Autumn 2025, Volume 28, Nummber 3

METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Effect of elevated-temperature homogenization on the formability of magnesium-zinc alloy

Shaghayegh Khoshdel[1], *Mehdi Malekan[2], Hamed Mirzadeh[2], Massoud Emamy[2]

1- MSc Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Faculty Member, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Citation: Khoshdel S, Malekan M, Mirzadeh H, Emamy M. Effect of elevated-temperature homogenization on the formability of magnesium-zinc alloy, Metallurgical Engineering, 2025: 28(3): 201-209 https://doi.org/10.22076/me.2026.743263

doi: https://doi.org/10.22076/me.2026.743263

ABSTRACT

Effect of elevated-temperature homogenization on the microstructure and formability of as-cast Mg-Zn alloy with 5 wt.% Zn was investigated. The average grain size of the as-cast alloy was 77 µm, which was coarsened to ~82 µm upon homogenizing. Despite grain growth, the hardness of the as-cast and homogenized samples was determined as 46.7 and 63.4 HV, respectively. The increase in hardness was related to the more pronounced solid solution effect of Zn in α-Mg, which was confirmed based on the elemental analysis, in such a way that Zn content in the matrix for the as-cast and homogenized samples was determined as 0.56 and 4.06 wt.%, respectively. Tensile testing revealed that, despite larger grain size, the increased Zn content in the matrix resulted in the improved mechanical properties after homogenizing, where the total elongation was doubled and the yield stress and the ultimate tensile strength slightly increased. On the other hand, the hardening exponent of the Hollomon equation for the homogenized sample was determined as 0.35, showing a major improvement compared to the as-cast counterpart with the hardening exponent of 0.27, which is consistent with the improved formability of the Mg-Zn alloy upon homogenizing.

Keywords: Mg-Zn alloys, Homogenization heat treatment, Solid solution hardening, Grain growth, Formability.

Received: April 6, 2025 | Accepted: October 15, 2025

Corresponding Author:
Mehdi Malekan, PhD
Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
Tel: +98 (21) 8208 4610
E-mail: mmalekan@ut.ac.ir

تاثیر همگن‌سازی در دمای بالا بر شکل‌پذیری آلیاژ منیزیم-روی

شقایق خوشدل[۱]، *مهدی ملکان[۲]، حامد میرزاده[۲]، مسعود امامی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

تاثیر همگن‌سازی در دمای بالا بر ریزساختار و شکل‌پذیری یک آلیاژ ریختگی منیزیم-روی با ۵ درصد وزنی روی بررسی شد. در حالت ریختگی، اندازه دانه برابر با ۷۷ میکرومتر به دست آمد که پس از همگن‌سازی به حدود ۸۲ میکرومتر رشد کرد. با وجود افزایش میانگین اندازه دانه، سختی نمونه‌های ریختگی و همگن‌شده به ترتیب ۴۶/۷ و ۶۳/۴ ویکرز به دست آمد. این افزایش سختی، ناشی از اثر موثرتر محلول جامد روی در زمینه منیزیم آلفا ارزیابی شد و توسط آنالیز عنصری تایید شد، به شکلی که میزان روی در زمینه برای نمونه‌های ریختگی و همگن شده به ترتیب ۰/۵۶ و ۴/۰۶ درصد وزنی به دست آمد. آزمون کشش نشان داد که افزایش روی در زمینه، با وجود درشت‌تر بودن اندازه دانه ها، منجر به بهبود خواص مکانیکی آلیاژ پس از عملیات همگن‌سازی شد، به شکلی که درصد ازدیاد طول تقریباً دو برابر شد و همچنین تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی هم به میزان جزئی افزایش یافت. از طرف دیگر، توان سخت‌شوندگی نمونه همگن شده بر اساس رابطه هولومون برابر با ۰/۳۵ به دست آمد که بهبود زیادی را در مقایسه با نمونه ریختگی با توان سخت‌شوندگی ۰/۲۷ نشان می‌دهد که با بهبود شکل‌پذیری آلیاژ منیزیم-روی در اثر همگن‌سازی تطابق دارد.

کلمات کلیدی: آلیاژهای منیزیم–روی، عملیات حرارتی همگن‌سازی، سخت‌شوندگی محلول جامد، رشد دانه، شکل پذیری.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷ | پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳

مقدمه

در دهه‌های اخیر، نیاز روزافزون صنایع به مواد سبک با استحکام بالا، پژوهشگران را به سمت توسعه و بهبود آلیاژهای منیزیم سوق داده است [۳-۱]. این آلیاژها به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، چگالی پایین و ویژگی‌هایی نظیر قابلیت جذب ارتعاش، هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب، زیست‌سازگاری، ماشین‌کاری مطلوب و مقاومت ویژه، از جمله امیدبخش‌ترین گزینه‌ها برای کاهش وزن قطعات مهندسی محسوب می‌شوند [۶-۴]. ترکیب این ویژگی‌ها سبب شده است که آلیاژهای منیزیم، برخلاف منیزیم خالص، در صنایع مختلفی همچون خودروسازی، تجهیزات زیست‌پزشکی و الکترونیک مورد استفاده قرار گیرند [۷و۸]. با این حال، محدودیت‌های ذاتی منیزیم و آلیاژهای آن همچون استحکام پایین، شکل‌پذیری محدود ناشی از ساختار بلوری فشرده شش‌گوش و مقاومت ناکافی در برابر خزش و خوردگی، استفاده گسترده از این آلیاژها را با چالش روبه‌رو کرده است [۹و۱۰]. در نتیجه، تلاش‌های گسترده‌ای برای بهبود خواص مکانیکی و افزایش قابلیت شکل‌پذیری این آلیاژها صورت گرفته است. روش‌هایی نظیر آلیاژسازی [۱۱و۱۲]، تغییر شکل گرم[۱۴و۱۲] ، تقویت با ذرات [۱۶و۱۵]، فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید[۱۸و۱۷] و عملیات حرارتی همگن‌سازی[۲۰و۱۹] از جمله رویکردهای مؤثر در این زمینه هستند.

