

تأثیر فرآیند فشردن زاویه‌دار در کانال‌های مساوی بر ریزساختار و استحکام برشی آلیاژ ریختگی Mg-2Si

سیما سیرجانی، محمد جمالپور، محمد هاشمی و رضا علیزاده*

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۹)

<https://doi.org/10.47176/jame.43.2.1052>

چکیده: علی‌رغم پتانسیل بالای آلیاژهای Mg-Si برای کاربردهای متفاوت صنعتی، وجود ذرات درشت Mg_2Si اولیه و یوتکتیک و توزیع ناهمگن آن‌ها در ریزساختار سبب تضعیف خواص مکانیکی این آلیاژ می‌شود. در این راستا، از روش‌های متفاوتی برای اصلاح ریزساختار و در نتیجه بهبود خواص استفاده شده است. در این مقاله، تأثیر فرآیند فشردن زاویه‌دار در کانال‌های مساوی (ECAP) بر ریزساختار و استحکام برشی آلیاژ Mg-2Si مورد بررسی قرار گرفته است. پس از ریخته‌گری، آلیاژ در دمای 350° درجه سانتی‌گراد اکستروود شده و سپس با استفاده از فرآیند فشردن زاویه‌دار در کانال‌های مساوی تا چهار پاس در دمای 200° درجه سانتی‌گراد تغییر شکل یافت. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی انجام شده است. استحکام برشی نیز با استفاده از آزمون پانچ برشی بررسی شد. نتایج حاصل نشان دادند که انجام فرآیند فشردن زاویه‌دار در کانال‌های مساوی سبب ریز شدن و توزیع همگن‌تر ذرات Mg_2Si در زمینه نسبت به حالت ریختگی می‌شود. همچنین، این اصلاح ریزساختار سبب بهبود استحکام برشی شد، به گونه‌ای که تنش برشی نهایی از ۸۷ مگاپاسکال در حالت ریختگی به ۱۲۲ مگاپاسکال پس از اعمال فرآیند ذکر شده افزایش یافت (۴۰ درصد افزایش).

واژه‌های کلیدی: آلیاژهای منیزیم، آلیاژ Mg-2Si، مورفولوژی Mg_2Si ، فرآیند فشردن زاویه‌دار در کانال‌های مساوی (ECAP)، استحکام برشی.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r.alizadeh@sharif.edu

Effect of Equal Channel Angular Pressing on the Microstructure and Shear Strength of an As-Cast Mg-2Si Alloy

S. Sirjani, M. Jamalpour, M. Hashemi and R. Alizadeh

Department of Material Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Although Mg-Si alloys have promising potential applications in various industries, their mechanical properties are challenged by the presence of coarse primary and eutectic Mg₂Si particles and their heterogeneous distribution in the microstructure. To address this issue, several methods have been employed to refine the microstructure and improve the mechanical properties. This study examines the effects of equal channel angular pressing on the microstructural evolution and shear strength of an as-cast Mg-2Si alloy. The alloy was initially extruded at 350 °C and then underwent four passes of equal channel angular pressing at 200 °C. Microstructural analysis was conducted using optical and scanning electron microscopy. Shear strength was assessed using the shear punch test. The obtained results indicated that the equal channel angular pressing process led to a more homogeneous distribution of the Mg₂Si particles within the microstructure compared to the as-cast alloys, significantly improving the shear strength. In particular, ultimate shear stress showed a significant increase from 87 MPa in the as-cast condition to 122 MPa after equal channel angular pressing, corresponding to 40 % improvement.

Keywords: Magnesium alloys, Mg-2Si alloy, Morphology of Mg₂Si, ECAP, Shear strength.

۱- مقدمه

آلیاژهای منیزیم، خواص منحصر به فردی مانند چگالی کم، استحکام ویژه بالا و قابلیت ریخته‌گری خوب دارند. این ویژگی‌ها، آلیاژهای منیزیم را ماده امیدوارکننده‌ای برای انواع کاربردهای صنعتی از جمله صنایع پزشکی، هوافضا و خودروسازی می‌کند. از سوی دیگر، این آلیاژها معایبی مانند شکل‌پذیری کم، مقاومت به خزش پایین، مقاومت به خوردگی کم و پایداری حرارتی کم دارند (۱-۳).

در بین آلیاژهای منیزیم، آلیاژهای Mg-Si به دلیل خواص مکانیکی ویژه از جمله پایداری حرارتی بالا، برای کاربردهای دما بالا گزینه مناسبی به‌شمار می‌روند. ریشه این خواص عمدتاً وابسته به حضور فاز ثانویه است. در این آلیاژها، در اثر واکنش اتم‌های سیلیسیم با اتم‌های منیزیم فاز ثانویه سخت Mg₂Si رسوب می‌کند که ویژگی‌های منحصر به فردی چون دمای ذوب بالا، سختی بالا، چگالی کم و ضریب انبساط حرارتی کم دارد (۴ و ۵). تأثیر این فاز ثانویه بر خواص مکانیکی آلیاژ، تا حد زیادی وابسته به مورفولوژی آن است. به‌طور کلی، فاز Mg₂Si به‌صورت ذرات اولیه درشت (در آلیاژهای هایپر یوتکتیک) و

