



## اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی با تعداد پاس مختلف بر خواص مکانیکی، سایشی و خوردگی آلیاژ آلومینیوم 6061

حامد آقامحمدی<sup>1</sup>، رسول جمشیدی<sup>2</sup>، اکبر حیدرپور<sup>3</sup>، یوسف مظاهری<sup>4</sup>، مهرداد نعمتی<sup>5</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

4- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

5- دانش‌آموخته کارشناسی، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\* همدان، صندوق پستی ۶۵۱۷۸۳۸۶۹۵، y.mazaheri@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل	در این مطالعه خواص مکانیکی، سایشی و خوردگی آلیاژ آلومینیوم 6061 بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی با تعداد پاس‌های مختلف بررسی شد. به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داد که اندازه متوسط دانه‌ها بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به شدت کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به طور کلی منجر به کاهش مقادیر سختی آلومینیوم در مقایسه با نمونه پایه می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم‌های تقویت‌کننده و تضعیف‌کننده مختلفی بر روی خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی وجود دارد. نتایج آزمون خوردگی به خوبی تأییدکننده نتایج مکانیکی می‌باشد، به طوری که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها می‌شود. به عبارت دیگر، در مقایسه با نمونه پایه، منحنی‌های پلاریزاسیون در اثر استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به سمت پتانسیل‌های منفی‌تر و چگالی جریان‌های بیشتر انتقال پیدا کرد. نتایج آزمون سایش نیز مطابق با نتایج سختی و خوردگی می‌باشد. در این راستا، مقدار کاهش وزن آلومینیوم نمونه دوپاسه، تقریباً 3/5 برابر بیشتر از مقدار مشابه در نمونه پایه بود.
دریافت: 19 اسفند 1396 پذیرش: 25 تیر 1397 ارائه در سایت: آذر 1397	
کلیدواژگان: فرایند اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 6061 تعداد پاس خوردگی خواص سایشی	

## Effect of friction stir processing with different pass numbers on the mechanical, tribological and corrosion properties of Al6061

Hamed Aghamohammadi<sup>1</sup>, Rasoul Jamshidi<sup>2</sup>, Akbar Heidarpour<sup>2</sup>, Yousef Mazaheri<sup>3\*</sup>, Mehrdad Nemati<sup>3</sup>

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Materials Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

3- Department of Material Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

\* P.O.B. 6517838695, Hamedan, Iran, y.mazaheri@basu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 10 March 2018  
Accepted 16 July 2018  
Available Online December 2018

### Keywords:

Friction stir processing  
Al6061  
pass number  
Corrosion  
Wear properties

### Abstract

In this study, the mechanical, tribological and corrosion properties of Al6061 after different pass number of FSP were investigated. To study the microstructure of samples, optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) were used. Optical microscopy images showed that the average grain size of samples significantly decreased after FSP. Furthermore, results showed that using of FSP generally leads to the reduction of microhardness values, compared to the base metal. It can be deduced that there are various strengthening and weakening mechanisms governing on the mechanical properties of FSPed aluminum. In consistent with microhardness findings, corrosion results showed that FSP has negative effects on the corrosion resistance of Al6061. In other words, the polarization plots of FSPed samples shifted to the more negative potentials and higher current densities. Wear results are in good agreement with what was mentioned. In this regard, wear weight loss of two pass FSPed aluminum was about 3.5 times higher than that for base metal.

خوردگی خوب توجه خاصی را در مجامع علمی و صنعتی به خود جلب کرده‌اند. با این وجود خواص سایشی ضعیف آلیاژهای آلومینیوم محدودیت‌های کاربردی زیادی را ایجاد کرده است.

### 1- مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل خواص منحصر بفرد خود مانند چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، هدایت حرارتی بالا و مقاومت

Please cite this article using:

H. Aghamohammadi, R. Jamshidi, A. Heidarpour, Y. Mazaheri, M. Nemati, Effect of friction stir processing with different pass numbers on the mechanical, tribological and corrosion properties of Al6061, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 12-21, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

افزایش سرعت چرخشی ابزار، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 1050 به طور پیوسته کاهش می‌یابد. در یک مطالعه دیگر، کارته‌کنان و همکاران [8] بیان کردند که افزایش سرعت چرخشی یک ابزار به دلیل تأثیر بیشتر در کاهش اندازه آلومینیوم منجر به بهبود خواص مکانیکی آلیاژ ریختگی 2285 می‌شود.

با این وجود، الانگوان و همکاران [9] به بررسی تأثیر سرعت‌های چرخشی متفاوت ابزار بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061 پرداختند. آن‌ها بیان کردند که یک مقدار سرعت چرخشی بهینه برای دستیابی به بهترین خواص مکانیکی وجود دارد. همچنین آن‌ها بیان کردند که استفاده از سرعت‌های بالاتر و کمتر از سرعت بهینه منجر به کاهش خواص مکانیکی می‌شود. در این راستا، موریشیگ و همکاران [10] گزارش دادند که افزایش سرعت چرخشی ابزار از 500 به 1500 دور بر دقیقه منجر به افزایش اندازه دانه آلیاژ آلومینیوم 1100 می‌شود.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، تعداد پاس است. دولتخواه و همکاران [11] بیان کردند که افزایش تعداد پاس نقش مثبتی در بهبود خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت آلومینیوم تقویت‌شده با ذرات کاربید سیلیسیم تولید شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی دارد.

در یک مطالعه دیگر، سینگ و همکاران [12] به بررسی تأثیر تعداد پاس بر خواص مکانیکی و سایشی آلیاژ Al-Si پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که با افزایش تعداد پاس تا عدد 2 یک روند افزایشی در خواص سایشی و مکانیکی حاصل می‌شود، اما با افزایش بیشتر تعداد پاس خواص به شدت کاهش می‌یابند. اما همان‌طور که گفته شد آلیاژهای سری 6xxx در

کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین بررسی رفتار خوردگی آن‌ها بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی از اهمیت بالایی برخوردار است. با این وجود، تاکنون مطالعات بسیار محدودی مبنی بر تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلومینیوم گزارش شده است [13-15]. هدف از این مطالعه بررسی خواص مکانیکی، سایشی و خوردگی آلیاژ آلومینیوم 6061 بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی با تعداد پاس مختلف با استفاده از تصاویر میکروسکوپی و ارائه تحلیل‌های متالورژیکی می‌باشد. مطالعات صورت‌گرفته اغلب مبنی بر تولید کامپوزیت‌های سطحی با استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌باشند، بنابراین به منظور درک تأثیر مستقیم این فرایند بر خواص مختلف آلومینیوم، انجام این مطالعه ضروری به نظر می‌رسد.