در میان این روش‌ها، آلیاژسازی نقش کلیدی در بهبود خواص جامع آلیاژهای منیزیم ایفا می‌کند. افزودن عناصری مانند روی (Zn) باعث استحکام محلولی، اصلاح دانه‌ها و تشکیل فازهای بین فلزی

* نویسنده مسئول:
دکتر مهدی ملکان
نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد
تلفن: ۸۲۰۸۴۶۱۰ (۲۱) ۹۸+
پست الکترونیکی: mmalekan@ut.ac.ir

پایدار می‌شود که می‌تواند به افزایش استحکام و چقرمگی منجر گردد [۲۱-۲۴]. آلیاژهای سری ZK [۲۵,۲۶] ZA، [۲۷] و AZ [۲۸] نمونه‌هایی از سیستم‌های متداول آلیاژی بر پایه منیزیم-روی هستند. علاوه بر روی، افزودن مقادیر اندک از استرانسیم (Sr) و کلسیم (Ca) در محدوده‌های ریز آلیاژی نیز اثرات چشمگیری بر ریزساختار و خواص مکانیکی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که حضور مقادیر کمتر از ۱ درصد وزنی استرانسیم موجب اصلاح دانه‌ها و تغییر مورفولوژی ترکیبات مرزدانه‌ای می‌شود و در نتیجه، استحکام و چقرمگی آلیاژ به‌صورت هم‌زمان بهبود می‌یابد [۲۹و۳۰]. از سوی دیگر، افزودن کلسیم نیز در مقادیر کمتر از ۱ درصد وزنی، باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی استحکام و سختی می‌گردد [۳۱و۳۲]. بنابراین، افزودن هم‌زمان استرانسیم و کلسیم می‌تواند اثر هم‌افزایی داشته باشد و منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی شود [۳۳]. از سوی دیگر، عملیات حرارتی همگن‌سازی به‌عنوان یکی از مؤثرترین فرآیندها برای بهبود یکنواختی ترکیب شیمیایی، کاهش فازهای ثانویه، و اصلاح ریزساختار شناخته می‌شود [۳۴و۳۵]. وانگ و همکاران [۳۴] نشان دادند که همگن‌سازی آلیاژ Mg-Al-Zn در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت، روشی کارآمد برای پیشگیری از ایجاد ترک به شمار می‌آید. به‌علاوه، صادق و همکاران [۲۱] و ژائو و همکاران [۳۵] اعلام کردند که عملیات همگن‌سازی در دماهای بالا می‌تواند باعث کاهش فاز β در آلیاژ AZ91 و در نتیجه افزایش استحکام و شکل‌پذیری گردد. علاوه بر این، یانگ و همکاران [۲۳] تأیید کردند که همگن‌سازی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۸ ساعت، می‌تواند منجر به کاهش فازهای ثانویه و حفظ اندازه دانه‌های ریز شود. در پژوهشی دیگر، قربانی و همکاران [۳۶] روند همگن‌سازی دو مرحله‌ای را در دماهای ۳۱۵ درجه سانتی‌گراد و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای آلیاژهای Mg-Zn معرفی کردند که به کاهش مقدار فاز یوتکتیکی Mg_7Zn_3 منجر شد و آلیاژ بهبود ۱۱۲ درصدی در استحکام کششی نهایی (UTS) و ۶۱۵ درصدی در ازدیاد طول کلی نسبت به وضعیت ریختگی اولیه نشان داد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه عملیات همگن‌سازی بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی سری آلیاژهای Mg-Zn است؛ موضوعی که به مطالعه دقیق‌تری درباره آلیاژهای جدید این سیستم نیاز دارد.

با وجود این، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های موجود بر آلیاژهای کارشده یا کاربردهای زیست‌پزشکی متمرکز بوده و بررسی جامع اثر هم‌افزایی استرانسیم و کلسیم در آلیاژهای ریختگی Mg-Zn کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌ویژه، سیستم آلیاژی Mg-5Zn-0.75Sr-0.25Ca با خواص مکانیکی مطلوب هنوز به طور کامل بررسی نشده است. این ترکیب شیمیایی می‌تواند رفتار متفاوتی از نظر تشکیل فازهای بین فلزی، تحول ریزساختار و خواص مکانیکی از خود نشان دهد. در پژوهش حاضر، با هدف توسعه آلیاژهای سبک با کارایی بالا، تأثیر عملیات حرارتی همگن‌سازی در دماهای بالا بر ریزساختار، سختی و خواص کششی آلیاژ ریختگی Mg-5Zn-0.75Sr-0.25Ca بررسی شده است تا نقش هم‌افزایی عناصر استرانسیم و کلسیم در بهبود عملکرد مکانیکی این آلیاژها روشن گردد.

روش پژوهش

مواد اولیه و روش ساخت

آلیاژ ریختگی با ترکیب اسمی Mg-5Zn-0.75Sr-0.25Ca و با بهره‌گیری از کوره القایی با فرکانس بالا تولید شد. عملیات ذوب در بوته‌ی گرافیتی صورت گرفت و در این فرآیند، شمش‌های خالص منیزیم و روی به همراه آمیژان‌های Mg-30Ca و Mg-13Sr به مذاب اضافه شدند. ترکیب شیمیایی آمیژان‌ها با استفاده از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس بررسی شد و نتایج حاکی از آن بود که درصد وزنی کلسیم و استرانسیم به ترتیب حدود ۲۹/۸۳ و ۱۳/۱۰ درصد بود، درحالی‌که مقدار ناخالصی‌ها به طور قابل‌توجهی کم بود. برای جلوگیری از اکسیداسیون منیزیم و ممانعت از آلودگی محیطی در فرآیند ذوب، از گاز محافظی که شامل ۹۵٪ آرگون و ۵٪ SF_6 بود، بهره گرفته شد. مذاب پس از رسیدن به دمای ۷۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حدود ۵ دقیقه در همان دما نگه داشته شد تا ترکیب شیمیایی به طور کامل یکنواخت شود. پس از جدا کردن سرباره از سطح، آلیاژ ذوب شده در قالب فلزی استوانه‌ای شکل با قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۴ میلی‌متر ریخته شد.

