E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 9, Number 2, 2024



The effect of traverse speed in friction stir process on the microstructure, mechanical properties and wear behavior Al5052/ZrO_2/$ZrSiO_4$ surface hybrid composite

M. Bozorgmehr[1], A. Heidari[1*], K. Amini[1*], M. LohMousavi[1], F. Gharavi[2]
1-Department of Mechanical Engineering, Khomeini-shar Branch, Islamic Azad University,Isfahan, Iran
2-Department of Materials Engineering, Sirjan Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran

Received 10 April 2023 ; Accepted 23 August 2023

Abstract

In the present study, friction stir process (FSP) was used to produce AL/ZrO_2/$ZrSiO_4$ surface hybrid composite at a fixed rotation speed of 1400 rpm and traverse speeds of 20, 25, 31.5 and 40 mm/min. Therefore, the purpose of the mentioned study is to investigate the effect of tool traverse speed on the microstructure, hardness and wear behavior of the above-mentioned surface hybrid composite and compare it with base material aluminum 5052. Investigations showed that as a result of FSP operation, a fine-grained structure is created, which improves the hardness and wear resistance of the samples compared to the base sample with the presence of ZrO_2 and $ZrSiO_4$ particles. Also, the results showed that among the FSP samples, the sample with a speed of 20 mm/min has the highest hardness and wear resistance. The reason for this is that in this sample, due to the lower traverse speed compared to other samples, more heat has been generated, which has led to more suitable particle distribution and more fine particles. Therefore, in the sample with the traverse speed of 20 mm/min, the hardness and wear resistance increases by 27.3% and 68.9% respectively compared to the base material sample. Also, the examination of the wear surfaces of the samples showed that the wear mechanism in the base sample is strong adhesive wear, and as a result of the FSP operation and surface compositing due to the fineness of the grains and the increase in hardness, the wear mechanism has become weak adhesive, so the wear resistance of the sample is FSPs have been improved.

Keywords: Friction Stir Process, Surface Hybrid Composite, Traverse Speed, Surface Modification, ZrO_2 and $ZrSiO_4$ particles.

Corresponding Author: amini@iaukhsh.ac.ir ; heidari@iaukhsh.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال نهم، شماره2، پاییز و زمستان 1402

تأثیر سرعت پیشروی در فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر ریز ساختار، خواص مکانیکی و رفتار سایش کامپوزیت هیبریدی سطحی $Al5052/ZrO_2/ZrSiO_4$

محمد بزرگمهر[1]، علی حیدری[1*]، کامران امینی[1*]، محسن لوح موسوی[1]، فرهاد غروی[2]

1- دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

2- گروه متالورژی، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، کرمان، ایران.

دریافت مقاله: 1402/01/21 ؛ پذیرش مقاله: 1402/06/01

چکیده

در مطالعه حاضر از فرایند اصطکاکی اغتشاشی(FSP) برای تولید کامپوزیت هیبریدی سطحی $Al/ZrO_2/ZrSiO_4$ در سرعت چرخش ثابت 1400 دور بر دقیقه و سرعت‌های پیشروی 20، 25، 31/5 و 40 میلی‌متر بر دقیقه استفاده گردید. لذا هدف از مطالعه مذکور بررسی تاثیر سرعت پیشروی ابزار بر ریزساختار، سختی و رفتار سایشی کامپوزیت هیبریدی سطحی فوق الذکر و مقایسه آن با آلومینیوم 5052 خام است. بررسی‌ها نشان داد، در اثر عملیات FSP یک ساختار ریزدانه ایجاد می‌گردد که با حضور ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ سختی و مقاومت سایشی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه خام بهبود می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد، در بین نمونه‌های FSP شده، نمونه با سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه دارای بالاترین سختی و مقاومت سایشی است. دلیل این موضوع آنست که در این نمونه بدلیل سرعت پیشروی کمتر در مقایسه با سایر نمونه‌ها، گرمای بیشتری ایجاد شده که منجر به توزیع مناسب تر و ریزشدن بیشتر ذرات گردیده است. بنابراین در نمونه با سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه، سختی و مقاومت سایشی در مقایسه با نمونه خام به ترتیب 27/3% و 68/9% افزایش می‌یابد. همچنین بررسی سطوح سایش نمونه‌ها نشان داد مکانیزم سایش در نمونه خام سایش چسبان قوی است که در اثر عملیات FSP و کامپوزیت سازی سطوح بدلیل ریز شدن دانه‌ها و افزایش سختی، مکانیزم سایش به چسبان ضعیف تبدیل شده است، لذا مقاومت به سایش نمونه‌های FSP بهبود یافته است.

کلمات کلیدی: فرایند اصطکاکی اغتشاشی، کامپوزیت هیبریدی سطحی، سرعت پیشروی، اصلاح سطح، ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: heidari@iaukhsh.ac.ir ; amini@iaukhsh.ac.ir

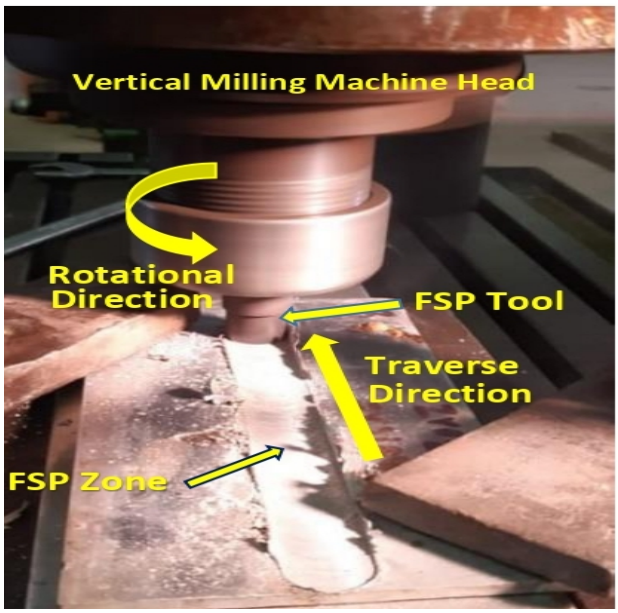
1- مقدمه

آلومینیوم 5052 کاربرد گسترده‌ای در زمینه صنایع نظامی، دریایی و هوافضا دارد. به دلیل خواص مقاوم در برابر خوردگی و استحکام کششی قابل توجه، این آلیاژ خود را به عنوان یک آلیاژ عالی برای کشتی‌های دریایی و سایر کاربردها ثابت کرده است[1]. اما به دلیل سختی پایین و مقاومت به سایش، کاربرد آن در صنعت محدود است. از این رو فرایندی برای افزایش سختی و مقاومت در برابر سایش مورد نیاز است. با توجه به این که خواص سایشی و خوردگی فلزات وابسته به سطح آن‌ها می‌باشد، می‌توان از طریق اصلاح ریزساختار سطح، این خواص را بهبود بخشید. تغییر شکل پلاستیک شدید یکی از روش‌های موثر در اصلاح ریزساختار با استفاده از اعمال کرنش‌های پلاستیکی بالا می باشد. یکی از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید که به منظور بهبود خواص سطح فلزات مورد استفاده قرار

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

می‌گیرد، فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد [3و2]. فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر اساس اصل اولیه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال 1999 توسط میشرا و همکاران [4] توسعه یافت و برای موارد مختلفی از جمله، اصلاح ریزساختار سطح[5]، ایجاد خواص سوپرپلاستیسیته[6]، ایجاد ساختار کامپوزیت [7]، همگن سازی آلیاژهای آلومینیوم دارای فازهای نانو و کامپوزیت‌های زمینه فلزی[8] و بهبود ریزساختار آلیاژهای آلومینیوم ریختگی[9] به کار برده می‌شود. شکل(1) عملیات فرایند اصطکاکی اغتشاشی انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این فرایند یک ابزار استوانه‌ای غیرمصرفی که شامل شانه و پین است، با حرکت چرخشی و تحت شرایطی تعریف شده وارد قطعه می‌شود و با اعمال فشار و ایجاد اصطکاک بین ابزار و قطعه کار موجب بالارفتن دما در محل تماس می‌شود[10].



شکل1- طرح عملیات فرایند اصطکاکی اغتشاشی یکی از نمونه‌ها.