ذرات یوتکتیک ظاهر می‌شود که ذرات یوتکتیک می‌تواند به شکل حروف چینی درشت و یا ساختار لایه‌ای باشد (۶). ذرات Mg₂Si اولیه و یوتکتیک معمولاً با گوشه‌های تیز در ریزساختارهای ریخته‌گری ظاهر می‌شوند که می‌تواند منجر به تمرکز تنش در گوشه‌های تیز این ذرات شکننده و در نتیجه تضعیف خواص مکانیکی شود (۷ و ۸). علاوه بر این، به دلیل وجود فاز درشت و سخت و همچنین توزیع ناهمگن آن، شکل‌پذیری در آلیاژهای منیزیم حاوی سیلیسیم کاهش می‌یابد. بنابراین، کارایی آلیاژ برای کاربردهای متفاوت، به‌ویژه در دماهای بالا، محدود می‌شود.

ریزدانه کردن، به‌عنوان روشی مناسبی برای بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم شناخته شده است. بر این اساس، تلاش‌های قابل توجهی برای توسعه آلیاژهای منیزیم با دانه‌های بسیار ریز انجام شده است. ریزدانه کردن با تغییر شکل پلاستیک شدید^۱، به‌ویژه با فرآیند فشردن زاویه‌دار در کانال‌های مساوی^۲، به روشی کارآمد برای بهبود رفتار مکانیکی مواد تبدیل شده است. ECAP به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌ها در تولید مواد فوق ریزدانه^۳ در محدوده میکرومتری و نانومتری و

سرعت فک 0.3 میلی متر بر ثانیه و با استفاده از روان کننده گرافیتی، این نمونه به میله‌ای با سطح مقطع به ابعاد 10 میلی متر در 10 میلی متر تبدیل شد. فرآیند ECAP از طریق یک قالب با زاویه داخلی 90 درجه بین کانال‌های افقی و عمودی و با استفاده از روان کننده گرافیتی انجام شد. نمونه در قالب پیش گرم شده تا دمای 200 درجه سانتی گراد قرار داده شد و سپس فرآیند ECAP با سرعت فک 0.2 میلی متر بر ثانیه انجام شد. این فرآیند چهار پاس تکرار شد. طرح‌واره این فرآیندها در شکل (۱) نشان داده شده است.

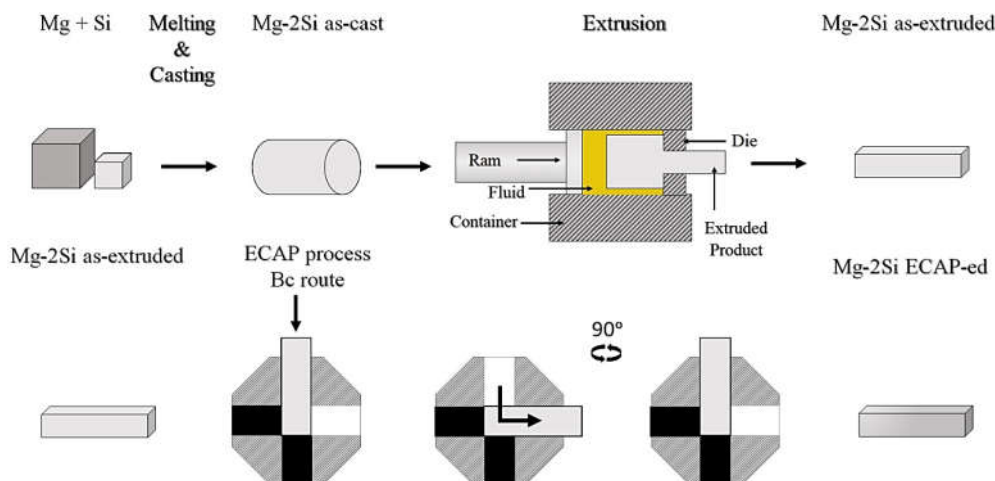
برای ارزیابی ریزساختار نمونه‌های ریختگی و ECAP شده، نمونه‌ها ابتدا با کاغذ سنباده رده 600 تا 5000 سنباده‌زنی شدند. نمونه ریختگی با پودر آلومینای پخش شده در الکل اتانول پولیش شد و عملیات حکاکی کردن در دمای اتاق به مدت $3-6$ ثانیه با استفاده از محلول نایتال (8 میلی لیتر نیتریک اسید + 92 میلی لیتر اتانول) انجام شد. نمونه ECAP شده توسط الکل پولیش شده و از محلول پیکرال (0.4 گرم پیکریک اسید + 2.5 میلی لیتر استیک اسید + 6 میلی لیتر اتانول + 2 میلی لیتر آب مقطر) به مدت 25 ثانیه در دمای اتاق برای حکاکی کردن استفاده شد. ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری ساخت شرکت Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ ساخت شرکت TESCAN مدل MIRA3 LMU و طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس^۶ مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، برای بررسی فازهای موجود در نمونه‌های ریختگی و ECAP شده، از آنالیز پراش اشعه ایکس^۷ ساخت شرکت PANalytical و مدل Xpert Pro MPD، استفاده شد. در این آزمون، قطعات کوچکی با حداقل سطح مقطع یک سانتی متر مربع برش داده شده و برای انجام آزمون در محدوده 2θ بین 10 تا 90 درجه از پرتو $K\alpha-Cu$ (با طول موج 1.54 آنگستروم) استفاده شد.