آلیاژهای سری 6xxx آلومینیوم که دارای عناصر آلیاژی منیزیم و سیلیسیم می‌باشند، دارای استحکام بالا و خواص فوق‌العاده‌ای در جوشکاری می‌باشند. بنابراین، از این آلیاژها به طور گسترده‌ای در کاربردهایی چون صنایع دریایی، خط لوله‌ها، مخزن‌ها و کاربردهای هوافضا استفاده می‌شود. علی‌رغم سهولت جوشکاری این آلیاژها، این مواد معمولاً در ناحیه تحت تأثیر حرارت جوشکاری دچار پدیده نرم‌شدگی می‌شوند. این موضوع یکی از مهم‌ترین مشکلات در بحث طراحی می‌باشد [1، 2].

با توجه به این که خواص سایشی و خوردگی فلزات وابسته به سطح آن‌ها می‌باشد، می‌توان گفت که می‌توان از طریق اصلاح ریزساختار سطح آلومینیوم این خواص را بهبود بخشید. تغییرشکل پلاستیک شدید یکی از روش‌های موثر در اصلاح ریزساختار با استفاده از اعمال کرنش‌های پلاستیکی بالا می‌باشد. معمولاً موادی که در معرض فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرند، دارای خواص مکانیکی فوق‌العاده‌ای هستند. با این وجود، استفاده از این روش همیشه تأثیر مثبتی بر روی خواص ماده ندارد [2-4].

یکی از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید که به منظور اصلاح سطح فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرایند اصطکاکی اغتشاشی<sup>1</sup> می‌باشد. این فرایند برگرفته از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد و در واقع یک فرایند حالت جامد برای اصلاح ریزساختار سطح و همچنین تولید کامپوزیت‌های سطحی است. در این فرایند، چرخش ابزار و اصطکاک بین ابزار و قطعه، منجر به ایجاد تغییرشکل پلاستیک شدید و حرارت زیادی می‌شود که در نهایت منجر به ریزدانه شدن ریزساختار می‌گردد [2-4].

تاکنون مطالعات متعددی مبنی بر تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص فلزات مختلفی مانند آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و غیره انجام شده است. برای مثال ناکاتا و همکاران [5] گزارش دادند که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به افزایش 1/7 برابری استحکام کششی آلومینیوم می‌شود.

در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار تأثیر مهمی بر ریزساختار و در نتیجه بر خواص فلز دارند. برای مثال، الانگوان و بالاسابرامانیا [6] گزارش دادند که افزایش سرعت چرخشی ابزار از مقدار 1500 به 1600 دور بر دقیقه، منجر به افزایش استحکام آلیاژ آلومینیوم 2219 می‌شود. با این وجود، ون و همکاران [7] گزارش دادند که متناسب با

<sup>1</sup> Friction stir processing (FSP)

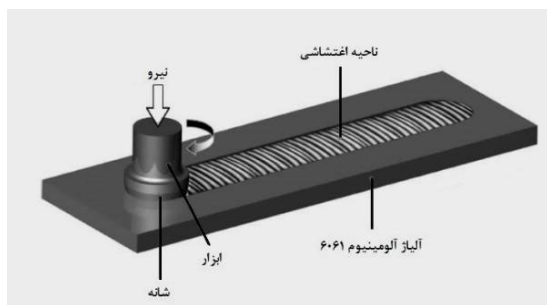


Fig. 1 Schematic image of friction stir processing

شکل 1 تصویر شماتیکی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی

برای انجام آزمون‌ها، نمونه از سالم‌ترین قسمت فراوری شده انتخاب گردید. همچنین با توجه تأثیرگذاری سطح ماده بر رفتار ماده، نمونه‌های آماده‌شده برای آزمون‌های سختی، سایش و خوردگی، به منظور حذف تأثیر ناهمواری‌های سطحی تا سنباده شماره 1500 مورد عملیات سنباده‌زنی قرار گرفتند.

همچنین در شکل 2 تصاویری از ابزار و نمونه فراوری شده آورده شده است. در این تحقیق، آزمون سختی طبق استاندارد ASTM E384 از سطح مقطع نمونه‌های فراوری‌شده به روش میکروویکرز انجام شد. نیروی اعمالی در این آزمون 100 گرم و به مدت 15 ثانیه بود. همچنین، خواص سایشی نمونه‌ها با استفاده از آزمون پین روی دیسک مطابق با استاندارد ASTM G99 در دمای اتاق انجام شد. به منظور انجام آزمون سایش، پین مورد استفاده از قسمت مرکزی آلیاژ آلومینیوم 6061 فراوری‌شده (ناحیه اغتشاشی) به قطر 2 میلی‌متر انتخاب گردید و از فولاد AISI D3 با سختی 59 HRC به عنوان دیسک استفاده شد. آزمون سایش با سرعت 0/1 میلی‌متر بر ثانیه و بار اعمالی 20 نیوتن انجام شد.

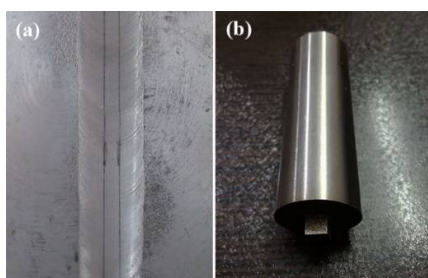


Fig. 2 Images of (a) FSPed sample and (b) used pin in this research

شکل 2 تصاویری از (الف) نمونه فراوری‌شده و (ب) ابزار مورد استفاده در این تحقیق

آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول 3/5 درصد کلرید سدیم با استفاده از یک دستگاه پتانسیوستات

