

# بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی T6 بر خواص سایشی منطقه روکش کاری شده آلیاژ ریختگی AZ91C

سید بهزاد حسنی<sup>۱\*</sup>، فتح‌الله... کریم‌زاده<sup>۱</sup>، محمدحسین عنایتی<sup>۱</sup> و منصور برونی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- شرکت صنایع هواپیماسازی ایران (هسا)، شاهین شهر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۰۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶)

**چکیده** - در این پژوهش از فرایند جوش کاری قوسی تنگستن برای روکش کاری<sup>۱</sup> و ترمیم سطح آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C استفاده شد. در ادامه برای بررسی تأثیر بهبود خواص ریزساختاری بر خواص سایشی، فرایند اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی T6 بر ناحیه روکش کاری شده، اعمال شد. نتایج ریزسختی سنجی گویای افزایش میانگین سختی با فرایند روکش کاری و سپس افزایش سختی ناحیه روکش کاری شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی و در نهایت افزایش بیشینه میانگین سختی در ناحیه روکش کاری شده پس از اعمال عملیات حرارتی T6 بود. نتایج آزمون سایش نشان داد فرایند روکش کاری موجب بهبود خواص سایشی آلیاژ شده است. پس از اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ناحیه روکش کاری شده، بهبود بیش تری در مقاومت سایش ناحیه روکش کاری شده حاصل شد. در نهایت بهترین خواص سایشی با اعمال عملیات حرارتی به دست آمد.

**واژگان کلیدی:** روکش کاری، ترمیم، فرایند اصطکاکی اغتشاشی، عملیات حرارتی، سایش

## Effects of Friction Stir Processing and T6 Heat Treatment on Wear Properties of Weld Metal of Cast AZ91C Alloy

B. Hassani<sup>1\*</sup>, F. Karimzadeh<sup>1</sup>, M. Enayati<sup>1</sup> and M. Borouni<sup>2</sup>

1- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Iran Aircraft Manufacturing Company (HESA), Shahinshahr, Isfahan, Iran

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: bh\_metal84@yahoo.com

**Abstract:** In this study, TIG welding was used to clad and repair the surface of cast AZ91C magnesium alloy. Then, friction stir processing and T6 heat treatment were applied on the welded region. Microhardness results showed an improvement in the mean hardness of welded zone and also FSPed zone. Increase in the mean microhardness of the welded zone after T6 heat treatment to the maximum value was also concluded. The results of wear test showed that the wear resistance of the welded area was improved. Further improvement in wear properties was obtained after friction stir processing and T6 heat treatment.

**Keywords:** Clad, Repair, Friction stir processing, Heat treatment, Wear

## ۱- مقدمه

امروزه مواد با خواص تریبولوژی بهبود یافته به عنوان یک نیاز در طراحی های مهندسی پیشرفته مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. آلیاژهای منیزیم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و در پی آن صرفه اقتصادی در به کار بردن این آلیاژها در تأسیسات، از جمله فلزات مهم صنعتی به شمار می روند [۲-۴]. خواص سطحی ضعیف آلیاژهای منیزیم همچون خواص سایشی منجر به محدود شدن کاربرد این آلیاژها شده است. وجود عیوب ریخته گری همچون انواع تخلخل ها منجر به تخریب و افت زودرس خواص این آلیاژها شده، استفاده این آلیاژها در صنعت را نامناسب می سازد [۵].

هرچند تاکنون پژوهش های بسیاری در مورد رفتار سایشی آلیاژهای مختلف منیزیم انجام شده است، در این میان پژوهش اندکی بر روی بهبود خواص سایشی آلیاژهای منیزیم AZ91 انجام گرفته است. دبرزانسکی<sup>۲</sup> و همکاران [۶] رفتار سایشی آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91 را تحت عملیات حرارتی پیرسختی و انواع مختلف عملیات حرارتی انحلالی مورد مطالعه قرار دادند و با رسیدن به کاهش جرم کم تر توسط عملیات حرارتی خواص سایشی این آلیاژ را بهبود دادند. آرورا<sup>۳</sup> و همکاران [۵] رفتار سایشی آلیاژ منیزیم AE42 را تحت شرایط ریختگی و پس از اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار دادند. فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش قابل توجه نرخ سایش شد که ریزدانه شدن ریزساختار و به دنبال آن افزایش سختی، انعطاف پذیری و قابلیت کارسختی به عنوان دلیل بهبود خواص سایشی گفته شد. در این پژوهش برای بهبود خواص سایشی آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C، از جوش کاری ترمیمی به صورت روکش کاری با جوش کاری قوسی تنگستن، عملیات

حرارتی T6 و فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی ناحیه روکش کاری شده آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C استفاده شد و سپس خواص سایشی آن مورد ارزیابی قرار گرفت.