پین ابزار دوار، در ورق فرو می‌رود و شانه با سطح ورق تماس پیدا می‌کند و سپس در جهت مورد نظر پیشروی می‌کند. تماس بین ابزار دوار و ورق باعث ایجاد گرما می‌شود که مواد را در زیر نقطه ذوب ورق نرم می کند و با هم زدن مکانیکی ناشی از پین، ماده در منطقه اغتشاشی دچار تغییر شکل پلاستیکی شدید می‌شود و یک ریزساختار دانه ریز با تبلور مجدد دینامیکی ایجاد می‌کند[11]. با توسعه فرایندFSP، محققان از این تکنیک برای تولید کامپوزیت‌های سطحی استفاده نمودند. کامپوزیت سطحی در کاربردهایی که تنها سطح ماده نقش مهمی را ایفا می‌کند مانند سایش، سختی و خوردگی بسیار مفید است[12]. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار تأثیر مهمی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فلز دارند. سرعت چرخشی یک پارامتر بسیار مهم است که نقش مهمی در جریان مواد و تولید حرارت ایجاد می‌کند و در نتیجه ریزساختارها و خواص مکانیکی اصلاح می‌شود [14و13]. با کاهش سرعت پیشروی ابزار توزیع ذرات یکنواخت‌تر خواهد شد. همچنین سرعت پیشروی با سختی و استحکام کششی رابطه معکوس دارد. لذا در سرعت‌های پیشروی پایین، سختی و استحکام کششی بهبود می‌یابد [15]. در هر سرعت پیشروی یک سرعت دورانی وجود دارد که فرایند بدون عیب ایجاد خواهد کرد [16]. البته قابل ذکر است که افزایش حرارت با افزایش سرعت چرخش ابزار به صورت خطی نیست که علت آن تغییر ضریب اصطکاک با افزایش سرعت چرخش ابزار است [17]. چیناروونگ و همکاران[18] به بررسی تأثیر سرعت‌های پیشروی و چرخشی متفاوت ابزار بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم356 SSM پرداختند. پارامترهای فرایند اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژهای آلومینیوم 356 SSM در سه سرعت پیشروی مختلف، 80، 120 و 160 میلی‌متر بر دقیقه تحت سه سرعت چرخش مختلف 1320، 1480 و 1750 دور در دقیقه مورد مطالعه قرار گرفت. سختی و استحکام کششی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شده که در سرعت پیشروی 160 میلی‌متر در دقیقه بهترین نتایج به دست آمد. بهرامی و همکاران [19] به بررسی اثر ذرات SiC بر ریزساختار و خواص مکانیکی شامل استحکام کششی، درصد کشیدگی، سطح شکست و رفتار ریزسختی اتصالات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم 7075 پرداختند. نمونه‌ها با سه سرعت چرخشی یعنی 800، 1000 و 1250 دور در دقیقه و سه سرعت پیشروی 31/5، 40 و 50 میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. مشاهده شد که بالاترین خواص مکانیکی در سرعت

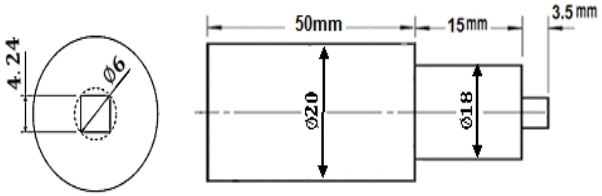
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

دورانی 1250 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه به دست آمد. شالوک و همکاران [20] به بررسی تاثیر سرعت دورانی و پیشروی بر ریز سختی و رفتار سایشی کامپوزیت سطحی $Al5052/ZrO_2$ تولید شده بوسیله فرایند اصطکاکی اغتشاشی پرداختند. سرعت‌های دورانی در این آزمایش 1400 و 710 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 56 و 80 میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد. مشاهده شده که در سرعت دورانی 1400 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 56 میلی‌متر در دقیقه توزیع ذرات ZrO_2 در صفحه آلومینیومی بدلیل افزایش گرمای اصطکاک یکنواخت‌تر بود. حداکثر سختی HV 110/7 در سرعت پیشروی mm/min 56 مشاهده شد. همچنین سختی و مقاومت در برابر سایش در سرعت پیشروی mm/min 56 با افزودن ذرات ZrO_2 بهبود یافت.

در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی با چند نوع تقویت کننده یا کامپوزیت‌های هیبریدی، به دلیل بهبود خواص تریبولوژیکی جایگزین کامپوزیت‌های با یک نوع تقویت کننده شده‌اند[21]. ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ خواصی مانند مقاومت در برابر سایش بهتر، استحکام بالا، سختی بالا، مقاومت شیمیایی عالی و چقرمگی شکست بالا را ارائه می‌دهند. بنابراین می‌تواند گزینه خوبی برای تقویت زمینه باشد[22]. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان گفت که در سرعت دورانی ثابت، تغییر سرعت پیشروی ابزار منجر به افزایش بیش از حد دما در منطقه اغتشاشی می‌شوند. در این راستا، هدف از مطالعه حاضر بررسی اثر سرعت چرخش ثابت 1400 دور در دقیقه و تغییرات سرعت پیشروی 20، 25، 31/5 و 40 میلی‌متر در دقیقه در عملیات FSP بر توزیع ذرات، ریزسختی، خواص مکانیکی و خواص مقاومت به سایش آلومینیوم 5052 و توسعه کامپوزیت‌های سطحی هیبریدی با استفاده از تقویت‌کننده ZrO_2 و $ZrSiO_4$ بر روی سطح ماده پایه Al5052 است.

2- مواد و روش انجام تحقیق

در این مطالعه از آلیاژ آلومینیوم 5052 دارای شرایط آنیل O اولیه به عنوان ماده اصلی برای توسعه کامپوزیت سطحی استفاده شد. جدول (1) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 5052 را نشان می‌دهد. صفحات آلومینیومی به ضخامت 5 میلی‌متر، عرض 100 میلی‌متر و طول 200 میلی‌متر بوسیله گیوتین برش داده شدند. برای تولید لایه کامپوزیت، شیاری به عمق 2/5 میلی‌متر و عرض 1/5 میلی‌متر با کمک دستگاه فرز در وسط صفحات و در راستای طولی ایجاد شد. از پودرهای ZrO_2 و $ZrSiO_4$ به عنوان مواد تقویت کننده، استفاده شد. این مواد با نسبت 85 درصد $ZrSiO_4$ و 15 درصد ZrO_2 مخلوط شده، در استون حل شده و در شیار ایجاد شده در ورق آلومینیوم بصورت خمیری فشرده گردید. زاویه انحراف 2 درجه و عمق نفوذ mm 0/3 در نظر گرفته شد. عملیات FSP با یک پاس و با دوران پادساعتگرد انجام گردید. ابزار مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد ابزار گرم کارAISI H13 با سختی HRC 52 ساخته شده است. یکی از پارامترهای مهم در فرایند اصطکاکی اغتشاشی هندسه ابزار می باشد، به طوری که این عامل بر روی گرمای تولیدی، جریان مواد و در نتیجه ریزساختار تأثیر مستقیم دارد. با توجه به مطالعات انجام شده [23-25] ، مشخص شده است که پین مربعی بالاترین تأثیر را در مقاومت کششی آلیاژ آلومینیوم دارا می‌باشد و منجر به دستیابی به بهترین خواص مکانیکی در مورد آلیاژهای آلومینیوم می‌شود. بنابراین در این تحقیق ابزار با پین مربعی طبق شکل (2) ساخته شد.



شکل2-شماتیک طرح ابزار با پین مربعی استفاده شده در تحقیق حاضر.

به منظور جلوگیری از پخش شدن ذرات از درون شیار طی فرایند، از یک ابزار بدون پین جهت ایجاد لایه سطحی اولیه بر روی شیار استفاده گردید. کامپوزیت سازی سطحی، روی 4 عدد نمونه با سرعت دورانی ثابت 1400 rpm و سرعت‌های پیشروی 20، 25 ، 31/5 و 40 میلی‌متر در دقیقه، طبق جدول(2) انجام گردید. برای آنالیز متالورژیکی، نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM E3-01 تهیه شدند[26]. همچنین به منظور بررسی ریزساختار و سطح سایش نمونه‌ها از میکروسکوپ نوری

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

و میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی(FE-SEM) مدل MIRA3 ساخت شرکتTESCAN استفاده گردید.