جهت حذف جدایش‌های شیمیایی و انحلال فاز بین فلزی Mg_7Zn_3، فرآیند همگن‌سازی در دو مرحله به اجرا درآمد. این روند بر اساس روش بهینه شده‌ای که توسط قربانی و همکاران [۳۶] برای آلیاژهای سیستم Mg–Zn ارائه شده، بر اساس دیاگرام فازی سیستم Mg–Zn [۳۷] طراحی شده است. در مرحله‌ی اول، نمونه‌ها به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۳۱۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند و سپس، مرحله‌ی دوم با نگهداری به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. انتخاب دمای اولیه که کمی کمتر از دمای یوتکتیک (۳۲۵ درجه سانتی‌گراد) است، به‌منظور کمک به انحلال جزئی فازهای یوتکتیکی و جلوگیری از ذوب موضعی انجام شد.

تحلیل ریزساختاری و فازی

برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت بررسی‌های ریزساختاری، ابتدا عملیات پرداخت مکانیکی تا دستیابی به سطحی صاف و صیقلی انجام شد. در ادامه، نمونه‌ها به‌منظور آشکارسازی مرزدانه‌ها با محلول اچ استیک پیکرال آماده شدند. این محلول از ترکیب ۴/۲ گرم اسید پیکریک، ۷۰ میلی‌لیتر اتانول، ۱۰ میلی‌لیتر اسید استیک و ۱۰ میلی‌لیتر آب تهیه گردید. پس از آماده‌سازی، ساختارهای میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری Olympus Vanox و میکروسکوپ الکترونی روبشی LMU MIRA 3 TESCAN (SEM) مورد بررسی قرار گرفتند. برای محاسبه‌ی اندازه‌ی دانه‌ها از نرم‌افزار ImageTool و روش استاندارد تقاطعی مطابق با ASTM E112 استفاده شد. همچنین، با تحلیل مجموعه‌ای از تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری و الکترونی، نسبت حجمی فازهای ثانویه تعیین گردید. جهت شناسایی ترکیب شیمیایی و فازهای موجود، به ترتیب از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) و دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل PHILIPS با منبع تابش Cu- Kα استفاده شد.

ارزیابی خواص مکانیکی

آزمون کشش تک‌محوره در دمای محیط با نرخ کرنش ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه جهت بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌ها انجام گرفت. قطعات مورد آزمایش طبق الزامات استاندارد ASTM E8 و در ابعاد کوچک شامل ناحیه‌ی گیج به طول ۱۶/۲ میلی‌متر و قطر ۴ میلی‌متر ساخته شدند. به‌منظور اطمینان از صحت و تکرارپذیری نتایج، هر آزمون سه نوبت تکرار شد. همچنین، سختی نمونه‌ها با روش ویکرز تحت بار ۲ کیلوگرم نیرو اندازه‌گیری گردید.