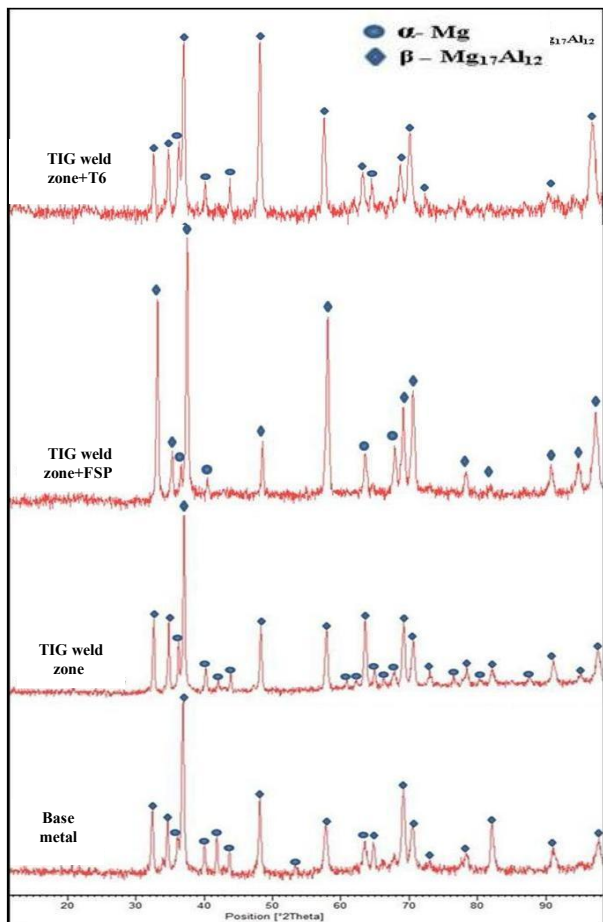
## ۲- مواد و روش پژوهش

در این پژوهش صفحه های منیزیمی دارای ابعاد ۱۰×۱۰×۱۵۰ میلی متر که با روش ریخته گری ماسه ای تهیه شده بود مورد استفاده قرار گرفت.

برای متالوگرافی نمونه ها، پس از مانع سرد، سنباده زنی و پولیش توسط پودر آلومینا انجام گرفت. سپس برای بررسی ریزساختار با میکروسکوپ نوری، نمونه تحت تاثیر محلول شامل ۴/۲ گرم اسید پیکریک، ۱۰ میلی لیتر اسید استیک، ۷۰ میلی لیتر آب مقطر و ۷۰ میلی لیتر اتانول، به مدت ۱ الی ۳ ثانیه مورد حکاکی قرار گرفت. برای بررسی فازی نمونه ها در اثر اعمال فرایندهای مختلف، از دستگاه تفرق اشعه X مدل (Philips xpert-MDDsystem) استفاده شد و نمونه ها در ولتاژ ۳۰ ولت به مدت یک ساعت در معرض اشعه قرار گرفتند.

برای بررسی تغییرات سختی پس از اعمال فرایندهای مختلف و همچنین مقایسه تغییرات سختی در هر حالت، از آزمون ریزسختی سنجی استفاده شد. در تمامی آزمایش های ریزسختی بار اعمالی معادل ۱۰۰۰ گرم بود که به مدت ۱۵ ثانیه برای هر نقطه اعمال می شد.

عملیات جوش کاری توسط پرکننده هایی از جنس AZ91C با قطر ۳/۲ میلی متر تحت محافظت گاز آرگون و به گونه خودکار توسط دستگاه جوش کاری قوسی تنگستن با شدت جریان معادل ۱۱۰ آمپر و سرعت خطی ۱ سانتی متر بر دقیقه انجام شد.



شکل ۱- حضور فازهای  $\alpha$ -Mg و  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> در الگوی پراش اشعه ایکس از سطح تمامی نمونه‌ها

تصاویر متالوگرافی از نواحی مختلف در شکل ۲ ارائه شده است. مطابق با تصویر (الف) این شکل، ریزساختار دندردیتی شامل شبکه پیوسته رسوبات فاز ثانویه  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> از خصوصیات فلز پایه است [۸، ۷]. تصویر (ب) شکل ۲ نشانگر ساختار به هم ریخته شامل رسوبات ریز و سوزنی شکل در ریزساختار ناحیه روکش کاری شده است. چنانچه شکل ۲-ج نشان می‌دهد ریز شدن دانه‌ها و انحلال فاز  $\beta$  در پی آن همگن شدن ریزساختار، از اثرات اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ناحیه بوده است. هم‌چنین انحلال چشم‌گیر فاز  $\beta$  به وسیله عملیات حرارتی، با کاهش شدت قله‌ها در الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به ناحیه روکش کاری شده پس از فرایند اصطکاکی اغتشاشی مشهود است.

