



تولید و بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت سطحی ترکیبی A356-TiO₂-Gr با فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

سعید احمدی فرد¹، مسعود رکنیان²، فاطمه خدایی³، اکبر حیدرپور^{4*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه رازی، کرمانشاه

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

* همدان، صندوق پستی 65155579، heidarpour@hut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/3/23

پذیرش: 96/7/12

کلیدواژگان:

فرآوری اصطکاکی اغتشاشی

آلومینیم A356

نانو کامپوزیت سطحی

خواص مکانیکی

سایش

آلیاژ A356 یک آلیاژ ریختگی بوده که شامل آلومینیم، سیلیسیم و منیزیم است. این آلیاژ دارای استحکام و شکل پذیری خوب به همراه خواص ریختگی عالی، مقاومت به خوردگی بالا و سیالیت خوب است. این آلیاژ به صورت گسترده‌ای در صنایع ماشین‌سازی، هواپیماسازی، صنایع دفاعی و به ویژه صنایع خودروسازی به جای اجزاء فولادی استفاده می‌گردد. اما مقاومت به سایش کم این آلیاژها باعث شده که استفاده از آن‌ها محدود گردد. فرآوری اصطکاکی اغتشاشی یک روش حالت جامد است که برای اصلاح سطح، بهبود خواص مکانیکی و تولید کامپوزیت استفاده می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به اصلاح ریزساختار آلیاژ A356 و توسعه نانو کامپوزیت‌های سطحی A356/TiO₂ و A356/TiO₂/Gr پرداخته شده است. در ابتدا ترکیبی از سرعت‌های دورانی و پیشروی مختلف روی نمونه‌ها انجام شد تا نمونه بهینه با در نظر گرفتن نتایج ریزساختاری و خواص مکانیکی انتخاب شود و بهترین نتایج در سرعت دورانی 900 rpm و پیشروی 60 mm/min بدست آمد. از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی، میکروسختی، سایش و نانوفرونده برای مشخصه‌یابی سطح استفاده شد. بررسی ریزساختاری نشان داد که توزیع یکنواختی از ذرات تقویت کننده در سطح نانو کامپوزیت در منطقه اغتشاش وجود دارد. نتایج نشان داد که تشکیل نانو کامپوزیت سطحی منجر به بهبود خواص مکانیکی و رفتار سایشی آن می‌گردد. افزودن روانکار جامد گرافیت باعث بهبود خواص سایشی نانو کامپوزیت می‌شود.

Fabrication and investigation of microstructure and mechanical properties of A356-TiO₂-Gr surface hybrid nanocomposite by friction stir processing

Saeed Ahmadifard¹, Masoud Roknian¹, Fatemeh Khodaei², Akbar Heidarpour^{3*}

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

2- Department of Material Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Department of Metallurgy and Materials Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

* P.O.B. 65155579, Hamedan, Iran, heidarpour@hut.ac.ir

Keywords

Friction stir processing
A356 Al
Surface nanocomposites
Mechanical properties
Wear

Abstract

The A356 is a cast alloy which consist of aluminum, silicon and magnesium. This alloy has good strength and ductility with excellent casting properties, high corrosion resistance and good fluidity. This alloy is widely used in the automotive industry, aircraft, defense industry and especially the automotive industry as a substitution of steel components. Poor wear resistance of the alloys is major limitation for their use. Friction stir processing (FSP) is a recognized surfacing technique as it overcomes the problems of fusion route surface modification methods. In this study, friction stir processing was utilized to incorporate TiO₂ and graphite particles into the matrix of an A356 alloy to form surface hybrid nanocomposite. For fabrication of nanocomposite a constant tool rotation rate of 900 rpm and travel speed of 60 mm/min with a tool tilt angle of 3 degree was used. Keeping in view of the requirement for improving wear resistance of A356 alloy, friction stir processing was attempted for surface modification with TiO₂ and graphite powders. SEM, metallography, hardness, nanoindentation and pin-on-disc wear testing were used for characterizing the surface of nanocomposite. Microstructural analysis showed a uniform distribution of reinforcement particles inside the nugget zone. The surface nanocomposite results in enhanced properties in mechanical properties and wear resistance compared to the behavior of the base metal. Addition of solid lubricant graphite improve tribological properties of the nanocomposite.

1-مقدمه

ریختگی آلومینیم محسوب می‌شوند. یکی از آلیاژهای ریختگی آلومینیم آلیاژ A356 است که به علت قابلیت ریختگری خوب یکی از پرکاربردترین آلیاژهای تجاری Al-Si-Mg در صنایع مختلف است [1-2]. اما مقاومت در برابر سایش

آلیاژهای آلومینیم حاوی سیلیسیم به عنوان عنصر اصلی، به علت سیالیت زیاد که ناشی از وجود حجم نسبتاً زیاد یوتکتیک Al-Si است، مهم‌ترین آلیاژهای

Please cite this article using:

Ahmadifard, S. Roknian, M. Khodaei, F. and Heidarpour, A., "Fabrication and investigation of microstructure and mechanical properties of A356-TiO₂-Gr surface hybrid nanocomposite by friction stir processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 61-68, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

پژوهش آن‌ها با انجام دو پاس فرآیند روی این کامپوزیت توزیع ذرات بهبود می‌یابد. احمدی‌فرد و همکاران [21] به بررسی تاثیر اثر تعداد پاس روی ریزساختار و خواص مکانیکی پرداختند و گزارش دادند که با افزایش تعداد پاس میانگین اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی آلومینیم 5083 کاهش و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. سرینیواسو⁴ و همکاران [22] به بررسی تاثیر اندازه ذرات خودروانکار MoS₂ بر رفتار سایشی کامپوزیت سطحی ترکیبی A356-B4C-MoS₂ پرداختند و نشان دادند که با کاهش اندازه ذرات میزان مقاومت به سایش بهبود می‌یابد.

آلیاژ آلومینیم A356 کاربردهای فراوانی در صنایع هوافضا و اتومبیل دارد اما وجود تخلخل، تیغه‌های سوزنی شکل درشت سیلیسیم و دندریت‌های درشت آلومینیم اولیه در ساختار ریختگی باعث کاهش خواص مکانیکی و از جمله خواص سایشی می‌شود. بنابراین هدف از انجام این پژوهش تولید نانو کامپوزیت سطحی ترکیبی A356/TiO₂/Gr توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی ریزساختار، خواص مکانیکی و سایشی آن می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش، آلومینیم A356 است که جزء آلیاژهای ریختگی به حساب می‌آید. ابعاد نمونه‌ها 6×50×150 میلیمتر انتخاب شد و ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فلز پایه

Table 1 Chemical composition of A356 alloy

Al	Si	Mg	Fe	Ni	Cr	Sn	ماده
پایه	6.67	0.38	0.16	0.01	0.005	0.002	درصد وزنی

برای اعمال ذرات تقویت کننده، سوراخ‌هایی در سطح ورق با عمق و قطر 2 میلیمتر و با فاصله 2 میلیمتر از یکدیگر ایجاد شد. ابزار مورد استفاده در این پژوهش از جنس فولاد گرم کار (H13) با سختی 52 HRC انتخاب گردید. هندسه ابزار به صورت استوانه‌ای رزوه‌دار انتخاب شد تا با توجه به جنس کار یعنی تولید کامپوزیت‌های سطحی بتواند سیلان و اغتشاش لازم جهت توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده بر سطح کامپوزیت‌ها را ایجاد کند. قطر پین 6 میلیمتر و ارتفاع آن 4 میلیمتر و قطر شانه نیز 20 میلیمتر انتخاب گردید.

