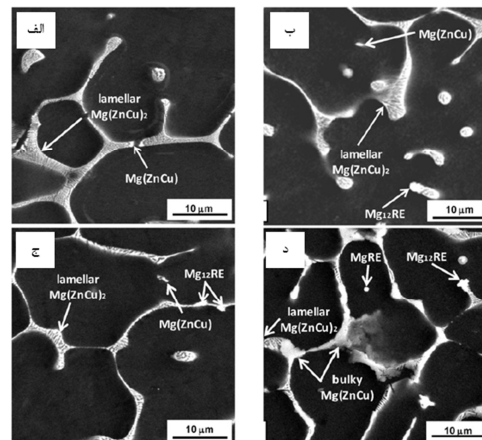
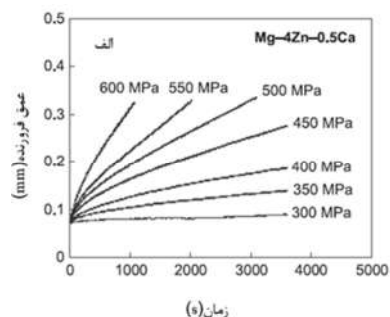
گزارش شده است که در دماهای پایین تر و تنش های بالاتر قانون توانی نقض شده است. تنش آستانه ای به صورت خطی با افزایش دما کاهش می یابد. آلیاژ شامل عناصر نادر خاکی، آستانه تنشی بالاتر و مقاومت خزشی بهتری از خود نشان می دهند. مقاومت به خزش بالاتر، به علت افزایش کسر حجمی ذرات ثانویه و ایجاد ذرات $(MgZn)_{12}RE$ با پایداری حرارتی بالا می باشد (شکل ۶ و ۷) [۲۷].



شکل ۵ - ساختار میکروسکوپ نوری (الف) آلیاژ $Mg-4Zn-0.5Ca$ (ب) $Mg-4Zn-0.5Ca-2RE$ [۲۷]

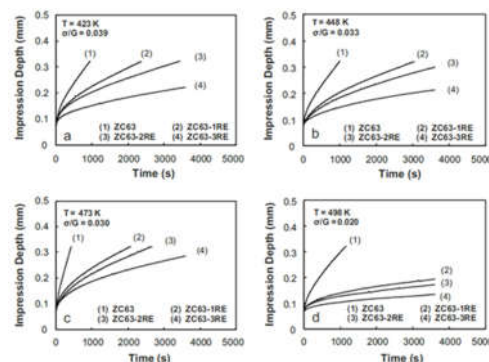


شکل ۶ - تصویر میکروسکوپ الکترونی: (الف و ب) عمود بر جهت اکستروژن و (ج و د) موازی جهت اکستروژن [۲۷]



شکل ۳ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی (الف) ZC63-1%RE (ب) ZC63-2%RE (ج) ZC63-3%RE (د) ZC63-3%RE [۲۵]

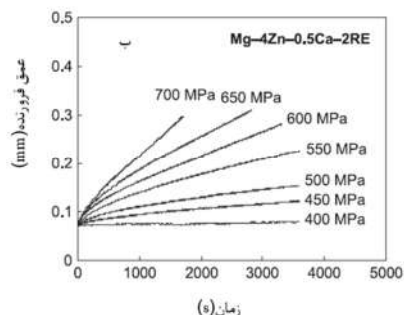
با بررسی نمودارهای آزمایش خزش فرورونده مطابق شکل ۴ (عمق فرورونده بر حسب زمان) به وضوح روشن است که با افزایش عناصر نادر خاکی مقاومت خزشی ZC63 در تمام دماها بهبود می یابد، دلیل این بهبود خواص مکانیکی تغییرات ریزساختاری، ریزدانه‌گی و افزایش کسر حجمی فاز یوتکتیک و تغییر مورفولوژی فازها و ایجاد ترکیبات با پایداری حرارتی بالا که موجب جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها و محدود شدن لغزش دانه‌ها به هنگام خزش نابجایی و جلوگیری از مهاجرت مرز دانه‌ها و لغزش مرز دانه‌ها به هنگام خزش نفوذی می باشد. گزارش شده است [۲۵، ۲۶].