ابزار مورد استفاده برای انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی در این پژوهش از جنس فولاد ابزار H13 با شانه استوانه ای به قطر ۱۸ میلی‌متر و دارای تقعر به زاویه ۷ درجه بود. انتهای شانه شامل پین استوانه‌ای به قطر ۶ میلی‌متر و ارتفاعی معادل با ۴/۵ میلی‌متر دارای چهار شیار به فاصله ۱ میلی‌متر انتخاب شد. برای ایجاد سختی و استحکام بالای پین، ابزار ماشین‌کاری شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل و سپس در روغن سرد شد.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته بر روی آلیاژ AZ91P [۷، ۸]، فرایند اصطکاکی اغتشاشی با پارامترهای بهینه شامل سرعت چرخشی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و سرعت خطی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. هم‌چنین ابزار در حین کار دارای زاویه ۳ درجه با محور عمودی بود.

برای انجام عملیات حرارتی T6 نمونه‌ها به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۴۱۳ درجه سانتی‌گراد در کوره تحت محافظت گاز آرگون مورد عملیات آنیل انحلالی و سپس در دمای ۲۱۶ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴ ساعت تحت عملیات پیرسختی قرار گرفت.

آزمون سایش توسط دستگاه سایش رفت و برگشتی صورت پذیرفت. بار اعمالی برای این آزمون معادل ۱۰ نیوتن در مسافت نهایی معادل ۲۰۰۰ متر انتخاب شد. کاهش وزن نمونه‌ها در بازه‌های ۲۰۰ متری از ابتدا تا انتهای مسیر توسط ترازوی با دقت ۱۰<sup>-۴</sup> گرم اندازه‌گیری شد. پین سایش مورد استفاده از جنس فولاد ابزار ۵۲۱۰۰ با سختی ۶۲ راکول سی و به قطر ۵ میلی‌متر بود. طول مسیر سایش ۴ سانتی‌متر و سرعت خطی پین روی نمونه برابر با ۰/۱ متر بر ثانیه انتخاب شد.

### ۳- بحث و نتایج

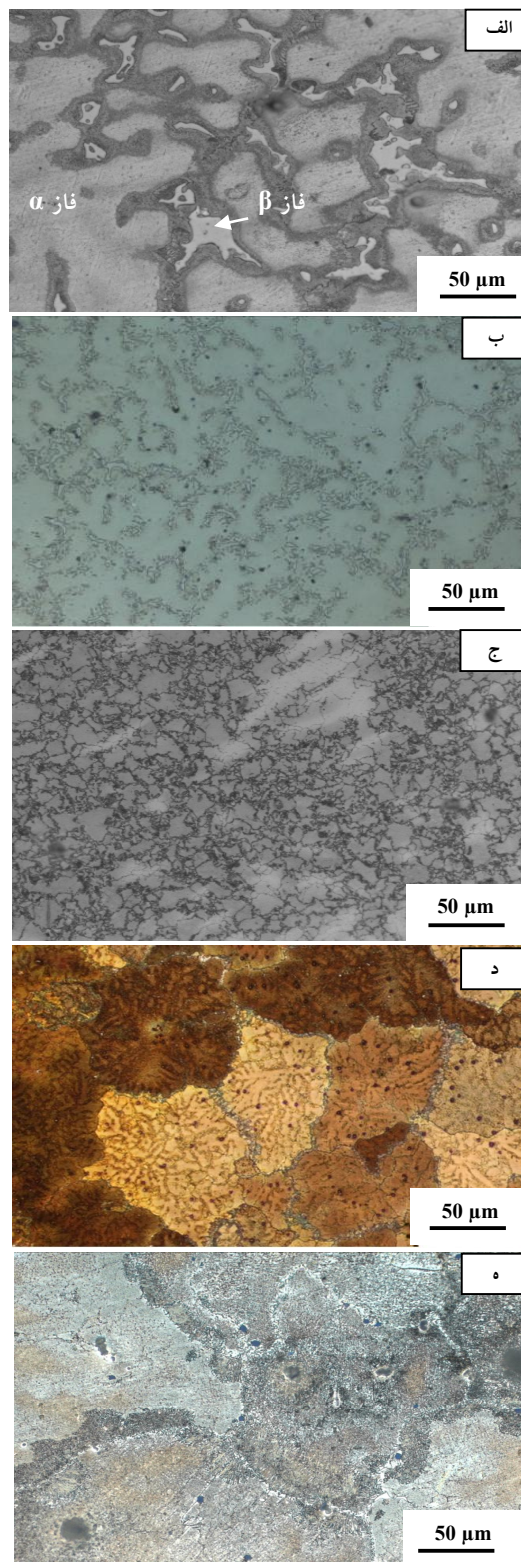
مطابق با الگوی پراش پرتوی ایکس ارائه شده در شکل ۱ و بررسی‌های مختلف انجام شده بر روی این آلیاژ [۷] فازهای  $\alpha$ -Mg و  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> به‌عنوان فازهای اصلی در ریزساختار مناطق مختلف شناسایی شد.