همچنین در این پژوهش از دو نوع پودر اکسید تیتانیم با میانگین اندازه 50 نانومتر و درصد خلوص 99.99 درصد و گرافیت با میانگین اندازه کمتر از 100 میکرومتر و با درصد خلوص 99 درصد مورد استفاده قرار گرفت که در شکل 1 به ترتیب تصویر TEM و SEM آن‌ها آورده شده است. تصویر TEM از نانو ذرات اکسید تیتانیم توسط شرکت سازنده گرفته شده است.

در ابتدا فرآیند FSP با سرعت‌های دورانی (400، 600 و 900 دور بر دقیقه) و پیشروی متفاوت (60، 85 و 110 میلیمتر بر دقیقه) روی نمونه‌ها انجام شد تا نمونه‌ای که از نظر ریزساختاری و خواص مکانیکی نتیجه مطلوبتری دارد به عنوان نمونه بهینه انتخاب شود. در نهایت نمونه بهینه، در سرعت دورانی 900 دور بر دقیقه و پیشروی 60 میلیمتر بر دقیقه بدست آمد و همچنین زاویه انحراف برای همه نمونه‌ها 3 درجه در نظر گرفته شد. به

کم این نوع از آلیاژهای آلومینیم باعث محدودیت کاربرد آن‌ها در موارد مختلف می‌شود. در کاربردهایی که تماس سطحی وجود دارد عمر مفید اجزاء به وسیله خواص سطحی از جمله مقاومت به سایش مشخص می‌شود [3]. از طرف دیگر، مطلوب‌تر این است که تنها لایه‌ی سطحی اجزاء به وسیله تقویت کننده‌ها، تقویت شوند در حالی که حجم ماده ساختار اصلی خود از جمله شکل‌پذیری خوب و ضریب هدایت حرارتی خود را حفظ کرده است. روش‌های مختلفی برای ساخت کامپوزیت‌های سطحی پایه فلزی وجود دارد از جمله پاشش حرارتی، لایه نشانی با لیزر، آلیاژسازی سطحی با لیزر و استفاده از اشعه پرتو الکترونی [4]. در این تکنیک‌ها جلوگیری از واکنش بین فازهای تقویت کننده و فلز پایه، رشد نانو ذرات و جلوگیری از تشکیل فازهای نامطلوب مشکل است. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی¹ (FSP) یک فناوری مهندسی سطح است که می‌تواند با حذف موضعی عیوب ریختگی و اصلاح ریزساختار به بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری [5]، افزایش مقاومت به خوردگی [6]، سایش و سختی [7-8]، خستگی [9] و افزودن کاربردی و بهبود سایر خواص منجر شود [10].

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی یک روش بر پایه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است که در سال 1991 میلادی توسط موسسه جوش انگلستان² ابداع شد و در سال‌های اخیر پیشرفت چشم‌گیری در این زمینه صورت گرفته است [11]. اگرچه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روش اصلاح دانه‌بندی پیشرفت نموده است، اما یک فرآیند جذاب برای ساخت کامپوزیت است [12]. در سال‌های اخیر از این روش برای ترکیب کردن ذرات سرامیکی با سطح آلیاژهای مختلف از جمله آلومینیم [13]، منیزیم [14]، مس [15]، تیتانیم [16] و غیره به منظور تولید کامپوزیت‌های سطحی استفاده شده است.

مزیت استفاده از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی برای ایجاد کامپوزیت سطحی این است که:

- در حالت جامد بوده و واکنش مضر بین ذرات تقویت کننده و فلز پایه را به حداقل می‌رساند و در نتیجه از تشکیل فازهای مضر جلوگیری می‌کند.
- موجب اصلاح ریزساختار سطحی می‌گردد.
- فرآیندی نسبتاً ساده و متغیرهای آن قابل تنظیم است [12].

کارهای متعددی در این زمینه صورت گرفته است مثلاً مظاهری و همکاران [17] موفق به تولید نانو کامپوزیت سطحی A356/Al₂O₃ شدند و گزارش دادند که میزان مقاومت به سایش نسبت به فلز پایه افزایش پیدا کرده است و همچنین ضریب اصطکاک نیز کاهش داشته است. علی‌دخت و همکاران [18] موفق به تولید کامپوزیت ترکیبی سطحی A356/SiC/MoS₂ شدند و نشان دادند که میزان سایش کامپوزیت ترکیبی نسبت به کامپوزیت سطحی A356/SiC و فلز پایه بهتر شده است. احمدی‌فرد و همکاران [19] به بررسی تاثیر ذرات میکرومتری و نانومتری اکسید تیتانیم پرداختند و نشان دادند که تاثیر ذرات نانومتری بر خواص مکانیکی و سایشی بسیار مطلوب‌تر از ذرات میکرومتری است. باثوری³ و همکاران [20] مطالعاتی بر نحوه انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر کامپوزیت ریختگی Al-TiC انجام دادند. طبق

¹ Friction Stir Processing

² The welding institute (TWI)

³ Bauri

⁴ Srinivasu

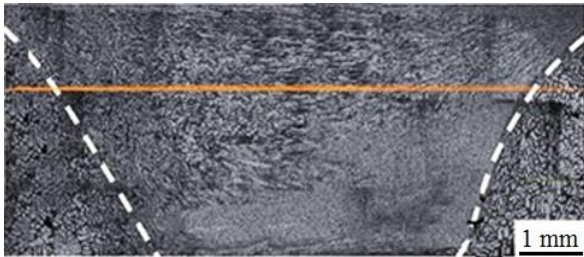


Fig. 2 Position of the microhardness test

شکل 2 محل انجام آزمون میکروسختی

آزمون سایش بصورت پین بر روی دیسک⁷ و بطور رفت و برگشتی طبق استاندارد ASTM G99 در دمای محیط توسط دستگاه آرکا صنعت آروین⁸ TR 20 انجام شد. قبل از انجام آزمون سایش، نمونه‌ها تا سنباده 1200 پوسابکاری شدند. آزمون سایش به مسافت 1000 متر و بارهای اعمالی 10 نیوتن و با سرعت 0.14 متر بر ثانیه انجام شد. جنس ماده ساینده از جنس فولاد AISI D3 که سختی آن 58 HRC بود، انتخاب شد. به منظور ثبت و اندازه‌گیری کاهش وزن نمونه‌ها از یک ترازو با حساسیت ± 0.1 میلی‌گرم استفاده گردید و همچنین نیروی اصطکاک بطور اتوماتیک توسط دستگاه ثبت و در نهایت سطح ساییده شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار

شکل 3 ریزساختار فلز پایه مورد استفاده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که نشان داده شده است ساختار آلیاژ A356 ریختگی شامل مناطق آلومینیم آلفا اولیه و مناطق یوتکتیک آلومینیم - سیلیسیم است.

