# بررسی تاثیر سرب بر ریز ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91

محمدرضا عسکران[۱]، مسعود امامی[۲]، مهدی ملکان*[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۹، ش.ص:۳۶-۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۸)

Archive of SID

## چکیده

در این پژوهش، ریز ساختار وخواص مکانیکی آلیاژ AZ91 در شرایطی که به آن مقادیر مختلف عنصر سرب (۰، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد وزنی ) افزوده شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. ریزساختار و خواص مکانیکی هر یک از آلیاژها، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) و تست کشش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزودن سرب، کسر حجمی فاز $Mg_{17}Al_{12}$ در آلیاژ کاهش یافته است. همچنین با افزایش سرب تا ۱ درصد وزنی، تمایل به تشکیل رسوبات $Mg_{17}Al_{12}$ جدا شده کم‌تر شده و اندازه دانه‌ها، بیش‌ترین کاهش را پیدا می‌کند. علاوه بر این مشاهده شد که بیش‌ترین استحکام کششی و درصد ازدیاد طول بهینه، در آلیاژ AZ91 به همراه ۱ درصد وزنی سرب رخ می‌دهد. با افزایش سرب از ۰ تا ۱ درصد وزنی، استحکام کششی از MPa ۱۰۰ به MPa ۱۶۰ و میزان درصد ازدیاد طول از ۲/۷ به ۷ درصد، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرب تا ۳ درصد وزنی، استحکام کششی از MPa ۱۶۰ به MPa ۱۲۴ و میزان درصد ازدیاد طول از ۷ به ۶/۵ درصد، کاهش می‌یابد. بررسی سطح شکست نیز نشان داد که شکست در این آلیاژها به صورت کلیواژ (ترد) می‌باشد و با افزوده شدن سرب تغییری در نوع سطح شکست به وجود نمی‌آید و تنها در برخی از مناطق تغییر فرم پلاستیک به صورت موضعی دیده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی**: آلیاژ منیزیم AZ91، سرب (Pb)، ریزساختار، خواص مکانیکی، اندازه دانه.

[۱] - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

[۲] - استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

[۳] - استادیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران، تهران

*- نویسنده مسئول مقاله: mmalekan@ut.ac.ir

www.SID.ir

## پیشگفتار

در سال‌های اخیر، تقاضا برای آلیاژهای منیزیم، به دلیل وزن مخصوص پایین‌تر و در نتیجه مصرف سوخت کم‌تر، در صنایع خودروسازی به شدت افزایش یافته است. پیش‌بینی می‌شود که سالانه استفاده از آلیاژهای منیزیم در قطعات اتومبیل‌ها در سطح جهان افزایش یابد[۱]. آلیاژ AZ91، یکی از پرمصرف‌ترین آلیاژها در بین آلیاژهای تجاری منیزیم است که شامل ٪ ۹ آلومینیم، ٪۱ روی و مقدار کمی منگنز است. با این وجود کاربرد آلیاژ منیزیم AZ91 به دلیل استحکام و خواص مکانیکی محدود آن کم است [۲].

از جمله روش‌های شناخته شده که به منظور بهبود خواص مکانیکی و افزایش شکل‌پذیری آلیاژهای منیزیم مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از روش‌های استحکام بخشی توسط تشکیل محلول جامد، استفاده از عناصر بهساز به منظور کاهش تمایل به تشکیل فاز β جداشده و همچنین استفاده از فرآیند ریزدانه‌سازی است. لذا افزودن عناصر آلیاژی یکی از بهترین راهکارها برای بهبود خواص مکانیکی می‌باشد. به عنوان مثال فلزاتی نظیر RE، Pb، Bi،Si و Ca از جمله عناصر آلیاژی مهمی هستند که به آلیاژهای منیزیم اضافه می‌شوند تا خواص مکانیکی آن را در دمای اتاق و در دماهای بالاتر بهبود ببخشند[۳]. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد، افزودن سرب باعث ریزترشدن و کاهش مقدار رسوبات β جداشده، در سری آلیاژهای Mg-Al می‌شود. به طور مثال بابی و همکارانش[۴]، گزارش دادند که افزودن سرب خالص به آلیاژ AZ91 منیزیم، موجب ریزتر شدن و کاهش تعداد رسوبات β جداشده و ریزتر شدن دانه‌ها در این آلیاژ شده و در نتیجه، این امر موجب بهبود خواص مکانیکی در این آلیاژ می شود. همچنین کاندان و همکارانش[۵]، گزارش کرده‌اند که با افزودن مقادیر سرب تا ٪۰/۴ وزنی استحکام کششی نهایی آلیاژ AZ91 منیزیم از ۱۴۴ MPa به تقریباً ۲۰۵ MPa و درصد ازدیاد طول، از ٪۴ به ٪۴/۸ افزایش یافته‌اند.

همچنین لیو و همکارانش[۶]، گزارش کرده‌اند که مورفولوژی فاز یوتکتیک β در آلیاژ AZ61 حاوی مقادیر معینی از سرب، از حالت جداشده فاصله گرفته و همین امر باعث می‌شود که در آلیاژ AZ61 به همراه ٪۲ وزنی سرب، درصد ازدیاد طول به ٪۱۶ و استحکام کششی نهایی به MPa ۲۵۳ افزایش یابند. لازم به ذکر است که حضور ذرات β که دارای مورفولوژی جداشده و دارای ابعاد بزرگ هستند، باعث افزایش حساسیت به بروز ترک و اشاعه آن می‌شوند [۶].

در شرایط انجماد تعادلی ریز ساختار آلیاژ AZ91 شامل فاز محلول جامد α-Mg همراه با رسوبات فاز β است؛ ولی در شرایط انجماد غیر تعادلی، آلیاژ دارای ریزساختار دندریتی است که در آن فاز ترد β بین بازوهای دندریتی قرار دارد. علاوه بر ساختار دندریتی، ناهمگنی‌های دیگری نیز در نمونه-های ریختگی می‌تواند مشاهده شود که موجب تردی و کاهش شکل‌پذیری آلیاژ می‌شود [۷و۸]. در این پژوهش قصد داریم تا اثر مقادیر مختلف عنصر سرب را بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیآژ AZ91 مورد بررسی قرار دهیم.

