

به نام پروردان هستی بخش



دانشگاه تهران
پردیس دانشکده های فنی
دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

عنوان
بررسی اثر عناصر کمیاب حاکی و زیر کونیم بر رفتار خزشی آلیاژ منیزیم
AZ91

فرهود کبیریان

استاد راهنما

دکتر رضا محمودی

استاد مشاور

دکتر حسن فرهنگی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی اشد

گرایش شناسایی و انتخاب مواد

بهمن ۸۶

۱۳۸۷ / ۲ / ۱۳

۱۳۸۷ / ۲ / ۱۳



تعهد نامه اصالت اثر

اینجانب ... فرهود کبیریان..... تایید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلا برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: فرهود کبیریان

امضاء دانشجو: [Signature]

تقدیم بہ پدر و مادر م حامیان، ہمیشگی من در زندگی

سپاس و قدر دانی

بر خود لازم می دانم که از جناب آقای دکتر محمودی استاذ ارجمندی این پایان نامه، به خاطر فراهم آوردن فضای فکری

و ابرازی مناسب به منظور انجام این تحقیق، سپاسگزاری نمایم.

همچنین بدینوسیله از آقایان مهندس گرانمایه و مهندس نوری که در انجام این فرایند طولانی مدت از نظر فکری و علمی با اینجانب

همیار بودند تشکر و قدر دانی به عمل می آورم.

چکیده

در این تحقیق اثر اضافه سازی زیرکونیم و عناصر کمیاب خاکی بر رفتار خزشی آلیاژ منیزیم، AZ91 با ترکیب شیمیایی اسمی $Mg-(8.3-9.7)wt.\%Al-(0.35-1.0)wt.\%Zn-(0.15-0.5)wt.\%Mn$ مورد بررسی قرار گرفت. Zr در سه درصد وزنی ۰/۲، ۰/۶ و ۱/۰ به آلیاژ پایه اضافه شد. عناصر کمیاب خاکی، RE، نیز در درصدهای وزنی ۱، ۲ و ۳ به آلیاژ پایه اضافه گردیدند. ریزساختار آلیاژهای مورد نظر در حالت ریختگی و بوسیله میکروسکوپ نوری، SEM و XRD مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های خزش فرو روندگی در پنج دمای ۴۲۵، ۴۵۵، ۴۸۵، ۵۲۵ و ۵۷۰K و سطوح تنشی ۱۰۰ تا ۷۰۰ MPa انجام گرفتند. با بکارگیری رابطه توانی مشخص شد توان‌های تنش بدست آمده برای آلیاژ پایه تابع دما بوده و از مقداری حدوداً برابر با ۶/۳ در دمای ۴۲۵K به مقداری برابر با ۴/۲ در دمای ۵۷۰K افت نشان داد. ضمن آنکه مقادیر انرژی‌های فعال سازی مربوط به خزش آلیاژ پایه کمتر از مقدار انرژی نفوذ در شبکه منیزیم بوده و با افزایش سطح تنش از مقداری برابر با ۱۱۸/۶ kJ/mol در $\sigma_{imp}/G = ۰/۰۲۱$ به مقداری حدوداً برابر با ۹۴/۱ kJ/mol در $\sigma_{imp}/G = ۰/۰۴۰$ افت نمود. بر اساس محاسبات صورت گرفته این مقادیر انرژی فعال سازی همراه با توان‌های تنش بدست آمده، خزش نابجایی‌ها تحت کنترل نفوذ در داخل شبکه به همراه نفوذ در هسته نابجایی‌ها را بعنوان مکانیزم خزشی پیشنهاد می‌نماید. مطالعه ساختار آلیاژ پایه بعد از خزش نشان از کشیدگی و فشردگی شدید رسوبات بین دندریتی $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ در امتداد مسیر تغییر شکل را داشت که این خود ناتوانی این رسوبات، در جلوگیری از تغییر شکل بیشتر خصوصاً در نواحی مرزی را ثابت کرد. نتایج خزشی آلیاژهای حاوی زیرکونیم و نیز عناصر کمیاب خاکی ضمن آنکه رفتار خزشی مشابه با آلیاژ پایه را ارائه نمود، نشان از بهبود مقاومت خزشی این آلیاژها نسبت به آلیاژ پایه را داشت. بهبود مقاومت خزشی در آلیاژهای حاوی زیرکونیم به تشکیل ذرات میکرونی حاوی زیرکونیم در داخل دندریت‌ها نسبت داده شد. مطالعات XRD نشان داد که این ذرات احتمالاً ترکیبات بین فلزی Al_2Zr و Al_3Zr_2 بوده که از پایداری حرارتی قابل ملاحظه‌ای برخوردارند. این ذرات سدی پایدار در برابر حرکت نابجایی‌ها در حین خزش محسوب می‌شوند. بهبود مقاومت خزشی در آلیاژهای حاوی RE به شکل‌گیری ترکیبات بین فلزی $Al_{11}RE_3$ که با یک مورفولوژی میله‌ای - انشعابی در داخل دندریت‌ها و بر روی مرزهای دندریتی گسترش یافتند نسبت داده شد. این ترکیبات با پایداری حرارتی قابل ملاحظه و معرفی سطوح فصل مشترکی بالا با زمینه منیزیم، مانعی محکم در برابر حرکت نابجایی‌ها و نیز تغییر شکل نواحی مرزی به شمار می‌روند.