شکل 4 ریزساختار قسمت‌های مختلف نمونه فرآوری شده بدون پودر را نشان می‌دهد. پس از انجام فرآیند FSP قسمت‌های مختلفی شامل ناحیه اغتشاشی⁹، ناحیه متأثر ترمومکانیکی¹⁰ و ناحیه متأثر از حرارت¹¹ ایجاد می‌شود [23]. به علت تمرکز حرارت در ناحیه اغتشاشی، ناحیه متأثر از حرارت قابل تشخیص نیست.

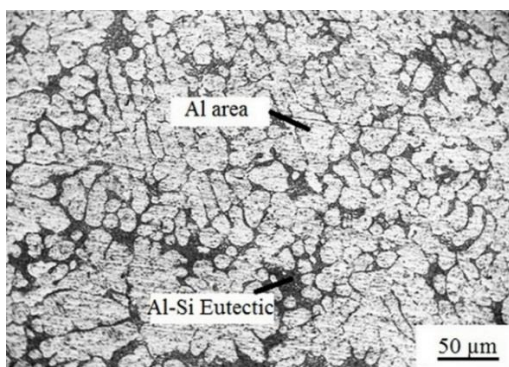


Fig. 3 Microstructure of base metal

شکل 3 ریزساختار فلز پایه

شکل 4 الف ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد که شامل تیغه‌های سوزنی شکل سیلیسیم و دندریته‌های درشت آلومینیم است. بدلیل اینکه

منظور تسهیل جریان مواد تعقر 6 درجه در سطح شانه ایجاد شد. به منظور توزیع بهتر ذرات در زمینه، فرآیند در 3 پاس انجام گردید و در هر پاس جهت چرخش ابزار تغییر داده شد تا توزیع ذرات بهتر صورت بگیرد، تا از احتمال انباشه شدن آن جلوگیری شود و بهترین نتیجه بدست آید.

برای بررسی ریزساختار، نمونه‌هایی از سطح مقطع قسمت فرآوری شده توسط گیوتین بریده شد، سپس این نمونه‌ها تا سنباده 3000 پوسابکاری و بعد برای بر طرف کردن ناصافی‌های سطح و صیقلی کردن آن، توسط دستگاه پولیش گردید. برای حکاکی کردن نمونه‌ها از محلول کلرا¹ که ترکیب شیمیایی آن در جدول 2 آورده شده است، استفاده گردید. زمان نگهداری نمونه‌ها در داخل محلول حکاکی در حدود 10 ثانیه بود. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری (مدل آنیون² MR 500) و الکترونی روبشی (مدل ژئول³ JFM-840A) استفاده گردید. همچنین به منظور تشخیص ذرات تقویت کننده و زمینه، آنالیز عنصری گرفته شد.

آزمون نانوفروورونده⁴ مشتمل بر فرو رفتن یک فروورنده با هندسه و جنس مشخص، با اعمال بار بسیار کم در سطح نمونه مورد آزمایش است. برای انجام این آزمایش از دستگاه NHTX S/N: 01-03119 استفاده شد و دستگاه مزبور مجهز به میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ نیروی اتمی و میز کنترل موقعیت نمونه با دقت 0.25 میکرومتر بود. محدوده بار اعمالی توسط دستگاه بین 0.1 تا 500 میلی نیوتن، دقت اندازه‌گیری بار 0.04 میکرونیوتن، ماکزیمم عمق نفوذ 200 میکرون و دقت اندازه‌گیری عمق 0.04 نانومتر بود. فرو رونده از جنس الماس و نوع برکوویچ⁵ مدل B-J87 است.

آزمون سختی به روش میکرو ویکرز از سطح مقطع نمونه‌ها توسط دستگاه بوهلر⁶ LTD 80044 و طبق استاندارد ASTM E384 در دمای محیط و میزان بار اعمالی 200 گرم و به مدت 20 ثانیه انجام شد. در شکل 2 تصویری از محل انجام آزمون سختی نشان داده شده است.

جدول 2 ترکیب محلول حکاکی

Table 2 Chemical composition of etching solution

H ₂ O	HF	HCl	HNO ₃
95 ml	1 ml	1.5 ml	2.5 ml

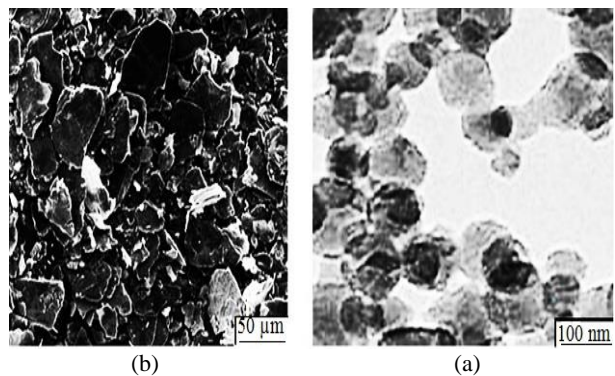


Fig. 1 (a) TEM micrograph of TiO₂ particles (b) SEM micrographs of Gr

شکل 1 الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی تونلی از ذرات اکسید تیتانیم (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات گرافیت

¹ Keller

² Unione

³ Jeol

⁴ Nanoindentation

⁵ Berkovich

⁶ Buehler

⁷ Pin on disk

⁸ Arca sanat Arvin

⁹ Stir Zone (SZ)

¹⁰ Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)

¹¹ Heat Affected Zone

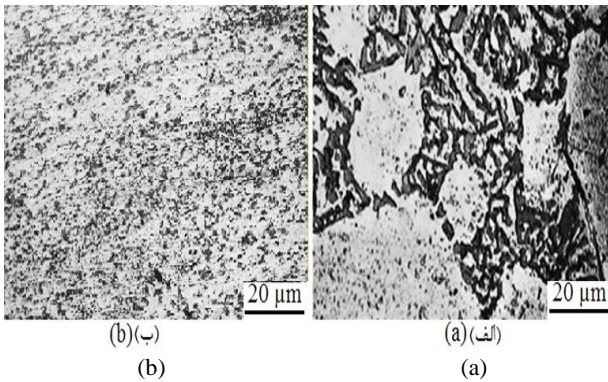


Fig. 5 OM micrograph of structure and Si partial dispersion (a) BM (b) FSPed without powder sample

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختار و توزیع ذرات سیلیسیم (الف) فلز پایه (ب) نمونه FSP شده بدون پودر

تصاویر SEM در شکل 6 تایید کننده تصاویر شکل 5 می‌باشد. شکل 6 الف تصویر SEM از فلز پایه و شکل 6 ب نیز ناحیه اغتشاشی نمونه فرآوری شده بدون پودر را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است ماده موجود در ناحیه فرآوری شده، متحمل اغتشاش و اختلاط شدید شده است و این امر به شکستن چشم‌گیر تیغه‌های سوزنی شکل درشت سیلیسیم و دندریتهای درشت اولیه آلومینیم منجر شده است.