## مواد و روش‌ها

آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش، آلیاژ AZ91 منیزیم است. برای تهیه این آلیاژ از شمش خالص تجاری منیزیم (با خلوص ٪۹۹/۹۷)، شمش آلومینیم خالص (با خلوص ٪۹۹/۹۵) و روی (با خلوص ٪۹۹/۹۸) استفاده شد. مواد مورد نیاز برای ساخت آلیاژ در داخل یک بوته گرافیتی ریخته و توسط یک کوره ذوب القایی الکتریکی ذوب شده و تحت اتمسفر محافظ مخلوط گازی ($Co_2$(٪۵)+$SF_6$(٪۹۵)) قرار گرفت. عنصر سرب با خلوص (٪۹۸ /۹۹) در انتها و در زمانی که دمای مذاب به حدود ۷۵۰°C رسید به مذاب اضافه شد. سپس مذاب به داخل یک قالب چدنی که تا دمای ۲۰۰°C پیش‌گرم شده بود ریخته شد. برای جلوگیری از اکسیداسیون و سوختن مذاب منیزیم، درون قالب با پودر مخصوصی آغشته شد. درصدهای مختلفی از عنصر سرب (۰، ۰/۵، ۱ و۳ درصد وزنی)

Archive of SID

www.SID.ir

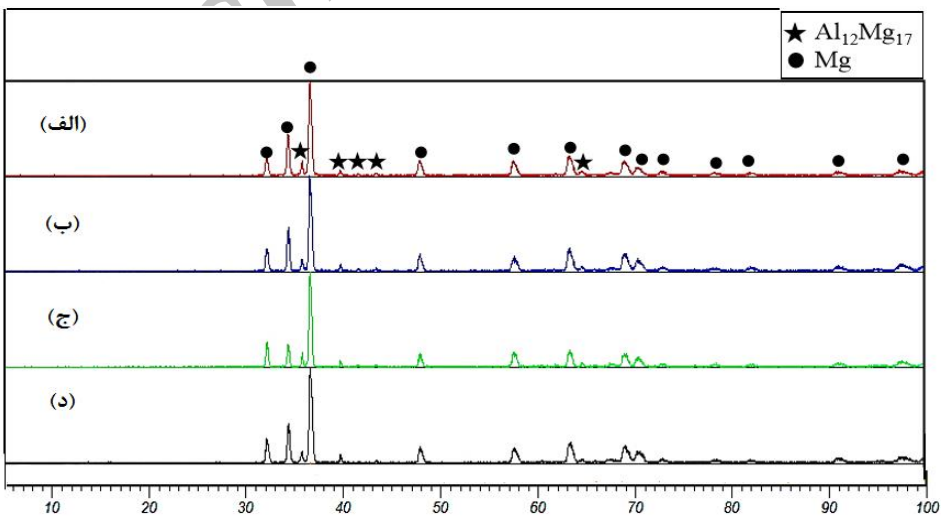
مورد استفاده قرار گرفتند تا تاثیر آن‌ها بر روی آلیاژ AZ91 بررسی شود.

پس از پایان ریخته‌گری، از هریک از ذوب‌های ریخته شده، نمونه‌های متالوگرافی در ابعاد ۱cm×۱cm×۱cm تهیه شد. سپس هر یک از نمونه‌های تهیه شده با استفاده از ورقه‌های سنباده از شماره ۲۲۰ تا ۲۰۰۰ و توسط آب سمباده‌زنی شدند. سپس هریک از نمونه‌ها با محلول آلومینای ۰/۰۵ میکرومتر پولیش و سپس اچ شدند. محلول اچ مورد استفاده متشکل از ۵ میلی‌لیتر استیک اسید، ۵ میلی‌لیتر آب، ۱/۲ گرم پیکریک اسید و ۳۵ میلی‌لیتر اتانول می‌باشد. برای به‌دست آوردن اندازه دانه‌ها در هر آلیاژ، نمونه‌ها در معرض عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای ۴۱۵°C به مدت ۱۸ ساعت قرار گرفتند [۹]. پس از آن نمونه در هوا کوئنچ شده و مشاهدات ریزساختاری مربوط به هر آلیاژ توسط میکروسکوپ نوری LEICA DRMX و با استفاده از نرم افزار آنالیز تصاویر CLEMEX مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این ریزساختار هریک از نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مدل Vega©Tesca SEM مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین تشخیص فازها توسط پراش پرتو ایکس (XRD) مدل binary diffractometer PHILIPS و با اشعه Cu-kα مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های تست کشش مطابق با استاندارد B 557M-02a تهیه شدند و توسط دستگاه تست کشش (SANTAM STM-20) با سرعت حرکت فک ۱mm/min تحت کشش قرار گرفتند. مشخصات سطح شکست نیز بر روی نمونه‌های تست کشش شکسته‌شده توسط SEM مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان مکانیزم‌های شکست را در حین کشش مورد بررسی قرار داد.

## نتایج و بحث

### مشاهدات ریزساختاری

شکل ۱، نمودار پراش اشعه ایکس نمونه‌های AZ91 به همراه مقادیر مختلف سرب را نشان می‌دهد. در حالت کلی، گزارش شده که آلیاژ AZ91 از دو فاز α-Mg و β $Mg_{17}Al_{12}$ تشکیل شده است [۱۰]. همان گونه که در شکل مشخص است، دو فاز اصلی α-Mg و β در تمام نمونه‌ها وجود دارند. البته در نمونه‌های حاوی ۱ و ۳ درصد وزنی سرب بیش‌ترین مقدار سرب در زمینه توزیع می‌شود. در رابطه با حضور فاز $Mg_2Pb$ در نمونه‌های حاوی سرب نیز می‌توان گفت که مطالعات انجام شده توسط سایر پژوهشگران عدم حضور این فاز را تایید می‌نماید [۱۱].