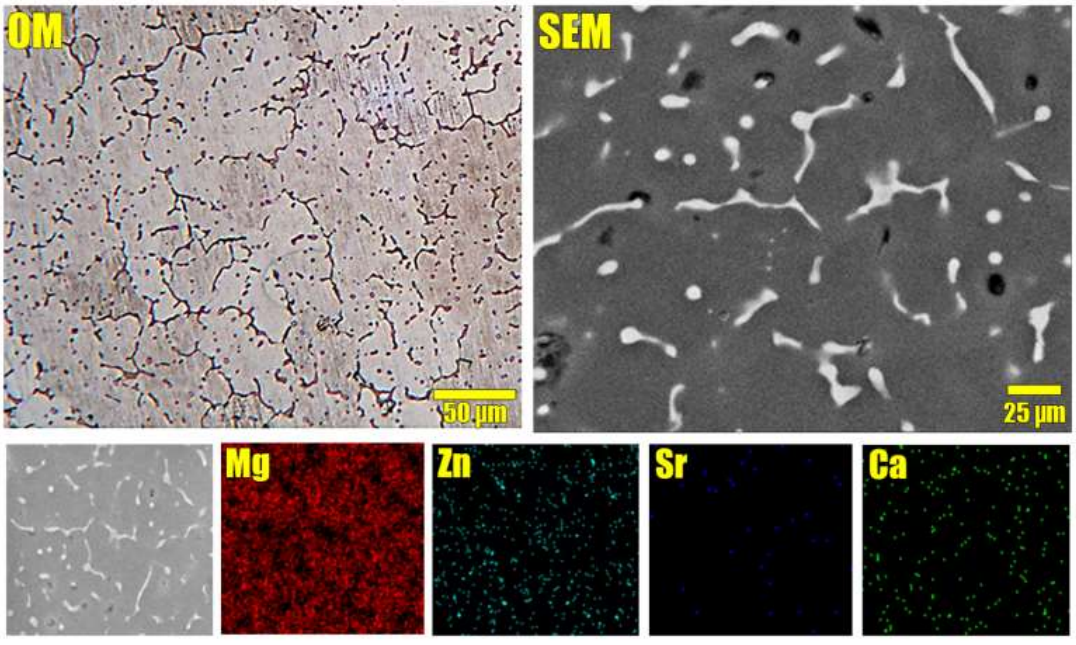
نتایج و بحث

تحولات ریزساختاری و فازی ناشی از همگن‌سازی

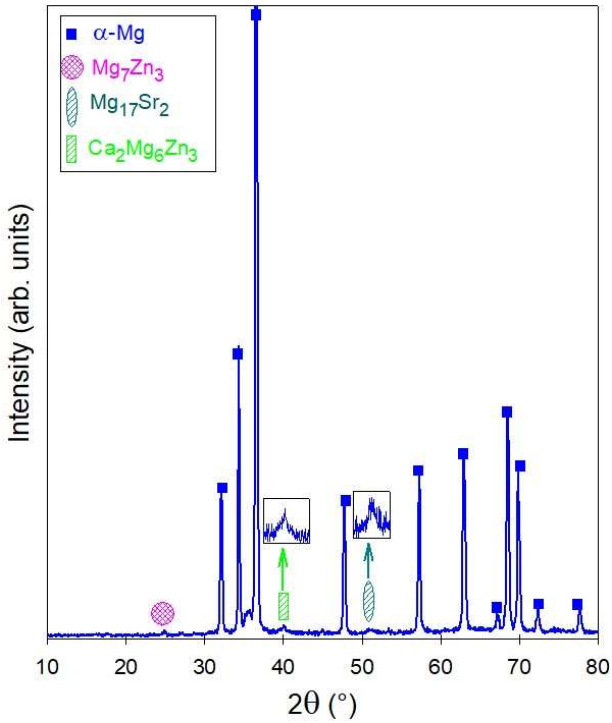
تصویر میکروسکوپ نوری به همراه تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقشه پراکندگی عنصری از آلیاژ ریختگی Mg-5Zn-0.75Sr-0.25Ca در شکل ۱ نشان داده شده است. آلیاژ ریختگی دارای اندازه‌ی میانگین دانه حدود ۷۷ میکرومتر است. در مورد فازهای موجود در ریزساختار، الگوی پراش پرتو ایکس مطابق با شکل ۲ نشان داد این آلیاژ شامل فازهای α-Mg، Mg_7Zn_3، $Mg_{17}Sr_2$ و $Ca_2Mg_6Zn_3$ است که با توجه به تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شده در شکل ۱، کسر حجمی فازهای ثانویه برابر با ۷/۷ درصد به‌دست آمد.

تصویر میکروسکوپ نوری به همراه تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقشه پراکندگی عنصری آلیاژ Mg-5Zn-0.75Sr-0.25Ca پس از انجام عملیات همگن‌سازی در دو مرحله‌ی در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که میانگین اندازه دانه بعد از همگن‌سازی ۸۲/۳ میکرومتر است که رشد دانه تقریباً ۶/۸ درصدی نسبت به حالت ریختگی را نشان می‌دهد. با این حال، بعد از عملیات همگن‌سازی، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، کسر حجمی فازهای ثانویه کاهش یافته است و به حدود ۵/۳۵ درصد رسیده است. به عبارت دیگر، با توجه به بحث‌های پیشین درباره هدف عملیات همگن‌سازی، می‌توان نتیجه گرفت که فازهای حاوی روی در زمینه حل شده و این امر منجر به کاهش مقدار فازهای ثانویه گردیده است.

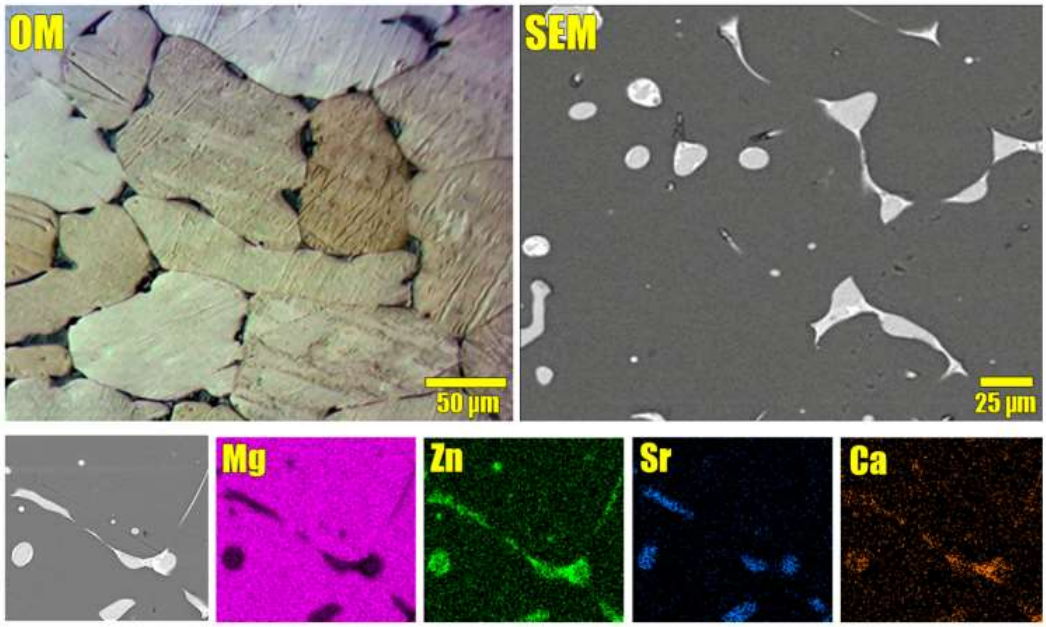
به‌منظور روشن‌تر شدن این موضوع، شکل ۴ تحلیل نقطه‌ای EDS از زمینه α-Mg درآلیاژ Mg-5Zn-0.75Sr-0.25Ca در حالت ریختگی و همگن‌شده را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که میزان روی در زمینه α-Mg در حالت ریختگی برابر با ۰/۲۱ درصد اتمی (یا ۰/۵۶ درصد وزنی) است. بعد از همگن‌سازی درصد روی زمینه α-Mg به حدود ۱/۵۵ درصد اتمی (یا ۴/۰۶ درصد وزنی) می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهد که عملیات همگن‌سازی موجب افزایش محسوس غلظت روی در زمینه شده و این امر تأییدی است بر انحلال فازهای حاوی روی که اتم‌های روی را در زمینه آزاد می‌کند. قربانی و همکاران [۳۶] نیز گزارش کرده‌اند که عملیات همگن‌سازی باعث انحلال فاز Mg_7Zn_3 و در نتیجه افزایش میزان روی در زمینه می‌شود. بر اساس این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که عملیات همگن‌سازی منجر به کاهش مقدار فازهای ثانویه در مرز دانه‌ها و همچنین افزایش میزان روی در زمینه α-Mg آلیاژ شده است. این تغییرات می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی آلیاژ داشته باشد که در بخش بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