## 2- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، از صفحات آلیاژ آلومینیوم 6061 با ابعاد  $150 \times 50 \times 6$  میلی‌متر مکعب به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ 6061 در جدول 1 ارائه شده است. قبل از انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی، یک شیار با عمق و قطر 2 میلی‌متر در مرکز فلز پایه ایجاد شد. ابزار مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد گرم‌کار H13 با سختی 56HRC ساخته شد. یکی از پارامترهای مهم در فرایند اصطکاکی اغتشاشی هندسه ابزار می‌باشد، به طوری که این عامل بر روی گرمای تولیدی، جریان مواد و در نتیجه ریزساختار تأثیر مستقیم دارد. در واقع در حین فرایند، در اثر حرارت ناشی از چرخش و اصطکاک بین پین و قطعه کار، مواد اطراف پین نرم شده و این مواد در اثر حرکت پین از قسمت جلویی به قسمت عقبی انتقال پیدا می‌کنند. از طرف دیگر، ابزارهای سر تخت مانند مربعی و مثلثی دارای عملکرد اختلاط پالسی هستند، به طوری که هرچه تولید پالس بیشتر، اندازه دانه‌ها کوچک‌تر، توزیع ذرات یکنواخت‌تر و در نتیجه استحکام و سختی بیشتر می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام‌شده، مشخص شده است که ابزار مربعی تعداد پالس بیشتری را ایجاد کرده و در نتیجه منجر به دستیابی به بهترین خواص مکانیکی در مورد آلیاژهای آلومینیوم می‌شود. بنابراین در این تحقیق، قسمت پین در ابزار به صورت مربعی (ضلع 6 میلی‌متر و ارتفاع 3 میلی‌متر) و قطر شانه در ابزار برابر با 20 میلی‌متر بود. لازم به ذکر است که ابتدا به منظور به دست آوردن سرعت بهینه از لحاظ ایجاد نمونه بدون عیب ظاهری از سرعت‌های چرخشی 900 و 1200 و 1500 دور بر دقیقه استفاده شد. اما نمونه‌های فراوری‌شده با سرعت‌های 900 و 1200 دور بر دقیقه دارای عیوب سطحی زیادی بودند. بنابراین در این تحقیق، از سرعت چرخشی 1500 دور بر دقیقه و سرعت پیشروی 15 میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد. در این مطالعه، نمونه‌ها با تعداد پاس‌های 2، 3 و 5 آماده شدند. لازم به ذکر است که جهت بررسی اثر افزایش تعداد پاس، پین همواره از یک جهت وارد قطعه شد. شکل 1 شماتیکی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 6061

Table 1 Chemical composition of Al6061 alloy

Al	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	ماده
	0/20	0/54	0/40	0/07	0/80	درصد وزنی
باقی‌مانده						

دست آوردن اندازه دانه‌ها امکان پذیر نمی‌باشد.

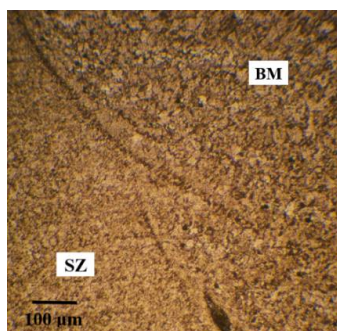


Fig. 3 Optical micrograph of 2 pass FSPed Al 6061 with different microstructural regions

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ آلومینیوم 6061 بعد از 2 پاس فرایند اصطکاکی اغتشاشی با نواحی ریزساختاری مختلف

در فرایند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل بالا بودن انرژی نقص چیده شدن<sup>4</sup> اعتقاد بر این است که تبلور مجدد دینامیکی دلیل اصلی در کاهش اندازه دانه‌ها می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده مشخص شده است که در ناحیه اغتشاشی معمولاً چگالی نابجایی‌ها پایین می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، در اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی، اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاشی به قدری کاهش یافته است که اندازه‌گیری آن‌ها با استفاده از تصاویر متالوگرافی میسر نیست. در واقع، بالا بودن تعداد پاس منجر به افزایش کرنش و در نتیجه تبلور مجدد شدید در ناحیه اغتشاشی نمونه‌ها شده است. با توجه به مطالب بیان شده، می‌توان نتیجه گرفت که به منظور اندازه‌گیری دقیق اندازه دانه‌ها باید از تجهیزات مناسب‌تری مانند تصاویر میکروسکوپ الکترونی (رویشی/ عبوری) استفاده کرد.

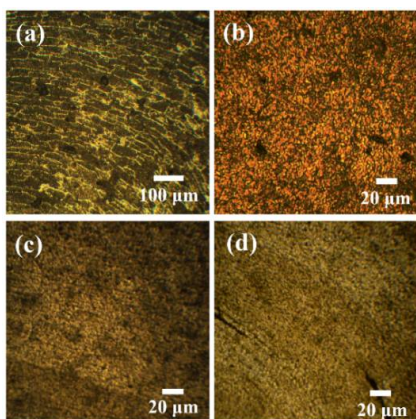


Fig. 4 Optical micrograph of (a) base metal, (b) 2 pass FSPed, (c) 3 pass FSPed and (d) 5 pass FSPed Al6061

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ نوری از (الف) فلز پایه، (ب) نمونه دو پاسه، (ج) نمونه سه پاسه و (د) نمونه پنج پاسه

سه‌الکترودی انجام شد. این دستگاه شامل یک الکتروود شماری پلاتینی، الکتروود مرجع Ag/AgCl و نمونه به عنوان الکتروود کار بود. قبل از انجام آزمون‌های خوردگی، نمونه‌ها به منظور دستیابی به شرایط پایدار به مدت 1 ساعت در محلول قرار گرفتند. همچنین به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها و همچنین سطح سایش نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری (مدل Union) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل JEOL JSM8A) استفاده گردید. به منظور انجام متالوگرافی، بعد از سنباده‌کاری (تا شماره 3000)، نمونه‌ها با استفاده از محلول 2 مولار اسیدفلوئوریک تحت عملیات حکاکی قرار گرفتند.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- ریزساختار

شکل 3 تصویر حاصل از میکروسکوپ نوری از مقطع عرضی نمونه دو پاسه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، این فرایند منجر به ایجاد ریزساختارهای متفاوتی می‌شود. ناحیه‌ای که ابزار در داخل قطعه حرکت می‌کند، ناحیه اغتشاشی<sup>1</sup> نام دارد. در مجاورت ناحیه اغتشاشی، به ناحیه‌ای که در معرض حرارت و تغییر شکل پلاستیک قرار دارد، ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی<sup>2</sup> گفته می‌شود. ناحیه بعدی که فقط در معرض حرارت می‌باشد، ناحیه تحت تأثیر حرارت<sup>3</sup> نامیده می‌شود. در شکل 3 نواحی مربوط به ناحیه اغتشاشی، ناحیه تحت تأثیر حرارت و ناحیه فلز پایه نشان داده شده است. با این وجود، می‌توان گفت که به دلیل هدایت حرارتی بالای آلومینیوم، تشخیص ناحیه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی و تحت تأثیر حرارت بسیار دشوار می‌باشد و می‌توان گفت که این نواحی در شکل 3 به وضوح دیده نمی‌شوند. اندازه دانه در منطقه فلز به طور میانگین برابر با 72 میکرومتر می‌باشد. اما همان‌طور که مشخص است فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به ریزدانه‌گی شدید ناحیه اغتشاشی شده است، بنابراین به دست آوردن اندازه دانه‌ها در این ناحیه میسر نمی‌باشد.