فهرست عناوین

۱	۱- فصل اول : مقدمه
۴	۲- فصل دوم: مروری بر منابع
۴	۲-۱- نگاهی کلی به خزش فلزات و آلیاژها
۵	۲-۱-۱- مکانیزم های خزشی
۸	۲-۲- مروری بر خواص کلی منیزیم و آلیاژهای آن
۹	۲-۳- معرفی آلیاژهای ریختگی منیزیم حاوی آلومینیم
۱۱	۲-۴- مروری بر رفتار خزشی منیزیم و آلیاژهای آن
۲۰	۲-۵- بررسی راه حل های ممکن برای کاهش نرخ خزش
۲۱	۲-۶- علل مقاومت خزشی ضعیف آلیاژهای Mg-Al
۲۳	۲-۷- توسعه آلیاژهای ریختگی مقاوم به خزش منیزیم
۲۳	۲-۷-۱- آلیاژهای Mg-Al-RE :
۲۶	۲-۷-۲- آلیاژهای Mg-Al-Ca(-Sr)
۲۸	۲-۷-۳- آلیاژهای Mg-Al-Sr
۳۰	۲-۸- مروری بر روش خزش فرو روندگی
۳۲	۲-۸-۱- تحلیل خزش فرو روندگی
۳۴	۳- فصل سوم: روش انجام آزمایش ها
۳۵	۳-۱- تهیه مواد اولیه
۳۶	۳-۲- ذوب و ریخته گری
۳۸	۳-۳- متالوگرافی
۳۸	۳-۴- آماده سازی نمونه های خزش
۳۹	۳-۵- آزمون خزش
۴۰	۴- فصل چهارم: نتایج
۴۱	۴-۱- نتایج مربوط به آلیاژ پایه- AZ91
۴۱	۴-۱-۱- ریزساختار قبل از خزش
۴۴	۴-۱-۲- نتایج خزش آلیاژ پایه AZ91
۴۷	۴-۱-۳- ریزساختار بعد از خزش
۵۱	۴-۲- نتایج مربوط به آلیاژهای حاوی زیرکونیم
۵۱	۴-۲-۱- ریزساختار آلیاژهای حاوی زیرکونیم
۵۶	۴-۲-۲- نتایج خزش فرو روندگی آلیاژهای حاوی زیرکونیم
۶۷	۴-۳- نتایج مربوط به آلیاژهای حاوی عناصر کمیاب خاکی، RE
۶۷	۴-۳-۱- ریزساختار قبل از خزش آلیاژهای حاوی عناصر RE
۷۱	۴-۳-۲- نتایج خزش فرو روندگی آلیاژهای حاوی عناصر RE
۸۰	۴-۳-۳- ریزساختار بعد از خزش آلیاژهای حاوی عناصر RE
۸۱	۴-۴- اثر اضافه سازی کلسیم، Ca، بر ریزساختار و خواص خزشی AZ91

۸۴	۴-۵- بررسی اثر همزمان زیرکونیم و عناصر کمیاب حاکی بر مقاومت خزشی AZ91
۸۶	۵- فصل پنجم: بحث
۸۷	۵-۱- ریزساختار آلیاژ پایه در حالت ریختگی
۸۸	۵-۲- بررسی رفتار خزشی آلیاژ پایه و ارتباط آن با ریزساختار
۹۱	۵-۳- مقایسه نتایج خزش فرو روندگی با نتایج خزش کششی آلیاژ AZ91
۹۳	۵-۴- تبیین مکانیزم خزشی با کمک انرژی فعال سازی خزش
۹۹	۵-۵- بررسی مشخصه های ساختاری آلیاژهای حاوی زیرکونیم
۱۰۱	۵-۶- بررسی رفتار خزشی آلیاژهای حاوی زیرکونیم
۱۰۲	۵-۷- ارتباط بین رفتار خزشی و ریزساختار آلیاژهای حاوی زیرکونیم
۱۰۵	۵-۸- ریزساختار آلیاژهای حاوی عناصر کمیاب حاکی، RE
۱۰۶	۵-۹- بررسی رفتار خزشی آلیاژهای حاوی عناصر کمیاب حاکی، RE
۱۰۷	۵-۱۰- اثر کلسیم بر ریزساختار و مقاومت خزشی
۱۰۸	۵-۱۱- بررسی علت افت مقاومت خزشی با اضافه سازی همزمان RE و Zr
۱۰۹	۶- فصل ششم: نتیجه گیری
۱۱۲	۷- مراجع