جدول1-عناصر تشکیل دهنده(درصد وزنی) آلیاژ آلومینیوم 5052.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
۰/۱۱	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۰۳	۲/۲	۰/۲۵	۰/۰۲	Balance

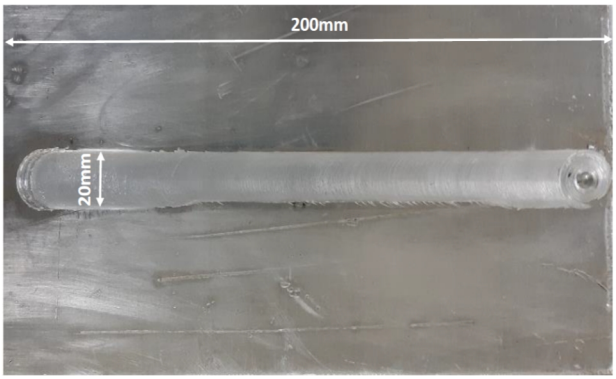
جدول2- شماره گذاری نمونه‌های مختلف FSP. شده با سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف.

شماره نمونه	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی(mm/min)
۱	۱۴۰۰	۲۰
۲	۱۴۰۰	۲۵
۳	۱۴۰۰	۳۱/۵
۴	۱۴۰۰	۴۰

به منظور انجام متالوگرافی، بعد از سنباده کاری تا شماره 4000، نمونه‌ها با استفاده از محلول keller حکاکی شدند. با توجه به تاثیرگذاری سطح ماده بر رفتار ماده و به منظور حذف تاثیر ناهمواری‌های سطحی، نمونه‌های آماده شده برای آزمون‌های میکروسختی و سایش، تا سنباده 1200 مورد عملیات سنباده زنی قرار گرفتند. در این تحقیق، آزمون سختی طبق استاندارد ASTM E384[27] از سطح مقطع نمونه‌های فراوری شده به روش میکرو ویکرز انجام شد. نیروی اعمالی در این آزمون100 گرم و به مدت 10 ثانیه بود. همچنین خواص سایشی نمونه‌ها با استفاده از آزمون پین روی دیسک مطابق با استاندارد[28] ASTM G99 در دمای اتاق انجام شد. به منظور انجام آزمون سایش از پین فولادی AISI D3 با سختی 52 HRC استفاده شد. برای آزمون سایش از هر نمونه 3 عدد آماده‌سازی گردید. آزمون سایش به مسافت 600 متر با سرعت 0/2 m/s و بار اعمالی10 نیوتن انجام شد. سپس رفتار سایش با استفاده از میانگین کاهش وزن نمونه‌ها براساس مسافت طی شده محاسبه شد.

3- نتایج و بحث

کامپوزیت سازی هیبریدی سطحی به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی 4 نمونه از آلیاژ آلومینیوم 5052 با سرعت دورانی و پیشروی مختلف طبق جدول(2) انجام شد. شکل(3) ظاهر سطح (نمونه 1) یکی از نمونه‌های کامپوزیت شده به روش FSP را با طول 200 میلی‌متر در نمای بالایی نشان می‌دهد. سطح صاف، بدون ترک و عیب ظاهری می‌باشد. سطح بالایی با حلقه‌های خاص کیفیت بسیار صافی را نشان می‌دهد و علی رغم به‌هم زدن ابزار تقریباً هیچ برجستگی یا فرورفتگی وجود ندارد.

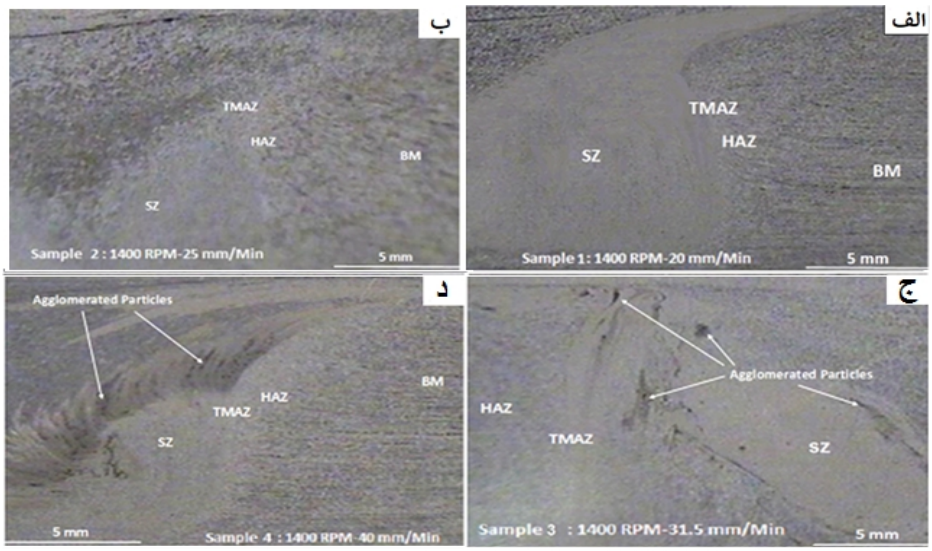


شکل3- شکل ظاهری نمونه شماره 1 بعد از انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی.

3-1- بررسی ریزساختار نمونه‌ها

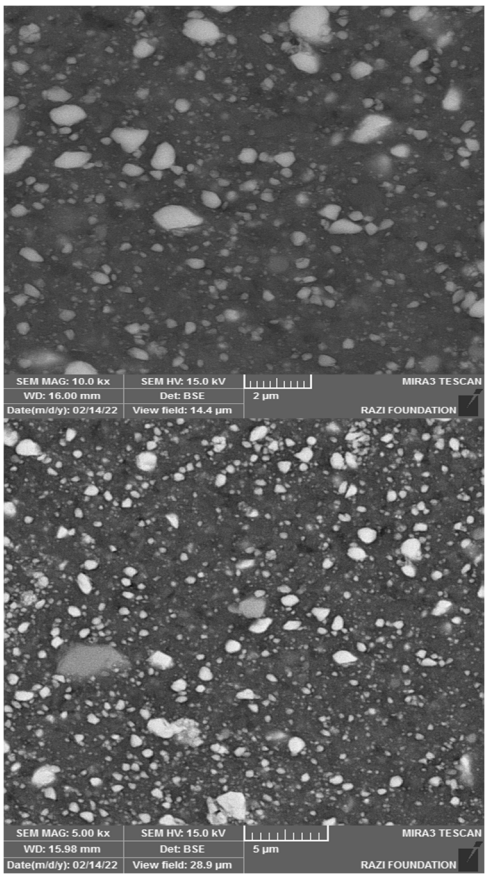
در شکل (4-الف) تصویر به دست آمده از میکروسکوپ نوری نمونه شماره 1 آورده شده است. همانطور که مشخص است، با انجام فرایند FSP نواحی ساختاری مختلفی به دست می‌آید. بررسی تصویر حاکی از حضور ناحیه اغتشاشی (SZ) (ناحیه‌ای که تحت تاثیر اغتشاش قرار دارد)، ناحیه ترمومکانیکال (TMAZ) (ناحیه ای که در معرض حرارت و تغییرفرم پلاستیک قرار دارد)، ناحیه تحت تاثیر حرارت (HAZ) و ناحیه فلزپایه (Base Metal) می‌باشد. در شکل (4) نواحی مختلف ایجاد شده در فرایند FSP برای نمونه‌های مختلف آورده شده است. همانطور که در شکل (4) مشاهده می‌شود، توزیع ذرات در تصاویر (الف) و (ب) نسبت به تصاویر دیگر همگن‌تر می‌باشد. علاوه بر این، خوشه‌های ZrO_2 و $ZrSiO_4$ در زمانی که سرعت چرخش کم می‌باشد در SZ تشکیل شدند. علت اصلی رشد تجمع ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ با کاهش سرعت پیشروی، می‌تواند به دلیل هم زدن شدیدتر مواد باشد که بر توزیع پودرهای ZrO_2 و $ZrSiO_4$ تأثیر می‌گذارد و متعاقباً منجر به

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]



شکل4-تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری در سرعت دورانی 1400 rpm **الف**- سرعت پیشروی 20 mm/min **ب**- سرعت پیشروی 25 mm/min **ج**-سرعت پیشروی 31/5 mm/min **د**-سرعت پیشروی 40 mm/min .