همچنین شکل 4 نشان‌دهنده تصاویر مقطع عرضی آلیاژ آلومینیوم 6061 در شرایط قبل و بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی با تعداد پاس مختلف می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، اندازه دانه‌های آلومینیوم بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به شدت کاهش یافته است. در مورد تمامی نمونه‌ها، فرایند ریزدانه‌گی به خوبی انجام شده است، به طوری که به

<sup>1</sup> Stir Zone (SZ)

<sup>2</sup> Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)

<sup>3</sup> Heat-Affected Zone (HAZ)

<sup>4</sup> Stacking Fault Energy (SFE)

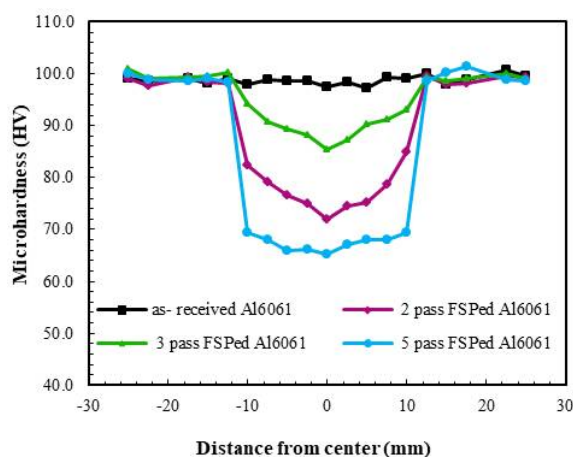


Fig. 5 Variation of the microhardness of FSPed samples

شکل 5 تغییرات مقادیر ریزسختی نمونه‌های فراوری شده توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی

به عبارت دیگر، اگر چه فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش کلی مقادیر سختی نمونه‌ها شد، اما در بین تمامی نمونه‌های فراوری شده، در نمونه سه‌پاسه مکانیزم‌های تقویت کنندگی تأثیر بیشتری نسبت به مکانیزم‌های تضعیف‌کننده دارند، به طوری که بیشترین مقدار سختی بعد از فلز پایه مربوط به نمونه سه‌پاسه است.

با وجود این که مطالعات بسیاری مبنی بر تأثیر مثبت فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم وجود دارد، اما برخی از مطالعات تأثیر منفی آن را نیز گزارش داده‌اند. برای مثال، الرایز<sup>3</sup> و الدناف<sup>4</sup> [16] به بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی و ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم 6082 پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که افزایش تعداد پاس در این فرایند منجر به افزایش حرارت بیشتر و در نتیجه درشت‌تر شدن ذرات فاز ثانویه می‌شود. نتایج آن‌ها نشان داد که متناسب با افزایش تعداد پاس، خواص مکانیکی نمونه کاهش می‌یابد. در یک مطالعه دیگر، دواراجو<sup>5</sup> و همکاران [17] تأثیر سرعت چرخشی ابزار بر خواص مکانیکی و سایشی کامپوزیت آلیاژ آلومینیوم 6061 به همراه ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلیسیم و گرافیت را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که متناسب با افزایش سرعت چرخشی ابزار، مقادیر ریزسختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابند. با این وجود، نتایج آن‌ها حاکی از افزایش مقدار درصد ازدیاد طول بود. آن‌ها بیان کردند که درشت شدن/حل شدن ذرات فاز

### 3-2- آزمون ریزسختی

شکل 5 نشان‌دهنده تغییرات مقادیر ریزسختی نمونه‌های مختلف بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر سختی نمونه‌های فراوری شده کمتر از نمونه پایه می‌باشد. به عبارت دیگر؛ مقادیر سختی میانگین نمونه‌های فراوری شده دو پاسه، سه پاسه و پنج پاسه به ترتیب برابر با  $73/11$  و  $91/۸۱,۷۷/48$  و  $۹۸/60$  ویکرز می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به پدیده نرم‌شدگی<sup>1</sup> در آلیاژ آلومینیوم 6061 شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عوامل مختلفی بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 6061 حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی موثر هستند.

در واقع، در حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی تغییر شکل پلاستیک شدیدی بر روی سطح فلزات رخ می‌دهد. علاوه بر آن، چرخش ابزار و همچنین اصطکاک بین ابزار و قطعه کار منجر به افزایش دمای قطعه کار می‌شود. با این وجود، اگر چه چگالی نابجایی‌ها در حین تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابند، اما می‌توان گفت که بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد منجر به کاهش آن شده است. همچنین همان‌طور که به خوبی مشخص است، آلیاژهای آلومینیوم شامل فازهای ثانویه می‌باشند. ترکیب مهم‌ترین فاز ثانویه در آلیاژ 6061 می‌باشد. همان‌طور که گفته شد فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به افزایش دما می‌شود. بنابراین می‌توان بیان کرد که افزایش دما منجر به درشت شدن این ترکیبات و در نتیجه کاهش سختی در ناحیه اغتشاشی شده است. به عبارت دیگر، با درشت شدن فاز  $Mg_2Si$ ، نابجایی‌ها قادر به دور زدن این ذرات بوده و از این طریق خواص مکانیکی افت می‌کند. با وجود دلایل ذکر شده می‌توان بیان کرد که مطابق با رابطه هال-پچ<sup>2</sup>، ریزدانه‌سازی در اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به افزایش خواص مکانیکی در ماده می‌شود.

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت که در فرایند اصطکاکی اغتشاشی همیشه یک رقابت بین مکانیزم‌های تقویت کننده و تضعیف‌کننده وجود دارد. با توجه به شکل 5 می‌توان مشاهده کرد که کاهش در مقادیر ریزسختی نمونه سه‌پاسه کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این نمونه مکانیزم‌های تقویت‌کننده نقش موثرتری داشته‌اند.

<sup>3</sup> El-Rayes

<sup>4</sup> El-Danaf

<sup>5</sup> Devaraju

<sup>1</sup> Softening

<sup>2</sup> Hall-Petch

ذکر است که مقدار میانگین ضریب اصطکاک در نمونه دو پاسه برابر با 0/432 می‌باشد که تقریباً حدود 6/14 درصد بیشتر از فلز پایه (0/407) می‌باشد.