بررسی های مختلف ریز شدن دانه های آلیاژهای منیزیم را ناشی از وقوع تبلور مجدد دینامیکی دانسته اند [ ۹]. هم چنین با توجه به اینکه قطعات منیزیمی پس از فرایند ریختگی مورد عملیات حرارتی قرار می گیرند، تأثیر عملیات حرارتی T6 بر نمونه های جوش کاری شده این آلیاژ نیز مورد بررسی قرار گرفت.

چنانچه در شکل ۲-د مشاهده می شود، در ریزساختار فلز پایه، رسوبات فاز  $\beta$  به گونه چشم گیری حل شده اند و در پی رخداد تبلور مجدد در حین عملیات حرارتی T6 اندازه دانه های آن به شدت کاهش یافته است که به طور میانگین  $50\ \mu\text{m}$  تخمین زده می شود. این در حالی است که مطابق با شکل ۲-ه ساختار منطقه روکش کاری شده پس از عملیات حرارتی T6 دچار رشد بی رویه دانه ها شده، رسوبات فاز ثانویه  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  در مرز دانه ها به طور چشم گیری انحلال یافته است. به عبارتی تنش های پسماند پس از جوش کاری در حین عملیات حرارتی منجر به وقوع تبلور مجدد زودرس در ناحیه روکش کاری شده، در ادامه رشد چشم گیر دانه ها در طول مدت عملیات حرارتی به وقوع پیوسته است.

انحلال چشم گیر فاز  $\beta$  در ناحیه روکش کاری شده پس از اعمال عملیات حرارتی، با کاهش شدت قله های مربوط به فاز  $\beta$  در شکل ۱ مشهود است.

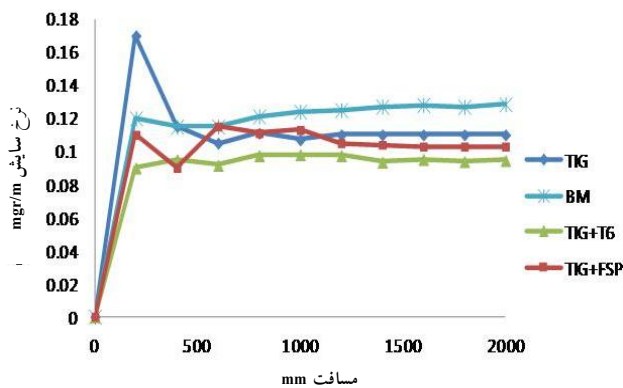
برای بررسی اثر روکش کاری بر ریزساختار آلیاژ ریختگی منیزیم AZ91C و سپس ارزیابی تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی T6 بر روی آن، سختی سنجی بر روی نواحی اشاره شده صورت گرفت و میانگین مقادیر سختی برای هر ناحیه در جدول ۱ ارائه شده است. چنانچه دیده می شود میانگین میزان سختی فلز پایه پس از عملیات حرارتی به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است که ریز شدن ریزساختار و عملیات رسوب سختی از دلایل عمده آن است. هم چنین سختی منطقه روکش کاری شده دارای افزایش اندکی نسبت به فلز پایه بوده که ناشی از نرخ بالای سرمایش ناحیه روکش کاری شده و ریزتر شدن ریزساختار



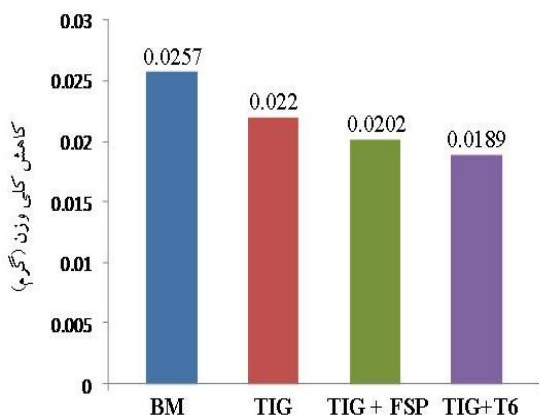
شکل ۲- ریزساختار الف) آلیاژ ریختگی، ب) ناحیه روکش کاری شده، ج) ناحیه روکش کاری شده پس از عملیات حرارتی و از FSP، د) فلز پایه پس از عملیات حرارتی و ه) ناحیه روکش کاری شده پس از عملیات حرارتی

جدول ۱- میانگین مقادیر سختی برای نواحی مختلف قبل از آزمون سایش

ناحیه	فلز پایه	فلز پایه پس از عملیات حرارتی T6	ناحیه روکش کاری شده	ناحیه روکش کاری شده پس از FSP	ناحیه روکش کاری شده پس از عملیات T6
میانگین سختی (ویکرز)	۹۱+۴	۶۳+۷	۶۷+۵	۷۸+۳	۸۹+۵