بهبود اندازه خوشه ذرات کوچکتر می‌شود. بدیهی است که تجمع و توزیع پودرهای ZrO_2 و $ZrSiO_4$ به پارامترهای فرایند حاوی سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار بستگی دارد[29]. بنابراین، سرعت پیشروی کمتر و سرعت چرخش بیشتر باید ساختارهای دانه درشت‌تری در ناحیه اغتشاشی ایجاد نماید. این به دلیل گرمای ورودی بیشتر می‌باشد[30] اما وجود ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ مانع از رشد دانه‌های آلومینیوم شده و این امر باعث کاهش و بهبود توزیع ذرات می‌شود. همانطور که در شکل (4) مشخص است فرایند اصطکاکی اغتشاشی منجر به ریزدانگی شدید ناحیه اغتشاشی شده است. در شکل(5) تصویر SEM نمونه شماره 1 آورده شده است. مشاهده می شود که در نمونه شماره 1 ذرات به خوبی توزیع شده‌اند. از طرف دیگر با مشاهده تصاویر ج و د در شکل (4) می‌توان دریافت که با افزایش سرعت پیشروی میزان اغتشاش و پراکندگی ذرات تقویت کننده کاهش یافته و مقدار ذرات آگلومره تشکیل شده از این مواد تقویت کننده افزایش یافته است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با افزایش سرعت پیشروی میزان تجمع و پیوستگی ذرات آگلومره در فصل مشترک نواحی SZ و TMAZ افزایش یافته و این حاکی از کاهش خواص مکانیکی و رفتار سایشی در نمونه 4 با میزان پیشروی 40 میلی‌متر بر دقیقه به ویژه در ناحیه SZ و سایر نواحی دیگر خواهد شد.

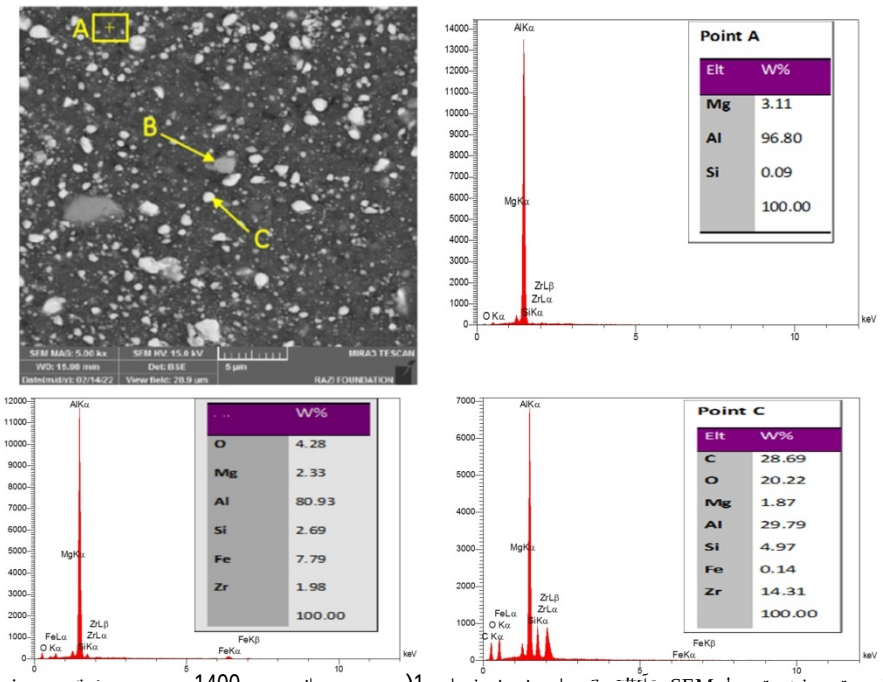


شکل5-تصاویر تهیه‌شده توسط SEM دربزرگنمایی‌های مختلف از نمونه شماره 1(سرعت دورانی 1400 rpm و سرعت پیشروی 20mm/min).

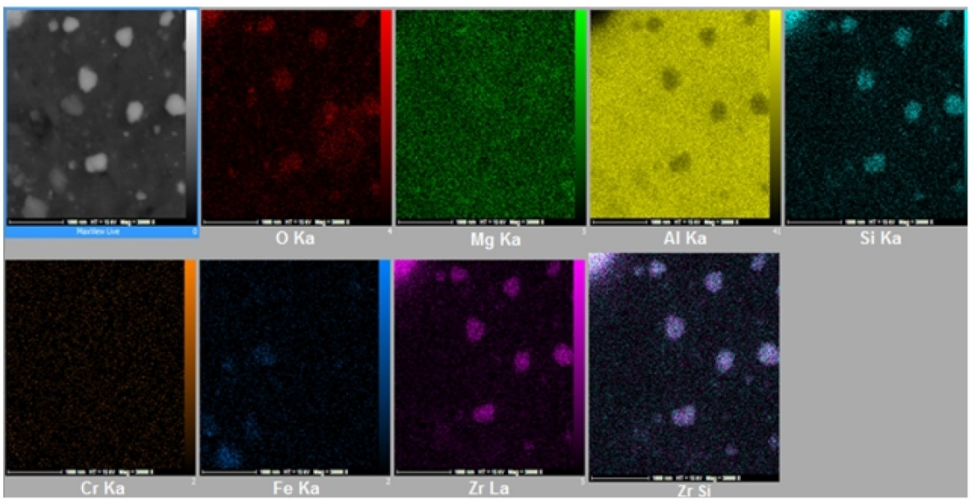
شکل(6) آنالیز EDS ذرات موجود در ناحیه اغتشاشی کامپوزیت هیبریدی سطحی نمونه شماره 1 را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]



شکل6- تصاویر تهیه شده توسط SEM و آنالیز شیمیایی نمونه شماره 1(سرعت دورانی 1400 rpm و سرعت پیشروی 20 mm/min).



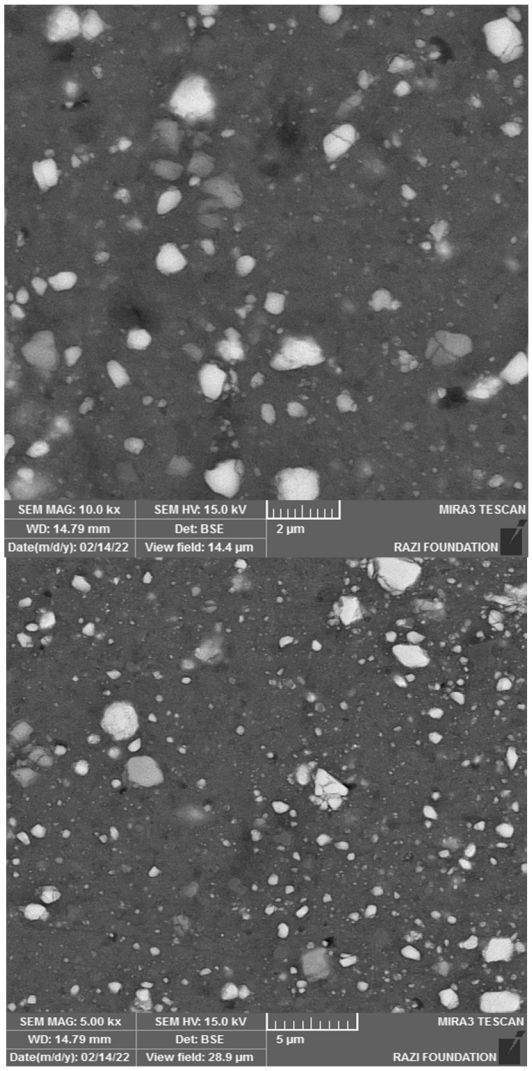
شکل7- توزیع عناصر شیمیایی در نمونه شماره 1 (سرعت دورانی 1400 rpm و سرعت پیشروی 20 mm/min).