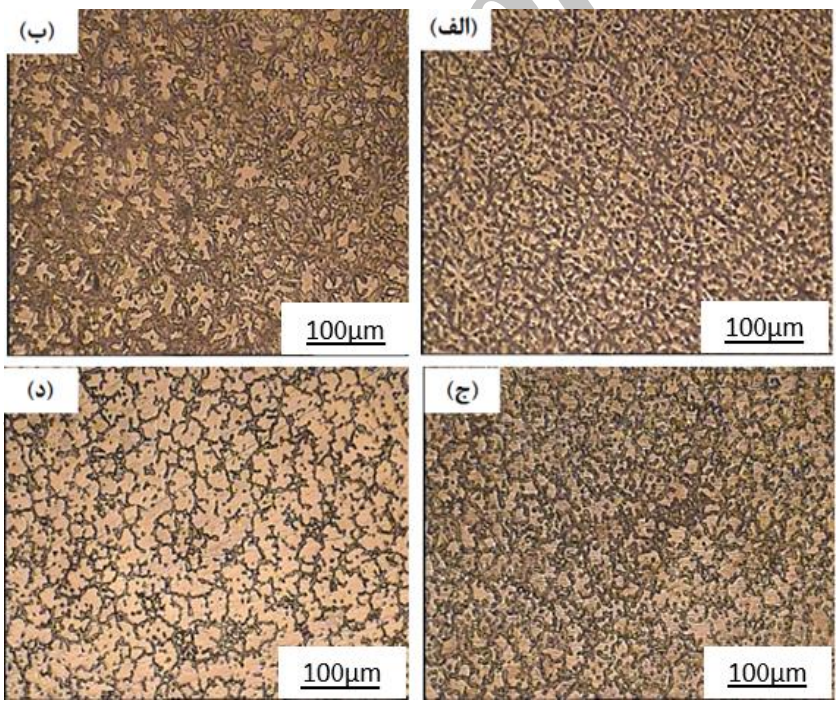



**شکل ۱- تصویر پراش اشعه ایکس (XRD) از آلیاژهای (الف) AZ91 (ب) AZ91+۰/٪۵Pb (ج) AZ91+٪۱Pb (د) AZ91+٪۳Pb**

Archive of SID

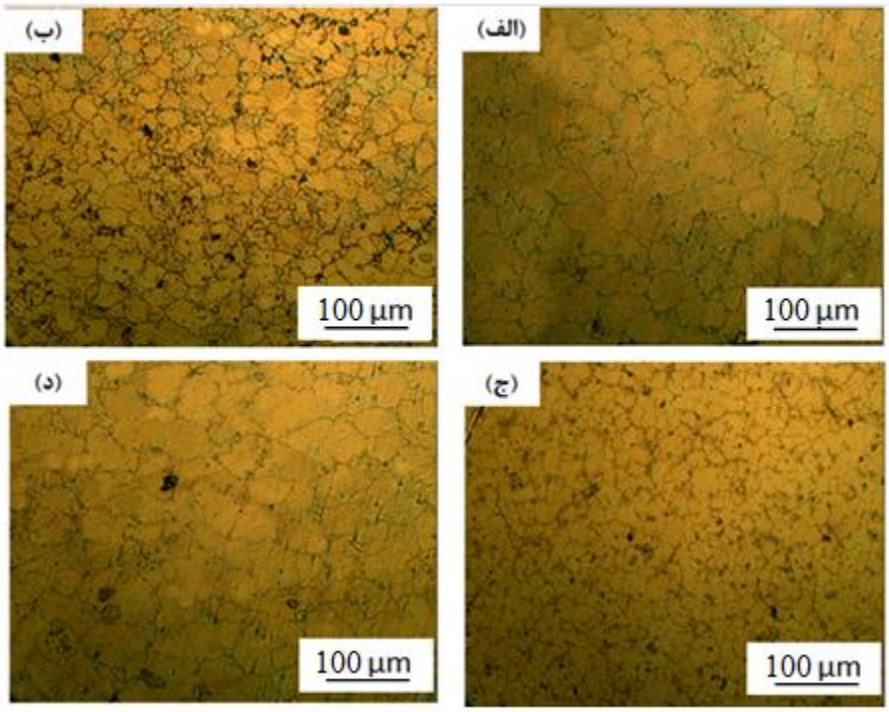
www.SID.ir

شکل ۲، تصاویر ریزساختار نوری آلیاژ AZ91 به همراه مقادیر مختلف سرب را نشان می‌دهد. در این تصاویر فاز β به رنگ تیره و فاز α-Mg به رنگ روشن دیده می‌شوند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرب در آلیاژ، کسر حجمی فاز β از ٪۲۵/۳ در AZ91 بدون سرب تا ٪۱۵/۹ در AZ91 حاوی ۳ درصد سرب کاهش می‌یابد. فاز β که به صورت یک ترکیب بین فلزی می‌باشد، با افزایش مقدار سرب به تدریج کاهش یافته است. این موضوع مطابق با نتایج پژوهش‌هایی است که نشان داده حضور سرب باعث کاهش مقدار فاز β می‌شود که علت اصلی آن مربوط به کاهش سرعت نفوذ اتم‌های Mg و Al توسط عنصر سرب است که هر دو عوامل اصلی تشکیل‌دهنده فاز β- $Mg_{17}Al_{12}$ می‌باشند [۱۰و۱۱]. شکل ۳-(الف-د) تصویر میکروسکوپ نوری آلیاژ AZ91، همراه با مقادیر مختلف سرب بعد از انجام عملیات حرارتی همگن سازی به مدت ۱۸ ساعت (T4) را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، بعد از انجام عملیات حرارتی همگن سازی، فاز β تقریبا به صورت کامل در زمینه حل شده و مرزدانه‌ها قابل مشاهده شده‌اند. همان‌گونه که از تصاویر مشخص است، با افزوده شدن مقادیر مختلف سرب اندازه دانه‌ها نسبت به آلیاژ AZ91 کاهش یافته و لذا کم‌ترین اندازه دانه در ۱ درصد وزنی سرب به‌دست می‌آید. جدول ۱ میانگین اندازه دانه و کسر حجمی فاز β را در هر یک از آلیاژهای بررسی شده، نشان می‌دهد. میانگین اندازه دانه‌ها در آلیاژ AZ91 بدون سرب برابر با ۹۶ میکرومتر است. این در حالی است که میانگین اندازه دانه‌ها در آلیاژ AZ91 به همراه ۱ درصد وزنی سرب، ۴۱ µm بوده و در بین آلیاژهای بررسی شده دارای کوچکترین اندازه دانه می‌باشد.