شکل ۴ - نمودارهای عمق فرورونده بر حسب زمان [۲۵]

۲-۲ - آلیاژ $Mg-4Zn-0.5Ca$ و $Mg-4Zn-0.5Ca-2RE$

نقدی و همکاران رفتار خزشی آلیاژ $Mg-4Zn-0.5Ca-2RE$ و $Mg-4Zn-0.5Ca$ اکستروژن شده را توسط آزمون خزش فرورونده در بازه دمایی $423-498 K$ مورد بررسی قرار دادند. رفتار خزشی هردو آلیاژ توسط رابطه سینوس هذلولوی بیان شد. توان تنشی خزش عدد ۵ و انرژی اکتیواسیون $135 \frac{kJ}{mol}$ ، نزدیک به نفوذ در شبکه در $(Mg)_\alpha$ به دست آمده است، بنابراین نفوذ در شبکه کنترل شده توسط صعود نابجایی به عنوان مکانیزم غالب در این خزش تعیین شده است. با توجه به شکل (۵) هردو آلیاژ ساختار دندریتی دارند که با اضافه کردن عناصر نادر خاکی اندازه دانه‌ها کاهش می یابد. اجزا تیره رنگ ذرات فاز ثانویه پراکنده در زمینه می باشند [۲۷].

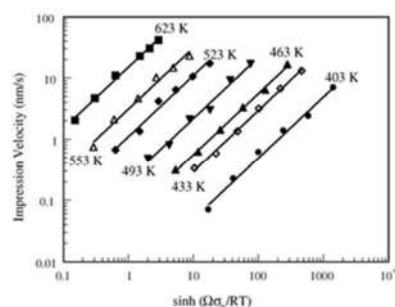


شکل ۷ - نمودارهای عمق فرورونده برحسب زمان در دمای ۴۴۸ K [۲۷]

۳-۲- آلیاژ Mg-8Zn-4Al-0.5Ca

پنگ^۱ و همکاران رفتار خزشی آلیاژ ریختگی Mg-8Zn-4Al-0.5Ca رسوب سخت شونده با استفاده از آزمایش های خزش فرورونده در بازه دمایی ۴۰۳-۶۲۳ K و تحت تنش MPa ۶۰/۴ تا ۱/۶۸ مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نشان دادند که با افزایش تنش از رابطه توانی بین نرخ فرورونده حالت پایدار و تنش فروروند، تغییرات توانی تنش با دما و تنش را به دست آورد. انرژی فعال سازی به عنوان تابعی از تنش از $76/5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ در تنش MPa ۱۳/۴ تا $45/4 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ تحت تنش MPa ۴۶/۹۵ تغییر می کند. با استفاده از قانون تنشی سینوس هذلولوی بین نرخ فرورونده و تنش فرورونده (معادله ۳)، انرژی اکتیواسیون $77/5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ به دست آمد (مطابق شکل ۸). نصف انرژی فعال سازی جهت نفوذ در شبکه در منیزیم ب تنها مکانیزم پیشنهادی کنترل کننده رفتار خزشی آلیاژ مورب بررسی در شرایط آزمایش، جریان مرزدانه های گزارش شده است [۲۸].

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sinh\left(\frac{\sigma_p}{RT}\right) \quad (3)$$



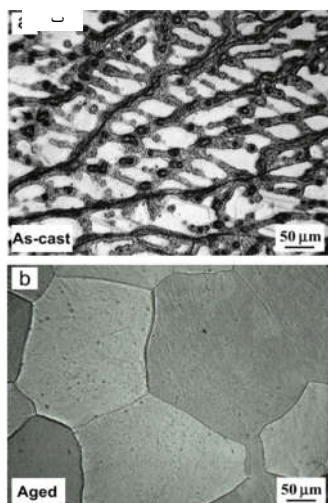
شکل ۸ - وابستگی سینوس هذلولوی تنش به نرخ فرورونده آلیاژ Mg-8Zn-4Al-0.5Ca [۲۸]

۳- تاثیر عملیات حرارتی بر رفتار خزشی و خواص مکانیکی

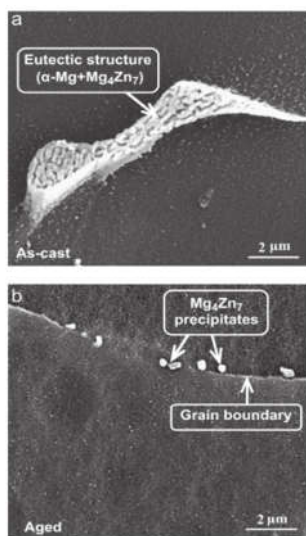
۳-۱- آلیاژ Mg-4Zn در حالت ریختگی و پیر شده