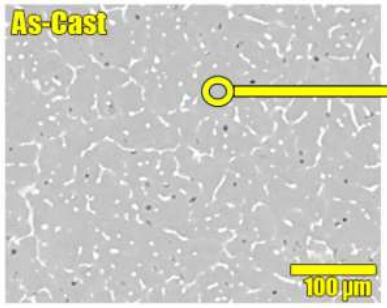
شکل ۱: تصاویر نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقشه پراکندگی عنصری آلیاژ ریختگی.



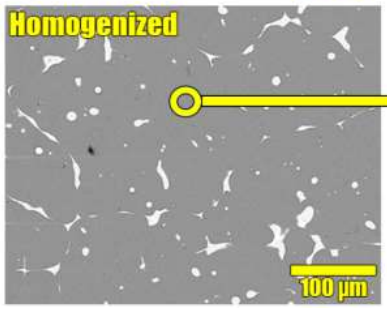
شکل ۲: الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ ریختگی.



شکل ۳: تصاویر نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و نقشه پراکندگی عنصری آلیاژ همگن‌شده.



Element	Line Type	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
Mg	K series	97.62	7.42	99.22
Ca	K series	0.15	0.13	0.09
Zn	L series	0.56	0.28	0.21
Sr	L series	1.67	1.25	0.47
Total:		100.00		100.00



Element	Line Type	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
Mg	K series	95.82	0.19	98.39
Ca	K series	0.09	0.06	0.05
Zn	L series	4.06	0.14	1.55
Sr	L series	0.03	0.12	0.01
Total:		100.00		100.00

شکل ۴: EDS نقطه‌ای از زمینه α-Mg در حالت‌های ریختگی و همگن‌شده.

ارزیابی خواص مکانیکی

شکل ۵-الف مقدار اندازه‌گیری شده سختی در آلیاژ ریختگی و همگن‌سازی شده را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که مقدار سختی در آلیاژ ریختگی برابر با ۴۶/۷ به‌دست آمد و بعد از فرآیند همگن‌سازی به دلیل تقویت محلول جامد در اثر غنی‌سازی روی در زمینه α-Mg (شکل ۴)، به مقدار ۶۳/۴ افزایش پیدا کرده است. این افزایش سختی و استحکام در اثر همگن‌سازی در تحقیقات قربانی و همکاران[۳۶] و هو و همکاران [۳۸] نیز گزارش شده است. بنابراین با وجود رشد دانه در اثر همگن‌سازی، افزایش درصد روی در زمینه اثر بسیار موثرتری بر بهبود سختی داشته است.

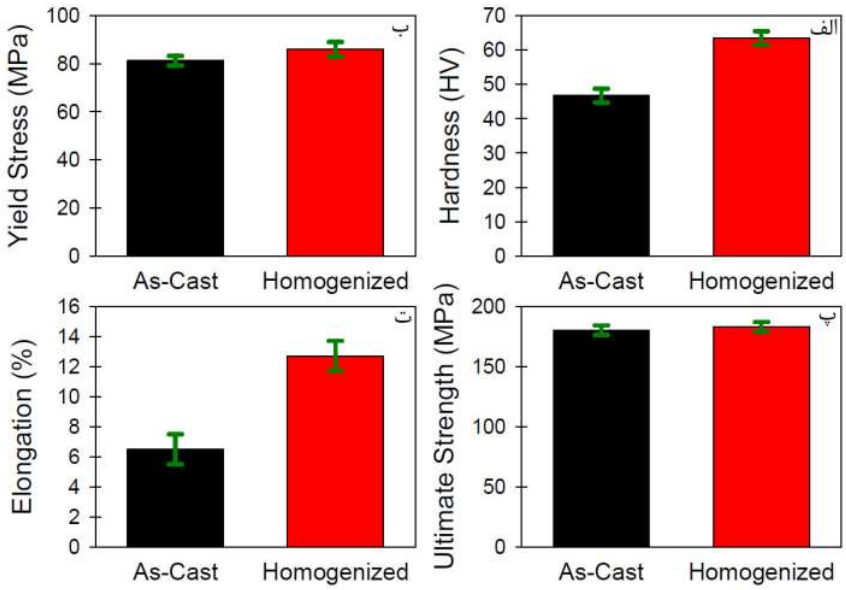
جهت بررسی تعادل استحکام-شکل‌پذیری این دو آلیاژ، رفتار مکانیکی آن‌ها با آزمون کشش بررسی شده است. با توجه به شکل های ۵-ب، ۵-پ و ۵-ت، مشاهده می‌شود که آلیاژ همگن شده دارای استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول بالاتری نسبت به آلیاژ ریختگی است. همان‌طور که قبلاً برای نتایج سختی سنجی بحث شد، بهبود استحکام را نیز تا حدودی می‌توان به اثر تقویت‌کنندگی همگن‌سازی از طریق افزایش محتوای روی در زمینه α-Mg نسبت داد که بر تاثیر منفی رشد دانه غلبه کرده است. از طرف دیگر، بهبود ازدیاد طول نیز می‌تواند ناشی از کاهش فازهای مضر مرزدانه‌ای باشد که محل رشد ترک هستند. بنابراین، همگن‌سازی با کاهش این فازها توانسته است منجر به بهبود زیاد ازدیاد طول شود به شکلی که درصد ازدیاد طول تقریباً دو برابر شد.