**شکل ۲-تصاویر ریزساختار نوری از آلیاژ ریختگی (الف) AZ91 (ب) AZ91+٪۰/۵Pb (ج) AZ91+٪۱Pb (د) AZ91+٪۳Pb**

www.SID.ir




**شکل۳-تصاویر ریزساختار نوری از آلیاژ ریختگی (الف) AZ91 (ب) AZ91+۰/۵٪Pb (ج) AZ91+۱٪Pb (د) AZ91+۳٪Pb پس از عملیات حرارتی همگن سازی در دمای ۴۱۵ °C به مدت ۱۸ ساعت**

**جدول ۱- میانگین اندازه دانه و کسر حجمی فاز $\beta$- $Mg_{17}Al_{12}$ در آلیاژ AZ91 همراه با مقادیر مختلف سرب**

| آلیاژ | کسر حجمی فاز $\beta$- $Mg_{17}Al_{12}$ | میانگین اندازه دانه (میکرومتر) |
|---|---|---|
| AZ91 | ۲۵/۳ | ۹۶ |
| AZ91+ Pb ۰/۵% | ۲۲/۵ | ۵۴ |
| AZ91+ Pb۱% | ۱۹/۳ | ۴۱ |
| AZ91+ Pb۳% | ۱۵/۹ | ۹۴ |

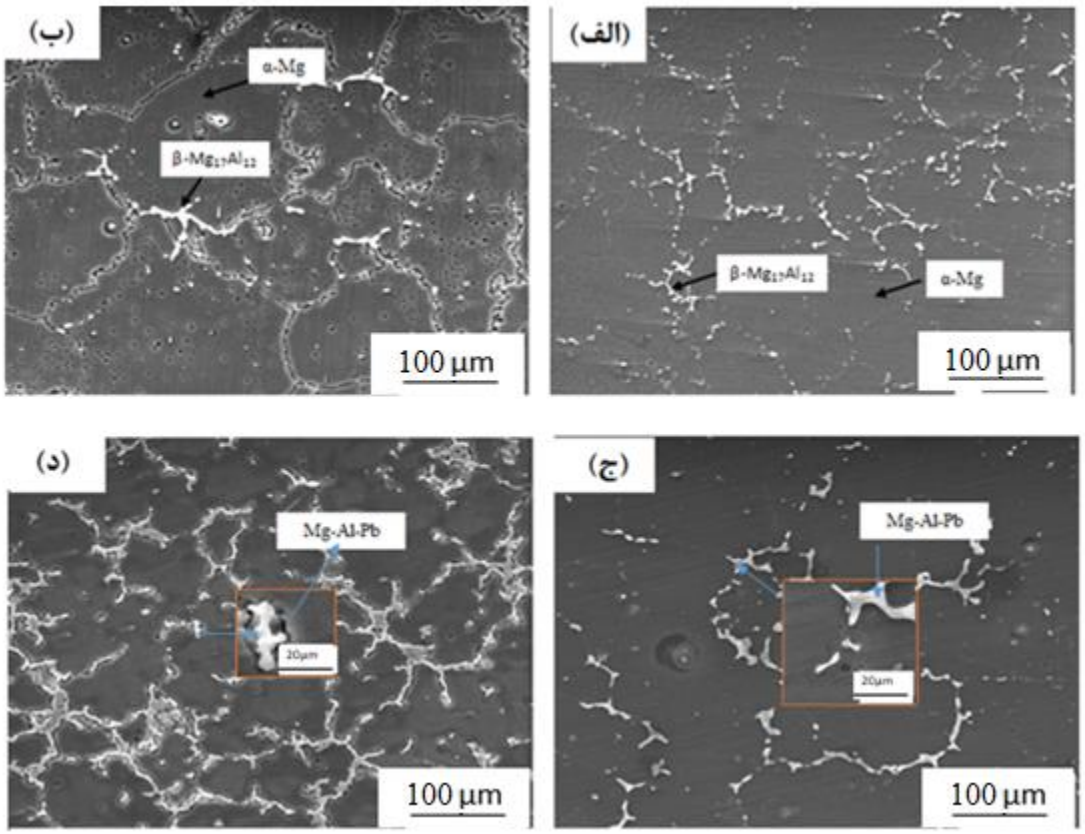
حد حلالیت سرب در منیزیم در حالت جامد به میزان ۴۵ درصد وزنی در دمای ۱۹۵ $^{\circ}C$ می‌باشد که مقدار قابل توجهی است [۱۲]. همان‌طور که قبلا نیز گفته شد به دلیل سرعت انجماد زیاد، انجماد در شرایط غیر تعادلی انجام می‌پذیرد. در فرآیند انجماد ابتدا کریستال‌های $\alpha$-Mg تشکیل شده و رشد می‌کنند، همچنین در حین فرآیند انجماد در فصل مشترک بین فاز $\alpha$-Mg و مذاب باقی مانده که غنی از سرب است، فوق تبرید ایجاد شده و مانع از رشد دانه می‌شود که این پدیده را می‌توان با پدیده تحت تبرید غلظتی توجیه نمود [۱۳]. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش آلیاژ AZ91 به همراه ۱ درصد وزنی سرب، ترکیب بهینه‌ای است که به ترتیب، کم‌ترین مقدار فاز $\beta$ جداشده و کم‌ترین اندازه دانه را به وجود آورده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) آلیاژهای AZ91 همراه با مقادیر مختلف سرب در شکل ۴ نشان داده شده‌است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است فاز $\beta$ در آلیاژ AZ91 در مناطق بین‌دندریتی

