

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91 با استفاده از فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی

حسن جیریایی شراهی^۱، مجید پورانواری^{۲*}، مجتبی موحدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

* pouranvari@sharif.edu

چکیده

آلیاژهای منیزیم، به عنوان سبک‌ترین آلیاژها با کاربرد سازه‌ای، به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا پتانسیل قابل توجهی برای بهبود راندمان انرژی در سیستم‌های مختلف حمل‌ونقل دارند. در این پژوهش، تاثیر فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی (FSP) بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ ریختگی AZ91 بررسی شده است. نشان داده شد که FSP قادر به حذف ساختار دندریتی، کاهش قابل توجه اندازه دانه، شکستن و انحلال جزئی فاز درشت بتا و تشکیل ترکیبات بین فلزی بتا با اندازه زیرمیکرون می‌باشد. این اصلاحات ریزساختاری منجر به افزایش خواص مکانیکی شامل استحکام کششی و قابلیت جذب انرژی تا شکست به ترتیب؛ به میزان ۴۸٪ و ۲۸۳٪ نسبت به حالت ریختگی شده است. نشان داده شد که FSP می‌تواند منجر به تغییر مکانیزم شکست آلیاژ ریختگی از حالت شکست حاکم-تورقی ترد به شکست حاکم-دیمیپلی نرم شود که این منجر به افزایش قابلیت اطمینان به قطعه، در کاربردهای حساس می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که FSP به عنوان یک فرآیند با قابلیت تغییر فرم پلاستیک شدید در دمای بالا، پتانسیل بالایی در بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم ریختگی را دارد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۳ اسفند ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۴ اردیبهشت ۱۳۹۹

کلید واژگان:

فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی

آلیاژ ریختگی پایه منیزیم

AZ91

اصلاح ریزساختاری

خواص مکانیکی

Modification of Microstructure and Enhancing Mechanical Properties of as-cast AZ91 Magnesium alloy via Friction Stir Processing

Hassan. Jiryaei Sharahi¹, Majid. Pouranvari^{2*}, Mojtaba. Movahedi³

1- MSc, Materials Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Engineering and Materials Science, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Engineering and Materials Science, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* pouranvari@sharif.edu

Article Information

Original Research Paper

Doi:

10.30495/apme.2021.681639

Keywords:

Friction Stir Processing

AZ91 Magnesium Cast

Alloy

Microstructure

Modification

Mechanical Properties

Abstract

Magnesium alloys, as the lightest structural alloys, due to their high strength-to-weight ratio offer significant potential for improving energy efficiency of various transportation systems. This paper addresses the influence of friction stir processing (FSP) treatment on the microstructure and mechanical properties of cast AZ91 Mg alloy. It is demonstrated that FSP treatment enables elimination of dendritic structure, significant grain refining, break-up and partial dissolution of coarse β and formation of ultra-fine sub-micron $Mg_{17}Al_{12}$ particles. These microstructural modifications resulted in enhancement of mechanical properties in terms of tensile strength and energy absorption by 48% and 283%, respectively. It is shown that FSP treatment altered the failure mechanism of the alloy from brittle cleavage-dominant mode to ductile dimple-dominant mode which can increase the potential of Mg alloys to use in safety-critical application. Therefore, it can be concluded that FSP, as a process of severe plastic deformation at high temperature, has a great potential to tailor the microstructure and enhancing the mechanical properties of cast Mg alloys.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hassan. Jiryaei Sharahi, Majid. Pouranvari, Mojtaba. Movahedi, Modification of Microstructure and Enhancing Mechanical Properties of as-cast AZ91 Magnesium alloy via Friction Stir Processing, New Process in Material Engineering, 2021, 15(1), 71-82.

۱- مقدمه

از این رو مشکلات مربوط به ساختار ریختگی مانند حضور فازهای ترد بین دندریتی و فازهای یوتکتیک محدود می‌شوند. پس از انجام فرآیند نواحی مختلفی که روی فلز پایه بوجود می‌آید، شامل ناحیه هم‌زده^۱، ناحیه تحت تاثیر عملیات حرارتی-مکانیکی (TMAZ) و ناحیه متاثر از حرارت (HAZ) می‌باشد [۱۲]. ریزساختار ناحیه هم‌زده شده دارای دانه‌های بسیار ریز و هم‌محور می‌باشد که از طریق تبلور مجدد دینامیکی بوجود آمده است و منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. همچنین در ریزساختار این ناحیه فاز ثانویه بزرگ و ترد حذف شده و به ذرات بسیار ریز و پراکنده در مرز دانه‌ها تبدیل شده است [۱۳-۱۵]. تا کنون از فرآیندهای متعدد تغییر فرم پلاستیک شدید^۲، برای بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری^۳ آلیاژهای منیزیم استفاده شده است. فرآیندهای مرسوم در این زمینه شامل: پرس با کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP) [۱۶]، اتصال نوردی تجمعی (ARB) [۱۷]، اکستروژن [۱۸] و نورد با سرعت‌های متفاوت (DSR) [۱۹] می‌باشد. این فرآیندها در دماهای بالا (معمولاً ۲۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) روی آلیاژ انجام می‌شود و با این که در این فرآیندها استحکام به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، ولی میزان انعطاف‌پذیری افزایش قابل توجهی ندارد [۲۰-۲۱]. اخیراً تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر FSP بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای منیزیم-آلومینیوم-روی (سری AZ)، به ویژه آلیاژ AZ91 انجام شده است [۹-۱۳-۲۲-۱۴] نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استحکام کششی آلیاژ بین ۱۰ تا ۵۵ درصد و در یک مورد تا ۱۵۰ درصد افزایش داشته است. همچنین، درصد افزایش طول در لحظه ی شکست بین ۲۴ تا ۱۲۰ درصد بهبود گزارش شده است. اما مساله ی تاثیر FSP بر رفتار شکست و قابلیت جذب انرژی آلیاژ AZ91 کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر از فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی به منظور اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم ریختگی AZ91 استفاده شده است. تاثیر FSP بر استحکام

منیزیم سبک‌ترین فلز سازه‌ای، دارای چگالی ۱/۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و در مقایسه با آلومینیوم با چگالی ۲/۷۰ و آهن با چگالی ۷/۸۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارای چگالی خیلی پایینی می‌باشد [۱-۳]. آلیاژهای منیزیم به دلیل این که نسبت استحکام به وزن بالا، هدایت حرارتی مناسب، قابلیت جذب صدا و قابلیت ریخته‌گری بالایی دارند، با هدف کاهش مصرف انرژی و وزن به طور گسترده‌ای در صنایع اتومبیل‌سازی و صنایع هوا-فضا استفاده می‌شوند [۴-۵]. منیزیم دارای سلول واحد شش‌وجهی فشرده (HCP) می‌باشد، از این رو فرم‌پذیری آن محدود است؛ بنابراین استفاده از روش‌های تولید شکل‌دهی برای ساخت قطعات منیزیمی محدود می‌شوند [۶]. وجود قابلیت ریختگی بالای آلیاژ منیزیم AZ91 می‌تواند فرآیند تولید قطعات را تسهیل نماید. در سال ۱۹۹۷، ۸۱٪ آلیاژهای منیزیم تولیدی به روش ریخته‌گری، آلیاژ منیزیم AZ91 بوده است [۷]. این آلیاژ به دلیل ساختار ریختگی، دانه‌های درشت و وجود فاز ثانویه بزرگ و پیوسته در مرز دانه‌ها، استحکام و درصد ازدیاد طول تا شکست پایینی دارد [۸-۹]. از این رو با اصلاح ریزساختار می‌توان خواص مکانیکی آن را بهبود بخشید. فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی^۱، روش نسبتاً جدیدی است که جهت اصلاح ریزساختار مواد فلزی و آلیاژها به صورت سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند حرارتی-مکانیکی^۲ براساس جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی^۳ توسط انجمن جوشکاری انگلستان (TWI) در سال ۱۹۹۱ اختراع شده است [۱۰]. در این فرآیند یک ابزار غیر مصرفی چرخان وارد قطعه کار یک‌پارچه^۴ شده و با چرخش و اصطکاک بین ابزار و قطعه کار حرارت تولید می‌شود که این باعث نرم‌شدگی ماده شده و سیلان آسان ماده را به دنبال دارد. در واقع در فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی، هدف اصلاح ریزساختار ماده به صورت موضعی می‌باشد، در حالی که در فرآیند جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی هدف جوشکاری و اتصال^۵ می‌باشد [۱۱]. فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی حالت جامد بوده و ریزساختار انجمادی در محل هم‌زده شده، مشاهده نمی‌شود.