به منظور ارزیابی استحکام برشی نمونه‌ها در شرایط مختلف از آزمون پانچ برشی^۸ استفاده شد. از هر یک از دو نمونه ریختگی و ECAP شده، سه برش با ابعاد 10 میلی متر در 10

همچنین همگن شدن ریزساختار برای طیف وسیعی از مواد از جمله آلیاژهای منیزیم شناخته شده است (9 و 10). یکنواخت‌ترین ریزساختارها را می‌توان با چرخش 90 درجه‌ای نمونه حول محور طولی آن پس از هر پاس، که به عنوان مسیر BC شناخته می‌شود، تولید کرد. ریزساختارهای ECAP شده، معمولاً از دانه‌های ریز هم‌محور تشکیل شده‌اند که استحکام کششی، سختی و شکل‌پذیری نسبتاً بالایی را نشان می‌دهند (11 و 12). هدف از پژوهش حاضر، بررسی ریزساختار و استحکام برشی آلیاژ $Mg-2Si$ پس از انجام فرآیند ECAP است. در این پژوهش تلاش می‌شود تا مورفولوژی ذرات Mg_2Si و در نتیجه استحکام برشی نهایی آلیاژ را با فرآیند ECAP بهبود بخشید.

۲- مواد و روش تحقیق

در مطالعه حاضر، از منیزیم خالص ($99/98$ درصد وزنی) و سیلیسیم خالص ($99/95$ درصد وزنی) برای تهیه آلیاژ استفاده شد. برای آلیاژسازی، ابتدا منیزیم در یک بوتله گرافیتی و با استفاده از کوره القایی ذوب شد و سپس سیلیسیم به آن اضافه گردید. به منظور کاهش اکسیداسیون مذاب، از فلاکس محافظ و نیز درب گرافیتی استفاده شد. مذاب به مدت پنج دقیقه در دمای 750 درجه سانتی گراد نگهداری شد و با استفاده از یک میله فولادی به صورت مکانیکی هم‌زده شد. در نهایت مذاب در قالبی با حفره استوانه‌ای شکل با قطر 35 میلی متر و ارتفاع 100 میلی متر ریخته‌گری شد. به منظور به حداقل رساندن عیوب ریخته‌گری، قالب فولادی، تا دمای 200 درجه سانتی گراد پیش گرم شده بود. تلاش شد تا نمونه‌ها از مرکز قطعه تهیه نشوند، زیرا احتمال وجود عیوب ریخته‌گری در نواحی مرکزی بیش‌تر است. برای تعیین ترکیب واقعی آلیاژ تولید شده، یک قطعه کوچک از آن در دمای 420 درجه سانتی گراد به مدت 24 ساعت همگن شده و ترکیب شیمیایی آن با استفاده از طیف‌سنجی جذب اتمی^۴ مدل آوانتا شرکت GBS مورد مطالعه قرار گرفت. پس از ماشین‌کاری جزئی نمونه ریخته‌گری شده، با استفاده از فرآیند اکستروژن در دمای 350 درجه سانتی گراد و با



شکل ۱- طرح‌واره فرآیندهای انجام شده.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی واقعی آلیاژ ریختگی Mg-2Si

به‌دست آمده توسط AAS		
مقدار منیزیم	مقدار سیلیسیم	ترکیب اسمی آلیاژ
(درصد وزنی)		
باقی‌مانده	۲/۱۱	Mg-2Si

AAS مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که ترکیب واقعی بسیار نزدیک به ترکیب اسمی آلیاژ است (جدول ۱). ریزساختار نمونه‌های ریختگی و ECAP شده در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲-الف و ب) قابل مشاهده است، نمونه ریختگی حاوی ذرات درشت Mg_2Si با شکل چندضلعی است که به‌صورت ناهمگن در ریزساختار توزیع شده و توسط فازهای α -Mg (فاز روشن) و Mg_2Si یوتکتیک (فاز تیره لایه‌ای - شکل) احاطه شده است. بر اساس نمودار فازی دوتایی Mg-Si که در شکل (۳) نشان داده شده، آلیاژ Mg-2Si یک آلیاژ هایپر یوتکتیک است که ریزساختار آن شامل Mg_2Si یوتکتیک و Mg_2Si اولیه است. Mg_2Si اولیه به‌صورت چندضلعی و Mg_2Si یوتکتیکی با موفولوژی لایه‌ای دیده می‌شود (۱۴). در حین انجماد، ابتدا Mg_2Si اولیه از مذاب رسوب می‌کند و سپس بقیه مذاب به‌صورت یک ساختار یوتکتیک دوتایی متشکل از α -Mg و یوتکتیک Mg_2Si جامد