نمودارهای تنش حقیقی (σ) -کرنش حقیقی (ε) نمونه‌های ریختگی و همگن شده در شکل ۶-الف آورده شده است. بر اساس رابطه هولومون نشان داده شده در رابطه ۱ و با گرفتن لگاریتم طبیعی از دو طرف رابطه، رابطه ۲ به دست می‌آید:

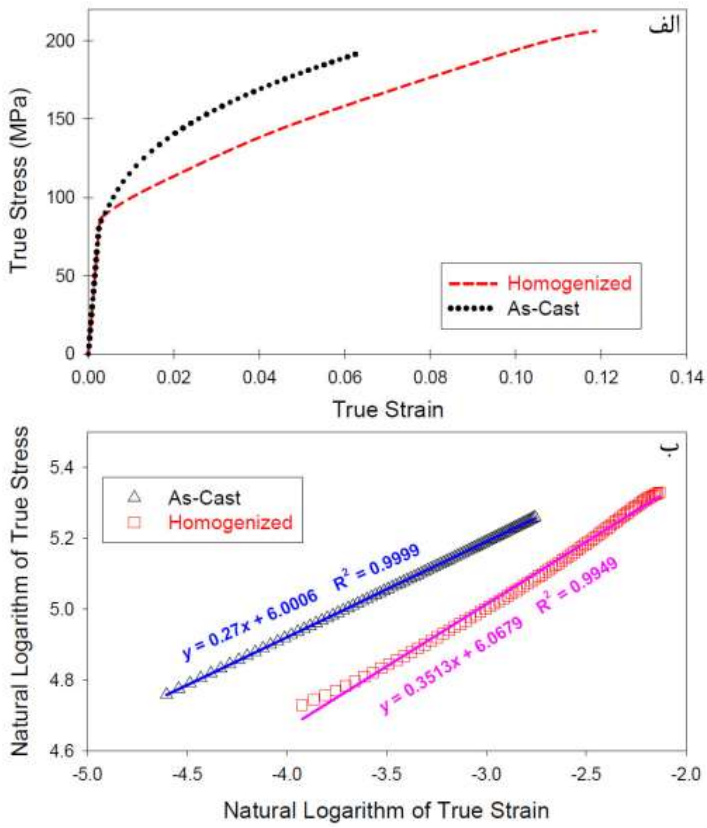
$$\sigma = K\varepsilon^{n} \quad (۱)$$

$$\ln\sigma = \ln K + n\ln\varepsilon \quad (۲)$$

در نتیجه، نمودارهای لگاریتم طبیعی تنش بر حسب لگاریتم طبیعی کرنش در شکل ۶-ب رسم شده است و شیب خط‌ها برابر با توان سخت‌شوندگی (n) و عرض از مبدا آن‌ها برابر با لگاریتم طبیعی ضریب استحکامی (K) خواهد بود. معادله‌های به دست آمده در شکل ۶-ب نشان داده شده‌اند. دیده می‌شود که توان سخت‌شوندگی نمونه همگن‌شده برابر با ۰/۳۵ است که بهبود زیادی را در مقایسه با نمونه ریختگی (۰/۲۷) نشان می‌دهد. بنابراین، به دلیل بهبود قابلیت سخت‌شوندگی، میزان شکل‌پذیری افزایش یافته است که با توجه به دوبرابر شدن درصد ازدیاد طول نمونه همگن‌شده قابل تایید است.



شکل ۵: نتایج آزمون‌های (الف) سختی‌سنجی و (ب-ت) کشش.



شکل ۶: (الف) منحنی‌های تنش حقیقی – کرنش حقیقی و (ب) نمودار مربوط به آنالیز هولومون.

نتیجه‌گیری

ریزساختار و خواص مکانیکی بهبود یافته آلیاژ Mg-5Zn-0.75Sr-0.25Ca ریختگی از طریق عملیات همگن‌سازی بررسی شد. نتایج زیر قابل استخراج است:

(۱) میانگین اندازه دانه در حالت ریختگی برابر با ۷۷ میکرومتر است. بعد از عملیات همگن‌سازی، این مقدار به حدود ۸۲ میکرومتر افزایش یافت که به دلیل قرارگیری در دمای بالا به مدت طولانی می‌باشد.

(۲) فازشناسی نشان داد که این آلیاژ دارای فازهای Mg_7Zn_3، $Mg_{17}Sr_2$ و $Ca_2Mg_6Zn_3$ است، که بعد از همگن‌سازی فازهای حاوی روی حل شده و باعث افزایش روی در زمینه α-Mg آلیاژ می‌شوند به شکلی که میزان روی در زمینه برای نمونه‌های ریختگی و همگن‌شده به ترتیب ۰/۵۶ و ۴/۰۶ درصد وزنی به دست آمد.

(۳) سختی آلیاژ ریختگی و همگن‌شده به ترتیب برابر با ۴۶/۷ و ۶۳/۴ به‌دست آمده است که افزایش سختی مربوط به اثر سخت‌شوندگی محلول جامد روی در زمینه α-Mg بود. با اینکه نمونه همگن‌شده اندازه دانه بزرگتری داشت، اما تاثیر سخت‌شوندگی محلول جامد بسیار بیشتر ارزیابی شد.