پیکریک اسید بود. مدت زمان نگه داری نمونه‌ها در محلول حکاکی ۵ ثانیه بود. جهت مشاهده ریزساختار از نور معمولی و پلاریزه استفاده شد.



شکل (۱): (الف): تصویر دستگاه جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی. (ب): آلیاژ منیزیم AZ91 یک پاس فرآیند شده.

برای بررسی خواص مکانیکی ناحیه هم‌زده شده، از آزمون کشش تک‌محوری و آزمون سختی‌سنجی میکرو استفاده گردید. نمونه‌های آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M [۲۹] ساخته شده است. نمونه‌های کشش به صورت طولی (در جهت طول منطقه ی هم زده شده) تهیه شد به طوری که تمام طول سنج (Gage) و بخش‌های وسط دستگیره‌های نمونه کشش شامل ناحیه هم‌زده شده می‌باشند (مطابق شکل ۲). برای جلوگیری از خوردن نمونه در طی کشش، طول دستگیره‌های نمونه‌های آزمون کشش برای فلز پایه فرآیند شده بلندتر در نظر گرفته شد. همین طور برای اطمینان کامل از این که سنجه کاملاً در ناحیه هم‌زده شده قرار گیرد، از اثر شانه^۹ ابزار که روی سطح آلیاژ به وجود آورده بود، استفاده شد. به طوری که پهنای اثر شانه تقریباً ۱۵ میلی‌متر بود و یک ناحیه مستطیلی شکل به عرض ۱۲ میلی‌متر از وسط این ناحیه علامت‌گذاری و سپس برشکاری شد. سپس در طی ماشین‌کاری از هر طرف یک میلی‌متر مجدداً برداشته شد تا نهایتاً پهنای دستگیره‌های نمونه کشش به ۱۰ میلی‌متر رسانده شد. سرعت حرکت فک‌های دستگاه کشش ۱ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. نمونه‌های متالوگرافی با مقطع

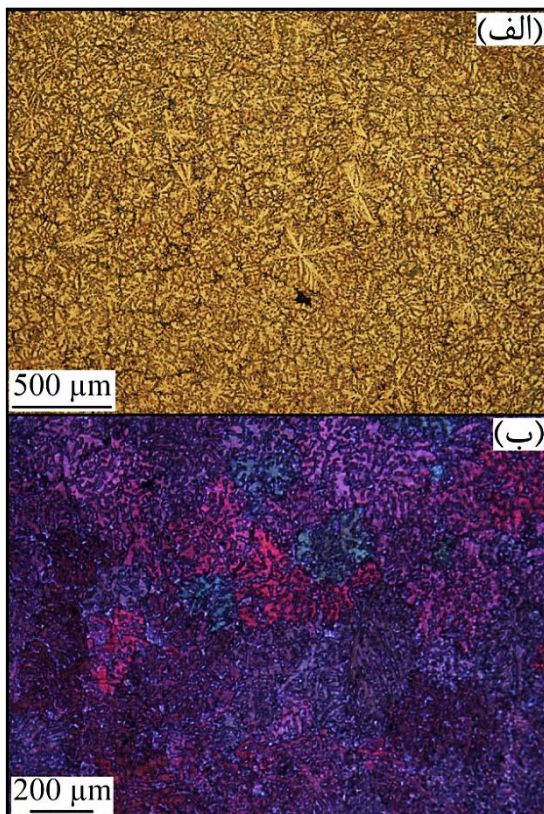
کششی، انعطاف‌پذیری، قابلیت جذب انرژی و رفتار شکست این آلیاژ مورد توجه قرار گرفته شده است.

۲- مواد و روش پژوهش

در این تحقیق صفحاتی (Plate) از جنس آلیاژ منیزیم AZ91، به ضخامت ۹ میلی‌متر، عرض ۷ و طول ۱۴ سانتی‌متر، با ریزساختار ریختگی مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی آلیاژ با استفاده از آنالیز کوانتومتری اندازه‌گیری شد و آلیاژ منیزیم مورد استفاده در این پژوهش دارای ۸/۶۹٪ آلومینیوم، ۱٪ روی و ۰/۲۵٪ منگنز (درصد وزنی) است. فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی به وسیله دستگاه جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی با قابلیت تنظیم سرعت چرخشی تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به هر دو صورت ساعتگرد و پادساعتگرد انجام شد (شکل ۱). در این تحقیق از سرعت چرخشی ۸۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. استفاده از سرعت چرخشی‌های بسیار بالا موجب افزایش بیش از حد حرارت ورودی شده و ناحیه فرآیند شده معیوبی را به وجود می‌آورد و همین‌طور کاهش سرعت چرخشی، موجب کاهش حرارت تولیدی مورد نیاز می‌شود. از طرفی سرعت‌های انتقالی کمتر از ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه کاربرد تولیدی ندارد، لذا سرعت انتقالی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار ۲/۵ درجه در نظر گرفته شد [۲۶-۲۸] ابزار با جنس فولاد گرم‌کار H13 و با قطر شانه ۱۵ میلی‌متر، قطر پین و ارتفاع پین ۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت، که سختی آن بین ۵۵ تا ۵۸ راکول‌سی بود. از یک صفحه مسی به عنوان پشتبند، به ضخامت ۱۰ میلی‌متر برای افزایش سرعت سرمایش در زیر ورق منیزیمی استفاده شد. مقاطع عرضی متالوگرافی برای بررسی ریزساختار نواحی مختلف تهیه شد. نمونه‌ها با استفاده از الکل متانول و آلومینا پولیش شدند. برای مشاهده ریزساختار زیر نور معمولی و پلاریزه از دو نوع محلول حکاکی استفاده شد. محلول مورد استفاده برای حکاکی معمولی شامل: ۲۰ میلی‌لیتر آب، ۲۰ میلی‌لیتر استیک اسید، ۶۰ میلی‌لیتر اتانول و یک میلی‌لیتر اسید نیتریک و مدت زمان نگه داری نمونه درون محلول ۱۰ ثانیه بود. محلول حکاکی رنگی شامل: ۵ میلی‌لیتر استیک اسید، ۱۰ میلی‌لیتر آب، ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول و ۶ گرم

۳-۱- ریزساختار آلیاژ ریختگی

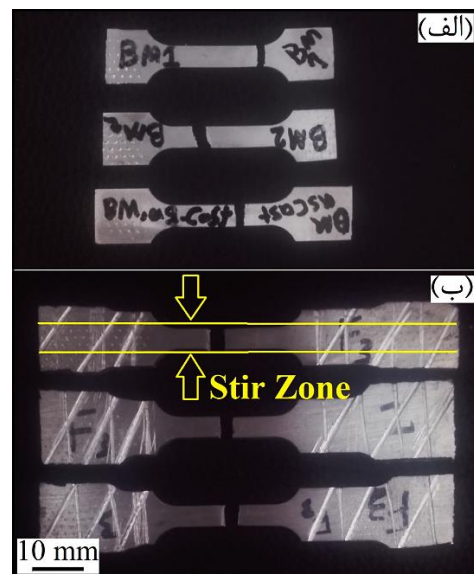
شکل ۳- (الف) تصویر متالوگرافی، تهیه شده با استفاده از نور معمولی و (ب) تصویر متالوگرافی با استفاده از نور پلاریزه را نشان می‌دهد.