شکل ۳- نمودار نرخ سایش برحسب مسافت طی شده فلز پایه، ناحیه روکش کاری شده، ناحیه روکش کاری شده پس از عملیات حرارتی و ناحیه روکش کاری شده پس از فرایند اصطکاکی اغتشاشی



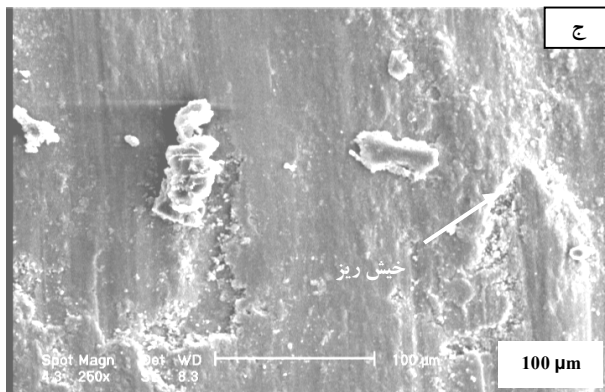
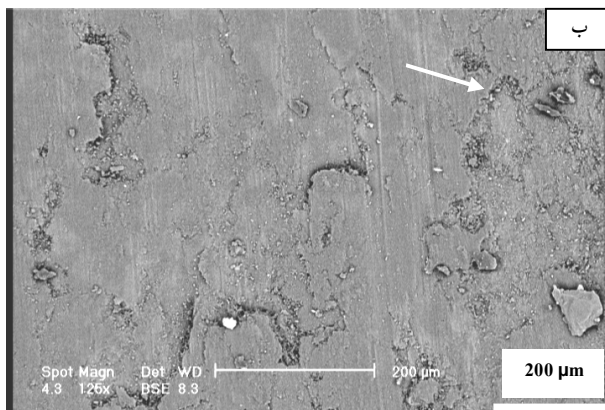
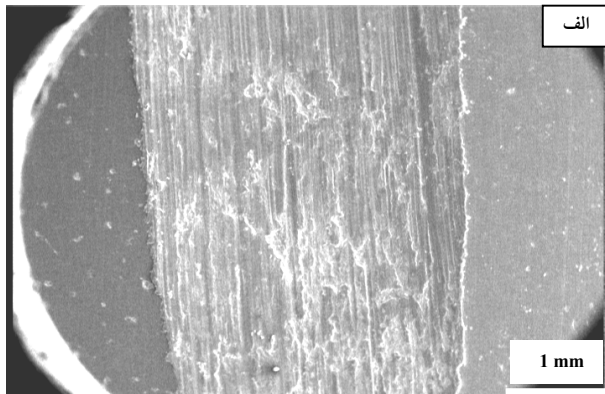
شکل ۴- نمودار کاهش کلی جرم برای حالت‌های مختلف پس از طی ۲۰۰۰ متر

مقاومت به سایش این منطقه نسبت به فلز پایه بوده است. نمودار مربوط به ناحیه روکش کاری شده پیش و پس از فرایند اصطکاکی اغتشاشی پس از طی مسافت حدود ۱۲۰۰ متر به حالت پایدار رسیده است که افزایش میزان انعطاف‌پذیری در

آن نسبت به فلز پایه و حضور بیش‌تر فاز سخت  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> در مرز دانه‌های ریزساختار ناحیه روکش کاری شده است. میانگین میزان سختی در ناحیه روکش کاری شده پس از اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی افزایش قابل‌ملاحظه‌ای را نشان داده که ریز شدن دانه‌ها مطابق با رابطه هال-پچ دلیل عمده آن است.

ناحیه روکش کاری شده پس از عملیات حرارتی باوجود رشد بی‌رویه دانه‌ها دارای مقدار میانگین سختی ۸۹ ویکرز بود که تفاوت اندکی با فلز پایه مجاور آن دارد. رسوب و توزیع یکنواخت انواع فازهای ثانویه سخت‌تر  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> در سرتاسر ماده توسط مرحله پیرسازی عملیات حرارتی T6 می‌تواند دلیل اصلی افزایش قابل‌توجه سختی در فلز پایه و ناحیه روکش کاری شده و نیز غلبه آن بر تأثیر معکوس فرایند رشد دانه‌ها بر سختی ماده در ناحیه روکش کاری شده، بوده باشد [۱۰، ۱۱]