(۴) نتایج آزمایش کشش نشان داد، افزایش محتوای روی در زمینه در اثر همگن‌سازی، عامل بهبود خواص مکانیکی آلیاژ همگن شده نسبت به حالت ریختگی است و این اثر توانست تاثیر منفی درشت شدن دانه ها را پوشش دهد. همچنین، همگن‌سازی با کاهش فازهای مرزدانه‌ای توانست منجر به بهبود ازدیاد طول و شکل‌پذیری آلیاژ شود به شکلی که درصد ازدیاد طول تقریباً دو برابر شد.

(۵) توان سخت‌شوندگی نمونه همگن‌شده بر اساس رابطه هولومون برابر با ۰/۳۵ به دست آمد که بهبود زیادی را در مقایسه با نمونه ریختگی (۰/۲۷) نشان داد و این نتایج با بهبود شکل‌پذیری آلیاژ منیزیم-روی در اثر همگن‌سازی تطابق دارد.

References

[1] Malik, A., Wang, Y., Nazeer, F., Khan, M.A., Sajid, M., Jamal, S. and Mingjun, W., 2021. Deformation behavior of Mg–Zn–Zr magnesium alloy on the basis of macro-texture and fine-grain size under tension and compression loading along various directions. Journal of Alloys and Compounds, 858, p.157740.

[2] Yang, Y., Xiong, X., Chen, J., Peng, X., Chen, D. and Pan, F., 2023. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022. Journal of Magnesium and Alloys, 11(8), pp.2611-2654.

[3] Li, G., Zhang, J., Wu, R., Feng, Y., Liu, S., Wang, X., Jiao, Y., Yang, Q. and Meng, J., 2018. Development of high mechanical properties and moderate thermal conductivity cast Mg alloy with multiple RE via heat treatment. Journal of materials science & technology, 34(7), pp.1076-1084.

[4] Ayer, Ö., 2020. Effect of die parameters on the grain size, mechanical properties and fracture mechanism of extruded AZ31 magnesium alloys. Materials Science and Engineering: A, 793, p.139887.

[5] Bairagi, D., Mandal, S., Roy, M., Paliwal, M. and Mandal, S., 2024. Enhanced in-vitro degradation resistance and cytocompatibility of a thermomechanically processed novel Mg alloy: Insights into the role of microstructural attributes. Journal of Magnesium and Alloys, 12(2), pp.700-725.

[6] Asadollahi, M., Alizadeh, R., Mahmudi, R., Labbaf, S., Sadrnezhaad, S.K. and Atari, M., 2024. Using solution heat treatment and multi directional forging to improve the mechanical and corrosion properties of an Mg–2Zn–0.2Ag alloy. Metals and Materials International, 30(6), pp.1538-1555.

[7] Liu, B., Yang, J., Zhang, X., Yang, Q., Zhang, J. and Li, X., 2023. Development and application of magnesium alloy parts for automotive OEMs: A review. Journal of Magnesium and Alloys, 11(1), pp.15-47.

[8] Chen, Q., Chen, R., Su, J., He, Q., Tan, B., Xu, C., Huang, X., Dai, Q. and Lu, J., 2022. The mechanisms of grain growth of Mg alloys: A review. Journal of Magnesium and Alloys, 10(9), pp.2384-2397.

[9] Jin, Z.Z., Zha, M., Wang, S.Q., Wang, S.C., Wang, C., Jia, H.L. and Wang, H.Y., 2022. Alloying design and microstructural control strategies towards developing Mg alloys with enhanced ductility. Journal of Magnesium and Alloys, 10(5), pp.1191-1206.

[10] Shah, S.S.A., Liu, M., Khan, A., Ahmad, F., Chaudry, U.M., Khan, M.Y., Abdullah, M.R., Xu, S. and Peng, Z., 2025. Recrystallization aspects and factors affecting their roles in Mg alloys: A comprehensive review. Journal of Magnesium and Alloys, in press.

[11] Jiang, P., Blawert, C. and Zheludkevich, M.L., 2020. The corrosion performance and mechanical properties of Mg-Zn based alloys—a review. Corrosion and Materials Degradation, 1(1), p.7.

[12] Pan, H., Ren, Y., Fu, H., Zhao, H., Wang, L., Meng, X. and Qin, G., 2016. Recent developments in rare-earth free wrought magnesium alloys having high strength: A review. Journal of Alloys and Compounds, 663, pp.321-331.