شکل (۳): ریزساختار ریختگی آلیاژ منیزیم AZ91: (الف): تصویر میکروسکوپ نوری با استفاده از نور معمولی و (ب): تصویر میکروسکوپ نوری با استفاده از نور پلاریزه.

همان‌طور که این تصاویر نشان می‌دهند، ریزساختار آلیاژ ریختگی AZ91 دندریتی می‌باشد؛ اما مرزخانه‌های اصلی بوسیله این تکنیک متالوگرافی مشخص نشد (شکل ۳-الف). در واقع بدست آوردن اندازه دانه‌های این آلیاژ کار ساده‌ای نیست و تحقیقات متعددی روی حکاکی رنگی برای مشخص شدن دانه‌های این آلیاژ انجام شده است [۳۱-۳۲]. با انجام حکاکی رنگی و استفاده از نور پلاریزه، در سطح آلیاژ دندریتهایی که با یکدیگر اختلاف جهت گیری دارند، به رنگ‌های متفاوتی ظاهر می‌شوند (شکل ۳-ب). یکی دیگر

عرضی تحت سختی‌سنجی قرار گرفتند. اندازه دانه آلیاژ ریختگی و فرآیند شده از روی تصاویر متالوگرافی با استفاده از استاندارد ASTM E112-10 [۳۰] به روش خط تقاطعی^{۱۰} محاسبه شد. سختی‌سنجی با استفاده از نیروی ۲۰۰ گرم و مدت زمان نگه‌داری ۱۵ ثانیه در راستای خطی به فاصله یک و نیم میلی‌متر از سطح ناحیه هم‌زده شده انجام شد. تصاویر متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری با استفاده از نور معمولی و پلاریزه و میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM, TeScan-MiraIII) تهیه شدند. جهت بررسی ترکیب شیمیایی فازهای مختلف در آلیاژ ریختگی و آلیاژ فرآیند شده از آنالیز طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس (EDS) استفاده شد. سطوح شکست نمونه‌های کشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی شکست‌نگاری شدند.



شکل (۲): نمونه‌های آزمون کشش تک‌محوری از آلیاژ منیزیم AZ91 پس از شکست. (الف): فلز پایه ریختگی و (ب): آلیاژ فرآیند شده.

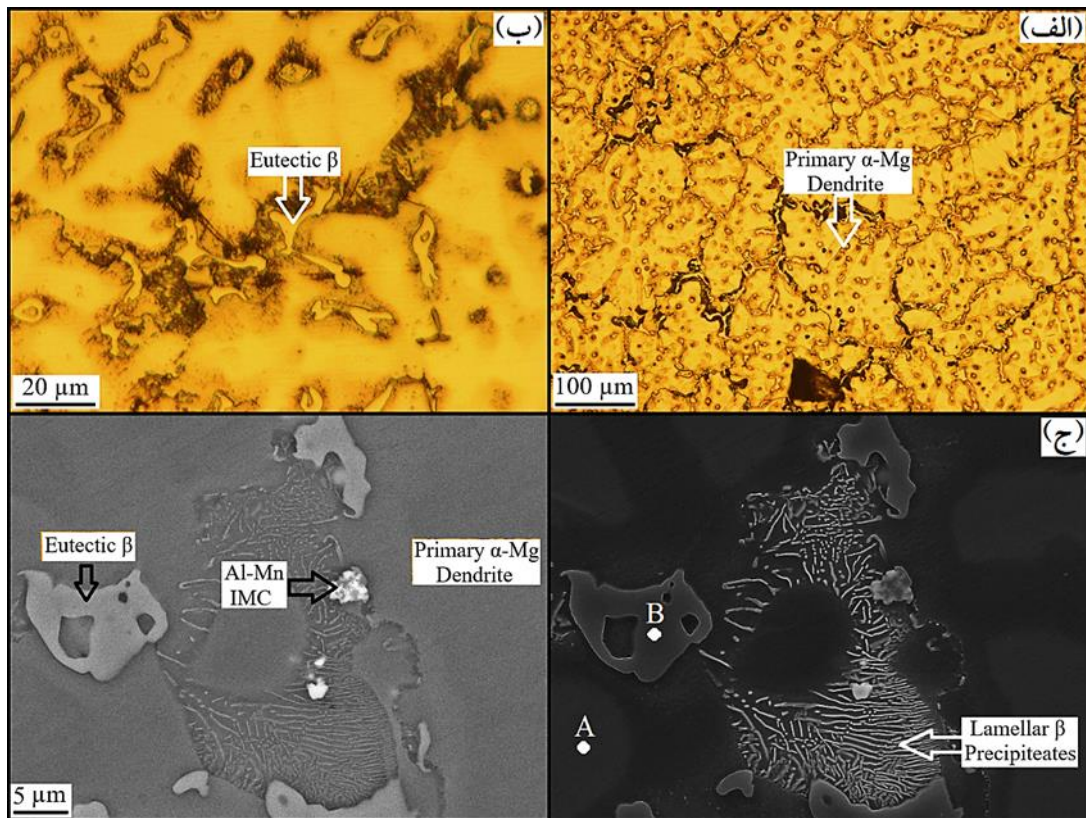
۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به بررسی ریزساختار آلیاژ ریختگی و فرآیند شده، خواص مکانیکی (کشش و ریزسختی) فلز پایه ریختگی و فرآیند شده و سپس شکست‌نگاری سطوح نمونه کشش پرداخته می‌شود.

[۳۴]، به صورت دندریتی از فاز مذاب جوانه می‌زند و با ادامه سرمایش شروع به رشد می‌کند، که در مرحله پایانی انجماد به دلیل شرایط انجماد غیر تعادلی مذاب باقی مانده از طریق واکنش یوتکتیک (دمای تعادلی ۴۳۷ درجه سانتی گراد)، به دو فاز $\alpha+\beta$ تبدیل می‌گردد [۳۵-۳۶].