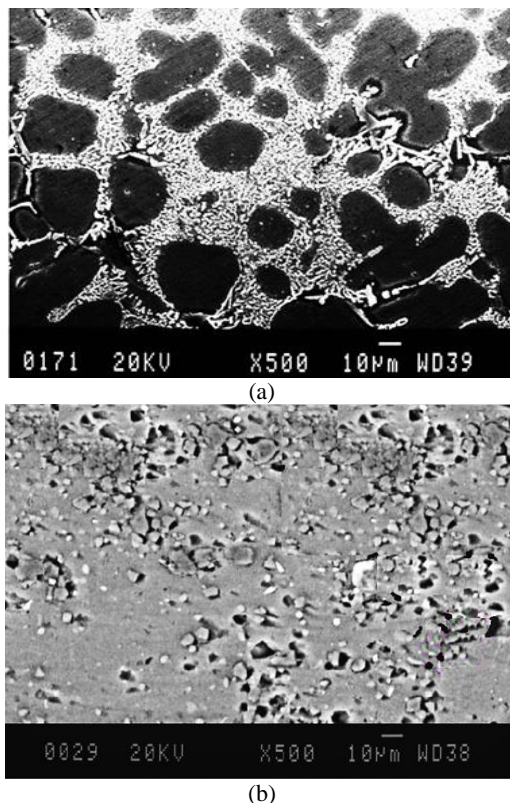


Fig. 6 SEM micrograph of size and Si partial dispersion (a) BM (b) FSPed without powder sample

شکل 6 تصاویر SEM از اندازه و توزیع ذرات سیلیسیم در (a) فلز پایه (b) ناحیه اغتشاشی نمونه FSP شده بدون پودر

شکل 7 الف تصویر SEM از ناحیه اغتشاشی نمونه حاوی ذرات TiO_2 و گرافیت را نشان می‌دهد و شکل 7 ب همان شکل 7 الف است که در

ذرات سیلیسیم ترجیح می‌دهند که در مرز دندریتهای آلومینیم اولیه پخش شوند لذا توزیع این ذرات در زمینه بصورت غیریکنواخت است. شکل 4 ب نیز ناحیه متأثر ترمومکانیکی را نشان می‌دهد که یک ساختار بهم ریخته ناشی از تاثیر حرارت و تغییر فرم پلاستیکی زیاد دیده می‌شود. شکل 4 ج ناحیه اغتشاشی بدون ساختار دندریتی را نشان می‌دهد که سیلیسیم‌های یوتکتیک به صورت یکنواخت در آن توزیع شده است. ایجاد اغتشاش شدید در حین فرآیند باعث بسته شدن تخلخل‌ها و با شکستن تیغه‌های بزرگ سیلیسیم، اندازه متوسط و نسبت طول و عرض آن‌ها را کاهش داده و ذرات را به صورت یکنواخت در ناحیه اغتشاشی توزیع شده است.

جزئیات مربوط به مورفولوژی، اندازه و توزیع ذرات سیلیسیم با بزرگ‌نمایی بالاتر در شکل 5 نشان داده شده است. شکل 5 الف تیغه‌های سوزنی شکل درشت سیلیسیم با توزیع غیریکنواخت را در نمونه‌های ریختگی A356 نشان می‌دهد. شکل 5 ب چگالی بالایی از ذرات ریز و تقریباً هم‌محور را که به صورت یکنواخت در تمام ناحیه توزیع شده‌اند، نشان می‌دهد.

برای بدست آوردن اندازه دانه از نرم‌افزار ایمیج جی¹ استفاده و طبق استاندارد ASTM E112 انجام شد. میزان خط ± 0.1 میکرومتر بود. میانگین اندازه سیلیسیم یوتکتیک در فلز پایه 68 میکرومتر، در نمونه بدون پودر 17 میکرون، در نمونه حاوی ذرات گرافیت و اکسید تیتانیوم 9.5 میکرومتر و در نمونه حاوی اکسید تیتانیوم 7 میکرون بدست آمد.

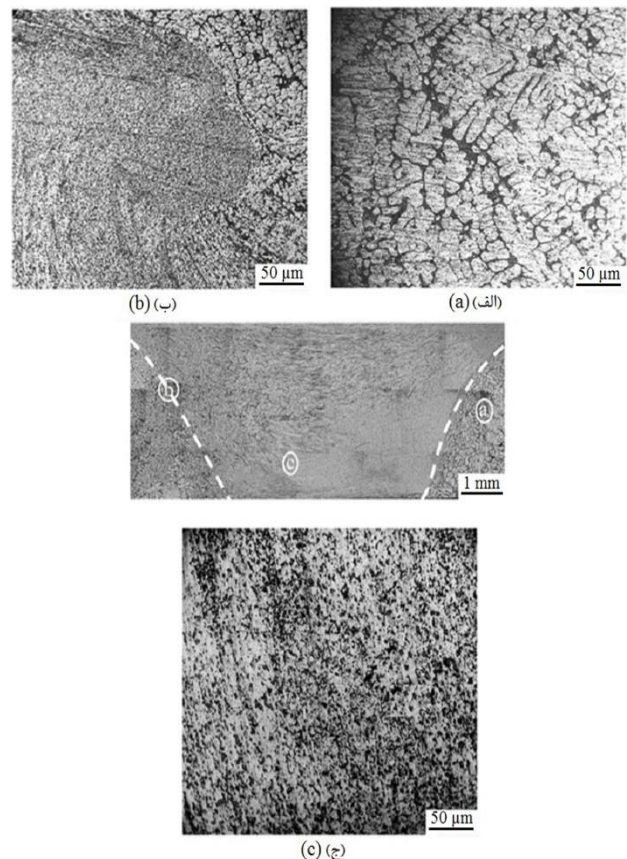


Fig. 4 Micrograph and Micrograph the different zone of FSPed without powder sample (a) BM zone (b) TMAZ (c) SZ

شکل 4 تصاویر ماکرو و میکروسکوپی از نواحی مختلف نمونه FSP شده بدون پودر (a) ناحیه فلز پایه (b) ناحیه ترمومکانیکی (c) ناحیه اغتشاشی

¹ Image J

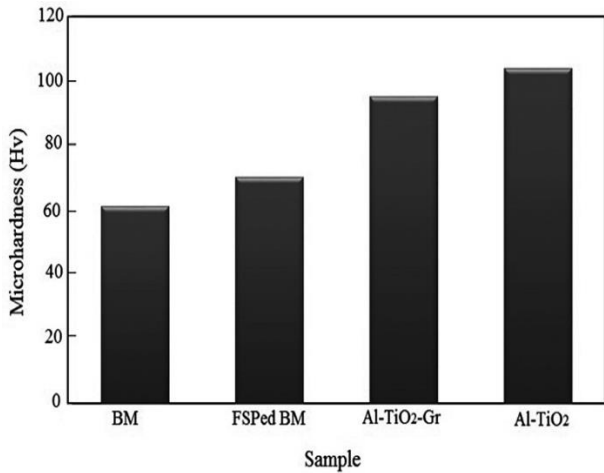


Fig. 8 profile microhardness of the BM and FSP samples

شکل 8 نمودار میکروسختی فلز پایه و نمونه‌های FSP شده

همچنین در بین نواحی مختلف ایجاد شده توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی بیشترین سختی در ناحیه اغتشاشی است. طبق گزارش شینودا¹ و همکاران [24] علت افزایش سختی در ناحیه اغتشاشی اصلاح ساختار، حضور دانه‌های ریز و هم‌محور و تبلور مجدد یافته ناشی از دمای بالا و تغییر شکل پلاستیکی شدید در این ناحیه توجه کننده این سختی بالا نسبت به سایر نواحی بوجود آمده است. همچنین وجود ذرات تقویت کننده اکسید تیتانیوم در افزایش سختی ناحیه اغتشاشی تاثیرگذار است که با توزیع یکنواخت باعث کاهش بیشتر اندازه دانه می‌شود که در واقع باعث رخ دادن حالت قفل شدگی² ذرات می‌شود و همچنین این ذرات مانند مانعی در برابر حرکت نایجابی‌ها عمل می‌کند [25].