نتایج تجزیه و تحلیل آنالیز EDS نشان می‌دهد که نقاط B وC در این میکروگراف حاوی ذرات پودرهای ZrO_2 و $ZrSiO_4$ است. وجود پیک‌های Al و Mg در شکل (7) به دلیل انتقال پرتو الکترونی در سراسر ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ و تماس با فلزپایه است. شکل(7) آنالیز MAP نمونه شماره 1 را نشان می‌دهد. تقریباً در همه نقاط اثر حضور عناصر O و Zr و Si مشاهده می‌شود.

این امر نشان دهنده حضور ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ درون زمینه می‌باشد. توزیع ذرات در سرتاسر زمینه و با فواصل کم می‌تواند به طور قابل توجهی باعث افزایش سختی زمینه شود. شکل‌های(8 و9) تصاویر تهیه شده توسط SEM نمونه‌های شماره 2 و 3 را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود ذرات به طور یکنواخت در زمینه توزیع شده اند. شکل(10) تصاویر تهیه شده توسط SEM نمونه شماره 4 با سرعت دورانی 1400 rpm و

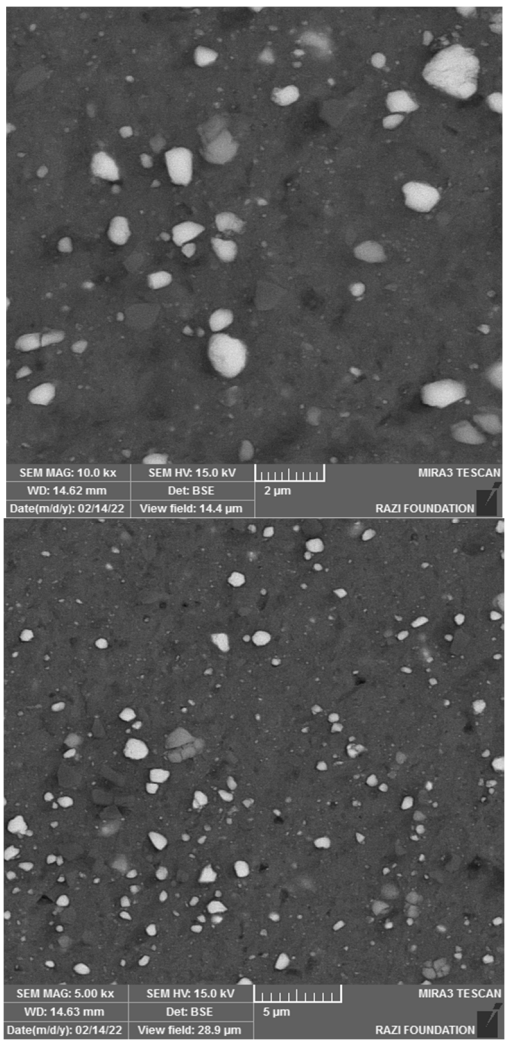
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

سرعت پیشروی 40 mm/min را برای آلیاژ آلومینیوم FSP شده را نشان می‌دهد. این شکل به وضوح توزیع همگن ذرات پودرهای ZrO_2 و $ZrSiO_4$ را در زمینه آلومینیوم نشان می‌دهد. به طور کلی، یکی از مهم‌ترین عوامل برای بهبود خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیت هیبریدی سطحی ساخته شده به روش فرایند اصطکاکی اغتشاشی، پیوند ذرات به یکدیگر و با فلزپایه است. پدیده تقویت به پیوند و چسبندگی ذرات و فلز پایه بستگی دارد[32و31].



شکل8-تصاویر تهیه شده توسط SEM دربزرگنمایی‌های مختلف از نمونه شماره 2(سرعت دورانی 1400rpm و سرعت پیشروی 25mm/min).

در شکل(11) تصاویر تهیه شده توسط نرم افزار Imagr J از توزیع ذرات در نمونه‌های شماره 1، 2، 3 و 4 آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود توزیع ذرات در نمونه شماره 1 نسبت به سه نمونه دیگر بهتر است. همچنین با توجه به نتایج آنالیز تصاویر که در جدول(3) نشان داده شده است، نمونه شماره 1 دارای رسوبات ریزتر و درصد کسر سطحی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. به نحوی که کسر سطحی ذرات از حدود 4% در نمونه شماره 4 به حدود 18% در نمونه شماره 1 می‌رسد. این نتایج با نتایج تحقیقات شفیعی زرقانی[33] مطابقت دارد. بنابراین تغییرات سرعت پیشروی تأثیر قابل توجهی بر پراکندگی ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ در طول فرایند اصطکاکی اغتشاشی داشتند.



شکل9- تصاویر تهیه شده توسط SEM دربزرگنمایی‌های مختلف از نمونه شماره 3 (سرعت دورانی 1400 rpm و سرعت پیشروی 5/31mm/min).

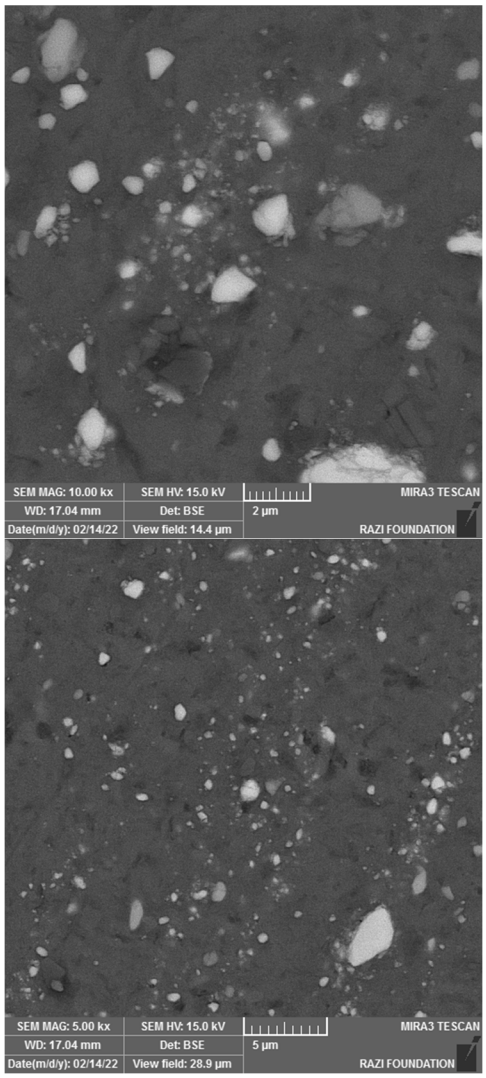
3-2- بررسی میکروسختی نمونه‌ها

هر 4 نمونه جهت میکروسختی سنجی مورد آزمایش قرار گرفتند و با فلزپایه مقایسه شدند. شکل(12) نمودار مقایسه‌ای

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

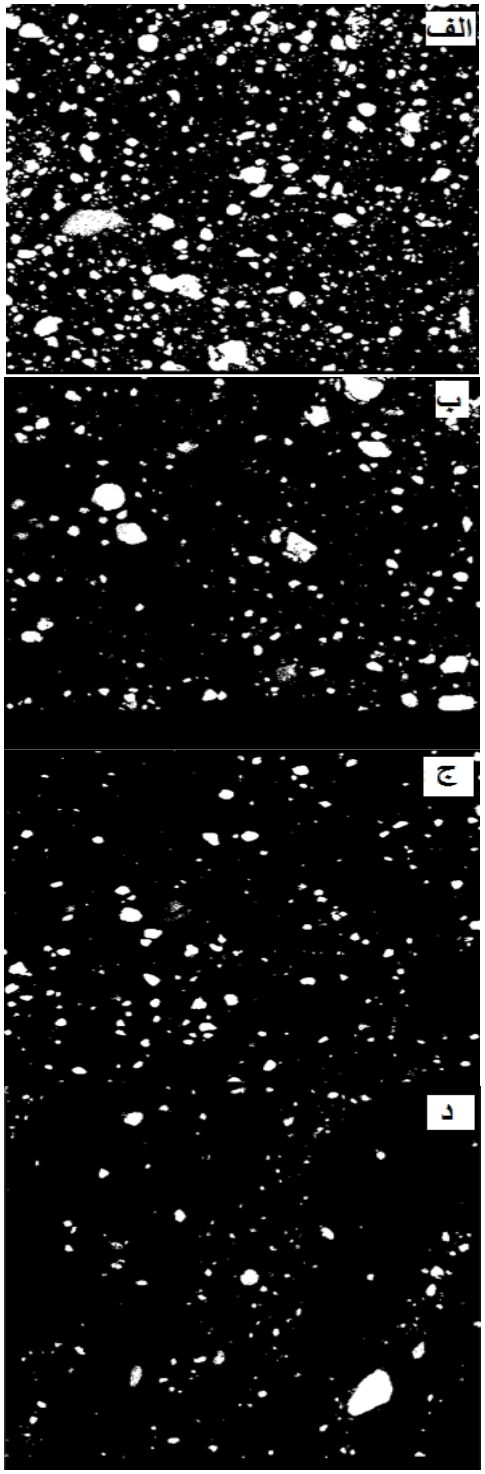
میانگین مقادیر میکروسختی نمونه‌ها را در ناحیه اغتشاشی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقدار متوسط سختی، میانگین 10 مقدار سختی است. از نتایج شکل(12) مشاهده شد که بیشترین سختی در نمونه شماره 1 در سرعت پیشروی 20 mm/min به دست آمد. کمترین سختی در نمونه شماره 4 در سرعت پیشروی 40 mm/min به دست آمد.