Archive of SID

www.SID.ir

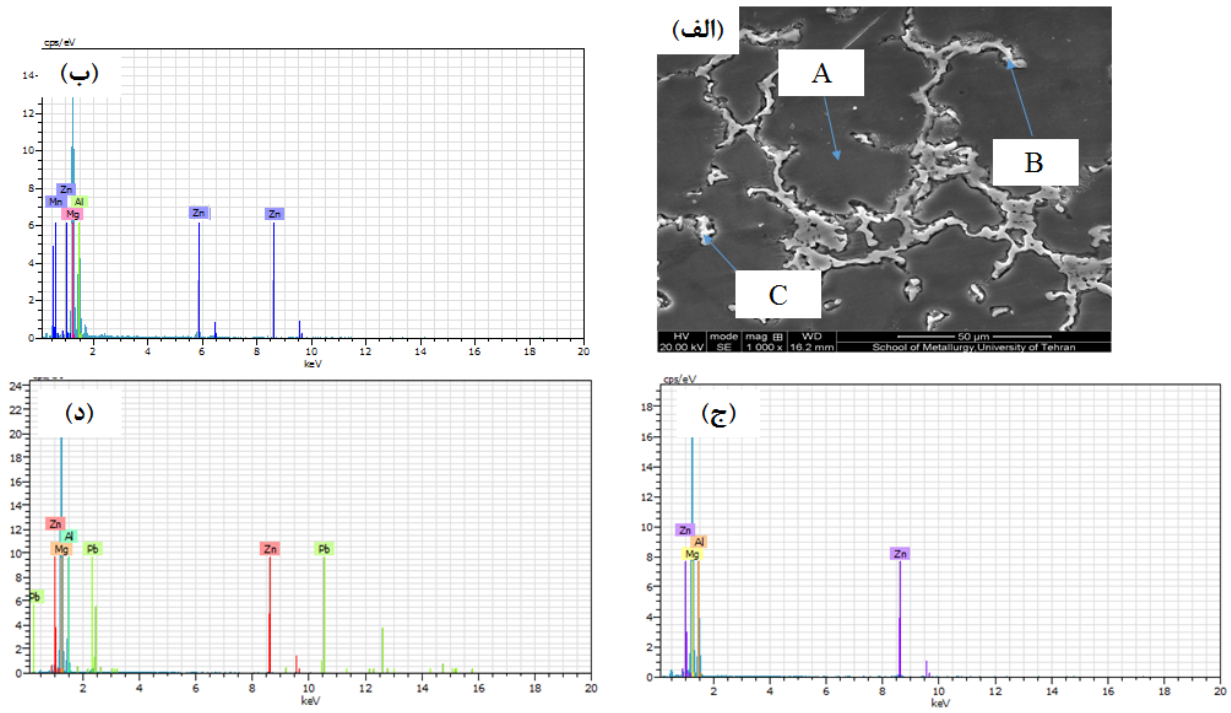
تشکیل می‌شوند. در شکل ۴ زمینه که به رنگ تیره است، فاز α-Mg و روشن‌تر نمایش‌دهنده فاز β است. با استفاده از EDS (شکل۵) نیز می‌توان تشخیص داد که غلظت عنصر آلومینیم در مناطق بین‌دندریتی بیش‌تر از زمینه است. همچنین تمرکز عنصر منیزیم در زمینه بیش‌تر از سایر مناطق است.

در شکل ۴-(ج-د) به ترتیب تصاویر SEM از آلیاژ AZ91 شامل ۱و۳ درصد وزنی سرب را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که از تصاویر مشخص است، فاز جدیدی با ترکیب متفاوت نسبت به فازهای اصلی تشکیل شده است. شکل ۵ تصویر SEM و آنالیز EDS مربوط به آن را در آلیاژ AZ91 همراه با ۳ درصد وزنی سرب نشان می‌دهد. درشکل ۵-(الف-د) آنالیز EDS از نقاط A، B وC که در شکل ۵-الف مشخص شده، به نمایش در آمده است. آنالیز نقطه A در شکل ۵-ب نشان می‌دهد که این فاز دارای ٪۳۲ وزنی Al، ٪۶ وزنی Zn و ٪۶۰ وزنی Mg می‌باشد. با استفاده از این آنالیز و همچنین نتایج حاصل از XRD که در شکل ۱ مشاهده می شود، می‌توان گفت که این منطقه، می‌تواند فاز α-Mg باشد و نقطه A نشان دهنده فاز α-Mg می‌باشد. آنالیز نقطه B از شکل ۵-ج نشان می‌دهد که این فاز دارای ٪۳۵ وزنی Al، ٪۶ وزنی Zn و ٪۵۸ وزنی Mg می‌باشد. با استفاده از این آنالیز و همچنین نتایج XRD که در شکل ۱ به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که نقطه B همان فاز βمی‌باشد. همچنین آنالیز نقطه C از شکل ۵-د نشان می‌دهد که این فاز دارای ٪۲۶ وزنی Al، ٪۷۰ وزنی Mg، ٪۲ وزنی Zn و ٪۲ وزنی Pb می‌باشد. با استفاده از این آنالیز این فاز می‌تواند به عنوان فاز سه‌تایی Mg-Al-Pb در نظر گرفته شود که به دلیل مقدار اندک آن (حدود ٪۳ کسر حجمی) امکان تشخیص این فاز توسط XRD وجود ندارد [۶].