چنانچه اشاره شد، منیزیم و آلایزهای آن دارای مقاومت به سایش پایینی است. از این‌رو ابتدا برای بررسی تأثیر فرایند جوش کاری ذوبی ترمیمی به‌صورت روکش کاری و سپس بررسی اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی بر ناحیه روکش کاری شده، نمودار نرخ سایش برحسب مسافت طی شده و نیز نمودار ستونی کاهش کلی جرم برای هر نمونه به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. چنانچه نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد نرخ سایش بیشینه و روند صعودی در نرخ سایش برای فلز پایه قابل مشاهده بوده که نشانگر تمایل کم فلز پایه به کارسختی و رسیدن به‌حالت پایدار با توجه به تردی بالای آن است. کاهش در نرخ سایش ناحیه روکش کاری شده در طول کل مسیر (شکل ۴) نشانگر بهبود



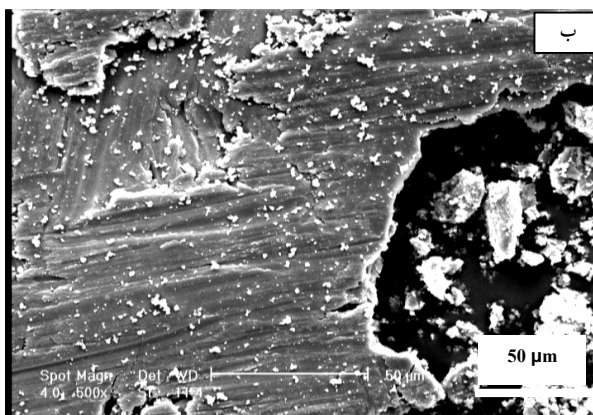
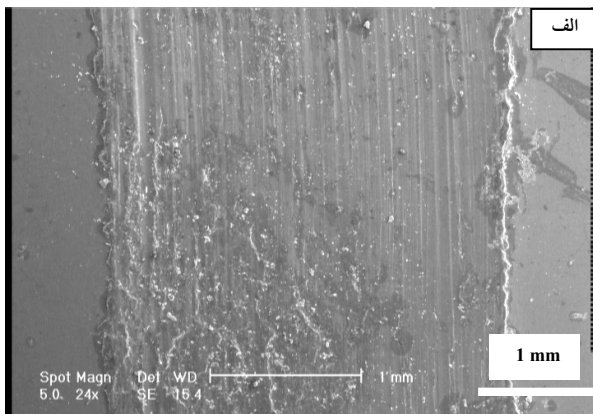
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش فلز پایه در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

خراشان از نوع ترک ریز بوده باشد. در واقع افزایش در تنش برشی بر روی سطح ماده منجر به ایجاد ترک و گسترش آن و کنده شدن ماده به صورت ترک ریز شده که با توجه به میزان انعطاف‌پذیری کم تر فلز پایه به نسبت حالات دیگر، مکانیزم سایش به طور عمده از نوع خراشان تلقی می‌شود. هم‌چنین وجود برآمدگی در انتهای شیار که در تصویر (ب) و در

این دو ناحیه، و لذا قابلیت ایجاد کارسختی و افزایش استحکام توسط تسهیل تحرک نابجایی‌ها در لایه سطحی و تجمع آن و رسیدن به حالت پایدار را می‌توان دلیل این امر دانست [۱۰-۱۳]. کاهش کلی نرخ سایش به‌ویژه در منطقه پایدار در نمودار نرخ سایش مربوط به ناحیه روکش کاری شده پیش و پس از فرایند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان به افزایش سختی حاصله با جوش کاری و در ادامه فرایند اصطکاکی اغتشاشی نسبت داد. هم‌چنین افزایش قابلیت کارسختی و میزان استحکام توسط عملیات جوش کاری و افزایش چشم‌گیر دوباره آن توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی، را می‌توان از دلایل دیگر بهبود در خواص سایشی بیان نمود [۲]. از سوی دیگر کاهش تعداد حفرات و اندازه آن پس از اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی نیز تاثیر زیادی در جلوگیری از وقوع و اشاعه ترک‌ها در زیر سطوح سایش و در پی آن افزایش مقاومت به سایش داشته است.

بیشترین تأثیر در بهبود رفتار سایشی مربوط به منطقه روکش کاری شده پس از عملیات حرارتی بود به‌گونه‌ای که از همان ابتدا دارای نرخ سایش پایین‌تری نسبت به ناحیه روکش کاری شده قبل و پس از فرایند اصطکاکی اغتشاشی بود. نوسان کم‌تر و پایداری نمودار نرخ سایش در کل مسیر طی شده با توجه به اینکه این ناحیه دارای بیشینه مقدار میانگین سختی توسط آزمون سختی سنجی است و با در نظر گرفتن این امر که معمولاً در سایش خراشان میزان سختی سطح به‌عنوان مهم‌ترین عامل در مقاومت سایشی ماده به‌شمار می‌رود [۵، ۱۴-۱۶]، از این‌رو مشاهده بهترین رفتار سایشی در این ناحیه منطقی به‌نظر می‌رسد.