شکل10- تصاویر تهیه شده توسط SEM دربزرگنمایی‌های مختلف از نمونه شماره 4 (سرعت دورانی 1400 rpm و سرعت پیشروی 40mm/min).

مقدار سختی نمونه شماره 1 تقویت شده با ZrO_2 و $ZrSiO_4$ حدود 69/96 HV به دست آمد که با توجه به سختی آلومینیوم 5052 که 55 HV می باشد به مقدار 27/15 درصد افزایش یافته است. بنابراین مشاهده می‌شود که ریزسختی ناحیه اغتشاشی در همه نمونه‌ها نسبت به فلزپایه افزایش یافته است.

سختی بالای نمونه‌های FSP شده ناشی از کاهش اندازه دانه، ریزشدن و توزیع بهتر ذرات و کسر سطحی بالای ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ می‌باشد.



شکل11- آنالیز تصاویر SEM توسط نرم افزار Image J از توزیع ذرات با سرعت دورانی 1400 rpm **الف**-نمونه 1 با سرعت پیشروی 20 mm/min
ب- نمونه 2 با سرعت پیشروی 25 mm/min **ج**-نمونه3 با سرعت پیشروی 40 mm/min **د-نمونه4 با** سرعت پیشروی 31/5 mm/min.

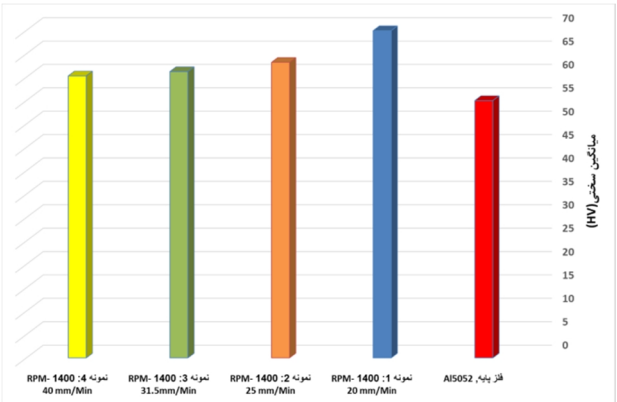
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

از این رو نتیجه گیری می‌شود که در سرعت دورانی ثابت 1400rpm با کاهش سرعت پیشروی و افزودن ذرات تقویت کننده، مقدار میکروسختی کامپوزیت هیبریدی سطحی آلیاژهای آلومینیوم 5052 بیشتر می‌شود. با کاهش سرعت پیشروی، ابزار زمان بیشتری برای تماس با مواد پایه پیدا می‌کند و در نتیجه گرمای بیشتری در سرعت پیشروی کم در مقایسه با سرعت پیشروی بالا تولید می‌گردد که در نهایت منجر به پراکندگی بهتر ذرات تقویت کننده در فلز پایه می‌شود. این نتایج دارای تطابق خوبی با نتایج سایر محققان است[36و35]. به عنوان مثال پاردیپ کومار و همکاران [37] اثر ذرات گرافن بر خواص مکانیکی در کامپوریت سطحی آلومینیوم 6063 را بررسی کردند.

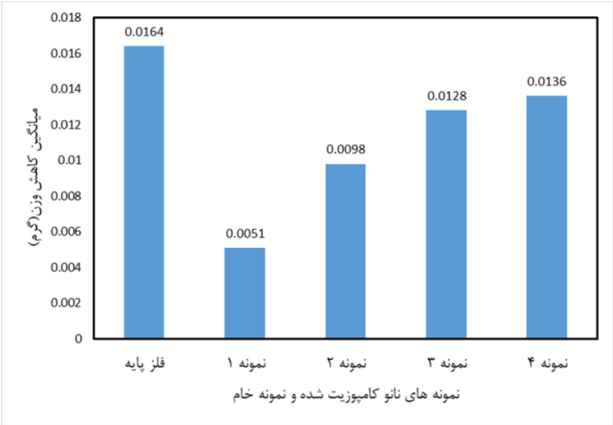
جدول3-آنالیر ذرات از نظر سایز، درصد سطحی ومیانگین اندازه ذرات در نمونه‌های مختلف.

شماره نمونه	تعداد ذرات در تصویر	درصد کسر سطحی	میانگین اندازه ذرات (میکرومتر مربع)
۱	۱۹۸۴	۱۸/۶۴۵	۰/۰۷۵
۲	۸۷۶	۹/۰۷۳	۰/۱۰۶
۳	۷۲۳	۵/۳۷۲	۰/۰۹۸
۴	۴۸۸	۴/۲۱۳	۰/۰۸۶



شکل12- نمودار مقایسه‌ای میانگین مقادیر میکروسختی نمونه‌ها در ناحیه اغتشاشی.

نتایج این تحقیق نشان داد که بدلیل ریزدانه شدن ذرات، سختی پس از یک پاس نسبت به فلزپایه به میزان 25/45 درصد افزایش یافت. همچنین نتایج Image Analyzer دارای تطابق خوبی با نتایج سختی است. همانطوری‌که از جدول(3) مشخص است در نمونه شماره 1 کسر سطحی ذرات بالاتر و اندازه ذرات در مقایسه با نمونه‌های 2، 3 و 4 کوچکتر است. لذا این نمونه دارای سختی بالاتری است. این نتایج با نتایج پاردیپ کومار و همکاران [37] تطابق خوبی دارد. در نتایج آن‌ها کاهش اندازه دانه در فرایند اغتشاشی اصطکاکی کامپوریت سطحی آلومینیوم 6063 به دلیل اتصال سطحی قوی ذرات تقویت کننده گرافن و مواد زمینه مشاهده شده است.

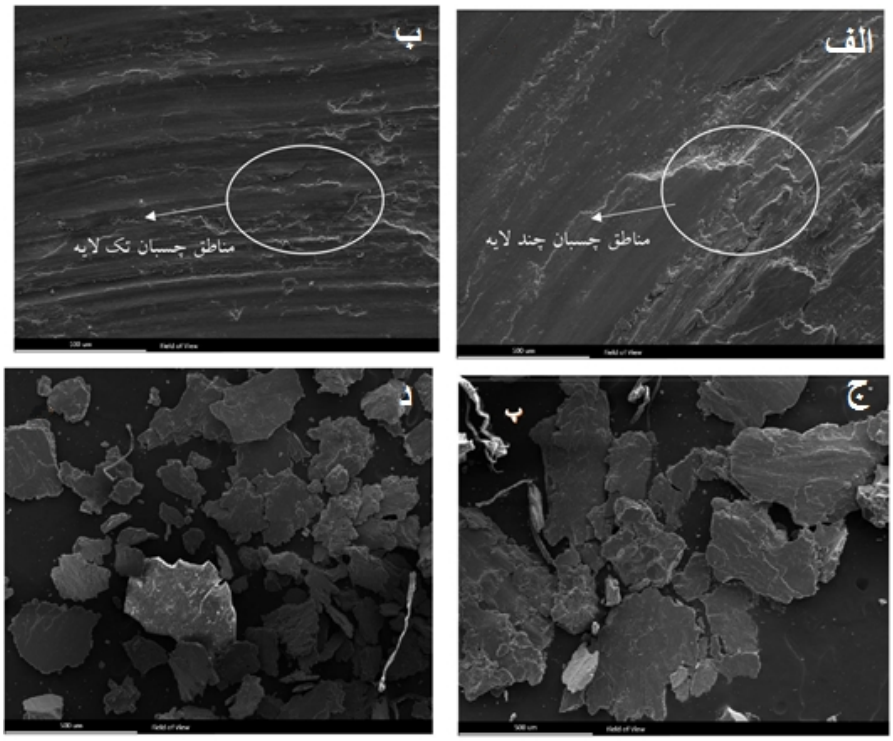


شکل13-میانگین کاهش وزن نمونه‌های نانو کامپوزیت شده و فلز پایه.