**شکل ۴- تصاویر SEM از آلیاژ ریختگی (الف) AZ91 (ب) AZ91+ ۰/۵ ٪Pb (ج) AZ91+ ۱ ٪Pb (د) AZ91+ ۳ ٪Pb**

www.SID.ir




شکل ۵-تصویر SEM و آنالیز EDS از آلیاژ ریختگی Pb٪ ۳ +AZ91 (الف) تصویر SEM (ب) آنالیز EDS ازنقطه A (ج) آنالیز EDS از نقطه B (د) آنالیز EDS از نقطه C

## خواص کششی

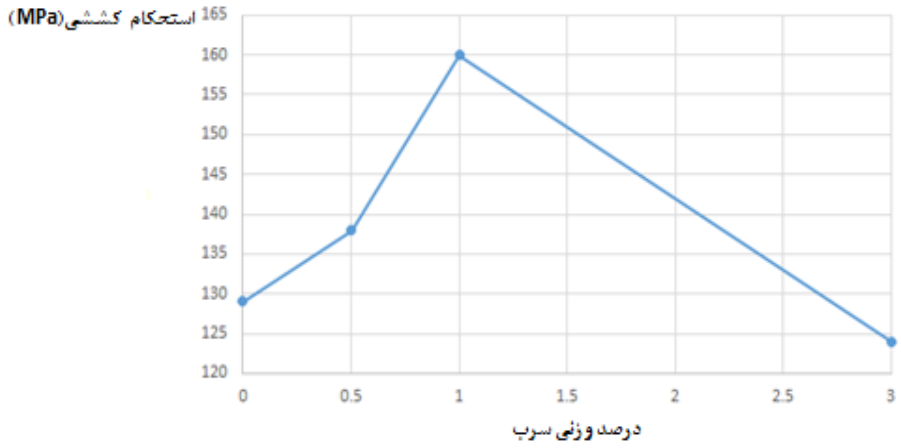
تست کشش در دمای اتاق بر روی آلیاژ AZ91 منیزیم که شامل مقادیر مختلف سرب است، انجام شد. شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب استحکام کششی و درصد ازدیاد طول را بر حسب میزان سرب در آلیاژ AZ91 نشان می‌دهند. استحکام کششی و ازدیاد طول آلیاژ AZ91 منیزیم بدون سرب به ترتیب ۱۲۹ MPa و ٪ ۲/۷ است. بیش‌ترین میزان استحکام کششی و ازدیاد طول نیز مربوط به آلیاژAZ91 شامل ۱ درصد وزنی سرب است، می‌باشد. استحکام کششی و ازدیاد طول در این آلیاژ به ترتیب برابر با ۱۶۰ MPa و ٪۷ است. این امر بدین معنی است که نسبت به آلیاژ AZ91، با افزایش سرب تا ۱ درصد وزنی در این آلیاژ استحکام کششی حدود ٪۲۴ و درصد ازدیاد طول حدود ٪۴ افزایش نشان داده است. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش سرب به ٪۱ استحکام کششی و داکتیلیتی آلیاژ افزایش می‌یابد. علت این امر نیز به دلیل کاهش اندازه دانه و کاهش میزان تمایل به تشکیل فاز ترد یوتکتیک β جدا شده در اثر افزودن ٪ ۱ سرب می‌باشد. لازم به ذکر است که روش ریز دانه سازی در میان سایر روش-های استحکام بخشی، تنها روشی است که علاوه بر افزایش استحکام باعث افزایش میزان درصد ازدیاد طول نیز می‌شود [۱۴]. همچنین با افزایش سرب تا ۳ درصد وزنی به دلیل افزایش تمایل به تشکیل فاز ترد یوتکتیک β جدا شده، استحکام کششی و داکتیلیته مجددا کاهش می‌یابند و به ترتیب به مقادیر ۱۲۴ MPa و ٪ ۶/۵ می‌رسند.

## رفتار شکست کششی

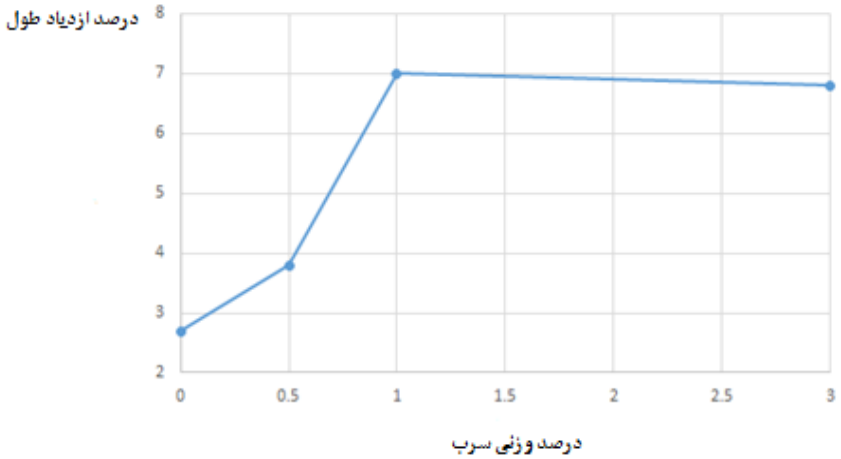
شکل ۸، سطح شکست آلیاژ AZ91 را همراه با مقادیر مختلف عنصر سرب نمایش می‌دهد. مشخص است که شکست در هر دو حالت شکل ۸ از نوع ترد و به صورت کلیواژ است. هر دو تصویر دارای تعداد ترک زیاد و از نوع ثانویه می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir




**شکل ۶-استحکام کششی آلیاژ AZ91 بر حسب درصد وزنی سرب**



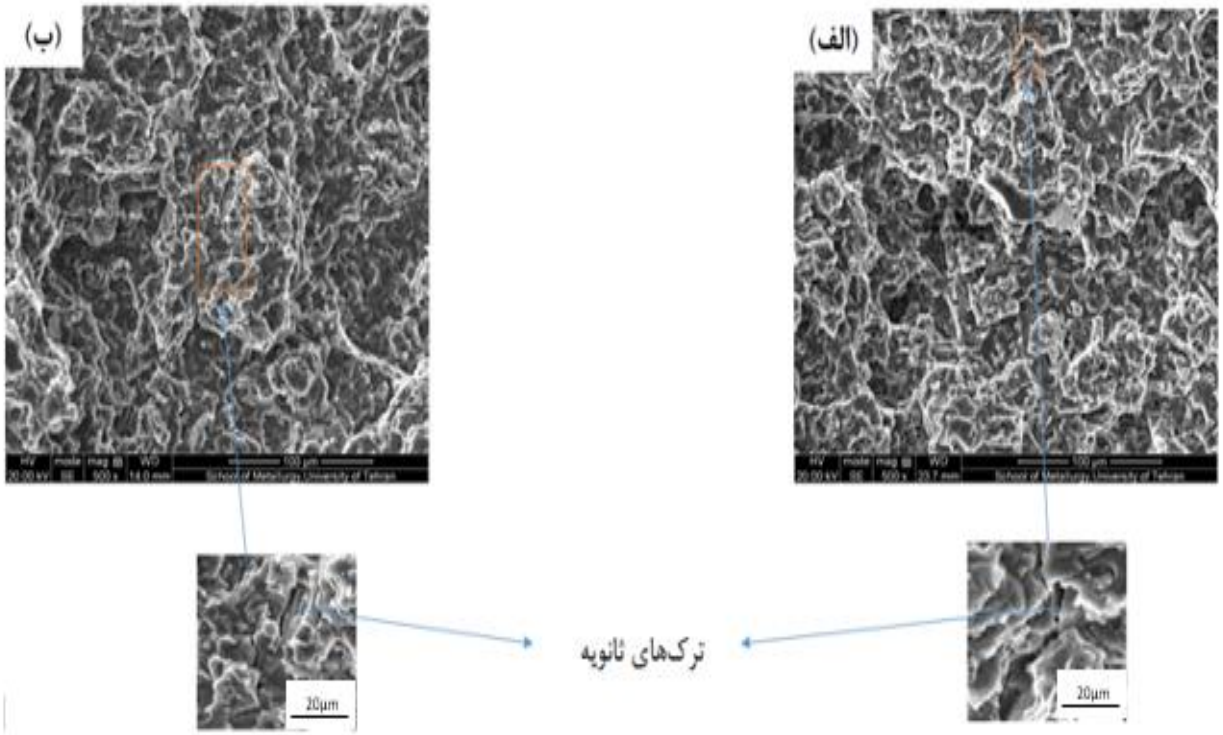

**شکل ۷-درصد ازدیاد طول آلیاژ AZ91 بر حسب درصد وزنی سرب**

شایان ذکر است که از جمله مشخصات ترک‌های ثانویه این می‌باشد که این ترک‌ها معمولا عمود بر یک ترک اصلی می-باشند و معمولا در فصل مشترک بین رسوبات $Mg_{17}Al_{12}$ و زمینه و یا در نزدیکی مرزدانه‌ها تشکیل می‌شوند. علاوه بر این در هر دو تصویر مناطقی وجود دارند که در آن‌ها تغییر شکل پلاستیک به صورت موضعی دیده می‌شود. همچنین تعدادی میکرو حفره در هر دو سطح شکست مشاهده می‌شود. در شکل ۸-(ب) تعداد بیشتری از مناطق دچار تغییر شکل پلاستیک نسبتاً یکنواختی در سطح شکست شده‌اند که مشاهده می‌شود. همین امر دلیل این است که داکتیلیتی و استحکام کششی در آلیاژ AZ91 همراه با سرب، بیش‌تر از

www.SID.ir

آلیاژ AZ91 بدون سرب بوده است. منیزیم دارای ساختار کریستالی هگزاگونال (hcp) می‌باشد، به همین دلیل سیستم‌های لغزش آن دارای محدودیت هستند که این امر موجب کاهش شکل‌پذیری و کارسختی در آن می‌شود. شکست در آلیاژهای منیزیم معمولا به صورت شکست ترد رخ می‌دهد که در این بین، شکست از نوع کلیواژی و شبه کلیواژی مرسوم‌ترین نوع شکست در این آلیاژها می‌باشند. شکست کلیواژی در منیزیم معمولا بر روی صفحه کریستالی (۰۰۰۲) رخ می‌دهد. در آلیاژ AZ91، فاز β مهم‌ترین ترکیب بین‌فلزی استحکام بخش می‌باشد. فاز β ، با ساختار کریستالی مکعب مرکز پر (bcc)، با منیزیم زمینه با ساختار کریستالی (hcp) ناسازگار می‌باشد و این امر منجر به این می‌شود که فصل مشترک α-Mg/ β- $Mg_{17}Al_{12}$ مکان مناسبی برای بروز شکست باشد[۱۵]. علاوه بر این فاز β- $Mg_{17}Al_{12}$، دارای استحکام کمی بوده و تمایل به شکست دارد. به همین دلیل میکروترک‌ها تمایل دارند تا در فصل مشترک α-Mg/ β- $Mg_{17}Al_{12}$ و یا حتی در ذرات فاز β جوانه بزنند. کسر حجمی و مورفولوژی β تا حد زیادی تعیین کننده خواص مکانیکی آلیاژ AZ91 می‌باشد [۱۶]. در آلیاژ AZ91 ریختگی، ذرات β به صورت ناپیوسته، در زمینه آلیاژ توزیع شده‌اند. جوانه‌زنی ترک در ابتدا در مجاورت ذرات β و مرزدانه‌ها، به خصوص در فصل مشترک α-Mg/ β- $Mg_{17}Al_{12}$ رخ می‌دهد.