میلی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر با استفاده از دستگاه وایرکات، برش داده شد. هر دو سطح این نمونه‌ها، به‌منظور حذف هرگونه آلودگی و اکسیداسیون، سنباده‌زنی شده و به ضخامت نهایی $0.9 - 0.7$ میلی‌متر رسیدند. پس از قرار دادن نمونه‌ها در قالب SPT، نیروی فشاری با استفاده از دستگاه Santam با سرعت ثابت 0.25 میلی‌متر بر دقیقه در دمای اتاق بر پانچ اعمال شد. پس از به‌دست آوردن منحنی نیرو-جابجایی، برای تعیین تنش برشی (τ) از رابطه (۱) استفاده شد:

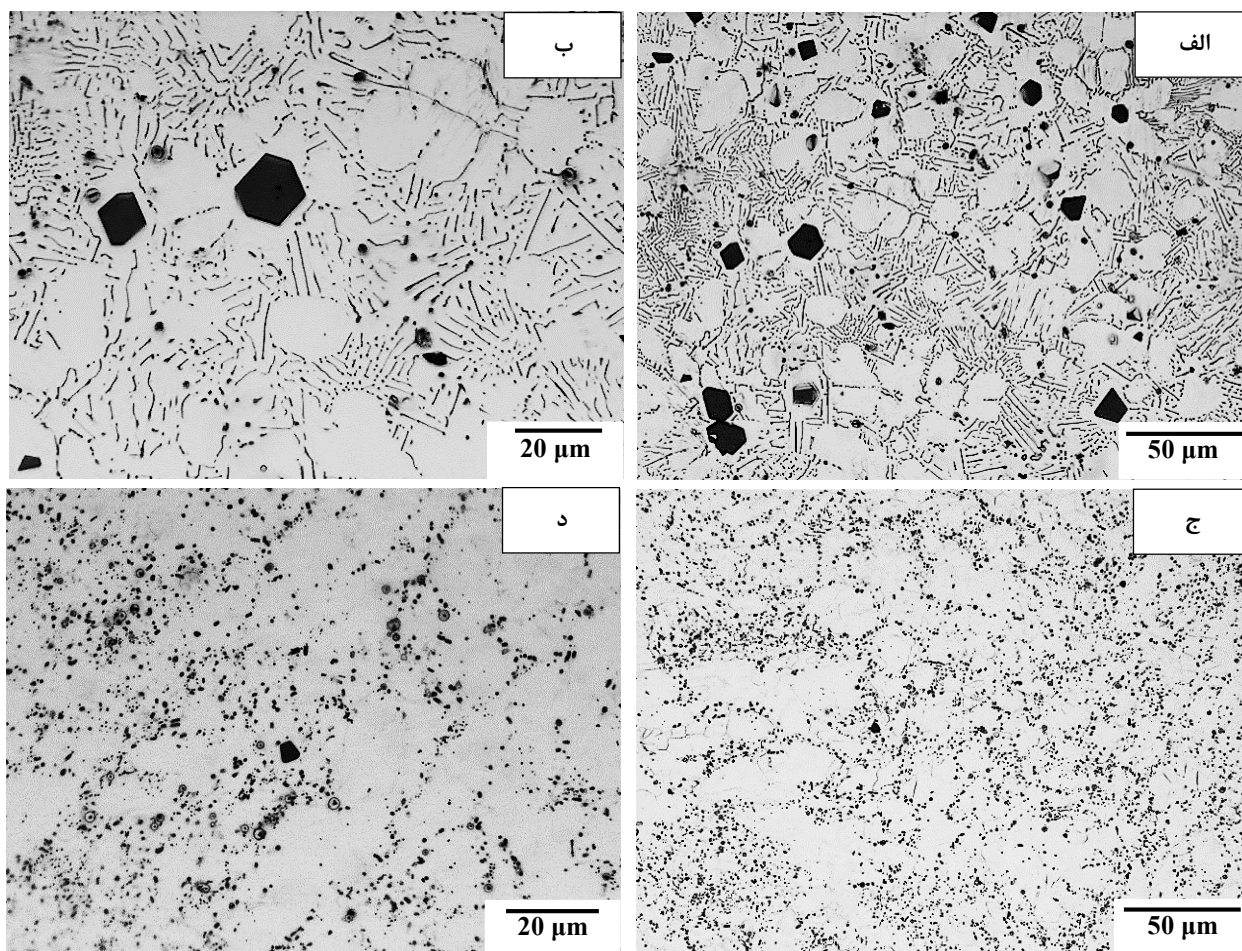
$$\tau = \frac{P}{\pi dt} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، τ تنش برشی، P نیروی اعمالی، d میانگین قطر پانچ و حفره قالب (که در این پژوهش برابر سه میلی‌متر بود) و t ضخامت نمونه است. پس از انجام آزمون، جابجایی پانچ بر ضخامت نمونه‌ها نرماله شد و منحنی‌های SPT با ترسیم تنش برشی بر حسب جابجایی پانچ نرماله‌شده به‌دست آمد. با استفاده از این منحنی‌ها می‌توان مقادیر استحکام برشی نهایی^۹ را با هم مقایسه نمود (۱۳).