3-3- آزمون نانوفرورونده

به منظور تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی تولیدی و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های اولیه، از آزمون نانوفرورونده که قابلیت اندازه‌گیری دقیق خواص مکانیکی را به صورت موضعی و در مقیاس نانومتری دارد، استفاده شد. شکل 9 نمودار بار بر حسب عمق نفوذ به دست آمده از آزمون نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. تفاوت بین سختی نمونه‌ها از اختلاف در عمق نفوذ ماکزیمم آشکار است. با توجه به منحنی‌ها واضح است که سختی کامپوزیت‌های سطحی بالاتر از فلز پایه می‌باشد. اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روی فلز پایه و انحلال رسوبات ناشی از آن، افزایش جزئی سختی و مدول یانگ را در پی داشته است [26]. توزیع ذرات تقویت کننده در زمینه، مقادیر سختی و مدول الاستیک کامپوزیت‌های سطحی را افزایش داده است. بهترین نتیجه مربوط به نمونه دارای 100 درصد TiO₂ بدست آمد. در جدول 3 نتایج حاصل از این آزمون آورده شده است.

3-4- آزمون سایش

شکل 10 نمودار کاهش وزن و نرخ سایش بر حسب مسافت لغزش را در بار اعمالی 10 نیوتن را برای فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش مسافت لغزش میزان نرخ سایش و کاهش وزن نمونه‌ها با افزایش مسافت لغزش افزایش پیدا کرده است. در بین نمونه‌ها کمترین و بیشترین میزان کاهش وزن و نرخ سایش به ترتیب مربوط

بزرگنمایی بالاتر گرفته شده که محل انجام آن را در شکل 7 الف مشخص شده است. همانطور که مشخص است توزیع ذرات در زمینه یکنواخت بوده و این تاثیر خوبی در بهبود خواص مکانیکی دارد و همچنین مشخص است که میانگین اندازه ذرات گرافیت به شدت کاهش پیدا کرده که علت آن اغتشاش، تغییر شکل پلاستیک و فشاری که ابزار وارد آورده است، می‌باشد [18]. همچنین از ذرات موجود در ساختار آنالیز عنصری گرفته شد و مطابق با شکل 7 الف و ب نتایج نشان داد که نقاط A و B به ترتیب گرافیت و TiO₂ هستند.

3-2- آزمون میکروسختی

شکل 8 نمودار میکروسختی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است میزان سختی در نمونه‌های فرآوری شده بیشتر از فلز پایه شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، برای همه نمونه‌های فرآوری شده سختی در قسمت پیشرو و پسرو تقریباً یکسان است و این مسله بیانگر آن است که حرارت ورودی به هر دو قسمت ناحیه اغتشاشی تقریباً یکسان بوده است. بر اساس نتایج ریزساختاری تاثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر توزیع سختی روی آلیاژ A356 ریختگی قابل توجه است. مقادیر میکروسختی به محل فرود سختی‌سنجی بستگی دارد. لذا با توجه به اینکه نقاط نرم در آلیاژهای ریختگی که ناشی از تخلخل و هسته‌های دندردیتی آلومینیم است، توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی محدود شده‌اند. بهترین نتیجه در این آزمون مربوط به نمونه‌ای که دارای 100 درصد TiO₂ است، بدست آمد بطوری که سختی فلز پایه از 60 HV به 105 HV رسید.

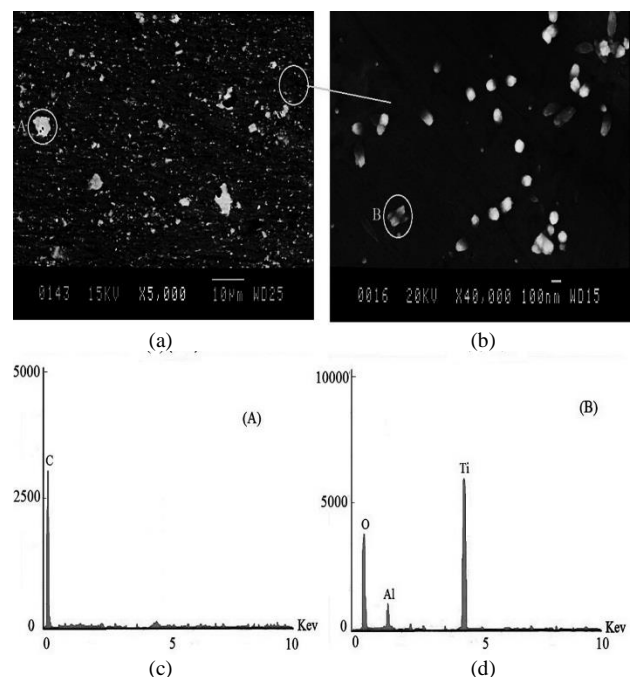


Fig. 7 SEM micrograph of the sample has particles TiO₂ and Gr (a) SZ (b) Higher magnification (c) and (d) The results of EDS of the marked spots

شکل 7 تصاویر SEM از نمونه دارای ذرات گرافیت و TiO₂ (الف) ناحیه اغتشاشی (ب) بزرگنمایی بالاتر (ج) و (د) نتایج آنالیز عنصری از نقاط مشخص شده

¹ Shinoda

² pinning

جدول 3 خواص مکانیکی فلز پایه و نمونه‌های FSP شده با استفاده از آزمون نانوفرورونده

Table 3 Mechanical characterizations of BM and FSPed sample using nanoindentation technique

sample	H _{IT} (MPa)	HV _{IT} (Vickers)	E _{IT} (GPa)
BM	808	65	75
FSPed BM	823	74	79
Al-TiO ₂ -Gr	994	102	82
Al-TiO ₂	1182	112	86

علت افزایش مقاومت به سایش نمونه‌های فرآوری شده 1- افزایش سختی نسبت به فلز پایه، 2- اصلاح ریزساختار، 3- کاهش اندازه دانه، 4- وجود ذرات تقویت کننده در زمینه و 5- کاهش بار تماسی بین کامپوزیت و پین در مقایسه با فلز پایه است [27].

شکل 11 نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش در بار اعمالی 10 نیوتن را نشان می‌دهد. کمترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه دارای ذرات گرافیت و TiO₂ است بطوری‌که حدود 33 درصد نسبت به فلز پایه کاهش داشته است.