[13] Hadadzadeh, A., Wells, M.A., Shaha, S.K., Jahed, H. and Williams, B.W., 2017. Role of compression direction on recrystallization behavior and texture evolution during hot deformation of extruded ZK60 magnesium alloy. Journal of Alloys and Compounds, 702, pp.274-289.
[14] Roostaei, M., Parsa, M.H., Mahmudi, R. and Mirzadeh, H., 2015. Hot compression behavior of GZ31 magnesium alloy. Journal of Alloys and Compounds, 631, pp.1-6.
[15] Dinaharan, I., Zhang, S., Chen, G. and Shi, Q., 2022. Assessment of Ti-6Al-4V particles as a reinforcement for AZ31 magnesium alloy-based composites to boost ductility incorporated through friction stir processing. Journal of Magnesium and Alloys, 10(4), pp.979-992.
[16] Ahmadian, H., Zhou, T., Alansari, A., Kumar, A.S., Fathy, A., Elmahdy, M., Yu, Q. and Weijia, G., 2024. Microstructure, mechanical properties and wear behavior of Mg matrix composites reinforced with Ti and nano SiC particles. Journal of Materials Research and Technology, 31, pp.4088-4103.
[17] Medeiros, M.P., Lopes, D.R., Kawasaki, M., Langdon, T.G. and Figueiredo, R.B., 2023. An overview on the effect of severe plastic deformation on the performance of magnesium for biomedical applications. Materials, 16(6), p.2401.
[18] Zengin, H., Krawiec, H., Minarik, P. and Hassel, A.W., 2025. Influence of Secondary Phases and Their Redistribution by Deformation on Corrosion Behaviour of Magnesium Alloys–A Short Review. Journal of Materials Research and Technology.
[19] Zohrevand, M., Alizadeh, R. and Mahmudi, R., 2023. Using different strategies to improve properties of the biodegradable Mg–4Li–4Zn alloy. Journal of Materials Research and Technology, 27, pp.2066-2079.
[20] Yang, Y., Liu, Y., Guo, X., Yin, C., Yu, J., Zhang, Z. and Huang, H., 2023. The hot deformation behavior, microstructure and texture evolution of homogenized Mg–9Li–1Zn alloy. Journal of Materials Research and Technology, 25, pp.2602-2618.
[21] Sadiq, T.O., Sudin, I., Alsakkaf, A., Idris, J. and Fadil, N.A., 2023. Effect of homogenization heat treatment on the microstructure of AZ91 magnesium alloy at different temperatures and ageing times. Journal of Engineering Research, 11(3), pp.212-218.
[22] Easton, M.A., Qian, M., Prasad, A. and StJohn, D.H., 2016. Recent advances in grain refinement of light metals and alloys. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 20(1), pp.13-24.
[23] Yang, Z., Nakata, T., Xu, C., Wang, G., Geng, L. and Kamado, S., 2023. Preparation of high-performance Mg-Gd-Y-Mn-Sc alloy by heat treatment and extrusion. Journal of Alloys and Compounds, 934, p.167906.
[24] Sharma, S.K., Saxena, K.K., Malik, V., Mohammed, K.A., Prakash, C., Buddhi, D. and Dixit, S., 2022. Significance of alloying elements on the mechanical characteristics of Mg-based materials for biomedical applications. Crystals, 12(8), p.1138.
[25] Savaedi, Z., Mirzadeh, H., Aghdam, R.M. and Mahmudi, R., 2022. Thermal stability, grain growth kinetics, mechanical properties, and bio-corrosion resistance of pure Mg, ZK30, and ZEK300 alloys: A comparative study. Materials Today Communications, 33, p.104825.
[26] Yang, Q., Xie, Z., Li, J., Lv, S., Zhang, W., Wu, R., Pan, H., Li, R. and Qiu, X., 2023. ZK60 based alloys with high-strength and high-ductility: a review. Resources Chemicals and Materials, 2(2), pp.151-166.
[27] Sanyal, S., Kanodia, S., Saha, R., Bandyopadhyay, T.K. and Mandal, S., 2019. Influence of hard plate hot forging temperature on the microstructure, texture and mechanical properties in a lean Mg–Zn–Al alloy. Journal of Alloys and Compounds, 800, pp.343-354.
[28] Meng, S., Xiao, H., Song, J., Bi, G., Wang, Q., Wang, Z., Yu, H. and Liu, H., 2024. Research progress and future prospects on high speed extrudable magnesium alloys: A review. Journal of Materials Research and Technology, 30, pp.9007-9019.
[29] Cheng, M., Chen, J., Yan, H., Su, B., Yu, Z., Xia, W. and Gong, X., 2017. Effects of minor Sr addition on microstructure, mechanical and bio-corrosion properties of the Mg-5Zn based alloy system. Journal of Alloys and Compounds, 691, pp.95-102.
[30] Bian, J., Yu, B., Jiang, L., Hao, J., Zhu, H., Jin, P., Zheng, L. and Li, R., 2021. Research on the effect of Sr and Zr on microstructure and properties of Mg–4Zn alloy. International Journal of Metalcasting, 15, pp.1483-1498.
[31] Liu, X.Q., Qiao, X.G., Xie, W.C., Pei, R.S., Yuan, L. and Zheng, M.Y., 2022. Influence of grain size on microstructure, mechanical properties and strain hardening behavior of Mg-0.3 Ca (wt.%) alloy. Materials Science and Engineering: A, 839, p.142847.
[32] Lotfpour, M., Bahmani, A., Mirzadeh, H., Emamy, M., Malekan, M., Kim, W.J., Taghizadeh, M. and Afsharnaderi, A., 2021. Effect of microalloying by Ca on the microstructure and mechanical properties of as-cast and wrought Mg–Mg2Si composites. Materials Science and Engineering: A, 820, p.141574.
[33] Qin, J., Chang, L. and Su, X., 2024. Influence of Sr on microstructure evolution, mechanical and corrosion properties of extruded Mg-2Zn-0.5 Ca alloy. Journal of Magnesium and Alloys, 12(9), pp.3744-3757.
[34] Wong, T.W., Hadadzadeh, A., Benoit, M.J. and Wells, M.A., 2018. Impact of homogenization heat treatment on the high temperature deformation behavior of cast AZ31B magnesium alloy. Journal of Materials Processing Technology, 254, pp.238-247.
[35] Zhao, M.C., Deng, Y.L. and Zhang, X.M., 2008. Strengthening and improvement of ductility without loss of corrosion performance in a magnesium alloy by homogenizing annealing. Scripta Materialia, 58(7), pp.560-563.
[36] Ghorbani, F., Mirzadeh, H., Dehghanian, C. and Emamy, M., 2025. Tailored mechanical properties and corrosion resistance of as-cast Mg-7Zn-0.5 Zr-0.5 Ca alloy via multi-step homogenization treatment. Journal of Alloys and Compounds, 1016, p.178980.
[37] Okamoto, H. and Okamoto, H., 2000. Phase diagrams for binary alloys (Vol. 44, pp. 307-356). Materials Park, OH: ASM international.
[38] Hu, Y., Guo, X., Qiao, Y., Wang, X. and Lin, Q., 2022. Preparation of medical Mg–Zn alloys and the effect of different zinc contents on the alloy. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 33(1), p.9.