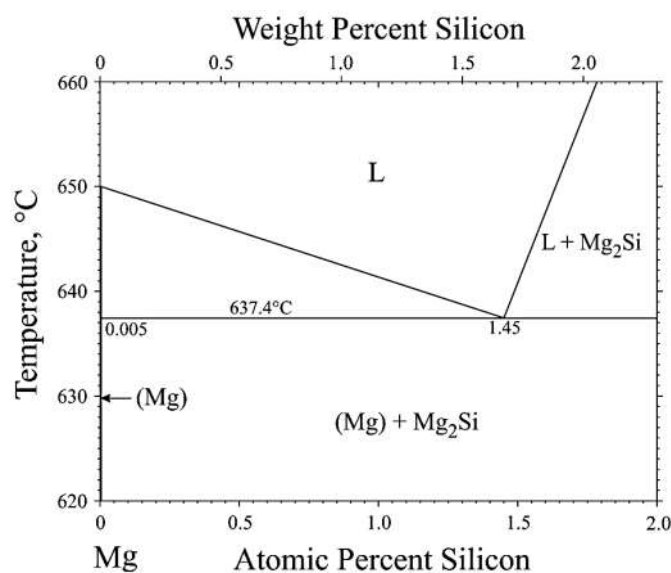
۳- بحث و نتایج

۳-۱- ریزساختار

در ابتدا ترکیب شیمیایی آلیاژ ریخته‌شده با استفاده از آزمون

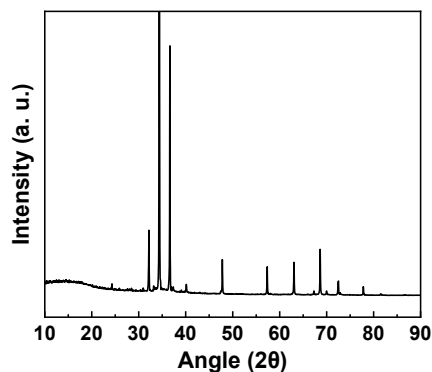


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه ریختگی (الف و ب) و نمونه ECAP شده (ج و د).



شکل ۳- دیاگرام فازی دو تایی Mg-Si (۱۷). ترکیب آلیاژ Mg-2Si مورد استفاده در این پژوهش با خط چین قرمز رنگ مشخص شده است.

(۶- الف)، ریزساختار نمونه ریختگی شامل فاز Mg_2Si با مورفولوژی چندضلعی و یوتکتیک با مورفولوژی میله‌ای (فاز روشن) در زمینه $\alpha-Mg$ (فاز تیره) را نشان می‌دهد. نتایج EDS به‌دست‌آمده برای نقطه A در شکل (۶- الف) بسیار نزدیک به ترکیب Mg_2Si است. در شکل (۶- ب)، مشاهده می‌شود که پس از فرآیند ECAP فاز یوتکتیک میله‌ای و اولیه نسبت به حالت ریختگی بسیار ریزتر شده و توزیع همگن‌تری ایجاد کرده است.



شکل ۴- طیف XRD آلیاژ ریختگی.