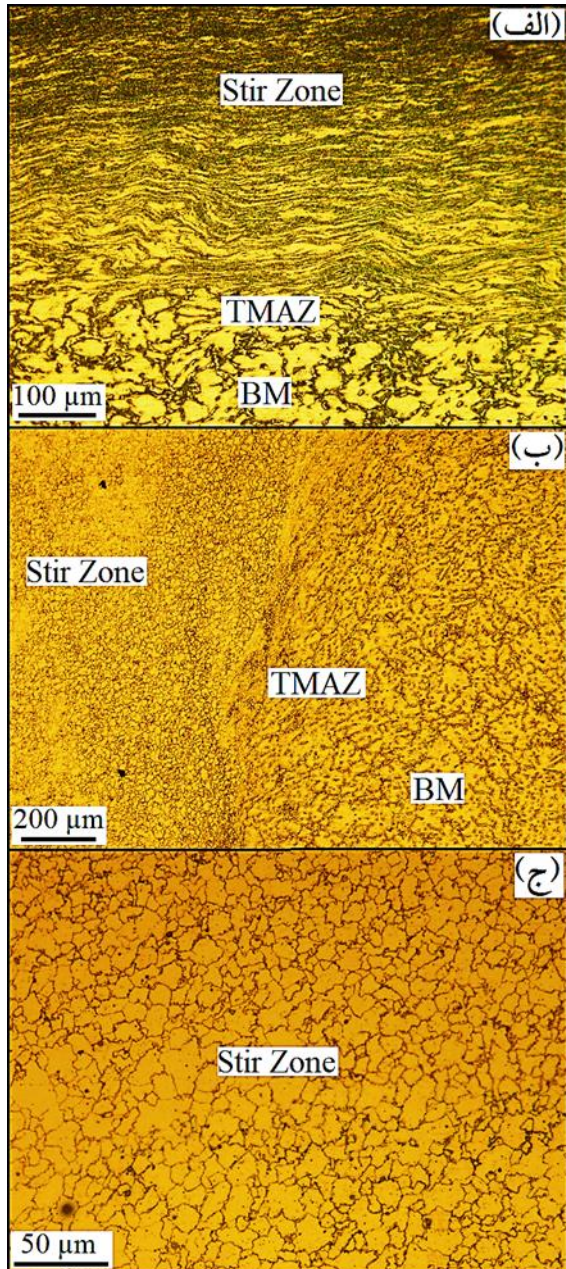
بسته به سرعت سرمایش فاز لایه‌ای بتا می‌تواند در حالت جامد از فاز فوق اشباع آلفا یوتکتیک رسوب گذاری کند (شکل ۴). در واقع عامل اصلی تاثیرگذار بر انعطاف پذیری پایین این آلیاژ حضور ترکیب بین فلزی ترد و درشت بتا در مناطق بین دندریتی و در مرزخانه‌ها است. البته لازم به ذکر است که فاز بتای یوتکتیکی در این ریزساختار ناپایدار بوده و با انجام عملیات همگن سازی در دمای ۴۱۳-۴۱۸ درجه سانتی گراد امکان حل شدن دارد. اما زمان لازم برای حل شدن این ترکیب بین فلزی درشت مضر در این محدوده‌ی دمایی بسیار طولانی و حدود ۲۴ ساعت گزارش شده است [۳۳]. از طرف دیگر، آلیاژهای منیزیم دارای انقباض انجمادی بالایی هستند و همچنین میزان انحلال گازها در

از تکنیک‌هایی که برای مشخص کردن اندازه دانه‌ی آلیاژهای منیزیم می‌تواند استفاده شود، پیرسازی می‌باشد. در طی انجام پژوهش حاضر، پدیده‌ی جالبی که مشاهده شد، با انجام فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی روی این آلیاژ مرزخانه‌های اصلی فلز پایه ریختگی در تصاویر متالوگرافی مشخص شدند (شکل ۴- الف). از آن جایی که دمای عملیات پیرسازی مصنوعی آلیاژ منیزیم AZ91، ۱۶۸ درجه سانتی گراد است [۳۳]، در نتیجه حرارت دیدن آلیاژ در این دما موجب رسوب گذاری جزئی، در مرزخانه‌ها در طی فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی می‌شود، که منجر به مشخص شدن مرزخانه‌ها در تصاویر متالوگرافی می‌شود. براساس این تصاویر، میانگین اندازه دانه فلز پایه ریختگی 9 ± 174 میکرون محاسبه شد. ریزساختار این آلیاژ دارای یک فاز زمینه محلول جامد غنی از منیزیم α و فاز ثانویه بین فلزی β است. برای بررسی تحولات فازی در آلیاژ AZ91 می‌توان از نمودار دوتایی Mg-Al استفاده کرد. فاز آلفا، محلول جامد منیزیم-آلومینیوم، بر اساس نمودار دوتایی منیزیم-آلومینیوم



شکل (۴): ریزساختار ریختگی آلیاژ منیزیم AZ91: (الف-ب): تصاویر میکروسکوپ نوری از فلز پایه ریختگی و نواحی بین دندریتی. (ج): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (با فاصله کاری ۱۵/۱۰ میلی متر)، سمت راست: الکترون ثانویه و سمت چپ: الکترون برگشتی از

نواحی بین دندریتی.



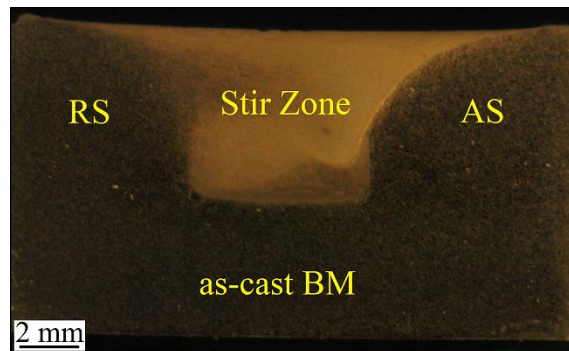
شکل (۶): تصاویر ریزساختاری آلیاژ منیزیم AZ91 پس از عملیات FSP: (الف): مرز ناحیه هم‌زده شده و فلز پایه در قسمت زیرین، (ب): مرز بین فلز پایه ریختگی و ناحیه هم‌زده شده (SZ) در سمت پیشرو (AS) و (ج): ناحیه هم‌زده شده.

الف) حذف ساختار دندردیتی و کاهش اندازه دانه: در واقع در طی فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی به دلیل اصطکاک موجود بین سطح ابزار و قطعه و حرارت ناشی از تغییر فرم پلاستیک ماده، دمای آلیاژ افزایش می‌یابد. حضور هم‌زمان تغییر فرم پلاستیک شدید و دمای بالا باعث می‌شود تبلور مجدد دینامیکی در طی فرآیند در ناحیه هم‌زده رخ داده و دانه‌های

مذاب این آلیاژها بالاست؛ بنابراین این آلیاژ پتانسیل بالایی برای تشکیل حفره‌های ماکروسکوپی در ریزساختار و حفره‌های میکروسکوپی در بین شاخه‌های دندردیتی حین انجماد دارد. این عیوب متالورژیکی نیز خواص مکانیکی آلیاژ را به شدت کاهش می‌دهد [۳۷].