فهرست شکل‌ها

شماره شکل	توضیحات مربوطه	صفحه
۲-۱	نمایشی شماتیک از منحنی خزش شامل مراحل مختلف خزش.	۴
۲-۲	درصد کاهش وزن مواد مختلف به عنوان جایگزینی برای فولاد با استفاده از معیار استحکام خمشی یکسان.	۸
۲-۳	تصویر SEM از جزئیات ریزساختار آلیاژ AZ91 (Mg-9Al-1Zn)	۱۵
۲-۴	الف) منحنی های خزش آلیاژ AZ91 در دما $150^{\circ}C$ (ب) میکروگراف TEM در راستای محور ناحیه ای $(2\bar{1}\bar{1}0)$ ، نابجایی ها بر روی صفحات قاعده ای (B) و نابجایی ها بر روی صفحات غیرقاعده ای (NB).	۱۶
۲-۵	تغییرات انرژی فعال سازی خزش در تنش 150MPa با دما.	۱۶
۲-۶	ریزساختار های TEM بعد از تغییر شکل خزش فشاری در دمای $275^{\circ}C$ تحت تنش 45MPa (الف و ب) و دمای $325^{\circ}C$ تحت تنش 45MPa (ج و د) آلیاژ AZ91D.	۱۸
۲-۷	نرخ کرنش نرماله شده بوسیله دما بر حسب $\sinh(\alpha_0\sigma)$ ($\alpha_0 = 0.024, Q = 143\text{kJ/mol}$)	۱۸
۲-۸	الف) منحنی نرخ خزش حداقل بر حسب تنش برای آلیاژ AM50 در محدوده دمایی 423K - 498K (ب) منحنی نرخ خزش حداقل بر حسب معکوس دما برای آلیاژ AM50.	۱۹
۲-۹	تصویر SEM نمایش دهنده ریزساختار آلیاژ AE42 (الف) به صورت ریختگی (ب) بعد از آزمایش کردن در دمای $175^{\circ}C$.	۲۵
۲-۱۰	استحکام خزشی در $175^{\circ}C$ برای آلیاژهای رایج ریختگی منیزیم و آلومینیوم در مقایسه با آلیاژهای جدید AX(J).	۲۷
۲-۱۱	الف) تصاویر TEM نمایشگر شکل گیری فاز مرزدانه ای، $(\text{Mg,Al})_2\text{Ca}$ ، در آلیاژ AX53 (ب) مورفولوژی پله ای در فصل مشترک.	۲۸
۲-۱۲	منحنی های خزش آلیاژهای AJ، AJC و AE42 در شرایط 70MPa / $175^{\circ}C$ در طول ۱۰۰ ساعت.	۳۰
۲-۱۳	نمایش ساده آزمون های خزش فرو روندگی الف و ب) با فرو رونده های هرمی و کرووی و تنش متغیر (Indentation Creep) (ج) با فرو رونده استوانه ای و تحت تنش ثابت (Impression Creep).	۳۱
۳-۱	تصاویری از سیستم ریخته گری چرخان (Tilt).	۳۷
۳-۲	نمایی شماتیک از نیم قالب ریخته گری.	۳۷
۴-۱	تصویر نوری از ساختار دندریتی آلیاژ AZ91.	۴۱
۴-۲	الگوی پراش آلیاژ AZ91.	۴۱
۴-۳	تصویر الکترون های برگشتی از ریزساختار آلیاژ AZ91.	۴۲