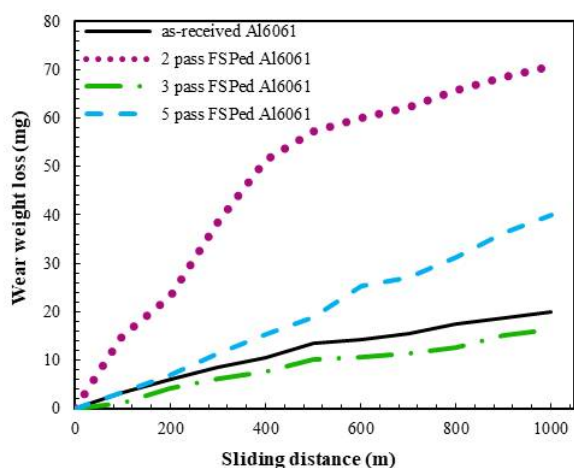


Fig. 6 The variation of the wear weight loss of samples

شکل 6 تغییرات کاهش وزن نمونه‌ها بعد از فرایند سایش

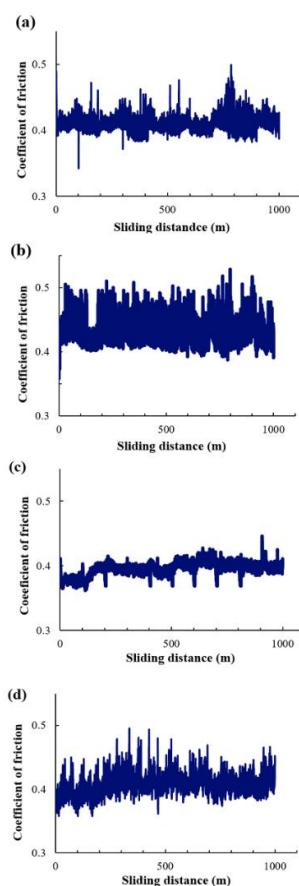


Fig. 7 The variation of friction coefficient of the (a) base metal, (b) 2 pass FSPed, (c) 3 pass FSPed and (d) 5 pass FSPed Al6061

شکل 7 تغییرات ضریب اصطکاک در (الف) فلز پایه، (ب) نمونه دو پاسه، (ج) نمونه سه پاسه و (د) نمونه پنج پاسه

ثانویه در اثر افزایش حرارت ناشی از سرعت بالای چرخشی ابزار، مهم‌ترین دلیل برای وقوع این پدیده می‌باشد.

با توجه مطالب بیان شده می‌توان گفت که عواملی چون افزایش سرعت دورانی ابزار و کاهش سرعت پیشروی ابزار منجر به افزایش بیش از حد دما در منطقه اغتشاشی می‌شوند. بنابراین انتظار می‌رود که در اثر کاهش سرعت دورانی و افزایش سرعت پیشروی، درشت شدن فاز ثانویه  $Mg_2Si$  کمتر شده و در نتیجه ریزدانه‌سازی در اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به افزایش مقادیر سختی آلیاژ آلومینیوم 6061 شود.

### 3-3- آزمون سایش

شکل 6 نشان‌دهنده روند تغییرات کاهش وزن نمونه به عنوان تابعی از مسافت سایش می‌باشد. همان‌طور که مشخص است در تمامی نمونه‌ها با افزایش مسافت سایشی، وزن نمونه‌ها به طور پیوسته کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، بیشترین مقدار کاهش وزن مربوط به نمونه دو پاسه می‌باشد. به عبارت دیگر، مقدار کاهش وزن نمونه دو پاسه تقریباً 3.5 برابر بیشتر از نمونه فلز پایه می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش مقاومت سایشی آلیاژ آلومینیوم 6061 شده است. به نظر می‌رسد که کاهش سختی نمونه‌ها مهم‌ترین دلیل برای کاهش مقاومت سایشی آن‌ها باشد. به عبارت دیگر، انتظار می‌رود که ماده‌ای با سختی بالاتر مقاومت بیشتری در مقابل یک ماده ساینده از خود نشان دهد. همچنین مشخص است که نمونه سه پاسه دارای کمترین نرخ سایش در بین تمامی نمونه‌ها می‌باشد. بالاتر بودن سختی این نمونه می‌تواند به عنوان مهم‌ترین دلیل برای پایین بودن نرخ سایش این نمونه معرفی شود.

همچنین در شکل 7 منحنی تغییرات ضریب اصطکاک به عنوان تابعی از مسافت لغزش رسم شده است. با مقایسه بین این منحنی‌ها کاملاً مشخص است که منحنی ضریب اصطکاک مربوط به نمونه دو پاسه دارای پهنای و نوسانات بسیار بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها است. افزایش نوسانات می‌تواند در اثر افزایش تماس موضعی بین دیسک و نمونه باشد و دلیل آن را می‌توان در دلایلی چون وجود اکسیدهای سطحی و افزایش کنده شدن سطح جستجو کرد. در نمونه دو پاسه، کاهش سختی نمونه منجر به افزایش تغییر شکل پلاستیک در ماده در حین فرایند سایش شده است. به عبارت دیگر در فلز پایه، فرایند سایش منجر به پدیده کارسختی نمونه شده و بنابراین نوسانات ضریب اصطکاک در آن کم شده است. همچنین لازم به

بودن مقاومت به خوردگی نمونه می‌باشد.

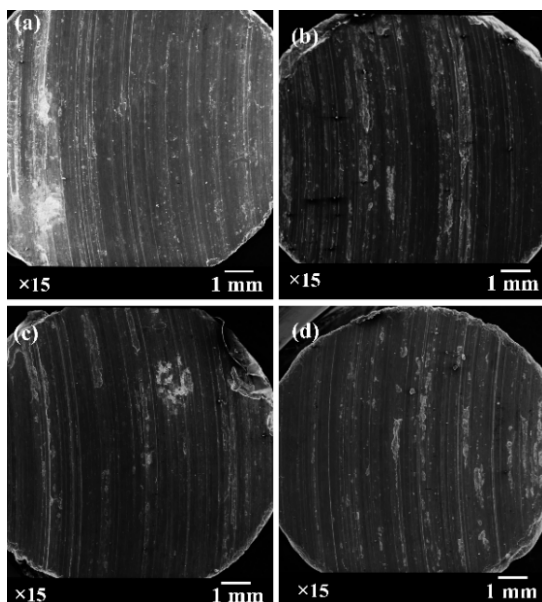


Fig. 8 SEM micrograph of worn surface of (a) as-received, (b) 2 pass FSPed, (c) 3 pass FSPed and (d) 5 pass FSPed Al 6061

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش (الف) فلز پایه، (ب) نمونه دو پاسه (ج) نمونه سه پاسه و (د) نمونه پنج پاسه

با توجه به شکل 10 مشخص است که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به انتقال منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک به سمت چگالی جریان‌های بیشتر و پتانسیل‌های خوردگی منفی‌تر شده است. به عبارت دیگر، نمونه‌های فراوری‌شده دارای مقاومت به خوردگی پایین‌تری نسبت به فلز پایه می‌باشند. همچنین، مقادیر پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی به دست‌آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در جدول 2 گزارش شده است. با توجه به جدول 2 مشخص است که پتانسیل خوردگی نمونه‌های دو پاسه، سه پاسه و پنج پاسه به ترتیب حدود 20/16، 15/90 و 23/28 درصد کمتر از مقدار مشابه در فلز پایه می‌باشند.