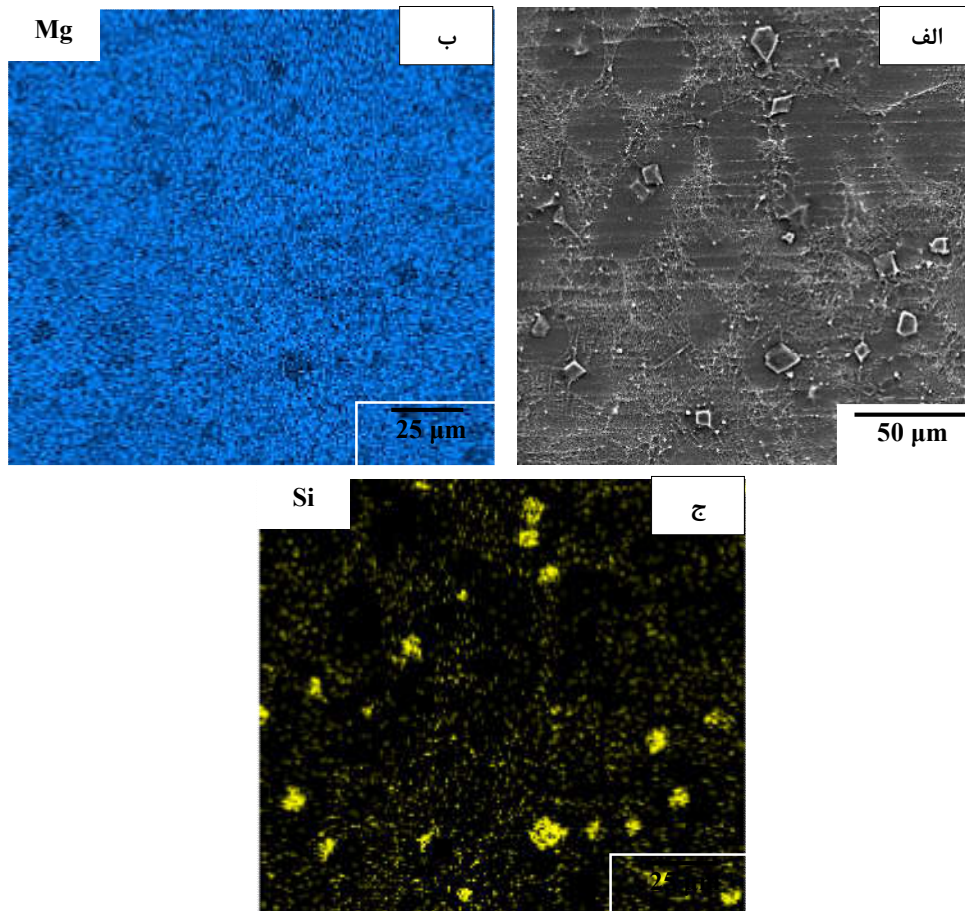
۳-۲- خواص مکانیکی

منحنی‌های SPT برای دو نمونه ریختگی و ECAP شده در شکل (۷)، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه ECAP شده نسبت به حالت ریختگی، تنش برشی نهایی بیشتری از خود نشان می‌دهد. پس از فرآیند ECAP، مقدار USS از ۸۷ مگاپاسکال در حالت ریختگی به ۱۲۲ مگاپاسکال رسید (۴۰ درصد افزایش). گزارش شده است که کارسختی ناشی از افزایش نابجایی‌ها و ریزدانه شدن در طول فرآیند ECAP استحکام آلیاژ را (به ترتیب مطابق با معادلات تیلور و هال-پچ) بهبود می‌بخشد (۱۸). به دلیل کرنش بالای ایجاد شده در این فرآیند، چگالی نابجایی‌ها افزایش می‌یابد و در نهایت، باعث بازآرایی مرزدانه‌ها و ریزدانه شدن، می‌شود (۱۹). همچنین، رسوبات Mg_2Si طی فرآیند ECAP شکسته شده و با اندازه ریزتر نسبت به قبل به‌صورت یکنواخت، مجدداً در زمینه توزیع می‌شوند. این رسوبات به‌عنوان مانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها عمل کرده (استحکام بخشی اوروان) و حرکت آن‌ها را دشوار می‌کنند و در نتیجه استحکام آلیاژ را بهبود می‌بخشند (۱۶). علاوه‌براین، رسوبات می‌توانند به‌عنوان نقاط تمرکز تنش برای هسته‌زایی ترک عمل کنند. ایجاد ترک می‌تواند باعث ایجاد کرنش موضعی در نمونه شود و خواص مکانیکی نمونه از جمله استحکام برشی را تضعیف کند. هرچه توزیع این رسوبات همگن‌تر و ریزتر باشد، نقاط تمرکز تنش کاهش می‌یابد و این امر سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

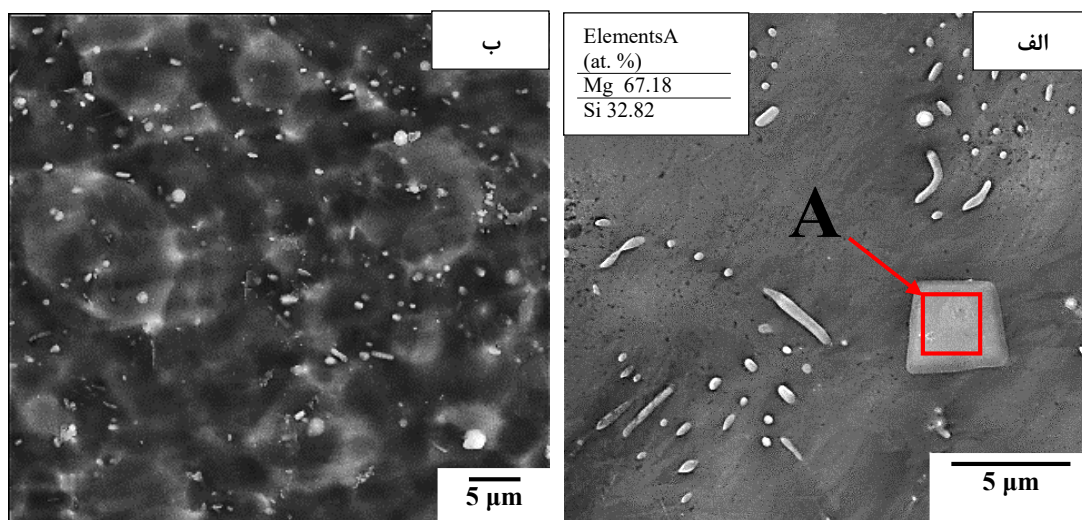
می‌شود. در طول رشد، Mg_2Si اولیه اتم‌های Si را از مذاب اطراف مصرف می‌کند و منیزیم را پس می‌زند و مذاب در اطراف آن تشکیل می‌شود که به ترکیب $\alpha-Mg$ می‌رسد. در نهایت، هنگامی که دما به دمای یوتکتیک کاهش می‌یابد، $\alpha-Mg$ اطراف جامد می‌شود (۶). در نمونه ECAP شده که در شکل (۲- ج و د) نشان داده شده است، فاز درشت Mg_2Si و فاز Mg_2Si یوتکتیک با مورفولوژی میله‌ای در این فرآیند تحت فشار بالا شکسته شده و نسبت به حالت ریختگی به‌صورت همگن‌تر و ریزتر در فاز $\alpha-Mg$ توزیع شده‌اند (۱۵ و ۱۶).