3-3- بررسی رفتار سایش نمونه‌ها

جهت بررسی رفتار سایشی در نمونه‌ها، نمونه‌های 1 تا 4 و همچنین نمونه خام تحت آزمون سایش به روش پین بر روی دیسک قرار گرفتند. نتایج کاهش وزن براساس مسافت طی شده در آزمون سایش در شکل(13) آورده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد در آزمون سایش نمونه‌های FSP شده، میزان کاهش وزن نمونه‌ها در مقایسه با نمونه خام کاهش یافته است. بنابراین مقاومت به سایش نمونه‌ها در اثر عملیات FSP بهبود یافته است. دلیل این موضوع افزایش سختی در اثر عملیات FSP بدلیل ریز شدن دانه‌ها و حضور ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ است. در بین نمونه‌های FSP شده نمونه شماره 1 دارای بهترین مقاومت به سایش است. دلیل این موضوع سختی بالاتر، افزایش کسر سطحی و توزیع مناسب‌تر ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ این نمونه در مقایسه با نمونه‌های 2، 3 و 4 است. جهت مشخص نمودن مکانیزم سایش، سطح سایش نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترون روبشی(SEM) بررسی گردید که تصاویر آن در شکل (14-الف و 14-ب) برای نمونه خام و نمونه

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]



شکل 14- تصاویر تهیه شده توسط SEM الف- سطح سایش نمونه خام ب- سطح سایش نمونه شماره 1
ج- ذرات حاصل از سایش در نمونه خام د- ذرات حاصل از سایش در نمونه شماره 1.

شماره 1 آورده شده است، بررسی تصاویر نشان دهنده آنست که مکانیزم سایش نمونه‌ها، چسبان می‌باشد. همچنین با ایجاد کامپوزیت هیبریدی و افزایش سختی نمونه از میزان سایش چسبان کاسته شده است به نحوی‌که در نمونه خام، مناطق چسبان به صورت چندلایه مشاهده می‌گردد (سایش چسبان قوی)، اما در نمونه شماره 1 به صورت تک لایه چسبان است (سایش چسبان ضعیف). همچنین براده‌های حاصل از سایش در شکل (14-ج و 14-د) آورده شده است. همانطوری‌که ملاحظه می‌گردد در نمونه شماره 1 (شکل 14-د) در مقایسه با نمونه خام (شکل 14-ج)، ذرات حاصل از سایش ریزتر است. دلیل این موضوع افزایش سختی و ترد شدن نمونه‌ها می‌باشد. نتایج سایش در این تحقیق دارای تطابق خوبی با دیگر محققان است. به عنوان مثال جینگ مینگ تانگ و همکاران[38] نشان دادند که در کامپوزیت سطحی SiC/Al ساخته شده با فرایند اصطکاکی اغتشاشی، با کاهش اندازه ذراتSiC، مکانیسم‌های سایش از سایش ساینده به سایش چسبان تغییر کرد. همچنین شالوک و همکاران [20] نشان دادند که در کامپوزیت سطحی $Al5052/ZrO_2$ ساخته شده بوسیله FSP، مقاومت در برابر سایش در سرعت دورانی 1400 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 56 mm/min با افزودن ذرات ZrO_2 بهبود یافت.

4- نتیجه‌گیری

دراین‌تحقیق کامپوزیت هیبریدی‌سطحی $Al5052/ZrO_2/ZrSiO_4$ با روش FSP در سرعت چرخش 1400 دور در دقیقه و سرعت پیشروی 20، 25، 31/5 و 40 میلی‌متر بر دقیقه با موفقیت ایجاد گردید. نتایج نشان داد:

- در نمونه با کمترین سرعت پیشروی(20 میلی‌متر بر دقیقه) به دلیل آنکه ابزار زمان بیشتری برای تماس با زمینه و ذرات استحکام‌دهنده پیدا می‌کند، لذا گرمای بیشتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها ایجاد می‌شود که باعث توزیع مناسب‌تر و ریزشدن ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ در مقایسه با سایر نمونه می‌گردد. در نمونه فوق الذکر کسر سطحی ذرات و اندازه ذرات به ترتیب 18/6% و 0/075 میکرومتر است. این درحالی است که در نمونه‌های با سرعت پیشروی 25، 31/5 و 40 میلی‌متر بر

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

دقیقه این مقادیر به ترتیب 5/3% و 0/098 میکرومتر ،% 9/07 و 0/1 میکرومتر و 4/21% و 0/086 میکرومتر است.

- ایجاد کامپوزیت هیبریدی سطحی$Al5052/ZrO_2/ZrSiO_4$ با روش FSP منجر به افزایش سختی و مقادیر سایش نمونه‌ها در مقایسه با نمونه آلیاژ آلومینیوم 5052 می‌گردد. دلیل این موضوع ریز شدن ساختار ناشی از فرایند FSP، قرارگیری ذرات ZrO_2 و $ZrSiO_4$ در سطح نمونه‌های FSP شده در مقایسه با نمونه خام است. در بین نمونه‌های FSP شده نمونه با سرعت پیشروی 20 میلی‌متر بر دقیقه دارای بالاترین سختی و مقاومت سایشی است. به نحوی‌که سختی و مقاومت سایشی این نمونه در مقایسه با نمونه خام به ترتیب27/16 درصد و 68/9 درصد افزایش را نشان می‌دهد.

- بررسی سطح سایش نمونه‌ها حاکی از آنست که مکانیزم سایش در نمونه خام سایش چسبان قوی(مناطق چسبان چندلایه) می‌باشد. در اثر عملیات FSP و کامپوزیت سازی سطحی به دلیل ریز شدن دانه، توزیع مناسب ذرات و افزایش سختی، مکانیزم سایش به چسبان ضعیف(مناطق چسبان تک لایه) تبدیل شده است. همچنین براده‌های حاصل ازسایش در FSP به دلیل افزایش سختی، ریزتر می‌باشد.

منابع

1-V. Dutta, L. Thakur, B. Singh, A study on the effect of friction stir processing technique for the marine applications, *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd (2019) 5048–5056.
https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.499

2-Hofmann DC, Vecchio KS. Submerged friction stir processing (SFSP): An improved method for creating ultra-fine-grained bulk materials. Materials Science and Engineering A. 2005;402:234-41.
https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.04.032

3-Dolatkhah A, Golbabaei P, Besharati Givi MK, Molaiekiya F. Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing. Materials and Design 2012;37:458-464.
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.035

4- R.S. Mishra, M.W. Mahoney, S.X. McFadden, N.A. Mara, A.K. Mukherjee, "High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy," Scripta Materialia, Vol. 42, pp. 163-168, 2000.
https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00329-2

5-H. Mehdi , R. S. Mishra "Modification of Microstructure and Mechanical Properties of $AA6082/ZrB_2$ Processed by Multipass Friction Stir Processing" Journal of Materials Engineering and Performance. (2022).
https://doi.org/10.1007/s11665-022-07080-0

6-I. Charit, R.S. Mishra, "Low temperature superplasticity in a friction-stir-processed ultrafine-grained Al-Zn-Mg-Se alloy," Acta Materialia, Vol. 53, pp. 4211-4223, 2005.
https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.05.021