همچنین مقدار چگالی خوردگی نمونه‌های دو پاسه، سه پاسه و پنج پاسه به ترتیب حدود 3/13، 4/08 و 4/73 برابر فلز پایه می‌باشد. تمامی این نتایج به وضوح بیان‌گر تأثیر منفی فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر مقاومت به خوردگی آلیاژ آلومینیوم 6061 می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که اگرچه فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها شده است، اما در بین نمونه‌های فراوری‌شده، نمونه سه‌پاسه دارای بالاترین مقاومت به خوردگی می‌باشد.

شکل 8 نشان‌دهنده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌های مختلف می‌باشد. در مورد آلیاژ آلومینیوم 6061 یک سطح صاف با کندگی‌های بسیار کم مشاهده می‌شود. با این وجود مشخص است که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به افزایش کندگی‌های سطحی شده است، به طوری که سطح سایش نمونه دو پاسه دارای کندگی‌های بسیار بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار سایشی نمونه‌ها، تصاویر سطح سایش در بزرگنمایی بالاتر در شکل 9 ارائه شده است. همان‌طور مشخص است، سطح سایش فلز پایه حتی در بزرگنمایی بالا به صورت تقریباً صاف می‌باشد. بنابراین، با توجه به وجود خیش‌های کم-عمق منظم در سطح سایش آن می‌توان گفت که مکانیزم غالب در فرایند سایش این نمونه مکانیزم سایش خراشان می‌باشد.

با این وجود سطح سایش نمونه دو پاسه شامل کندگی‌های عمیق و ترک‌های بسیاری می‌باشد. این ترک‌ها به عنوان مسیرهای مناسبی برای فرایند سایش می‌باشند و از این طریق ذرات بزرگی از سطح جدا می‌شوند. با مقایسه سطوح سایش می‌توان فهمید که نمونه سه پاسه و فلز پایه دارای صاف‌ترین سطوح در بین تمامی نمونه‌ها می‌باشند، که این می‌تواند ناشی از بالاتر بودن سختی این نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها باشد.

با توجه به این که وجود ترک و کندگی‌های عمیق از مشخصه‌های اصلی سایش ورقه‌ای می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت فرایند اصطکاکی اغتشاشی (غیر از نمونه سه‌پاسه) منجر به تغییر مکانیزم سایش از خراشان به ورقه‌ای شده است [18-20]. همان‌طور که مشخص شد، کاهش سختی آلیاژ آلومینیوم 6061 بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی مهم‌ترین دلیل برای افت خواص سایشی آن می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت تغییر در پارامترهایی که منجر به افزایش سختی ماده شوند، می‌توانند به بهبود خواص سایشی بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی کمک کنند.

#### 3-4- آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک

شکل 10 منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که پتانسیل خوردگی را می‌توان به صورت نیروی لازم برای به وقوع پیوستن واکنش خوردگی در نظر گرفت. بنابراین هر چه پتانسیل خوردگی مثبت‌تر باشد به معنای این است که نیروی بیشتری برای انجام خوردگی نیاز است. از طرف دیگر، چگالی جریان خوردگی به معنای مقدار بار تبادل شده در واکنش خوردگی می‌باشد و از این رو هر چه این کمیت مقدار کمتری داشته باشد، به معنای بالاتر

جدول 2 پارامترهای خوردگی نمونه‌ها

نمونه	چگالی جریان خوردگی ( $\mu\text{Acm}^{-2}$ )	پتانسیل خوردگی (V)
فلز پایه	63/65	-0/6274
دو پاسه	199/50	-0/7539
سه پاسه	260/23	-0/7272
پنج پاسه	301/31	-0/7735

در واقع تاکنون مطالعات بسیار محدودی مبنی بر تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژهای آلومینیوم انجام شده است. در برخی از این مطالعات بیان شده است که فرایند اصطکاکی منجر به افزایش مقاومت به خوردگی آلومینیوم می‌شود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ریزدانه‌سازی در اثر این فرایند به معنای افزایش چگالی مرزدانه در فلز می‌باشد. بنابراین، با توجه به این که مرزدانه‌ها تمایل به واکنش شیمیایی بالاتری نسبت به سایر نواحی دارند، انتظار می‌رود که فرایند تشکیل لایه رویین تسهیل شده باشد. با این وجود مطالعاتی مبنی بر تأثیر منفی فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر مقاومت به خوردگی آلومینیوم نیز گزارش شده است. برای مثال، محمود [21] به بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر مقاومت به خوردگی آلیاژ آلومینیوم 6063 پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش سرعت چرخشی ابزار منجر به کاهش مضاعف مقاومت به خوردگی آلومینیوم می‌شود. در این مطالعه گزارش شد که در ناحیه اغتشاشی، فاز  $\text{Mg}_2\text{Si}$  در مرزدانه‌های آلومینیوم رسوب می‌کند. با توجه به این تمایل شیمیایی این فاز نسبت به آلومینیوم بیشتر است، بنابراین در مرزدانه‌ها خوردگی گالوانیکی رخ داده و در نتیجه مقاومت به خوردگی آلومینیوم کاهش می‌یابد.

با این وجود، در یک مطالعه دیگر، رائو و همکاران [13] به بررسی تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار خوردگی آلیاژ Al-30Si پرداختند. آن‌ها بیان کردند که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به تشکیل لایه رویین ضخیم‌تر و متراکم‌تری در مقایسه با فلز پایه می‌شود و در نهایت منجر به بهبود مقاومت به خوردگی آن می‌شود. بنابراین کاهش مقاومت به خوردگی آلیاژ آلومینیوم 6061 بعد از فرایند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان مرتبط با درشت شدن فاز  $\text{Mg}_2\text{Si}$  بیان کرد. در شکل 11 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خوردگی نمونه دو پاسه نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، حفره‌های میکرومتری زیادی بر روی سطح وجود دارد. همان‌طور که گفته شد، در ریزساختار آلیاژ آلومینیوم 6061، ذرات فاز  $\text{Mg}_2\text{Si}$  وجود دارد. همان‌طور که در شکل 11 مشخص است، اندازه این حفرات بین 20 تا 25 میکرومتر