برای توجیه رفتار سایشی فلز پایه، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح و براده‌های حاصله از آزمون سایش در شکل ۵ ارائه شده است. در ریخت سطح سایش فلز پایه علاوه بر چیره بودن مکانیزم سایش خراشان به صورت شیارهای هم‌راستا، کندگی‌های فراوانی نیز مشاهده می‌شود که با مشاهده تصویر (ب) مربوط به سطح سایش این آزمون، کندگی مشاهده‌شده می‌تواند نشان‌دهنده مکانیزم سایش



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از  
الف) سطح سایش منطقه روکش کاری شده و  
ب) براده‌های سایش ایجاد شده تحت بار ۱۰ نیوتن

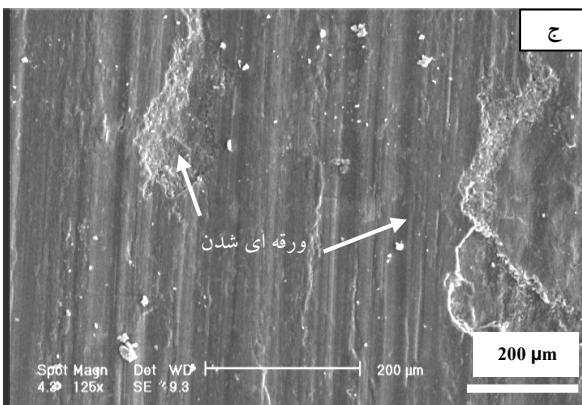
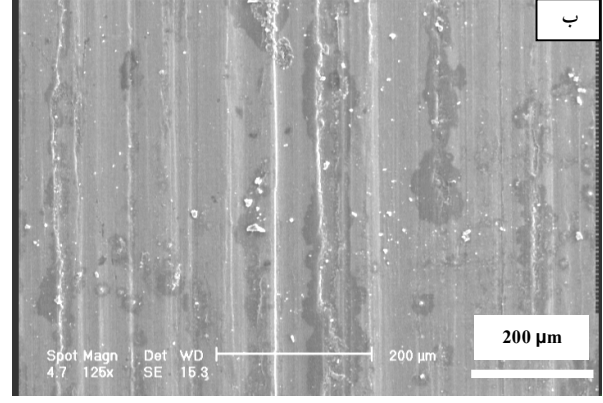
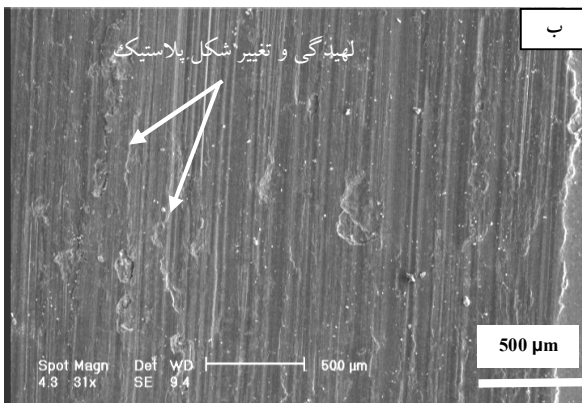
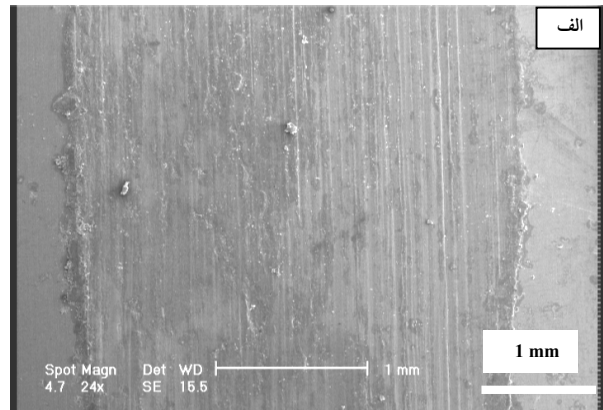
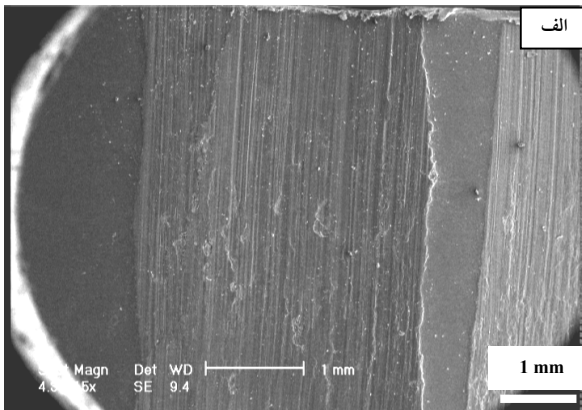
مناطق دیگر را می‌توان دلیل کاهش جرم کمینه این ناحیه در طول آزمون دانست. بیشینه بودن مقدار سختی مربوط به این منطقه نسبت به ناحیه روکش کاری شده را می‌توان دلیلی بر حضور کم‌تر کندگی و سایش ورقه‌ای در سطوح سایش این منطقه بیان نمود.

تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ناحیه روکش کاری شده را می‌توان با توجه به حضور مناطق کنده شده به صورت لایه‌ای و نیز انباشته شدن و لهیدگی ماده در راستایی متفاوت از راستای شیارهای مربوط به سایش خراشان، که در شکل ۶-ب نشان‌گذاری شده، مشاهده نمود. در واقع ناهمگونی‌های سطحی درگیر میان پین و سطح قطعه تغییر شکل داده است و به صورت لهیدگی ماده بر روی سطح ظاهر شده است که منجر

بزرگ‌نمایی بالاتر در تصویر (ج) شکل ۵ با علامت نشان داده شده، نشان‌گر تجمع ماده بوده و می‌تواند به دلیل وقوع مکانیزم سایش خراشان از نوع خیش ریز بوده باشد. کندگی‌های زیاد در سطح سایش فلز پایه در مقایسه با دیگر سطوح سایش را می‌توان به استحکام بسیار پایین‌تر و تردی بالاتر آن نسبت به بقیه سطوح، با توجه به تردی آلیاژ ریختگی دانست که باعث تسهیل در ایجاد ترک‌ها در زیر سطوح و اشاعه و به هم پیوستن آن‌ها و ایجاد مکانیزم سایش خراشان از نوع ترک ریز شده است. هم‌چنین با توجه به حرکت رفت و برگشتی پین بر روی سطح و میزان بالای کندگی سطح نمونه وقوع مکانیزم ترک ریز محتمل‌تر به نظر می‌رسد.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح سایش ناحیه روکش کاری شده در شکل ۶ نشانگر کاهش در میزان کندگی نسبت به فلز پایه بوده، چیره بودن مکانیزم سایش خراشان در این تصاویر به خوبی ملاحظه می‌شود. با توجه به افزایش میانگین سختی به دست آمده برای ناحیه روکش کاری شده، افزایش مقاومت این سطوح در برابر ایجاد و گسترش ترک‌ها در زیر سطوح سایش و کاهش سایش خراشان از نوع ترک ریز قابل توجه است. تصویر (ب) در این شکل نشانگر براده‌های سایش روکش کاری شده است که شیارهای روی آن حاکی از غالب بودن مکانیزم سایش خراشان است.

کمترین میزان کاهش جرم در آزمون سایش مربوط به نمونه‌ای است که پس از روکش کاری تحت عملیات حرارتی T6 قرار گرفته است. همان‌گونه که تصاویر شکل ۷ نشان می‌دهند مکانیزم سایش چیره در این ناحیه، از نوع خراشان بوده که با توجه به بیشینه بودن میانگین سختی این ناحیه نسبت به فلز پایه و ناحیه روکش کاری شده، حداقل کندگی و عدم حضور ترک‌های ریز محتمل است. مقاومت سایشی خراشان عموماً با سختی سطح بیان می‌شود در صورتی که می‌بایست تأثیر پدیده کارسختی یا سختی سطوح ساییده شده نیز در نظر گرفته شود [۱۴]. بیشینه بودن میانگین سختی این منطقه قبل از اعمال آزمون سایش نسبت به



شکل ۷- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سایش منطقه روکش کاری شده پس از عملیات حرارتی تحت بار ۱۰ نیوتن در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

به کاهش درگیری مکانیکی و بهبود مقاومت سایشی به‌ویژه در مرحله سایش پایدار (مسافت‌های بالاتر از ۱۲۰۰ متر) شده است. افزایش انعطاف‌پذیری ماده و نیز قابلیت کارسختی کسب شده پس از اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان دلیل این امر دانست. حضور ملموس کندگی‌های ناشی از سایش ورقه‌ای (شکل ۸-ج) نیز گویای افزایش قابلیت ماده برای ایجاد کار سختی و تسهیل در تحرک و انباشتگی نابجایی‌ها در ریز سطوح سایش، بوده است [۱۶].

شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش منطقه روکش کاری شده پس از فرایند اصطکاکی اغتشاشی تحت بار ۱۰ نیوتن در بزرگ‌نمایی‌های مختلف

در ناحیه روکش کاری شده نسبت به فلز پایه و سپس بهبود آن توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی T6 را نشان داده به‌گونه‌ای که ناحیه عملیات حرارتی شده با بالاترین سختی دارای بهترین خواص سایشی بود. افزایش سختی با اعمال فرایندهای مختلف و ایجاد کارسختی بر روی سطح در

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج سختی‌سنجی افزایش میانگین سختی پس از روکش کاری و سپس اعمال فرایند اصطکاکی اغتشاشی و عملیات حرارتی را نشان داد. بررسی نمودارهای نرخ سایش بهبود خواص سایش