رفتار خزش فرورونده آلیاژ Mg-4%Zn در حالت ریخته گری و پیرسازی شده در محدوده دمایی ۴۲۳-۵۲۳ کلون تحت تنش ثابت

مورد بررسی قرار گرفته است، که عملیات پیرسا، الف. ق نتایج حاصل از شکل های ۹ و ۱۰ باعث بهبود مقاومت خزشی آلیاژ شده است. بعد از انجام تست خزش و مقایسه نمودارهای خزش (شکل ۱۱) باریز ساختارهای حاصل از میکروسکوپ نوری و الکترونی (شکل ۹ و ۱۰) می توان به این نتیجه رسید که علت افزایش مقاومت خزشی آلیاژ بعد از عملیات پیرسازی وجود رسوبات ریز Mg_4Zn_7 درامداد مرزدانه ها و در درون دانه ها می باشد [۲۹].

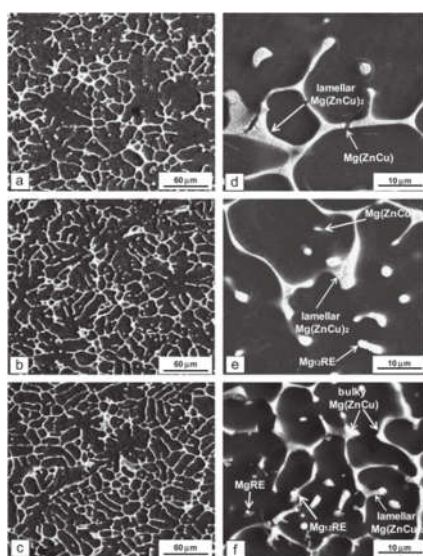


شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ نوری آلیاژ Mg-4%Zn (الف) در حالت ریختگی (ب) در حالت پیر شده [۲۹]

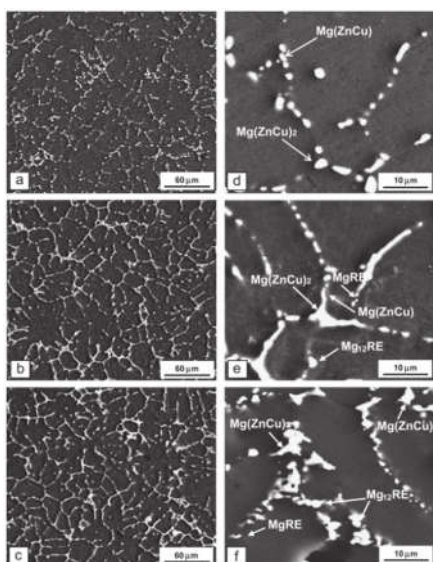


شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ SEM آلیاژ Mg-4%Zn (الف) در حالت ریختگی (ب) در حالت پیر شده [۲۹]

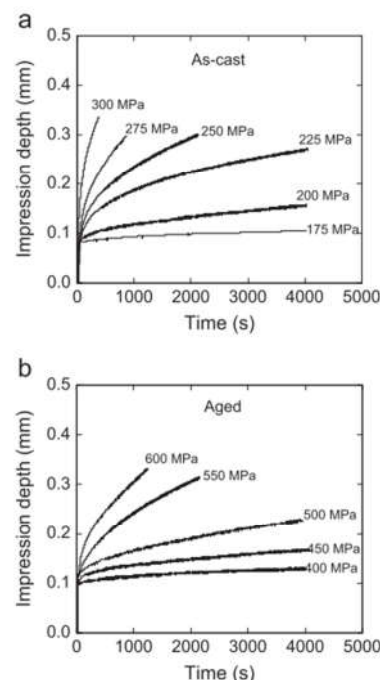
^۱ Peng



شکل ۱۲- تصاویر sem نمونه ریخته‌گری (a,d) نمونه ZC63 (b,e)، نمونه (c,f)، ZC63-1%La [۳۰]



شکل ۱۳- تصاویر SEM نمونه پیرسازی شده (a,d) نمونه ZC63، (b,e) نمونه ZC63-1%La، (c,f) نمونه ZC63-1%Ce [۳۰]



شکل ۱۱- نمودارهای عمق فرورونده برحسب زمان آلیاژ Mg-4%Zn (الف) در حالت ریختگی (ب) در حالت پیرشده [۲۹]