ترک‌ها اصطلاحا به رود بلندی از ترک تبدیل شده که به ترک اصلی وصل بوده و به صورت ثانویه حضور داشته است. ترک‌های ثانویه دارای عمق بیشتری می‌باشند و این نشان دهنده این است که ترک زمان کافی برای رشد در حین تست کشش را داشته است. همچنین این اتفاق نشان دهنده قابلیت شکل‌پذیری ضعیف آلیاژ AZ91 است [۱۶].




**شکل ۸- سطح شکست نمونه های تست کشش آلیاژ AZ91 (الف) بدون Pb (ب) همراه با ۳ درصد سرب**

www.SID.ir

## نتیجه گیری

تاثیر عنصر سرب بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ AZ91 به روش ریخته‌گری در قالب فلزی بررسی شد. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- افزودن عنصر سرب به آلیاژ به میزان ۱ درصد وزنی باعث بیش‌ترین کاهش اندازه از ۹۶ به ۴۱ µm شد و همچنین افزودن عنصر سرب تا ۳ درصد وزنی موجب کاهش کسر حجمی فاز β از ٪۲۵/۳ به ٪۱۵/۹ در این آلیاژ می‌شود.

۲- علاوه بر فازهای α-Mg و β موجود در ریز ساختار آلیاژ AZ91، با افزودن ۱ و ۳ درصد وزنی سرب به این آلیاژ، احتمال حضور فاز سه تایی Mg-Al-Pb در آلیاژ می‌باشد، که با توجه به مقادیر بسیار کم این فاز امکان تشخیص آن توسط XRD وجود نداشت.

۳- بهترین خواص مکانیکی در بین آلیاژهای مورد مطالعه در آلیاژ AZ91 به همراه ۱ درصد وزنی سرب به‌دست آمد که باعث شد، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول از MPa ۱۲۹ و ٪۲/۷ به MPa ۱۶۰ و ٪۷ رسید و سپس با افزودن ۳ درصد وزنی سرب، استحکام کششی و داکتیلیته به ترتیب به مقادیر MPa ۱۲۴ و ٪۶/۸ کاهش یافتند.

۴- بررسی سطح شکست نمونه‌های تست کشش نشان داد که شکست در دمای اتاق در هر یک از نمونه‌ها به صورت کلیواژ است و با افزودن سرب تغییری در نوع شکست ایجاد نمی‌شود و تنها در برخی از مناطق تغییر فرم پلاستیک به صورت موضعی رخ می‌دهد.

***References:***


1- B. L. Mordike, T. Ebert, Magnesium Properties -Applications-Potential, Materials Science and Engineering, Vol 302, pp. 3745, 2001.

2- K. U. Kainer, Magnesium Alloys and Technology, Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.

3- P .Moreno, Nandy, T.K.Jones , J.W. Allison, J .E. Pollock , Microstructural stability and creep of rare earth containing magnesium alloys, ScriptaMaterialia,Vol.48, (2003), pp.1029–1034.

4-A. Boby ,U.T.S.Pillai , B.C.Pai , "Effect of Pb Addition on the Discontinuous and Continuous Mg17Al12-β Precipitate During Solidification of AZ91 Magnesium Alloy", Trans Indian Inst Met (April 2013) 66(2):105–108.

5-S. Candan, M. Unal, M. Turkmen, E. Koc, Y. Turen, E. Candan ,"Improvement of mechanical and corrosion properties of magnesium alloy by lead addition" , Department of Metals, Karabuk University, 78200 Karabuk, Turkey.

6-H. Liu and W. Gao,"Effect of Pb and Sn additions on the ductility of cast AZ61 Mg alloy", Department of Chemical and Materials Engineering, The University of Auckland. PB 92019, Auckland 1142, New Zealand.

7- E. Cerri, P. Leo, P. De Marco, 'Hot Compression Behavior of the AZ91 Magnesium Alloy Produced by High Pressure die casting", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 189, pp. 97106, 2007.

8- M. M. Avedesian, H. Baker, Magnesium and Magnesium Alloys. ASM Specialty Handbook,Materials.Park,.ASM,International, 1999.

9-A.Kielbus,L.Cizek,L.Pawlica, 'Microstructural,Changes of AZ91Magnesim Alloy After HeatTreatment", 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, pp. 196-202. 2004.

10-A. BOBY, U. T .S. Pillai, and B. C. PAI, 'Investigation on Lead and Yttrium Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of


Archive of SID

www.SID.ir

AZ91 Magnesium Alloy", Materials Science and Technology Division ,National Institute for Interdisciplinary, Science and Technology (NIIST), India.

11-S. Wei, T. Zhu, H. Hou, J. Kim, E. Kobayashi, T. Sato, M. Hodgson, W. Gao," Effects of Pb/Sn additions on the age-hardening behaviour of Mg–4Zn alloys" Department of Chemical & Materials Engineering, Faculty of Engineering, The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand.

12-E.F. Emley, Principle of Magnesium Technology,1st ed.,Pergamon,1966.

13- Y. C. Lee, D. H. StJohn, J. E. C. Hutt, A. K. Dahle, "Effect of Grain Refinement and Silicon

14- W.Yuan, S.K. Panigrahi, J.-Q. Su, R.S. Mishra, '' Influence of grain size and texture on Hall–Petch relationship for a magnesium alloy", Scripta Materialia, Volume 65, Issue 11, December 2011, Pages 994-997.

15-L .Zheng, H .Nie, W .Liang, H .Wang, Y . Wang, "Effect of pre-homogenizing treatment on microstructure and mechanical properties of hot-rolled AZ91 magnesium alloys'', Journal of Magnesium and Alloys, Volume 4, Issue 2, June 2016, Pages 115-122.

16-Y.Z.Lu, Q. D .Wang, W. J. Ding, X .Q. Zeng, Y. P. Zhu, 'Fracture Behavior of AZ91 Magnesium alloy", Materials Letters, Vol. 44, pp 265-268, 2000.

Archive of SID

www.SID.ir