به‌منظور شناسایی بهتر فازهای موجود در ریزساختار آلیاژ ریختگی، از آزمون‌های XRD و EDS استفاده شد. نتایج آزمون XRD در شکل (۴) آورده است. همان‌طور که در این تصویر مشخص است، آلیاژ ریختگی $Mg-2Si$ از دو فاز $\alpha-Mg$ و Mg_2Si تشکیل می‌شود. همچنین، نتایج آنالیز نقشه EDS برای ارزیابی توزیع عناصر مختلف در آلیاژ ریختگی $Mg-2Si$ در شکل (۵) آورده شده است. شکل (۵- الف) تصویر SEM از آلیاژ $Mg-2Si$ در حالت ریختگی را نشان می‌دهد. توزیع عناصر منیزیم و سیلیسیم به‌ترتیب در شکل (۵- ب و ج) نشان داده شده است. مطابق شکل (۵- ج)، غلظت بالای سیلیسیم را می‌توان به وضوح در مکان‌هایی که ذرات Mg_2Si اولیه وجود دارند، مشاهده کرد.

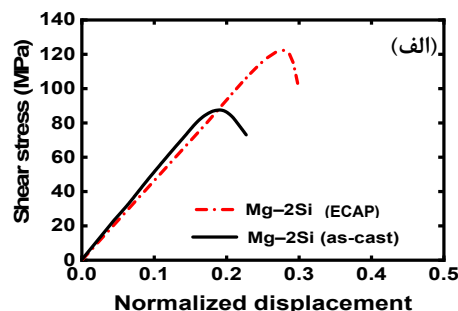
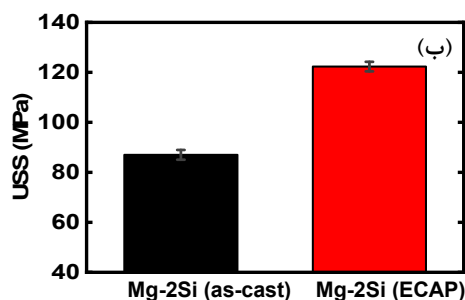
تصاویر SEM آلیاژ $Mg-2Si$ در دو حالت ریختگی و ECAP شده، برای مقایسه در شکل (۶) آورده شده است. شکل



شکل ۵- تصویر SEM آلیاژ ریختگی (الف)، به همراه آنالیز نقشه مربوط به عناصر منیزیم (ب) و سیلیسیم (ج).



شکل ۶- تصاویر SEM از نمونه ریختگی (الف) و نمونه ECAP شده (ب). نتایج EDS برای یکی از ذرات Mg_2Si که در تصویر (الف) با حرف A نشان داده شده است نیز در شکل الف گنجانده شده است.



شکل ۷- منحنی SPT (الف) و نمودار ستونی مقادیر USS نمونه‌های ریختگی و ECAP شده (ب).

می‌شود. همچنین، ریزدانه شدن و بازآرایی مرزدانه‌ها که ناشی از افزایش چگالی نابجایی‌ها به دلیل کرنش بالای ایجاد شده در فرآیند ECAP است، طبق معادلات تیلور و هال-پچ، موجب افزایش استحکام می‌شود.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید ECAP بر ریزساختار و استحکام برشی آلیاژ Mg-2Si بررسی شد و مهم‌ترین نتایج را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱- در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید در فرآیند ECAP، فاز Mg₂Si شکسته شده و به صورت ریزتر و همگن‌تر در فاز زمینه α-Mg توزیع می‌شود.

۲- در اثر فرآیند ECAP، استحکام برشی نهایی نسبت به حالت ریختگی از ۸۷ مگاپاسکال به ۱۲۲ مگاپاسکال افزایش یافت (۴۰ درصد افزایش). دلیل اصلی این امر، کاهش اندازه رسوبات Mg₂Si و نیز توزیع یکنواخت آن‌ها در فاز زمینه است که سبب ایجاد موانع مؤثرتری در برابر حرکت نابجایی‌ها (مکانیزم اوروان)، کاهش نقاط تمرکز تنش و در نهایت افزایش استحکام

واژه‌نامه

1. severe plastic deformation (SPD)
2. equal channel angular pressing (ECAP)
3. ultrafine grained (UFG)
4. atomic absorption spectroscopy (AAS)
5. scanning electron microscope (SEM)
6. energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
7. X-ray diffraction (XRD)
8. shear punch test (SPT)
9. ultimate shear strength (USS)