۳-۲- ماکرو ساختار آلیاژ فرآیند شده

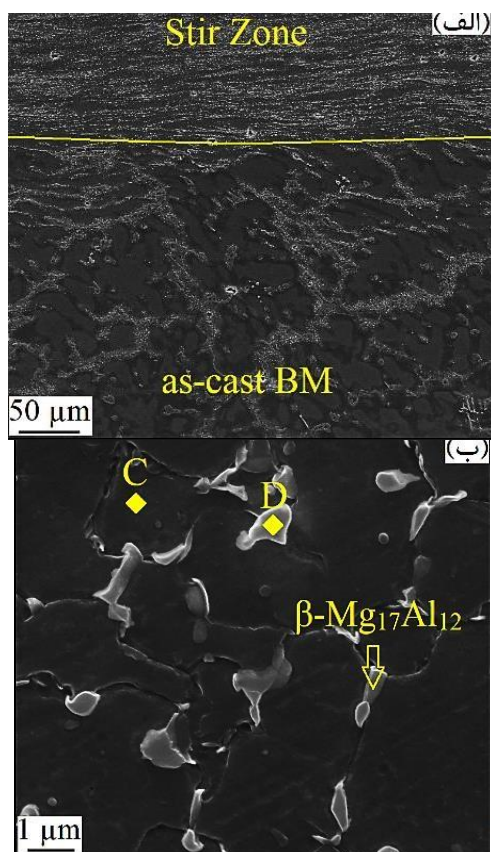
شکل ۵ تصویر ماکروساختار از مقطع متالوگرافی عرضی ناحیه هم‌زده شده را نشان می‌دهد. ناحیه هم‌زده شده به شکل یک گلدان می‌باشد و پهنای آن بیشتر از قطر بین ابزار (۵ میلی‌متر) می‌باشد، این امر به دلیل سیلان مواد در اطراف بین ابزار و فورج مواد به پشت پین در طی فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی و حرکت رو به جلوی ابزار مربوط می‌باشد.



شکل (۵): ماکروساختار عرضی ناحیه فرآیند شده روی آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91.

۳-۳- ریزساختار آلیاژ فرآیند شده

همچنین با حرکت از عمق به سطح پهنای افزایش قابل توجهی را از خود نشان می‌دهد. ناحیه هم‌زده شده عاری از عیوب و ناپیوستگی‌هایی (مانند حفره‌ها و عیوب شیاری و تونلی) است. شکل ۶ ریزساختار آلیاژ AZ91 پس از عملیات FSP را نشان می‌دهد. شکل (الف-ب) گرا دیان ریزساختاری بین ناحیه هم‌زده شده و فلز پایه ریختگی را نشان می‌دهد. شکل (ج) ساختار دانه‌ای ناحیه هم‌زده را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است سه تغییر عمده در منطقه هم‌زده شده نسبت به فلز پایه ریختگی رخ داده است:



شکل (۷): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الکترون ثانویه از آلیاژ منیزیم AZ91: (الف): فصل مشترک ریزساختار ناحیه هم‌زده شده و فلز پایه ریختگی (فاصله کاری میکروسکوپ ۱۵/۰۴ میلی‌متر) و (ب): ناحیه هم‌زده شده به همراه فاز ثانویه بسیار ریز خرد شده در مرزخانه‌ها (فاصله کاری میکروسکوپ ۱۴/۸۸ میلی‌متر).

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فاز زمینه و فاز بتا آلیاژ ریختگی و فرآیند

شده با استفاده از آنالیز FESEM-EDS

فلز پایه ریختگی			
ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)			
Zn	Al	Mg	فاز
۰/۲	۲/۸	۹۶/۴	آلفا اولیه (A)
۴/۶	۳۱/۹	۶۳/۲	بتا یوتکتیک (B)
فلز پایه فرآیند شده			
ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)			
Zn	Al	Mg	فاز
۱/۱	۷/۸	۹۰/۹	آلفا (C)
۱/۸	۱۶/۳	۸۱/۵	بتا (D)

بنابراین انحلال فاز بتا پس از FSP را می‌توان به خرد شدن و تبدیل ذرات فاز بتا به ذرات زیرمیکرونی، دمای بالای فرآیند، تغییر فرم پلاستیک شدید و ریزدانه شدن فاز زمینه که منجر به کاهش فاصله‌ی نفوذی می‌شود، مرتبط کرد [۱۶-۱۳].

ریز و هم‌محور به وجود بیاید [۳۸]. میانگین اندازه دانه در ناحیه هم‌زده $1/8 \pm 8$ میکرون است که یک کاهش قابل ملاحظه را نسبت به فلز پایه ریختگی نشان می‌دهد. فرآیند تبلور مجدد دینامیکی منجر به حذف ساختار دندریتی حاصل از ریختگی نیز شده است.

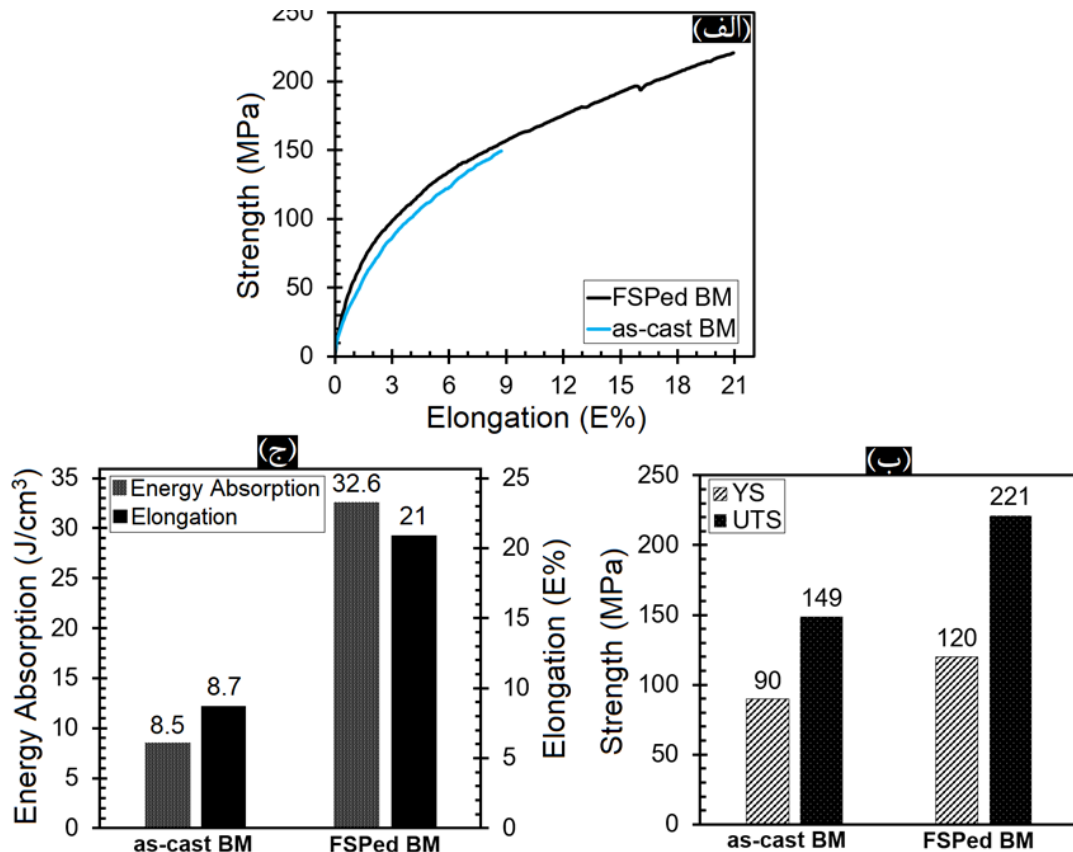
(ب) ریز شدن ترکیب بین فلزی بتا در مرز دانه‌های جدید: میانگین طول و عرض ترکیبات بتای یوتکتیکی در ساختار ریختگی برابر با ۱۳۳ و ۷ میکرون است. اما پس از FSP این ذرات خرد شده و به ذرات نسبتاً کروی با میانگین قطر ذرات برابر با 0.3 ± 0.73 میکرون تبدیل شده‌اند. این امر به دلیل تغییر فرم پلاستیک شدید آلیاژ در طی فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی است (شکل ۷).