۳-۲- آلیاژ Mg-6Zn-3Cu به همراه عناصر نادر خاکی Ce و La

تاثیر عملیات پیرسازی بر روی ریزساختار، مقاومت خزشی و خواص مکانیکی دمای بالای آلیاژ ZC63 به همراه عناصر نادر خاکی Ce و La توسط تست خزش فرورونده در بازه دمایی ۴۲۳-۴۹۸ کلوین و تحت تنش ۷۰۰-۱۵۰ MPa و در زمان ۳۶۰۰ ثانیه توسط محمودی و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه نتایج ریزساختاری (شکل های ۱۲ و ۱۳) در حالت ریخته‌گری و عملیات حرارتی شده (محلول سازی در دمای ۷۱۳ کلوین به مدت ۸ ساعت و کوئنچ در آب سرد و پیرسازی در دمای ۴۷۳ کلوین به مدت ۱۶ ساعت) و نیز نمودارهای تست خزش فرورونده (شکل ۱۴)، نتیجه گرفته شده که فرآیند پیرسازی باعث افزایش کسر حجمی فاز یونکتیک و ایجاد ترکیبات Mg-RE با پایداری حرارتی بالا می‌شود. ساختار شبکه پیوسته مرزدانه شکسته شده و ذرات ناپیوسته در مرزدانه‌ها تشکیل می‌شود. استحکام خزشی آلیاژ مورد بررسی در نتیجه عملیات پیرسازی به دلیل شکستگی ساختار شبکه‌ای مرزدانه تضعیف شده است [۳۰].

magnesium alloy. Materials Science and Engineering: A, 566: pp. 30-39, 2013.

[10] Gibson M.A., et al., The effect of precipitate state on the creep resistance of Mg-Sn alloys. Scripta Materialia, 63(8): pp. 899-90, 2010

[11] Badri M., Miresmaeili S.M. and Nami B., Microstructure and Impression Creep Properties of Ca-Containing AS31 Magnesium Alloy. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 29(12): pp. 1089-1097, 2016.

[12] Mohammadi Mazraeshahi E., et al., Effect of Si on the creep properties of AZ61 cast magnesium alloy. Materials & Design, 76: pp. 64-70, 2015.

[13] Buha, J. and T. Ohkubo, Natural Aging in Mg-Zn-Cu Alloys. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008. 39(9): pp. 2259-2273.

[14] Ye J., et al., Study on Aging Strengthening of Mg-Zn-Cu Alloy Based on Component Optimization Design. Materials Science Forum, 873: pp. 33-37, 2016.

[15] Wen Q., et al., Effect of Ca addition on the microstructure and tensile properties of Mg-4.0Zn-2.0Gd alloys. Materials Science and Engineering: A, 609: pp. 1-, 2014.

[16] S. Li, H. Izui, M. Okano, W. Zhang, and T. Watanabe, "Microstructure and Mechanical Properties of ZrO," vol. 10, no. 2, pp. 111-116, 2009.

[17] Polmear I. and John D.S., Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. 2005: Butterworth-Heinemann.

[18] Chen J., et al., Effects of Sn addition on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Al alloys. Journal of Alloys and Compounds, 461(1-2): pp. 209-215, 2008.

[19] Mathew, M.D., Characterisation of Mechanical Properties Using Ball Indentation, Small Punch Creep and Impression Creep Methods. 2017: p. 79-94.

[20] Yang F. and Li J.C.M., Impression test—A review. Materials Science and Engineering: R: Reports, 74(8): pp. 233-25, 2013.

[21] Sastry D., Impression creep technique—an overview. Materials Science and Engineering: A, 409(1): pp. 67-7, 2005.

[22] Chu, S. and J. Li, Impression creep; a new creep test. Journal of Materials Science, 1977. 12(11): pp. 2200-2208.

[23] Kondori, B. and R. Mahmudi, Impression Creep Characteristics of a Cast Mg Alloy. Metallurgical and Materials Transactions A, 40(8): pp. 2007-2015, 2009.

[24] Nayyeri G. and Mahmudi R., Effects of Sb additions on the microstructure and impression creep behavior of a cast Mg-5Sn alloy. Materials Science and Engineering: A, 527(3): pp. 669-678, 2010.

[25] Jun J. H., Kim J. M., Park B. K., Kim K. T. and Jung W. J., Effects of rare earth elements on microstructure and high temperature mechanical properties of ZC63 alloy, J. Mater. Sci., Vol. 40, No. 9-10, pp. 2659-2661, 2005.