نکته قبل توجه این است که در نمونه دارای ذرات TiO₂ اگرچه دارای سختی بالاتری نسبت به نمونه دارای ذرات TiO₂ و گرافیت است اما این افزایش سختی سبب بالا رفتن نرخ سایش از سطح متقابل سایش نسبت به نمونه دارای ذرات TiO₂ و گرافیت می‌شود. افزایش سختی کامپوزیت سطحی سبب بدتر شدن قابلیت ماشین کاری کامپوزیت می‌گردد. اشکال دیگر ذرات سرامیکی جهت بهبود خواص سایشی، جدا شدن ذرات سرامیکی از کامپوزیت و قرار گرفتن این ذرات در بین سطوح سایش و ایجاد سایش خراشان سه جرمی می‌شود. اما در نمونه دارای ذرات گرافیت که این ماده یک خودروانکار جامد است باعث ایجاد یک فیلم روانکار در سطح سایشی شده و بدین ترتیب ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند. در واقع با کاهش ضریب اصطکاک میزان تغییر شکل پلاستیک در سطح سایش شده کمتر و باعث تبدیل شدن سایش چسبان به سایش خراشان می‌شود. گرافیت موجود باعث کاهش تنش برشی بین ماده ساینده و سطح نمونه می‌شود [28].

دلیل بهبود ضریب اصطکاک نمونه بدون پودر نسبت به فلز پایه اصلاح ریزساختار و افزایش سختی احتمالاً بخاطر تشکیل رسوبات Mg₂Si است، که باعث کاهش چسبندگی بین سطح نمونه و پین ساینده شده است [29]. همچنین این موضوع به خوبی در تصاویر SEM که در شکل 12 آورده شده است مشخص است. همچنین در سطح نمونه دارای گرافیت و TiO₂ نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است. همچنین میزان کنده شدن ماده نیز کمتر بوده که این نشان دهنده افزایش مقاومت به سایش این نمونه است. سطح سایش فلز پایه و نمونه بدون پودر بصورت لایه لایه است که علت آن بوجود آمدن تنش برشی در سطح تماس نمونه‌ها و ماده ساینده است. همچنین وجود ذرات تقویت کننده می‌تواند به عنوان محل تمرکز تنش باشد، اما اگر توزیع ذرات تقویت کننده یکنواخت باشد، می‌تواند مانع رشد ترک در هنگام سایش شود که در نتیجه میزان کنده شدن ماده از سطح کمتر می‌شود. مکانیزم غالب در سایش نمونه‌ها از نمونه خراشان و چسبان است ولی در فلز پایه نوع چسبان بیشتر مشاهده می‌شود [18,28].

به نمونه‌ای که دارای گرافیت و TiO₂ و فلز پایه بدست آمد به طوری که میزان کاهش وزن و نرخ سایش به ترتیب حدود 30 و 36 درصد کاهش داشته است.

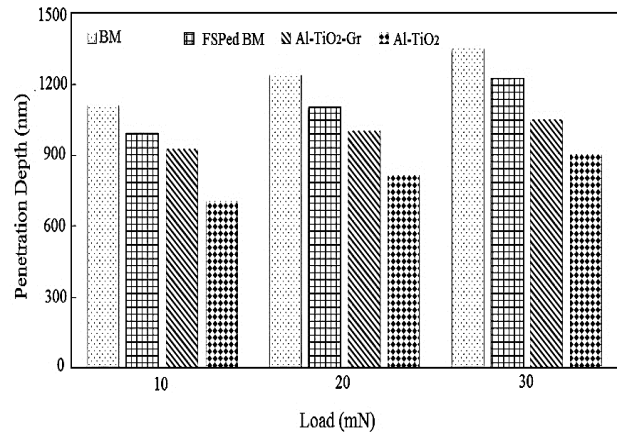


Fig. 9 Load versus penetration depth curves of BM and FSP sample
شکل 9 نمودار عمق نفوذ در بارهای مختلف برای فلز پایه و نمونه‌های FSP شده

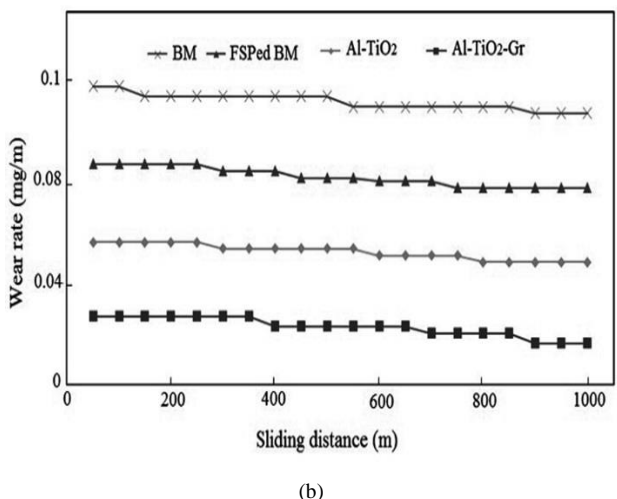
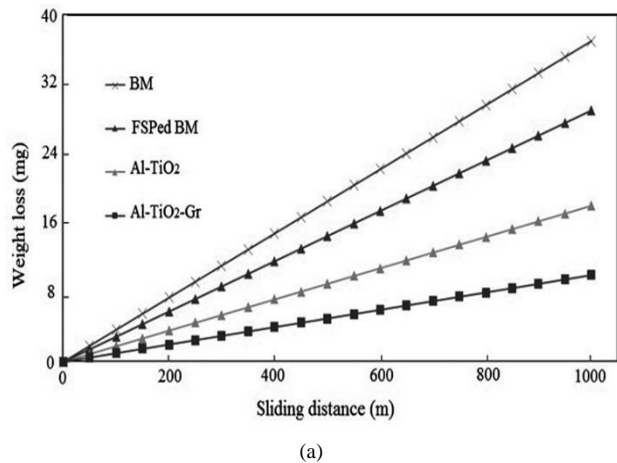


Fig. 10 The results of the wear test (a) Variation of weight loss with the sliding distance (b) Variation of wear rate with the sliding distance

شکل 10 نتایج آزمون سایش (a) تغییرپذیری کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش (b) تغییرپذیری نرخ سایش بر حسب مسافت لغزش

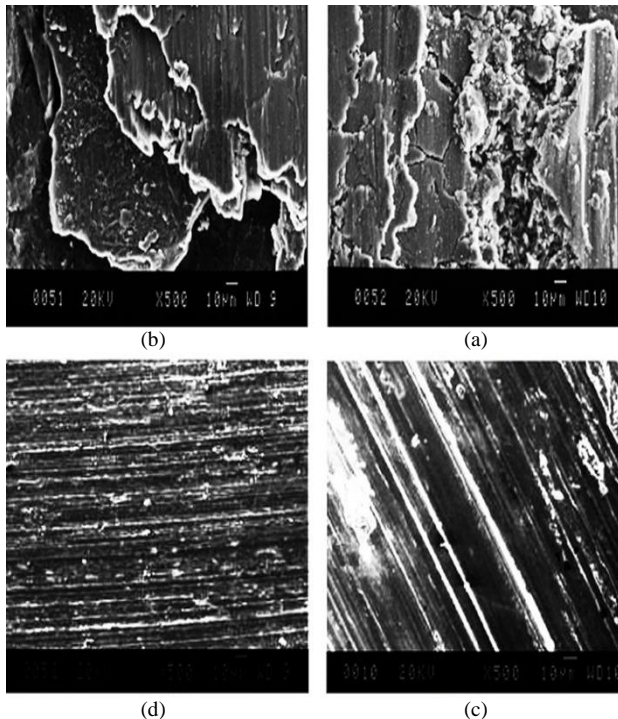


Fig. 12 SEM Image of the worn surface (a) BM (b) FSPed BM (c) sample has TiO_2 (d) sample has Gr and TiO_2