۴۳	الف (تصویر SEM از اجزای تشکیل دهنده ساختار آلیاژ AZ91 ب، ج و د) نتیجه آنالیز EDS از نقاط معادل نواحی C و B.A در شکل ۴-۴ الف.	۴-۴
۴۴	الف (نمایش رسوب گذاری لایه و یا ناپیوسته $Mg_{17}Al_{12}$ اطراف رسوبات یوتکتیکی ب) نتیجه آنالیز EDS از ساختار لایه‌ای.	۴-۵
۴۵	منحنی های عمق فرو رفتگی بر حسب زمان برای آلیاژ AZ91 در دماهای (الف) $425K$ ، (ب) $455K$ ، (ج) $485K$ ، (د) $525K$ و (ه) $570K$.	۴-۶
۴۶	منحنی سرعت فرو رفتن بر حسب زمان برای AZ91 در سه دمای 425 ، 455 و $485 K$ و $\sigma_{imp}/G \approx 0.034$.	۴-۷
۴۶	نمایش لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده به دما برحسب تنش نرماله شده به مدول برشی برای AZ91 در دماهای مختلف.	۴-۸
۴۷	نمایش نیمه لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده به دما بر حسب معکوس دما برای آلیاژ AZ91 در سطوح تنشی مختلف.	۴-۹
۴۹	الف و ب (سطح مقطع حاصل از برش در امتداد قطر اثر مربوط به گوشه های سمت راست و چپ نمونه خزشی در دمای $455 K$. پیکان های خمیده جهت تغییر شکل ماده را نمایش می دهند، ج) نمایش در بزرگنمایی بالا از فشردگی و تغییر شکل رسوبات و دندریت ها در امتداد جهت تغییر شکل واقع در ناحیه ۲.	۴-۱۰
۵۰	سطح مقطع حاصل از برش در امتداد قطر اثر نمونه خزشی در دمای $525 K$. بیضی اشاره به منطقه ای دارد که در آن رسوب گذاری شدید فاز $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ رخ داده است و ب) تصویر در بزرگنمایی بالا از رسوبات ثانویه ایجاد شده در مناطق فوق اشباع از آلومینیم در اطراف رسوبات $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ اولیه. پیکان ها به رسوبات $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ ثانویه ایجاد شده در منطقه تمرکز تنش اشاره دارند.	۴-۱۱
۵۱	تصاویر نوری از ریزساختار آلیاژهای (الف) پایه، (ب) AZ91، (ج) $AZ91+0.2Zr$ و (د) $AZ91+0.6Zr$ و (ه) $AZ91+1.0Zr$.	۴-۱۲
۵۲	مقایسه الگوی پراش آلیاژ $AZ91+1.0Zr$ با آلیاژ پایه.	۴-۱۳
۵۳	تصاویر حاصل از الکترون های برگشتی از ساختار الف) $AZ91+0.6Zr$ با کسر حجمی فاز دوم ۸٪ ب) AZ91 با کسر حجمی فاز دوم ۱۲٪.	۴-۱۴
۵۴	الف) تصویر الکترون های برگشتی از ذرات ایجاد شده در اثر اضافه سازی زیر کونیم، ب) طیف EDS ذرات نشان داده شده در شکل الف.	۴-۱۵
۵۵	الف) تصویر الکترون های برگشتی از ذرات ایجاد شده در اثر اضافه سازی زیر کونیم، ب) طیف EDS ذرات نشان داده شده در شکل الف.	۴-۱۶
۵۵	نقشه اشعه X (تصویر سمت چپ) از ساختار آلیاژ $AZ91+0.6Zr$ (تصویر سمت راست).	۴-۱۷
۵۷	منحنی های عمق فرو رفتگی بر حسب زمان برای آلیاژ $AZ91+0.2Zr$ در دماهای (الف) $425K$ ، (ب) $455K$ ، (ج) $485K$ ، (د) $525K$ و (ه) $570K$.	۴-۱۸
۵۸	نمایش لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما برحسب تنش نرماله شده	۴-۱۹

	بوسیله مدول برشی برای AZ91+0.2Zr در دماهای مختلف.	
۵۸	نمایش نیمه لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب معکوس دما برای آلیاژ AZ91+0.2Zr در سطوح تنشی مختلف.	۴-۲۰
۵۹	منحنی های عمق فرو رفتگی بر حسب زمان برای آلیاژ AZ91+0.6Zr در دماهای الف) ۴۲۵K، ب) ۴۵۵K، ج) ۴۸۵K، د) ۵۲۵K و ه) ۵۷۰K.	۴-۲۱
۶۰	نمایش لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب تنش نرماله شده بوسیله مدول برشی برای آلیاژ AZ91+0.6Zr در دماهای مختلف.	۴-۲۲
۶۰	نمایش نیمه لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب معکوس دما برای آلیاژ AZ91+0.6Zr در سطوح تنشی مختلف.	۴-۲۳
۶۱	منحنی های عمق فرو رفتگی بر حسب زمان برای آلیاژ AZ91+1.0Zr در دماهای الف) ۴۲۵K، ب) ۴۵۵K، ج) ۴۸۵K، د) ۵۲۵K و ه) ۵۷۰K.	۴-۲۴
۶۲	نمایش لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب تنش نرماله شده بوسیله مدول برشی برای آلیاژ AZ91+1.0Zr در دماهای مختلف.	۴-۲۵
۶۲	نمایش نیمه لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب معکوس دما برای آلیاژ AZ91+1.0Zr در سطوح تنشی مختلف.	۴-۲۶
۶۴	منحنی های خزشی بدست آمده از آلیاژهای حاوی Zr در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۲۵ K در تنش الف) ۵۰۰MPa، ب) ۵۵۰ MPa و ج) ۶۰۰ MPa.	۴-۲۷
۶۴	نمایش میله ای از حداقل سرعت فرو رفتن آلیاژهای حاوی زیرکونیم در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۲۵K.	۴-۲۸
۶۶	منحنی های خزشی بدست آمده از آلیاژهای حاوی Zr در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۵۵ K تنش الف) ۳۵۰MPa، ب) ۴۰۰ MPa و ج) ۴۵۰ MPa.	۴-۲۹
۶۶	نمایش میله ای از حداقل سرعت فرو رفتن آلیاژهای حاوی Zr در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۲۵K.	۴-۳۰
۶۷	منحنی های خزشی بدست آمده از آلیاژهای حاوی Zr در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۸۵ K در تنش الف) ۳۰۰MPa، ب) ۴۰۰ MPa.	۴-۳۱
۶۸	تصاویر نوری از ریزساختار آلیاژهای الف) پایه، AZ91 ب) AZ91+1RE ج) AZ91+2RE و د) AZ91+3RE.	۴-۳۲
۶۹	نمایش فازهای میله ای شکل در داخل و مرزهای دندریت الف) AZ91+1RE و ب) AZ91+2RE. پیکانها اشاره فازهای میله ای شکلی دارند که در اثر اضافه سازی عناصر RE در ساختار پدیدار شده اند.	۴-۳۳
۶۹	مقایسه مقایسه الگوی پراش آلیاژ AZ91+2RE با آلیاژ پایه.	۴-۳۴
۷۰	الف) تصویر الکترون های برگشتی از آلیاژ AZ91+1RE ب) آنالیز EDS بر روی فازهای روشن در تصویر الف.	۴-۳۵
۷۱	تصاویر الکترونیهای برگشتی از ریزساختار آلیاژهای الف) AZ91+1RE ب) AZ91+2RE، ج) AZ91+3RE د) نمایش میله های $Al_{11}RE_3$ در ساختار آلیاژ	۴-۳۶