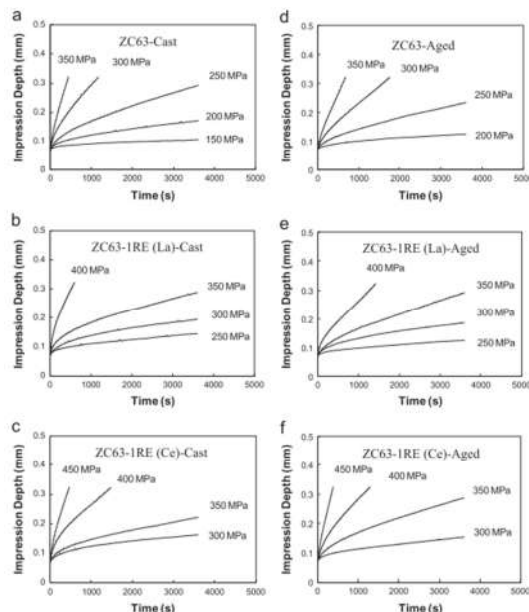
[26] Michael Kassner, Fundamental of creep in metals and alloys,

[27] Naghdi F. and Mahmudi R., Impression creep behavior of the extruded Mg-4Zn-0.5Ca and Mg-4Zn-0.5Ca-2RE alloys. Materials Science and Engineering: A, 2014. 616: pp. 161-170.

[28] Peng L., et al., Impression creep of a Mg-8Zn-4Al-0.5Ca alloy. Materials Science and Engineering: A, 410-411: pp. 42-47, 2005.

[29] Alizadeh R., Mahmudi R. and Langdon T.G., Creep mechanisms in an Mg-4Zn alloy in the as-cast and aged conditions. Materials Science and Engineering: A, 564: pp. 423-43, 2013.

[30] Golmakanian S. and Mahmudi R., Effect of aging treatment on the microstructure, creep resistance and high-temperature mechanical properties of Mg-6Zn-3Cu alloy with La- and Ce-rich rare earth additions. Materials Science and Engineering: A, 620: pp. 301-308, 2015.



شکل ۱۴- نمودارهای خزش فرورونده بر حسب زمان در دمای ۴۹۸ کلوین [۳۰]

۴- نتیجه گیری

با توجه به استحکام به وزن بالای آلیاژهای منیزیم و کاربرد گسترده آن‌ها در صنایع اتومبیل و هوایی در راستای بهبود خواص مکانیکی دمای بالای این آلیاژها، پژوهش‌هایی صورت گرفته است که از جمله به بررسی اثر عناصر آلیاژی و نیز عملیات حرارتی می‌توان اشاره کرد. به صورت کلی عناصر آلیاژی می‌تواند با ایجاد ترکیبات با پایداری حرارتی بالا در مرز دانه‌ها از لغزش مرز دانه‌ای و در درون دانه‌ها از لغزش نابجایی جلوگیری کرده و مقاومت خزشی را افزایش دهد. از طرفی انجام عملیات محلول‌سازی و پیرسازی می‌تواند باعث ریزدانه‌گی و پراکندگی رسوبات شده و به عنوان موانع در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل کند که باعث کاهش نرخ خزش و افزایش مقاومت خزشی می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Roberts C.S., Magnesium and its Alloys. 1960: Wiley.
- [2] Rashno S., Nami B., and Miresmaeili S.M., Impression creep behavior of a cast MRI153 magnesium alloy. Materials & Design, 2014. 60: pp. 289-294.
- [3] Avedesian M.M. and Baker H., ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys. Vol. 274. ASM international Materials Park, OH, 1999.
- [4] Mordike B. and Ebert T., Magnesium: Properties—applications—potential. Materials Science and Engineering: A, 302(1): pp. 37-45, 2001.
- [5] Yu H., et al., Hot deformation behavior and processing maps of Mg-Zn-Cu-Zr magnesium alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23(3): pp. 756-764, 2013.
- [6] Haughton J.L and Prytherch W.E., Magnesium and its Alloys. 1937: HM Stationery Office London.
- [7] Srinivasan, A., et al., Creep Behavior of AZ91 Magnesium Alloy. Procedia Engineering, 55: pp. 109-113, 2013.
- [8] Deng J., et al., Hot tensile deformation and fracture behaviors of AZ31 magnesium alloy. Materials & Design, 49: pp. 209-219, 2013.
- [9] Mahmudi R. and Moeendarbari S., Effects of Sn additions on the microstructure and impression creep behavior of AZ91