شکل 12 تصویر SEM از سطح ساییده شده (الف) فلز پایه (ب) فلز پایه FSP شده (ج) نمونه دارای TiO_2 (د) نمونه دارای گرافیت و TiO_2

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر استفاده از ذرات گرافیت و TiO_2 بر ریزساختار، خواص مکانیکی و سایش نانو کامپوزیت سطحی ترکیبی A356 که توسط فرآوری اصطکاکی اغتشاشی تولید شده بود، پرداخته شد و نتایج زیر بدست آمد:

- اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی روی آلومینیم A356 منجر به خرد شدن قابل ملاحظه ذرات سوزنی شکل درشت سیلیسیم و دندریتهای درشت اولیه آلومینیم و توزیع یکنواخت ذرات ریز سیلیسیم در ناحیه اغتشاشی شد و این باعث افزایش سختی در ناحیه اغتشاشی شد.
- با انجام فرآیند روی آلیاژ A356 خواص مکانیکی بهتر شد که با اضافه کردن ذرات تقویت کننده نیز خواص مکانیکی نسبت به نمونه بدون هم افزایش پیدا کرد.
- اضافه کردن ذرات TiO_2 باعث افزایش مقاومت به سایش کامپوزیت شد. اما با اضافه کردن ذرات گرافیت در نانو کامپوزیت سطحی باعث تشکیل فیلم روانکار بر سطح شد که این تاثیر قبل توجه‌ای در افزایش مقاومت به سایش نسبت به کامپوزیت شد بطوری ضریب اصطکاک کاهش پیدا کرد.
- مکانیزم غالب سایش نمونه‌ها از نوع سایش خراشان همراه با ایجاد لبه، کندگی و لهیدگی سطح است.

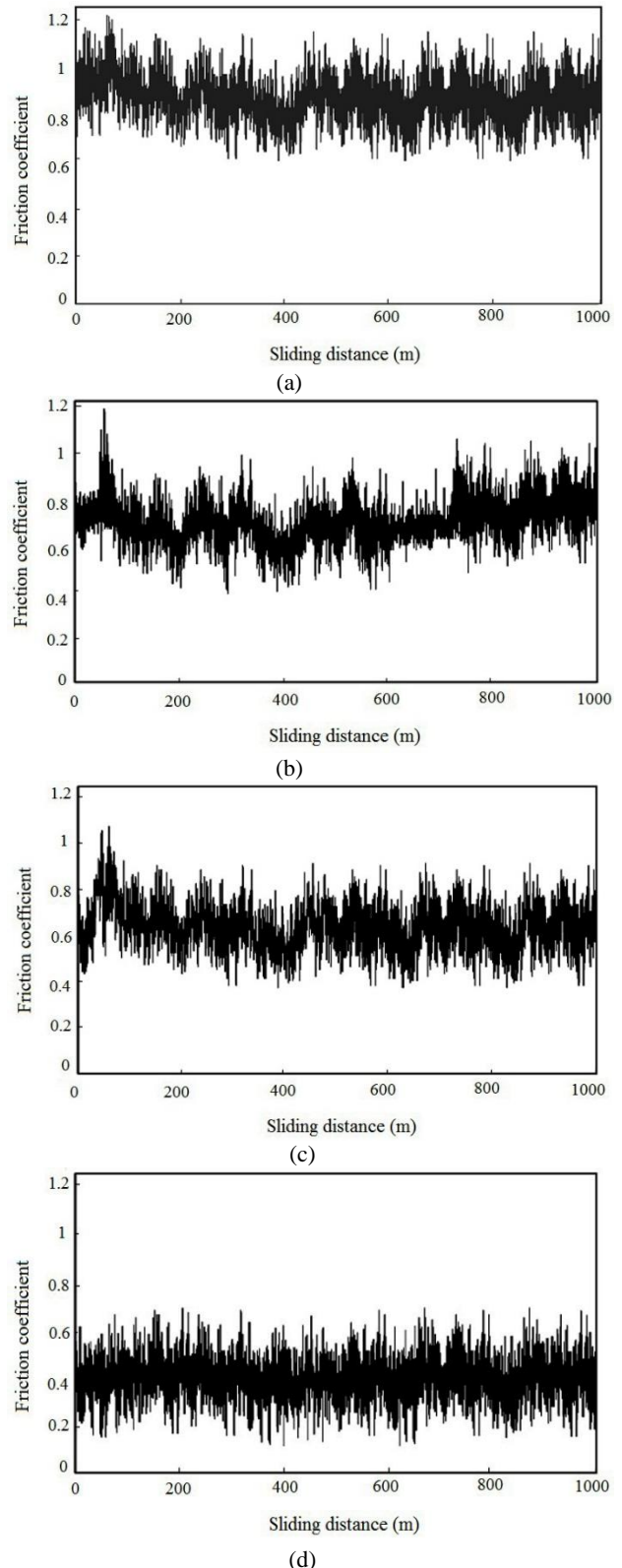


Fig. 11 Variations of friction coefficient with sliding distance for BM and FSPed samples (a) BM (b) FSPed BM (c) sample has TiO_2 (d) sample has Gr and TiO_2

شکل 11 تغییرپذیری ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش برای فلز پایه و نمونه‌های FSP شده (a) فلز پایه (b) فلز پایه FSP شده (c) نمونه دارای TiO_2 (d) نمونه دارای گرافیت و TiO_2

5- فهرست علایم

H _{IT}	سختی
HV _{IT}	سختی
E _{IT}	مدول یانگ

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها

نویسندگان بر خورد لازم می‌دانند که از مسئولین و سرپرستان آزمایشگاه‌های متالوگرافی، خواص مکانیکی، ماشین ابزار و SEM دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا به دلیل همکاریشان، تقدیر و تشکر نمایند.