	AZ91+3RE	
۷۲	منحنی های عمق فرو رفتگی بر حسب زمان برای آلیاژ AZ91+1RE در دماهای (الف) ۴۲۵K، (ب) ۴۵۵K، (ج) ۴۸۵K و (د) ۵۲۵K.	۴-۳۷
۷۳	نمایش لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب تنش نرماله شده بوسیله مدول برشی برای آلیاژ AZ91+1.0RE در دماهای مختلف.	۴-۳۸
۷۳	نمایش نیمه لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب معکوس دما برای آلیاژ AZ91+1RE در سطوح تنشی مختلف.	۴-۳۹
۷۴	منحنی های عمق فرو رفتگی بر حسب زمان برای AZ91+2RE در (الف) ۴۲۵K، (ب) ۴۵۵K، (ج) ۴۸۵K و (د) ۵۲۵K.	۴-۴۰
۷۴	نمایش لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب تنش نرماله شده بوسیله مدول برشی برای آلیاژ AZ91+2RE در دماهای مختلف.	۴-۴۱
۷۵	نمایش نیمه لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب معکوس دما برای AZ91+2RE در تنشهای مختلف.	۴-۴۲
۷۵	منحنی های عمق فرو رفتگی بر حسب زمان برای AZ91+3RE در (الف) ۴۲۵K، (ب) ۴۵۵K، (ج) ۴۸۵K و (د) ۵۲۵K.	۴-۴۳
۷۶	نمایش لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب تنش نرماله شده بوسیله مدول برشی برای آلیاژ AZ91+3RE در دماهای مختلف.	۴-۴۴
۷۶	نمایش نیمه لگاریتمی سرعت فرو رفتن نرماله شده با دما بر حسب معکوس دما برای آلیاژ AZ91+3RE در سطوح تنشی مختلف.	۴-۴۵
۷۸	منحنی های خزشی بدست آمده از آلیاژهای حاوی RE در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۲۵ K در تنش (الف) ۵۰۰MPa و (ب) ۵۵۰ MPa.	۴-۴۶
۷۸	نمایش میله ای از سرعت فرو رفتن حداقل آلیاژهای حاوی RE در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۲۵ K.	۴-۴۷
۷۹	منحنی های خزشی بدست آمده از آلیاژهای حاوی RE در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۵۵ K در تنش (الف) ۴۰۰MPa و (ب) ۴۵۰ MPa.	۴-۴۸
۷۹	نمایش میله ای از سرعت فرو رفتن حداقل آلیاژهای حاوی RE در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۵۵K.	۴-۴۹
۸۰	منحنی های خزشی بدست آمده از آلیاژهای حاوی RE در مقایسه با آلیاژ پایه در دمای ۴۸۵ K و تنش ۴۰۰MPa.	۴-۵۰
۸۱	ریزساختار بعد از خزش در دمای ۴۵۵K و تنش ۴۵۰ MPa (آلیاژ الف) AZ91+2RE و (ب) AZ91+3RE.	۴-۵۱
۸۲	الگوی پراش آلیاژ AZ91+1Ca.	۴-۵۲
۸۲	تصویر الکترون های برگشتی از ساختار آلیاژ AZ91+1Ca.	۴-۵۳
۸۳	شکل ۱۲ مقایسه رفتار خزشی آلیاژهای AZ91، AZ91+1.0Ca و AZ91+0.6Zr در دمای ۴۲۵K و تنشهای (الف) ۵۰۰MPa و (ب) ۵۵۰ MPa.	۴-۵۴