(ج) انحلال فاز بتا: بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که فاز بتای رسوبی، در ناحیه‌ی هم‌زده شده به طور کامل حل شده است. این امر به دلیل افزایش دما (ناحیه هم‌زده شده) حین FSP به بیش از دمای انحلال این رسوبات لایه‌ای نازک است. همچنین بررسی‌های ریزساختاری نشان داد، که میزان کسر حجمی ترکیبات بتای یوتکتیکی از ۶ درصد در آلیاژ ریختگی به ۴ درصد در آلیاژ FSP شده کاهش یافته است (اندازه گیری با استفاده از نرم‌افزار ایمیج‌جی). تغییرات ترکیب شیمیایی فازهای آلفا و بتا پس از عملیات FSP نیز موید این مطلب است. جدول ۱ آنالیز EDS فاز زمینه و فاز بتا در حالت ریختگی (شکل ۴-ج) و ترکیب این دو فاز پس از FSP (شکل ۷-ب) را نشان می‌دهد. براساس جدول ۱، فاز آلفا در آلیاژ ریختگی از عناصر آلیاژی فقیر است و تنها دارای ۲/۸ درصد وزنی آلومینیوم و ۰/۲ درصد وزنی روی است. بعد از انجام فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی روی آلیاژ، فاز آلفا از عناصر آلیاژی غنی شده که این نشان می‌دهد بخشی از فاز بتا درون زمینه حل شده است. همان‌طور که ذکر شد، زمان لازم برای انحلال فاز بتای یوتکتیکی در ساختارهای ریختگی بسیار طولانی است. در واقع زمان لازم برای انحلال یک فاز به شدت تابع اندازه‌ی ذره است. به طوریکه براساس محاسبات تئوریک زمان انحلال ذره بطور معکوس با توان دوم اندازه ذرات رابطه دارد.

۳-۴- خواص مكانيكي

لحاظ استحکام تسليم ۹۰ مگاپاسکال، استحکام کششی ۱۴۹ مگاپاسکال، درصد ازدیاد طول تا شکست حدود ۸/۷ درصد و میزان جذب انرژی ۸/۵ ژول بر سانتی متر مکعب است. انجام فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی روی آلياژ منيزيم AZ91 منجر به بهبود قابل توجهی بر خواص مكانيكي شد. استحکام تسليم و استحکام کششی آلياژ FSP شده نسبت به آلياژ ريختگی به ترتیب حدود ۳۳ درصد و ۴۸ درصد افزایش پیدا کرد. بررسی سختی آلياژ ريختگی نشان داد، که میانگین سختی آن ۷۰ ویکرز است.

برای بررسی تاثیر FSP بر خواص مكانيكي آلياژ AZ91، آزمون کشش تک‌محوره در دمای اتاق روی نمونه‌های ريختگی و فرآیند شده انجام شد. شکل ۸- (الف) نمودار تنش- کرنش آلياژ ريختگی و FSP شده را نشان می‌دهد. شکل ۸- (ب) تاثیر FSP بر خواص کششی (استحکام تسليم و استحکام کششی) و شکل ۸- (ج) درصد ازدیاد طول تا لحظه شکست و میزان جذب انرژی تا لحظه شکست آلياژ AZ91 را نشان می‌دهد. آلياژ ريختگی به دلیل ساختار درشت دانه و وجود فاز ترد و درشت β -Mg₁₇Al₁₂ در مناطق بین دندریتی و مرزدانه‌ها، دارای خواص مكانيكي ضعیفی به



شکل ۸: خواص مكانيكي آلياژ منيزيم AZ91 قبل و بعد از FSP: (الف) نمودار تنش-کرنش مهندسی، (ب) استحکام کششی و استحکام تسليم و (ج): درصد ازدیاد طول در لحظه شکست و انرژی جذب شده.

سختی و استحکام آلياژ فرآیند شده را می‌توان به فاکتورهای زیر نسبت داد:
(الف) کاهش اندازه دانه: ضریب حساسیت استحکام به اندازه دانه، به عبارت دیگر ثابت قفل شونده‌گی مرزدانه‌ها، در

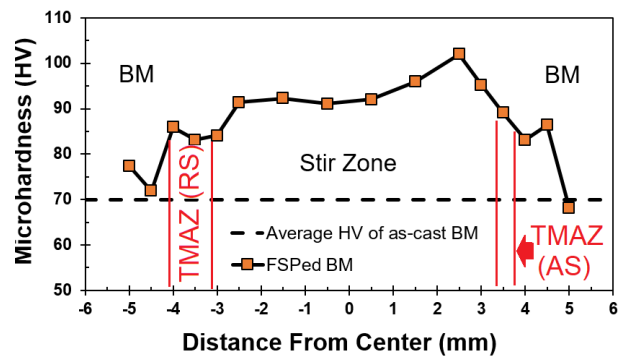
شکل ۹ تغییرات سختی آلياژ FSP شده را در یک مقطع عرضی عمود بر جهت FSP را نشان می‌دهد. سختی منطقه هم‌زده نسبت به سختی فلز پایه ريختگی بیشتر است. افزایش

نشان می‌دهد. وجود صفحات صاف بزرگ و تورقی شکل بیانگر حاکم بودن شکست ترد تورقی در این آلیاژ است. میانگین اندازه‌ی صفحات صاف در سطح شکست ۱۸ میکرون است، که با فواصل بین دندریتی در آلیاژ ریختگی تطابق دارد. در واقع عامل انعطاف‌پذیری ضعیف و انرژی شکست پایین آلیاژ ریختگی AZ91 وجود فاز بین فلزی ترد و پیوسته $Mg_{17}Al_{12}$ در مرزخانه‌های آلیاژ است. در سطح شکست نمونه ریختگی ترک‌هایی به طول ۱۰ تا ۶۰ میکرون وجود دارند (که در شکل ۱۰ با فلش زرد رنگ نشان داده شده‌اند). وجود این ترک‌ها را می‌توان هم به ترک‌های بین دندریتی ناشی از انقباض انجمادی و هم به ترک‌های ثانویه ناشی از تردی ساختار ارتباط داد. انجام فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی روی آلیاژ منیزیم AZ91 منجر به بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی آلیاژ شد. انعطاف‌پذیری و انرژی شکست آلیاژ FSP شده نسبت به آلیاژ ریختگی به ترتیب حدود ۱۴۱ درصد و ۲۸۳ درصد افزایش پیدا کرد. شکل ۱۰- (ج) سطح شکست نمونه کشش فلز پایه فرآیند شده را نشان می‌دهد. وجود حفره‌ها در سطح شکست بیانگر حاکم بودن شکست نرم در آلیاژ FSP شده است. حفره‌های عمیق به همراه ریز حفرات موجود در کف آن در سطح شکست نشان می‌دهند که قبل از شکست ماده تغییر فرم پلاستیک قابل توجهی داشته است. بهبود چشمگیر انعطاف‌پذیری و انرژی شکست آلیاژ FSP شده به دلیل ریز شدن دانه‌های آلیاژ، خرد شدن و ریز شدن فاز بتا، شکستن پیوستگی فاز بتا و همچنین کاهش درصد فاز بتا است. افزایش انرژی شکست آلیاژ می‌تواند منجر به افزایش کاربرد قطعات ریختگی آلیاژهای منیزیمی در کاربردهای حساس به ایمنی شود.

آلیاژهای منیزیم مقداری قابل توجه‌ای است. بنابراین کاهش اندازه دانه از 9 ± 174 میکرون به $1/8 \pm 8$ میکرون موجب افزایش استحکام آلیاژ می‌شود.