7-J.Karpagam, Chandrashekhar K.Patil, K.V.Pradeep Kumar, AnkurDutt Sharma, RaviKumarGoyal, MotiLal Rinawa, M.Sudhakar, "Fabrication of Al-Zr -Mg-Ni matrix composite with TiC reinforcement by multi-pass recursive friction stir processing and its characterization" *Materials Today: Proceedings*, Volume 59, Part 2, 2022, Pages 1485-1490.
https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.239

8-P.B. Berbon, W.H. Bingel, R.S. Mishra, C.C. Bampton, M.W. Mahoney, "Friction stir processing: a tool to homogenise nanocomposite aluminum alloys," Scripta Materialia, Vol. 44, pp. 61, 2001.
https://doi.org/10.1016/S1359-6462(00)00578-9

9-Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, "Effect of multiple-pass friction stir processing on microstructure and tensile properties of a cast aluminum-silicon alloy," Scripta Materialia, Vol. 54, pp. 1623, 2006.
https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.01.010

10-K. Kumar, S. V. Kailas, On the role of axial load and the effect ofinterface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy, Materials and Design, Vol. 29, No. 4, pp. 791-797, 2008.
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.012

11-Jiangmei He, Yijie Hu, Youping Sun, Wangzhen Li, Guojian Luo "Effect of single-pass friction stir processing parameters on the microstructure and properties of 2 mm thick AA2524" Materials Research Express, Volume 9, Number 9, 2022.
DOI 10.1088/2053-1591/ac8f20

12-S. Bharti, L. Thakur, S. Anand, V. Dutta, Nano-based Composites and Their Synthesis, Nanomater. Environ. Biotechnol. Springer, Cham. (2020) 141–161.
doi:10.1007/978-3-030-34544-0_9.

13-Wang FF, Li WY, Shen JJ, et al. Effect of tool rotational speed on the microstructure and mechanical properties of bobbin tool friction stir welding of Al–Li alloy. Materials and Design. 2015;86:933–940.
http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.096

14- Dinaharan I, Kalaiselvan K, Vijay SJ, et al. Effect of material location and tool rotational speed on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded aluminum alloys. Archives of civil and Mechanical Engineering. 2012;12(4):446–454.
https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.08.002

15-M. Jayaraman, R. Sivasubramanian, V. Balasubramanian. Establishing relationship between the base metal properties and friction stir welding process

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

DOI 10.1088/2631-8695/ab4b00
26- G. Minak, L. Cedchini, I. Boromei, and M. Ponte: Int. J. Fatigue, 2010, vol. 32, pp. 218–26.
DOI: 10.1520/E0003-01
27-American Society for Testing and Materials (2017) Standard test method for microindentation hardness of materials, ASTM E 384. ASM International, West Conshohocken.
DOI: 10.1520/E0384-22
28-American Society for Testing and Materials (2004) Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, ASTM G99. ASM International, West Conshohocken.
DOI: 10.1520/G0099-17
29-M. Raaft, T.S. Mahmoud, H.M. Zakaria, and T.A. Khalifa, "Microstructural, mechanical and wear behavior of A390/graphite and A390/Al2O3 surface composites fabricated using FSP," Materials Science and EngineeringA, 528, No. 18, 5741–5746 (2011).
https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.097.
30-M. Paidar, A. Khodabandeh, H. Najafi, and A. Sabour Rouh-aghdam, "Retracted article: An investigation on mechanical and metallurgical properties of 2024-T3 aluminum alloy spot friction welds," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80, Nos. 1–4, 183–197 (2015).
https://doi:10.1007/s00170-015-6997-2.
31- ShojaeefardMH, Akbari M, Asadi P and Khalkhali A The effect of reinforcement type on the microstructure, mechanical properties, and wear resistance of A356 matrix composites produced by FSP. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 91, pages1391–1407 (2017).
DOI:10.1007/s00170-016-9853-0
32- Mishra R S, SarathiD, P and KumarNFriction Stir Welding and Processing (Berlin: Springer, 2010).
DOI 10.1007/978-3-319-07043-8
33- Shafiei-Zarghani, A., S.F. Kashani-Bozorg, and A. Zarei-Hanzaki, Microstructures and mechanical properties of Al/Al2O3 surface nano-composite layer produced by friction stir processing. Materials Science and Engineering A, 2009. 500: p. 84-91.
https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.064
34- Shamsipur A, Kashani-Bozorg S.F, Zarei-Hanzaki A. The effects of friction-stir process parameters on the fabrication of Ti/SiC nano-composite surface layer. Surface and Coatings Technology. 2011; 206: 1372–1381.
https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.08.065
35-Qu, J., et al., Improving the tribological characteristics of aluminum 6061 alloy by surface compositing with sub-micro-size ceramic particles via friction stir processing. Wear, 2011. 271: p. 1940 – 1945.
https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.11.046
36- J. Gandra, R. Miranda, P. Vilica, A. Velhinho, J.P. Teixeira, Functionally graded materials produced by friction stir processing, Journal of Materials Procressing Technology 211, 1659 (2011).
DOI:10.1016/j.jmatprotec.2011.04.016
parameters of cast aluminium alloys. Materials and Design. Volume 31, Issue 9, October 2010, Pages 4567-4576.
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.040
16- Yupeng Li, Daqian Sun,Wenbiao Gong, "Effect of Tool Rotational Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of Bobbin Tool Friction Stir Welded 6082-T6 Aluminum Alloy " *Metals* 2019, *9*(8), 894.
https://doi.org/10.3390/met9080894
17-M. Barmouz, M.K. Besharati, "Fabrication of in situ Cu/SiC composites using multi-pass friction stir processing: Evaluation of microstructural, porosity, mechanical and electrical behavior," Composites, Vol. 42, pp. 1445-1453, 2011.
https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.06.010
18-S. Chainarong , P. Muangjunburee, S. Suthummanon., Friction Stir Processing of SSM356 Aluminium Alloy, Procedia Engineering 97 (2014) 732 – 740.
https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.303
19- Mohsen Bahrami, Kamran. Dehghani, Mohammad Kazem Besharati Givi, A novel approach to develop aluminum matrix nano-composite employing friction stir welding technique, Materials and Design, Volume 53, January 2014, Pages 217-225.
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.006
20- Shalok Bharti a , Nilesh D. Ghetiya a , Varun Dutta, "Investigating micro hardness and wear behavior of Al5052/ZrO_2 surface composite produced by friction stir processing "Materials Today, Volume 44, Part 1, 2021, Pages 52-57.
https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.318.
21-S. Mitrovic, M. Babic, B. Stojanovic, N. Miloradovic, M. Pantic and D. Dzunic, "Tribological potential of hybrid composites based on zinc and aluminum alloys reinforced with SiC and graphite particles", Tribology in Industry, Vol. 34(4), pp. 177–185, 2012. License CC BY-NC 4.0
22-A. Akinci, S. Sen, U. Sen, Friction and wear behavior of zirconium oxide reinforced PMMA composites, Composites Part B: Engineering. 56 (2014) 42–47.
https:// doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.015.
23-S. M. Bayazida, H. Farhangia , A. Ghahramani, Effect of Pin Profile on Defects of Friction Stir Welded 7075 Aluminum Alloy, Procedia Materials Science 11 (2015) 12 – 16.
https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.013
24- S.J. Vijay, N. Murugan, Influence of tool pin profile on the metallurgical and echanical properties of friction stir welded Al–10 wt.% TiB2 metal matrix Composite, Materials and Design. Volume 31, Issue 7, 2010, P.3585-3589.
https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.018
25-Ravi Butola , RanganathMS, Qasim Murtaza, Fabrication and optimization of AA7075 matrix surface composites using Taguchi technique via friction stir processing (FSP), Engineering Research Express 1 (2019) 025015.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]

37-Pardeep Kumar, Vipin Sharma, Dinesh Kumar, Shalom Akhai, "Morphology and Mechanical Behavior of Friction Stirred Aluminum Surface Composite Reinforced with Graphene" EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy, Vol. 10, Issue 01, pp105-110, March 2023. DOI:10.5109/6781056

38-Jingming Tang, Yifu Shen, Junping Li, "Influences of friction stir processing parameters on microstructure and mechanical properties of SiC/Al composites fabricated by multi-pin tool " Journal of Manufacturing Processes 38 (2019) 279–28. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.029

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2024.01]