۸۴	مقایسه رفتار خزشی آلیاژهای AZ91، AZ91+1.0Ca و AZ91+0.6Zr در دمای ۴۵۵K و تنش های الف) ۴۰۰MPa و ب) ۴۵۰MPa.	۴-۵۵
۸۵	مقایسه رفتار خزشی آلیاژهای AZ91، AZ91+0.6Zr، AZ91+2RE و AZ91+2RE+0.6Zr در دمای ۴۲۵ K.	۴-۵۶
۸۵	تصویر الکترون‌های برگشتی از ساختار آلیاژ AZ91+2RE+0.6Zr حاوی ذرات پایه Al-Zr و Al-RE.	۴-۵۷
۸۷	دیاگرام فازي دو تایی منیزیم - آلومینیم	۵-۱
۹۱	مقایسه اطلاعات بدست آمده از روش خزش فرو روندگی (این تحقیق) و خزش کششی [۱۷] آلیاژ AZ91 در حالت دایکست.	۵-۲
۹۴	بازنگری اطلاعات شکل ۲-۵ با اعمال D_{eff} به جای D_I	۵-۳
۹۶	نمایش انرژی فعال سازی پیش بینی شده نسبت به تنش نرماله با مدول برشی با استفاده از رابطه (۲-۵). تغییرات انرژی‌های فعال سازی بدست آمده بوسیله آزمایش های عملی در این تحقیق تطابق نسبتاً خوبی با روند پیش بینی شده نشان می‌دهند.	۵-۴
۹۷	خط های (1) (این تحقیق)، (2) [۶۵] و (3) [۶۴] به تنش بحرانی که بالای آن نفوذ از طریق هسته نابجایی ها غالب می باشد اشاره می کند.	۵-۵
۱۰۲	تصاویر نوری از ساختار آلیاژهای الف) AZ91 و ب) AZ91+0.6Zr بعد از ۲۴ ساعت همگن سازی در دمای $410^{\circ}C$.	۵-۶

فهرست جداول

شماره جدول	توضیحات مربوطه	صفحه
۲-۱	مکانیزمهای خزش در سطوح میکرونی	۶
۲-۲	نگاهی کلی به آلیاژهای ریختگی منیزیم	۱۰
۲-۳	نرخ خزش و انرژی اکتیواسیون برای مکانیزیم های خزشی فعال شونده بوسیله حرارت	۱۲
۲-۴	انواع ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در سیستم های دوتایی منیزیم	۲۲
۲-۵	تغییر در مقادیر فازها (%wt.) با انجام آزمایش خزش آلیاژ AE42	۲۵
۳-۱	ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد استفاده در این تحقیق	۳۵
۳-۲	ترکیب محلول حاکمی مورد استفاده	۳۸

فصل نخست

مقدمه

در دوهه اخیر آلیاژهای منیزیم به عنوان یک کاندیدای مناسب به منظور بکارگیری در ساخت قطعات مورد استفاده در صنایع هوا فضا، خودرو و الکترونیک مطرح شده اند. با مطرح شدن معضل انرژی در سالهای اخیر، تمایل به استفاده از آلیاژهای منیزیم با نسبت استحکام به وزن بالا، بیشتر شده است. اگرچه این امتیاز، آلیاژهای منیزیم را بسیار مورد توجه ساخته است اما وجود برخی محدودیتها مانع گسترش این آلیاژها بوده است. مقاومت کم به خوردگی و قابلیت شکل پذیری پایین از جمله این محدودیتها می باشند.

آلیاژهای منیزیم که آلومینیم در آنها بعنوان عنصر آلیاژی اصلی محسوب می شود به خاطر قابلیت ریخته گری بالا و خواص استحکامی مناسب در دمای محیط، از پرکاربردترین آلیاژهای منیزیم می باشند. افت شدید خواص استحکامی و خزشی با افزایش دما از مواردی هستند که به عنوان مشکلات استفاده از آلیاژهای پایه Mg-Al مطرح می شوند. افت قابل ملاحظه خواص خزشی این آلیاژها در دماهای بالاتر از $150^{\circ}C$ سبب شده است که حداکثر دمای کاری آنها از $150^{\circ}C$ تجاوز ننماید. از این رو یکی از مباحثی که در تلاشهای اخیر در زمینه توسعه آلیاژهای منیزیم به آن توجه می شود بهبود مقاومت خزشی آلیاژهای پایه Mg-Al با توجه به کاربرد بالای آنها در صنایع مختلف می باشد. به این منظور تحقیقات بسیاری به منظور بررسی رفتار خزشی منیزیم و آلیاژهای آن شده است. آشنایی با مکانیزمهای خزشی در محدوده های دمایی و تنشی مختلف این امکان را فراهم می سازد که روشی مناسب برای بهبود مقاومت خزشی مورد استفاده قرار گیرد.

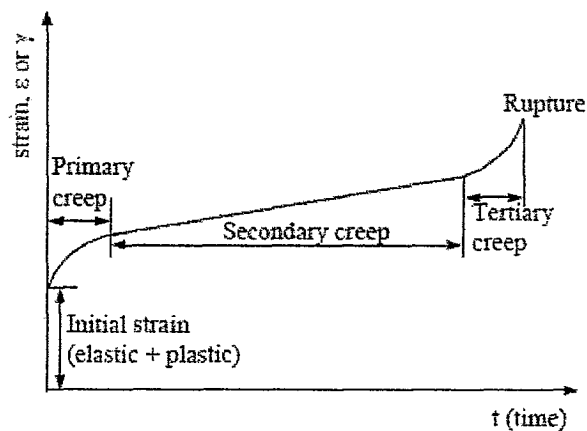
یکی از آلیاژهای مطرح منیزیم، آلیاژ AZ91 است. با توجه به ترکیب شیمیایی اسمی این آلیاژ که عبارتست از $Mg-(8.3-9.7)wt.\%Al-(0.35-1.0)wt.\%Zn-(0.15-0.5)wt.\%Mn$ ، آلومینیم به عنوان عنصر آلیاژی اصلی در این آلیاژ محسوب می گردد. همانطور که قبلا نیز گفته شد این قبیل آلیاژها، قابلیت ریخته گری عالی و خواص مکانیکی مناسبی را در دمای محیط دارا می باشند اما با توجه به ضعف خواص خزشی این آلیاژ با افزایش دما به دماهای بالاتر از $125^{\circ}C$ ، در این تحقیق سعی بر آن است تا با استفاده از روش خزش فرو روندگی با فرو رونده استوانه ای رفتار خزشی این آلیاژ در دماهای بالا مورد بحث قرار گیرد و سپس اثر اضافه سازی عناصر آلیاژی Zr ، RE و Ca بر مقاومت خزشی آن مورد بررسی قرار گیرد.