7- مراجع

- [1] Zhang, D. and Zheng, L., "The Quench Sensitivity of Cast Al-7 Wt pct Si-0.4 Wt pct Mg Alloy" *Metallurgical Materials Transactiona A*, Vol. 27, No. 12, pp. 3983-3994, 1996.
- [2] Elshalakany, A. B. Osman, T. A. Khattab, A. and Azzam, B., "Microstructure and Mechanical Properties of MWCNTs Reinforced A356 Aluminum Alloys Cast Nanocomposites Fabricated by Using a Combination of Rheocasting and Squeeze Casting Techniques" *Journal of Nanomaterials*, Vol. 20, No. 1, pp 1-14, 2014.
- [3] Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction Stir Welding and Processing" *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [4] Meng, C. Cui, H. C. Lu, G. and Tang, X. H., "Evolution Behavior of TiB₂ Particles During Laser Welding on Aluminum Metal Matrix Composites Reinforced with Particles" *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, No. 6, pp. 1543-1548, 2013.
- [5] Liu, Q. Ke, L. Liu, F. Huang, C. and Xing, L., "Microstructure and Mechanical Property of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Aluminum Matrix Composites Fabricated by Friction Stir Processing" *Materials and Design*, Vol. 45, No. 1, pp. 343-348, 2013.
- [6] Yousefpour, H. and Akbari Mousavi, S. A. A., "Investigations on Microstructure, Wear Behavior and Corrosion Resistance of Brass/Graphite Composite Produced by Friction Stir Processing" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 253-260, 2016. (in Persian فارسی)
- [7] Soleymani, S. Abdollah-zadeh, A. and Alidokht, S. A., "Microstructural and Tribological Properties of Al5083 Based Surface Hybrid Composite Produced by Friction Stir Processing" *Wear*, Vol. 278-279, No. 1, pp. 41-47, 2012.
- [8] Shafiei-Zarghani, A. Kashani-Bozorg, A. F. and Zarei- Hanzaki, A., "Wear Assessment of Al/Al₂O₃ Nano-composite Surface Layer Produced Using Friction Stir Processing" *Wear*, Vol. 270, No. 5-6, pp. 403-412, 2011.
- [9] Kapoor, R. Kandasamy, K. Mishra, R. S. Baumann, J. A. and Grant, G., "Effect of Friction Stir Processing on the Tensile and Fatigue Behavior of a Cast A206 Alloy" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 561, No. 1, pp. 159-166, 2013.
- [10] Khodabakhshi, F. Simchi, A. Kokabi, A. H. Sadeghahmadi, M. and Gerlich, A. P., "Reactive Friction Stir Processing of AA 5052-TiO₂ Nanocomposite: Process Microstructure" mechanical characteristics, *Materials Science and Technology*, Vol. 31, No. 4, pp. 426-436, 2015.
- [11] Mishra, R. S. Mahoney, M. W. McFadden, S. X. Mara, N. A. and Mukherjee, A. K., "High Strain Rate Superplasticity in a Friction Stir Processed 7075 Al Alloy" *Scripta Materialia*, Vol. 42, No. 2, pp. 163-168, 1999.
- [12] Mishra, R. S. Ma, Z. Y., and Charit, I., "Friction Stir processing: a Novel Technique for Fabrication of Surface Composite" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 341, No. 1-2, pp. 307-310, 2003.
- [13] Ni, D. R. Wang, J. J. Zhou, Z. N. and Ma, Z. Y., "Fabrication and Mechanical Properties of Bulk NiTi/Al Composites Prepared by Friction Stir Processing" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 586, No. 1, pp. 368-374, 2014.
- [14] Asadi, P. Faraji, G. and Besharati, M. K., "Producing of AZ91/SiC Composite by Friction Stir Processing (FSP) " *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 247-260, 2010.
- [15] Akramifard, H. R. Shamanian, M. Sabbaghian, M. and Esmailzadeh, M., "Microstructure and Mechanical Properties of Cu/SiC Metal Matrix Composite Fabricated via Friction Stir Processing" *Materials and Design*, Vol. 54, No. 1, pp. 838-844, 2014.
- [16] Li, B. Shen, Y. Luo, L. and Hu, W., "Fabrication of TiCp/Ti-6Al-4V Surface Composite via Friction Stir Processing (FSP): Process Optimization, Particle Dispersion-Refinement Behavior and Hardening Mechanism" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 574, No. 1, pp. 75-85, 2013.
- [17] Mazaheri, Y. Karimzadeh, F. and Enayati, M. H., "A Novel Technique for Development of A356/Al₂O₃ Surface Nanocomposite by Friction Stir Processing" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 10, pp. 1614-1619, 2011.
- [18] Alidokht, S. A. Abdollah-zadeh, A. Soleymani, S. and Assadi, H., "Microstructure and Tribological Performance of an Aluminium Alloy Based Hybrid Composite Produced by Friction Stir Processing" *Materials and Design*, Vol. 32, No. 5, pp. 2727-2733, 2011.
- [19] Ahmadifard, S. Kazemi, Sh. and Heidarpour, A., "Fabrication of Al5083/TiO₂ Surface Composite by Friction Stir Process and Investigating its Microstructural, Mechanical and Wear Properties" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 55-62, 2015. (in Persian فارسی)
- [20] Bauri, R. Yadav, D. and Suhas, G., "Effect of Friction Stir Processing (FSP) on Microstructure and Properties of Al-TiC in Situ Composite" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4732-4739, 2011.
- [21] Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, Sh. Heidarpour, A. and Shirazi, A., "Fabrication of A5083/SiC Surface Composite by Friction stir Processing and its Characterization" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2016. (in Persian فارسی)
- [22] Srinivasu, R. Sambasiva, R. A. Madhusudhan, R. G. and Srinivasa, R. K., "Friction Stir Surfacing of Cast A356 Aluminium-Silicon Alloy with Boro Carbide and Molybdenum Disulphide Powders" *Defence Technology*, Vol. 10, No. 2, pp. 1-7, 2014.
- [23] Hossieni, S. A. Ranjbar, K. Dehmolaei, R. and Amirani, A. R., "Fabrication of Al5083 Surface Composites Reinforced by CNTs and Cerium Oxide Nano Particles via Friction Stir Processing" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 662, No. 1, pp. 725-733, 2014.
- [24] Shinoda, T. and Kawai, M., "Surface Modification by Novel Friction Thermomechanical Process of Aluminium Alloy Castings" *Surface and coating Technology*, Vol. 456, No. 9, pp. 170-179, 2003.
- [25] Amouri, K. Amouri, J. Ahmadifard, S. Kazazi, M. and Kazemi, S., "Preparation and Characterization of A356 Composite Reinforced with SiC Nano and Microparticles by Stir Casting Method" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 335-342, 2016. (in Persian فارسی)
- [26] Tjong, S. C., "Novel Nanoparticle-Reinforced Metal Matrix Composites with Enhanced Mechanical Properties" *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 1, pp. 639-652, 2007.
- [27] Bauri, R. and Surapa, M. K., "Sliding Wear Behavior of Al-Li-SiCp Composites" *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 265, No. 11-12, pp. 1756-1766, 2008.
- [28] Mostafapour, A. and Khandani, S. T., "Role of Hybrid Ratio in Microstructural, Mechanical and Sliding Wear Properties of the Al5083/Graphitep/Al₂O₃p a Surface Hybrid Nanocomposite Fabricated via Friction Stir Processing Method" *Materials Science and Engineering A*, Vol. 559, No. 1, pp. 549-557, 2013.
- [29] Lashgari, H. R. Zangeneh, Sh. Shahmir, H. Saghafi, M. Emamy, M., "Heat Treatment Effect on the Microstructure, Tensile Properties and Dry Sliding Wear Behavior of A356-10%B₄C Cast Composites" *Materials and Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4414-4422, 2010.