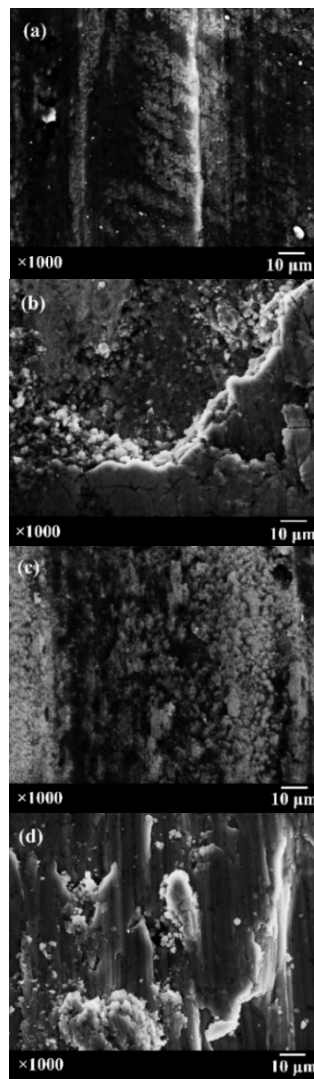


Fig. 9 SEM micrograph of worn surface of (a) as-received, (b) 2 pass FSPed, (c) 3 pass FSPed and (d) 5 pass FSPed Al 6061 at higher magnification

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش (الف) فلز پایه، (ب) نمونه دو پاسه (ج) نمونه سه پاسه و (د) نمونه پنج پاسه فرایند اصطکاکی در بزرگنمایی بالاتر

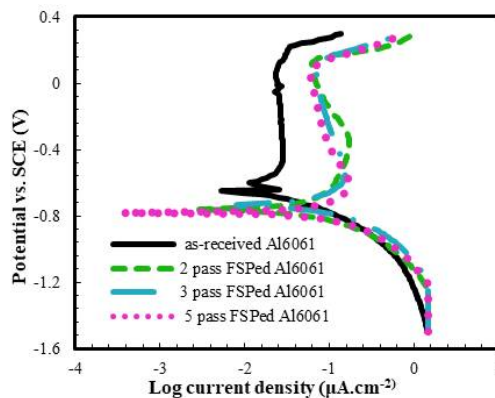


Fig. 10 Potentiodynamic polarization curves of samples

شکل 10 منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌ها



جدی اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی آلومینیوم در مورد همه نمونه‌ها شد. با این وجود، مقادیر سختی در ناحیه اغتشاشی نمونه‌های فراوری شده کمتر از نمونه فلز پایه بود. به طوری مقدار سختی نمونه‌های دو پاسه، سه پاسه و پنج پاسه به ترتیب حدود 17/36، 6/92 و 25/85 درصد کمتر از فلز پایه بود.

- مهم‌ترین دلیل در کاهش مقادیر سختی نمونه‌های فراوری شده را می‌توان درشت شدن فاز  $Mg_2Si$  در حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی به دلیل بالا بودن حرارت ورودی بیان کرد. عواملی چون افزایش تعداد پاس، بالا بودن سرعت دورانی ابزار و پایین بودن سرعت پیشروی ابزار نقش مستقیمی در افزایش حرارت قطعه کار دارند. در نمونه سه‌پاسه مکانیزم‌های تقویت‌کنندگی تأثیر بیشتری نسبت به مکانیزم‌های تضعیف‌کننده داشتند، به طوری که در بین تمامی نمونه‌های فراوری شده، بیشترین مقدار سختی بعد از فلز پایه مربوط به نمونه سه‌پاسه بود.

- نتایج آزمون سایش به طور کلی نشان‌دهنده تأثیر منفی فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار سایشی نمونه‌ها بود. به طوری که مقدار کاهش وزن نمونه‌های دو پاسه و پنج پاسه تقریباً  $3/5$  و  $2$  برابر بیشتر نمونه فلز پایه بود. همچنین تصاویر میکروسکوپی نشان داد که مقدار کندگی‌های سطحی در مورد نمونه‌های فراوری شده بیشتر از فلز پایه می‌باشد. کاهش سختی نمونه‌های فراوری شده مهم‌ترین دلیل افت خواص سایشی بود. با این وجود، در بین تمامی نمونه‌های فراوری شده، نمونه سه‌پاسه دارای کمترین نرخ سایش بود. بالاتر بودن سختی این نمونه می‌تواند به عنوان مهم‌ترین دلیل برای پایین بودن نرخ سایش این نمونه معرفی شود.

- نتایج آزمون خوردگی نشان داد که استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها می‌شود. به عبارت دیگر، در مقایسه با نمونه پایه، منحنی‌های پلاریزاسیون در اثر استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به سمت پتانسیل‌های منفی‌تر و چگالی جریان‌های بیشتر انتقال پیدا می‌کنند. نتایج نشان داد که پتانسیل خوردگی نمونه‌های دو پاسه، سه پاسه و پنج پاسه به ترتیب حدود 20/16، 15/90 و 23/28 درصد کمتر از مقدار مشابه در فلز پایه بودند. همچنین مقادیر چگالی خوردگی نمونه‌های دو پاسه، سه پاسه و پنج پاسه به ترتیب حدود 3/13، 4/08 و 4/73 برابر فلز پایه بودند.

- با توجه به این که تمایل شیمیایی فاز  $Mg_2Si$  بیشتر از آلومینیوم می‌باشد، بنابراین حضور این ذرات در مرزخانه‌های آلومینیوم منجر به خوردگی گالوانیکی می‌شود. بنابراین مهم‌ترین دلیل کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌های فراوری

می‌باشد، که این نشان‌دهنده این است که حرارت ناشی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی به حدی بالا بوده است که منجر به درشت شدن بیش از حد و یا تجمع ذرات  $Mg_2Si$  و در نتیجه تشدید خوردگی گالوانیکی در نمونه‌های فراوری شده شده است.

همچنین با توجه به شکل 10 می‌توان گفت که پتانسیل شکست لایه رویین در نمونه‌های فراوری شده کمتر از فلز پایه می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حضور ذرات درشت  $Mg_2Si$  در مرزخانه‌های آلومینیوم منجر به تشدید خوردگی گالوانیکی و تخریب سریع لایه رویین شده است. بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت که اگر چه فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به ریزدانه‌های آلیاژ آلومینیوم می‌شود، اما تأثیرگذاری آن در بهبود خواص به عوامل مختلفی مانند سرعت دورانی، سرعت پیشروی، هندسه ابزار، حرارت ورودی و غیره دارد.