فصل دوم

مروری بر منابع

۱-۲- نگاهی کلی به خزش فلزات و آلیاژها

چنانچه یک فلز در دمای بالا تحت بار ثابت قرار گیرد یک تغییر شکل پلاستیک وابسته به زمان نشان خواهد داد [۱]. به تغییر شکل پیوسته ماده با گذشت زمان، خزش می‌گویند. به طور کلی تغییر شکل خزشی چنانچه در حالت کششی انجام شود همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است شامل چهار مرحله می‌شود. بعد از یک مرحله تغییر شکل سریع، ϵ_0 ، نرخ خزش با گذشت زمان شروع به کاهش می‌کند سپس تغییر شکل وارد مرحله پایدار می‌شود که در آن نرخ خزش تغییرات بسیار کمی با زمان نشان می‌دهد و سرانجام نرخ خزش به سرعت افزایش پیدا می‌کند تا اینکه شکست در ماده رخ می‌دهد. در خزش‌های فشاری مرحله آخر وجود ندارد.



شکل ۱-۲- نمایشی شماتیک از منحنی خزش شامل مراحل مختلف خزش [۱].

در حالیکه در تغییر شکل‌های الاستیک- پلاستیک، کرنش ایجاد شده تنها تابع تنش است (رابطه (۱-۲))، در

خزش، کرنش تابع تنش و زمان می‌باشد (رابطه (۲-۲)) [۲]:

$$\epsilon = f(\sigma) \quad (2-1)$$

$$\epsilon = f(\sigma, t) \quad (2-2)$$

با توجه به اینکه سرعت حرکت اتمها با افزایش دما زیاد می‌گردد، فرایندهای تحت کنترل نفوذ تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی دما بالای ماده مورد نظر خواهند داشت. برای مواد مختلف با توجه به نقطه ذوب آنها، دمای بالا تعاریف متفاوتی دارد. لذا به منظور انجام یک مقایسه صحیح از رفتار خزشی مواد مختلف، دمای همسانی که عبارتست از نسبت دمای آزمایش به نقطه ذوب مطلق ماده تعریف می‌گردد [۳]. به طور کلی خزش در دمای همسانی بزرگتر از ۰/۵ از اهمیت مهندسی برخوردار می‌گردد.

طبق رابطه (۲-۳) اجزای تنش فعال شده بوسیله حرارت مسبب تغییر شکل خزشی می‌باشند،

$$\sigma = \sigma_E + \sigma_T \quad (2-3)$$

که σ_T جزء حرارتی و σ_E جزء غیرحرارتی تنش می‌باشند. در حالیکه تنشهای غیرحرارتی شامل حرکت قسمتهای طولی از نابجایی های موازی می‌شوند، اجزای حرارتی تنها می‌توانند باعث حرکت بخشهای کوچکی از یک نابجایی شوند که مجموع این دو سبب تغییر شکلی آهسته و دائمی معروف به خزش می‌شوند.

۱-۱-۲- مکانیزم های خزشی

عمده مکانیزم های تغییرشکل خزشی عبارتند از:

- ۱) لغزش نابجایی: این مکانیزم شامل لغزش نابجایی بر روی صفحات لغزش و غلبه آنها بر موانع موجود می‌شود. این مکانیزم معمولا در سطوح تنش بالا ($\sigma/G > 10^{-2}$) رخ می‌دهد [۱].
- ۲) خزش نفوذی: این مکانیزم شامل حرکت جاهای خالی و اتمهای بین نشین تحت تنش اعمالی در سرتاسر کریستال می‌گردد. معمولا این مکانیزم در سطوح تنشی پایین یعنی $\sigma/G < 10^{-4}$ رخ می‌دهد. رخ دادن سیلان جاهای خالی و یا اتمهای بین نشین بوسیله نفوذ در شبکه و یا مرزهای دانه منجر به خزش پلی کریستال می‌گردد. این دو مسیر سیلان هر یک به صورت مستقل در نرخ کرنش کل سهیم خواهند بود. برای این دو مسیر نفوذ، رابطه تلفیقی (۲-۴) به عنوان رابطه بین نرخ کرنش کششی و تنش کششی ارائه شده است [۴].

$$\dot{\epsilon}_{gb,bulk} = 14 \frac{\sigma \Omega}{kT} \frac{1}{d^2} D_v \left\{ 1 + \frac{\pi \delta D_b}{d D_v} \right\} \quad (2-4)$$