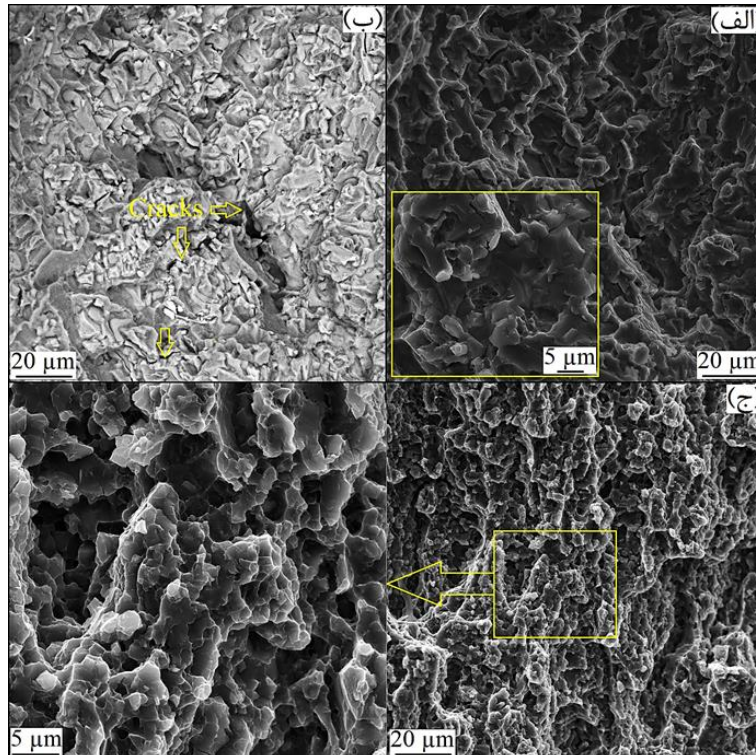
(ب) استحکام بخشی با ذرات زیرمیکرونی فاز بتا: تاثیر فاز بتای یونکتیکی درشت در استحکام آلیاژ ریختگی بیشتر ناشی از محدود کردن تغییر فرم پلاستیک زمینه‌ی نرم توسط یک فاز سخت است. اما در آلیاژ فرآیند شده با کاهش اندازه‌ی ذرات بین فلزی بتا به زیر یک میکرون، اندرکنش ذرات و نابجایی (مکانیزم ارووان) فعال شده و موجب افزایش استحکام آلیاژ می‌شود [۱۳].

(ج) افزایش تاثیر مکانیزم محلول جامد در استحکام فاز آلفا در اثر انحلال فاز بتا: همانطور که در بالا توضیح داده شد انحلال فاز بتا در اثر FSP موجب افزایش درصد عناصر محلول (آلومینیوم و روی) در زمینه‌ی آلفا شده و به این ترتیب نقش مکانیزم محلول جامد در افزایش استحکام موثرتر می‌شود.



شکل (۹): نمودار پروفیل سختی در راستای یک خط مستقیم به فاصله ۱ میلی‌متر از سطح، در مقطع عمود بر جهت FSP.

همچنین براساس شکل ۸، درصد ازدیاد طول و قابلیت جذب انرژی آلیاژ FSP شده نسبت به آلیاژ ریختگی به ترتیب ۲/۴ برابر و ۳/۸ برابر شده است. شکل ۱۰- (الف-ب) سطح شکست نمونه‌های کشش تک‌محوره فلز پایه ریختگی را



شکل (۱۰): تصاویر سطح شکست نمونه‌های آزمون کشش: (الف): تصویر الکترون ثانویه از فلز پایه ریختگی با فاصله کاری ۱۵/۷۰ و ۱۴/۸۹ میلی‌متر. (ب): تصویر الکترون برگشتی شکل (الف). (ج): تصویر الکترون ثانویه فلز پایه FSP شده (فاصله کاری میکروسکوپ ۱۴/۳۱ میلی‌متر).

۴- نتیجه گیری

فرم پلاستیک شدید در دمای بالا منجر به انحلال جزئی فاز بتا، شکستن پیوستگی فاز بتا، خرد شدن آن و تبدیل شدن ذرات بتا به ذرات بسیار ریز با اندازه زیر یک میکرون شد. (۲) نتایج نشان داد که استحکام کششی آلیاژ AZ91 با ۴۸ درصد افزایش به ۲۲۱ مگاپاسکال رسید، که ناشی از افزایش تاثیر مکانیزم استحکام‌دهی مرزانه‌ای، فعال شدن مکانیزم ارووان و افزایش میزان سهم مکانیزم محلول جامد است. (۳) انعطاف‌پذیری آلیاژ پس از عملیات FSP به ۲۱ درصد رسید و انرژی شکست آلیاژ بیش از ۳/۸ برابر افزایش یافت. این بهبود در شکل‌پذیری و انرژی شکست با تغییر مکانیزم شکست از حالت تورقی به نرم همراه بود که به دلیل ریز شدن دانه‌های آلیاژ، خرد شدن و ریز شدن فاز بتا، شکستن پیوستگی فاز بتا و همچنین کاهش درصد فاز بتا است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند FSP می‌تواند به عنوان یک روش موفقیت‌آمیز برای اصلاح ریزساختاری و بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای ریختگی منیزیم در افزایش

در این پژوهش به بررسی بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91 ریختگی با استفاده از فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی پرداخته شده است. آلیاژ ریختگی با اندازه دانه درشت و ترکیبات بین فلزی یوتکتیکی $Mg_{17}Al_{12}$ در مناطق بین دندریتی و مرزانه‌ها خواص مکانیکی ضعیفی را از خود نشان می‌دهد. این امر به دلیل شکستن ذرات ترد فاز بتا حین بارگذاری مکانیکی شکست ترد تورقی را تشویق کرده و با ایجاد ناپیوستگی در فصل مشترک زمینه و ذره موجب تسریع فرآیند شکست می‌شود. در حالت ریختگی، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نمونه تا شکست به ترتیب ۱۴۹ مگاپاسکال و حدود ۸/۷ درصد بود. از فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی برای بهبود ریزساختار آلیاژ استفاده شد و نتایج زیر حاصل شد:

(۱) اعمال فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی با تشویق پدیده تبلور مجدد دینامیکی منجر به کاهش شدید اندازه دانه از ۱۷۴ میکرون به حدود ۸ میکرون شد. همچنین ترکیب تغییر