مراجع

1. Yu J, Wang J, Li Q, Shang J, Cao J, Sun X. Effect of Zn on microstructures and properties of Mg-Zn alloys prepared by powder metallurgy method. *Rare Met Mater Eng.* 2016; 45(11):2757–2762. [https://doi.org/10.1016/s1875-5372\(17\)30035-8](https://doi.org/10.1016/s1875-5372(17)30035-8)
2. Zhao T, Hu Y, Zhang C, He B, Zheng T, Tang A, et al. Influence of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of Mg-2Gd-0.3Zr magnesium alloy. *J Magnes Alloy.* 2022; 10(2):387–399. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.06.019>
3. Zareian Z, Emamy M, Malekan M, Mirzadeh H, Kim WJ, Bahmani A. Tailoring the mechanical properties of Mg-Zn magnesium alloy by calcium addition and hot extrusion process. *Mater Sci Eng A.* 2020; 774.

- <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.138929>
4. Kim B, Hwang J, Park Y, Lee Y. Microstructural improvement of eutectic Al + Mg₂Si phases on Al-Zn-Si-Mg cast alloy with TiB₂ particles additions. *Materials (Basel)*. 2021; 14(11). <https://doi.org/10.3390/ma14112902>
 5. Safari S, Akhlaghi F. Microstructure and mechanical properties of Al-Mg₂Si composite fabricated in-situ by vibrating cooling slope. *Trans Nonferrous Met Soc China (English Ed)*. 2018; 28(4):604–612. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64693-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64693-X)
 6. Ajith Kumar KK, Srinivasan A, Pillai UTS, Pai BC, Chakraborty M. Microstructure and Mechanical Property Correlation of Mg-Si Alloys. *Silicon*. 2022; 14:9499–9515. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01521-6>
 7. Seth PP, Parkash O, Kumar D. Structure and mechanical behavior of in situ developed Mg₂Si phase in magnesium and aluminum alloys - a review. *RSC Adv*. 2020; 10:37327–37345. <https://doi.org/10.1039/d0ra02744h>
 8. Dai J, Li K, Han WD, Li YH, Li YF, Yin WL, et al. First-principles investigation on the structural, electronic, mechanical and thermodynamic properties of binary phase in Mg-1Si-3RE (RE = La, Ce) alloys. *Mater Today Commun*. 2021; 26: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101738>
 9. Zuo D, Li T, Liang W, Wen X, Yang F. Microstructures and mechanical behavior of magnesium processed by ECAP at ice-water temperature. *J Phys D Appl Phys*. 2018; 51. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aab86d>
 10. Xu B, Sun J, Yang Z, Xiao L, Zhou H, Han J, et al. Microstructure and anisotropic mechanical behavior of the high-strength and ductility AZ91 Mg alloy processed by hot extrusion and multi-pass RD-ECAP. *Mater Sci Eng A*. 2020; 780:139191. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139191>
 11. Hashemi M, Alizadeh R, Langdon TG. Recent advances using equal-channel angular pressing to improve the properties of biodegradable Mg-Zn alloys. *J Magnes Alloy*. 2023; 11:2260-2284. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.07.009>
 12. Zhang Q, Li Q, Chen X. Research progress of ultrafine grained magnesium alloy prepared by equal channel angular pressing. *Mater Res Express*. 2021; 8. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abe062>
 13. Gerashi E, Asadollahi M, Alizadeh R, Mahmudi R. Effects of Sr additions on the microstructural stability and mechanical properties of a cast Mg-4Zn alloy. *Mater Sci Eng A*. 2022; 843. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143127>
 14. Jamalpour M, Alizadeh R. Experimental insights toward understanding how the morphology of Mg₂Si particles affects degradation behavior of the biodegradable as-cast Mg-Si alloys. *Intermetallics*. 2024; 165. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.108133>
 15. Bian L, Liang W, Ma J, Wang S, Chen K, Xue J, et al. Effect of ECAP on the microstructure and mechanical properties of a high-Mg₂Si content Al-Mg-Si Alloy. *J Wuhan Univ Technol Mater Sci*. 2010; 25:395-398. <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0009-z>
 16. Bian L, Liang W, Xie G, Zhang W, Xue J. Enhanced ductility in an Al-Mg₂Si in situ composite processed by ECAP using a modified BC route. *Mater Sci Eng A*. 2011; 528:3463-3467. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.034>
 17. Okamoto H. Mg-Si (Magnesium-Silicon). *J Phase Equilibria Diffus*. 2007; 28:229–230. <https://doi.org/10.1007/s11669-007-9038-5>
 18. Chegini M, Shaeri MH, Taghiabadi R, Chegini S, Djavanroodi F. The correlation of microstructure and mechanical properties of in-situ Al-Mg₂Si cast composite processed by equal channel angular pressing. *Materials (Basel)*. 2019; 12:1-12. <https://doi.org/10.3390/ma12091553>
 19. Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Prog Mater Sci*. 2006; 51:881-981. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>