که در این رابطه Ω حجم اتمی، d اندازه دانه، D_b ضریب نفوذ در مرز، D_v ضریب نفوذ در حجم و δ سطح مقطع موثر یک مرز برای انجام نفوذ است. چنانچه نفوذ در حجم شاخص تر باشد آنگاه تغییرشکل به خزش Nabarro-Herring معروف می‌گردد در حالیکه چنانچه نفوذ در مرز به عنوان مکانیزم غالب شناخته شود آنگاه خزش Coble مطرح می‌گردد. مکانیزم‌هایی که در سطوح میکرونی منجر به خزش نفوذی می‌گردند در جدول ۱-۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه مرزهای دانه از مسیرهای سریع نفوذ به حساب می‌آیند، خزش نفوذی به شدت وابسته به اندازه دانه می‌باشد [۴].

جدول ۱-۲ - مکانیزمهای خزش در سطوح میکرونی [۳]

دماهای بالا: فرآیندهای بازیابی فعال شده بوسیله حرارت	
خزش نابجایی	خزش نفوذی
صعود نابجایی	مسیرهای نفوذ سریع از قبیل هسته های نابجایی و مرزهای دانه
حرکت اتمسفر نابجایی	نفوذ در حجم (فضاهای خالی و فضاهای بین نشین)
لغزش متقاطع	$T > 0.3T_m$
برش مرزدانه	

۳) خزش نابجایی : حرکت نابجایی‌ها سبب تغییرشکل پلاستیک ماده می‌شود. مواجه شدن نابجایی‌ها با موانعی از قبیل رسوبات، مرزهای دانه و نابجایی‌های دیگر منجر به بالا رفتن سطح استحکام ماده در دمای پایین می‌گردد. در دماهای بالا، نابجایی‌ها می‌توانند از این موانع عبور کنند. در کنار لغزش متقاطع به عنوان یکی از راه‌های فرار از موانع، صعود نابجایی‌ها که یک فرایند نفوذی می‌باشد به عنوان مکانیزم اصلی برای عبور از این موانع مطرح می‌گردد. در واقع در این مکانیزم خزشی حرکت نابجایی‌ها به کمک فرایندهای فعال شونده

بوسیله حرارت از قبیل نفوذ جاهای خالی و اتم های بین نشین صورت می گیرد. به این دلیل، نرخ خزش نه تنها وابسته به دما و تنش است، بلکه تابع خصوصیات دیگری از ماده از قبیل ضریب نفوذ و انرژی نقص در چیده شدن نیز می گردد. به دنبال فرایند صعود، در اثر اعمال تنشهای نسبتاً بالا نابجایی ها داخل دانه های پلی کریستال حرکت می کنند و در اثر تجمع آنها سلولهای نابجایی داخل دانه تشکیل می گردد. بنابراین تغییر شکل حاصل شده برخلاف لغزش نابجایی ها تحت کنترل نفوذ است. این مکانیزم معمولاً در سطوح تنشی متوسط ($10^{-4} < \sigma/G < 10^{-2}$) رخ می دهد. اما بر خلاف خزش نفوذی نرخ کرنش تابع خطی از تنش نمی باشد. رابطه بین نرخ کرنش و تنش کششی در حالیکه مکانیزم خزش نابجایی ها مکانیزم غالب باشد عبارتست از [۵]:

$$\dot{\epsilon} = A \left(\frac{b}{d} \right)^p \frac{D_0 G b}{kT} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (۲-۵)$$

که در این رابطه، A انرژی نقص در چیده شدن، b بردار برگرز، d اندازه دانه، D_0 فاکتور فرکانسی، G مدول برشی، Q_c انرژی فعال سازی خزش، k ثابت بولتزمن و p و n ثوابت بدون بعد هستند. فرایندهای خزش و یا لغزش نابجایی منجر به ایجاد بافت جدید در ساختار می گردند در حالیکه در خزش نفوذی چنین اتفاقی رخ نمی دهد. در ضمن برخلاف خزش نفوذی، در خزش نابجایی اندازه دانه تاثیر قابل ملاحظه ای بر رفتار خزشی ندارد [۴]. خزش نابجایی در سطوح میکرونی از مکانیزم هایی که در جدول ۲-۱ ارائه شده است، تشکیل می گردد.

۴) لغزش مرزدانه ای : لغزش مرزدانه ای بر اثر تضعیف مرزهای دانه در دمای بالا رخ می دهد. تضعیف مرزهای دانه می تواند در اثر ناپایداری حرارتی فازهای مرزدانه ای، عیوب ساختاری نزدیک مرزدانه و یا در اثر فرایندهای رسوب گذاری موضعی و اندرکنش های پیچیده آنها با نابجایی ها رخ دهد. در طول لغزش مرزدانه ای، دانه ها بدون آنکه تغییر شکل قابل ملاحظه ای را تحمل کنند روی یکدیگر می لغزند [۶]. از این رو لغزش دانه ها بر روی یکدیگر مسبب بروز این مکانیزم می گردد.