- magnesium alloy produced by high pressure die cast", *Journal of materials processing technology*, vol. 184, no. 1-3, pp. 77-83, 2007.
- [10] K. Fuse, & V. Badheka, "Bobbin tool friction stir welding: a review", *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 24, no. 4, 277-304, 2019.
- [11] R. S. Mishra & Z. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials science and engineering: R: reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-7, 2005.
- [۱۲] ا. بهرامی، م. شمعیان و ح. ادیس، "تولید کامپوزیت درجا آلومینیوم - نیکل بر سطح آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۳، ۱۳۹۵.
- [13] W, Yuan, S. K. Panigrahi & R. S. Mishra, "Achieving high strength and high ductility in friction stir-processed cast magnesium alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 44, no. 8, pp. 3675-3684, 2013.
- [14] T. Freney, & R. Mishra, "Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of a cast-magnesium-rare earth alloy", *Metallurgical and materials transactions A*, vol. 41, no. 1, pp. 73, 2010.
- [15] A. Feng & Z. Ma, "Microstructural evolution of cast Mg-Al-Zn during friction stir processing and subsequent aging", *Acta Materialia*, vol. 57, no. 14, pp. 4248-4260, 2009.
- [16] K. Máthi, J. Gubicza & N. Nam, "Microstructure and mechanical behavior of AZ91 Mg alloy processed by equal channel angular pressing", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 394, no. 1-2, pp. 194-199, 2005.
- [17] W. Kim, J. Park & W. Kim, "Effect of differential speed rolling on microstructure and mechanical properties of an AZ91 magnesium alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 460, no. 1-2, pp. 289-293, 2008.
- [18] M. Mabuchi, Y. Chino, H. Iwasaki, T. Aizawa & K. Higashi, "The grain size and texture dependence of tensile properties in extruded Mg-9Al-1Zn", *Materials Transactions*, vol. 42, no. 7, pp. 1182-1188, 2001.
- [19] M. T. Pérez-Prado, J. Del Valle & O. A. Ruano, "Achieving high strength in
- قابلیت اطمینان به قطعات ریختگی در برابر شکست ترد نقش کلیدی بازی کند، که در نهایت منجر به افزایش کاربرد آلیاژهای ریختگی منیزیم در قطعات حساس به ایمنی بالا می‌شود.
- ### ۵- مراجع
- [۱] ا. عبدالله زاده، ع. شکوه فر، ح. امیدوار، م. ص. خانیان و م. ر. نادری، "بررسی تاثیر افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم بر خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ31 جوشکاری شده به روش اصطکاکی اغتشاشی"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۴، ۱۳۹۵.
- [2] Kim, N. "Critical Assessment 6: Magnesium sheet alloys: viable alternatives to steels?" *Materials Science and Technology*, vol. 30, no. 15, pp. 1925-1928, 2014.
- [3] T. Trang, J. Zhang, J. Kim, A. Zargaran, J. Hwang, B.-C. Suh & N. Kim. "Designing a magnesium alloy with high strength and high formability", *Nature communications*, vol. 9, no. 1, pp. 2522, 2018.
- [4] T. Trang, J. Zhang, J. Kim, A. Zargaran, J. Hwang, B.-C. Suh & N. Kim. "Designing a magnesium alloy with high strength and high formability", *Nature communications*, vol. 9, no. 1, pp. 2522, 2018.
- [5] A. A. Luo, "Recent magnesium alloy development for elevated temperature applications", *International materials reviews*, vol. 49, no. 1, pp. 13-30, 2004.
- [6] T. Trang, J. Zhang, J. Kim, A. Zargaran, J. Hwang, B.-C. Suh & N. Kim. "Designing a magnesium alloy with high strength and high formability", *Nature communications*, vol. 9, no. 1, pp. 2522, 2018.
- [7] B. Mordike, & T. Ebert, "Magnesium: properties—applications—potential", *Materials Science and Engineering*, vol. 302, no. 1, pp. 37-45, 2001.
- [۸] م. پاکشیر، ر. مدحت و خ. مرشد بهیانی، "بررسی و مقایسه رفتار خوردگی آلیاژ منیزیم AZ91 ریختگی و تغییر فرم یافته به روش اکستروژن برشی ساده"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره ۲، ۱۳۹۴.
- [9] P. Cavaliere, & P. De Marco, "Superplastic behaviour of friction stir processed AZ91

- properties of AZ80A Mg alloy joints", FME Transactions, vol. 46, no. 1, pp. 23-32.
- [29] E8/E8M – 15a, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", DOI: 10.1520/E0008_E0008M-15A. 2015.
- [30] E 112 – 10, "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", DOI: 10.1520/E0112-10. 2010.
- [31] A. Maltais, D. Dube, F. Roy & M. Fiset, "Optical anisotropy of a color-etched AZ91 magnesium alloy", Materials characterization, vol. 54, no. 4-5, pp. 315-326, 2005.
- [32] A. Maltais, D. Dube, M. Fiset, G. Laroche & S. Turgeo, "Improvements in the metallography of as-cast AZ91 alloy", Materials Characterization, vol. 52, no. 2, pp. 103-119, 2004.
- [33] A. Feng & Z. Ma, "Enhanced mechanical properties of Mg–Al–Zn cast alloy via friction stir processing", Scripta materialia, vol. 56, no. 5, pp. 397-400, 2007.
- [34] X. Chai, T. Yuan & S. Kou, "Liquation and liquation cracking in partially melted zones of magnesium welds", Weld, J, vol. 9, 2016.
- [35] "Microstructure in Magnesium–Aluminium alloy", Journal of light metals, vol. 1, no. 1, pp. 61-72.
- [36] M. Ohno, D. Mirkovic & R. Schmid-Fetzer, "Liquidus and solidus temperatures of Mg-rich Mg–Al–Mn–Zn alloys", Acta Materialia, vol. 54, no. 15, 3883-3891, 2006.
- [37] B. Hassani, F. Karimzadeh, M. H. Enayati, S. Sabooni & R. Vallan, "Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of AZ91C Magnesium Cast Alloy Weld Zone", Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 25, no. 7, pp. 2776-2785. 2016.
- [38] B. Guan, Y. Xin, X. Huang, P. Wu & Q. Liu, "Quantitative prediction of texture effect on Hall–Petch slope for magnesium alloys", Acta Materialia, vol. 173, pp. 142-152, 2019.
- commercial Mg cast alloys through large strain rolling", Materials letters, vol. 59, no. 26, pp. 3299-3303, 2005.
- [20] B. Chen, D. L. Lin, L. Jin, X. Q. Zeng & C. Lu, "Equal-channel angular pressing of magnesium alloy AZ91 and its effects on microstructure and mechanical properties", Materials Science and Engineering: vol. 483, pp. 113-116, 2008.
- [21] S. Khani, M. Aboutalebi, M. Salehi, H. Samim & H. Palkowski, "Microstructural development during equal channel angular pressing of as-cast AZ91 alloy", Materials Science and Engineering, vol. 678, pp. 44-56, 2016.
- [22] F. Chai, D. Zhang & Y. Li, "Microstructures and tensile properties of submerged friction stir processed AZ91 magnesium alloy", Journal of Magnesium and Alloys, vol. 3, pp. 203–209, 2015.
- [23] M. Dadashpour, R. Yeşildal, A. Mostafapour & V. Rezazade, "Effect of heat treatment and number of passes on the microstructure and mechanical properties of friction stir processed AZ91C magnesium alloy", Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 30, pp. 667-672, 2016.
- [24] S. Rouhi, A. Mostafapour & M. Ashjari, "Effects of welding environment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded AZ91C magnesium alloy joints", Science and Technology of Welding and Joining, vol. 21, pp. 25-31, 2016.
- [25] F. Chai, D. T. Zhang & Y. Y. Li, "Microstructures and tensile properties of submerged friction stir processed AZ91 magnesium alloy", Material Research Innovations, vol. 18, no. S4, pp. 152-156, 2014.
- [26] D. Ahmadkhaniha, M. Heydarzadeh Sohi & A. Zarei-Hanzaki, "Optimisation of friction stir processing parameters to produce sound and fine grain layers in pure magnesium", Science and Technology of Welding and Joining, vol. 19, no. 3, pp. 235-241, 2014.

۶- پی نوشت

- [1] Friction Stir Processing
 [2] Thermo-Mechanical
 [3] Friction Stir Welding
 [4] Monolithic Workpiece
 [5] Joining
 [6] Stir Zone
 [7] Severe Plastic Deformation

- [27] Processing of As-Cast Magnesium AZ91. "Materials Science Forum" 916: 239-243.
- [28] "Parameters of FSW process on the microstructural evolution & mechanical

- [8] Ductility
- [9] Shoulder
- [10] Intercepted Method