با توجه به مطالب بیان شده، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد پاس بر روی اندازه دانه، حرارت ورودی به قطعه و اندازه رسوبات  $Mg_2Si$  تأثیر مستقیم دارد. به طوری که در بین تمامی نمونه‌های فراوری شده، نمونه سه‌پاسه دارای بالاترین مقاومت به خوردگی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، که در این نمونه عوامل بهبود دهنده مقاومت به خوردگی مانند کاهش اندازه دانه تأثیر بیشتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارند. از دیدگاه دیگر، در نمونه سه‌پاسه تعادل بیشتری بین اندازه دانه‌ها، حرارت ورودی به قطعه و اندازه رسوبات  $Mg_2Si$  وجود دارد، که منجر به بهبود مقاومت خوردگی بهتر آن شده است.

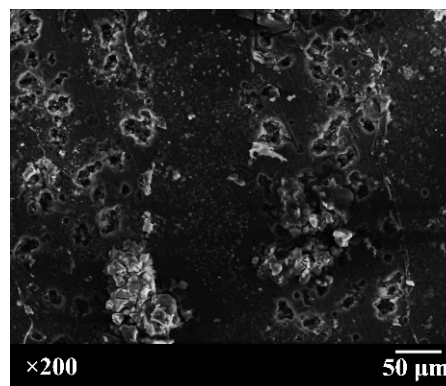


Fig. 11 The corrosion morphology of 2 pass FSPed Al6061

شکل 11 مورفولوژی خوردگی نمونه دو پاسه

#### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر رفتار مکانیکی، سایشی و خوردگی آلیاژ آلومینیوم 6061 پرداخته شد و نتایج زیر به دست آمد:

- استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به کاهش

- Material Letter*, Vol. 64, pp. 1189-1200, 2010.
- [11] A. Dolatkah, P. Golbabaie, M. K. Besharati Givi, F. Molaiekiya, Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing, *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 458-464, 2012.
- [12] S. K. Singh, R. J. Immanuel, S. Babu, S. K. Panigrahi, G. D. Janaki Ram, Influence of multi-pass friction stir processing on wear behaviour and machinability of an Al-Si hypoeutectic A356 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 236, pp. 252-262, 2016.
- [13] V. A. K. A.G. Rao, G. Gunasekaran, V.P. Deshmukh, N. Prabhu, B.P. Kashyap, Effect of multipass friction stir processing on corrosion resistance of hypereutectic Al-30Si alloy, *Corrosion Science*, Vol. 83, pp. 198-208, 2014.
- [14] B. S. M. K. Surekha, K. Prasad Rao, Comparison of corrosion behaviour of friction stir processed and laser melted AA 2219 aluminium alloy, *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 4502-4508, 2011.
- [15] R. A. B. Sadegh Rasouli, Abdolrahman Davvand and Noureyeh Saleki-Haselghoubi, Improvement in corrosion resistance of 5083 aluminum alloy via friction stir processing, *Journal of materials: Design and Application*, Vol. 230(1), pp. 142-150, 2016.
- [16] M.M. El-Rayes, E.A. El-Danaf, The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 1157-1168, 2012.
- [17] A. K. A. Devaraju, B. Kotiveerachari, Influence of rotational speed and reinforcements on wear and mechanical properties of aluminum hybrid composites via friction stir processing, *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 576-585, 2013.
- [18] S. R. Anvari, F. Karimzadeh, M. H. Enayati, Wear characteristics of Al-Cr-O surface nano-composite layer fabricated on Al6061 plate by friction stir processing, *Wear*, Vol. 304, No. 1-2, pp. 144-151, 2013.
- [19] E. R. Mahmoud, M. Takahashi, T. Shibayanagi, K. Ikeuchi, Wear characteristics of surface-hybrid-MMCs layer fabricated on aluminum plate by friction stir processing, *Wear*, Vol. 268, No. 9, pp. 1111-1121, 2010.
- [20] A. Zmitrowicz, Wear patterns and laws of wear—a review, *Journal of theoretical and applied mechanics*, Vol. 44, No. 2, pp. 219-253, 2006.
- [21] T. S. Mahmoud, Effect of friction stir processing on electrical conductivity and corrosion resistance of AA6063-T6 Al alloy, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 222, pp. 1117-1125, 2008.
- شده را می‌توان به درشت شدن ذرات  $Mg_2Si$  و در نتیجه تشدید خوردگی گالوانیکی نسبت داد.
- نتایج به دست آمده نشان دادند که در بین نمونه‌های فرآوری شده، نمونه سه‌پاسه دارای بالاترین مقاومت به خوردگی بود. در واقع می‌توان بیان کرد که تعادل بیشتری بین اندازه دانه‌ها، حرارت ورودی به قطعه و اندازه رسوبات  $Mg_2Si$  در نمونه سه‌پاسه وجود داشته که منتج رفتار بهتر خوردگی آن شده است.

## 5- منابع

- [1] M. Yang, C. Xu, C. Wu, K.-c. Lin, Y. J. Chao, L. An, Fabrication of AA6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano ceramic particle reinforced composite coating by using friction stir processing, *Journal of Materials Science*, Vol. 45, No. 16, pp. 4431-4438, 2010.
- [2] M. N. H. Zuhailawati Hussain, I. P. Almanar, B. K. Dhindaw, Friction Stir Processed of 6061-T6 Aluminum Alloy Reinforced with Silica from Rice Husk Ash, *Advanced Materials Research*, Vol. 1024, pp. 227-230, 2014.
- [3] P. K. Rohatgi, B. F. Schultz, A. Daoud, W. W. Zhang, Tribological performance of A206 aluminum alloy containing silica sand particles, *Tribology International*, Vol. 43, No. 1-2, pp. 455-466, 2010.
- [4] U. Sen, K. Sharma, Friction Stir Processing of Aluminum Alloys: A Literature Survey, 2016.
- [5] Y. G. K. K. Nakata, H. Fujii, T. Tsumura, and T. Komazaki, Improvement of Mechanical Properties of aluminum Die Casting Alloy by Multi-Pass Friction Stir Processing, *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 437, pp. 274-280, 2006.
- [6] V. B. K. Elangovan, Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Journal of materials processing technology*, Vol. 200, pp. 163-175, 2008.
- [7] I. S. Y.J. Kwon, and N. Saito, Mechanical Properties of Fine-Grained Aluminum Alloy Produced by Friction Stir Process, *Scr. Mater.*, Vol. 49, pp. 785-789, 2003.
- [8] V. S. S. L. Karthikeyan, V. Balasubramanian, S. Natarajan, Mechanical property and microstructural changes during friction stir processing of cast aluminum 2285 alloy, *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2237-2242, 2009.
- [9] V. B. K. Elangovan, and M. Valliappan, Effect of Tool Pin Profile and Tool Rotational Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6061 Aluminium Alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 23, pp. 251-260, 2008.
- [10] T. H. T. Morishige, M. Tsujikawa, and K. Higashi, Comprehensive Analysis of Minimum Grain Size in Pure Aluminum Using Friction Stir Processing,