



بهبود خواص سایشی و ریزساختاری آلیاژ پیستون با استفاده از ذرات تقویت کننده ZrO_2

حسین رحیمی آسیابارکی^۱، مصطفی اکبری^{۲*}، پرویز اسدی^۳

۱- عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران

* تهران، کد پستی ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷، mo-akbari@tvu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۴ اسفند ۱۴۰۰

داوری اولیه: ۲۳ اردیبهشت ۱۴۰۱

پذیرش: ۷ تیر ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

فرایند اصطکاکی اغتشاشی

ریزساختار

آلیاژ پیستون

ذرات تقویت کننده

سایش

آلیاژهای Al-Si معمولاً در تولید قطعات خودرو از جمله پیستون و سیلندر استفاده می‌شوند. اگرچه این آلیاژ ویژگی‌های مطلوبی را برای استفاده در خودرو ارائه می‌دهد، اما چنندین ویژگی ریزساختاری مانند وجود سیلیسیوم‌های سوزنی شکل یا دندریته‌ها، عملکرد قطعات تولیدشده را مختل می‌کند. در این مطالعه، از ذرات تقویت کننده ZrO_2 برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی به وسیله فرایند اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده است. ابتدا ویژگی‌های ریزساختاری ناحیه اغتشاشی (SZ) نمونه‌های تولیدشده با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرایند اصطکاکی اغتشاشی ویژگی‌های ریزساختاری فلز پایه از جمله اندازه ذرات سیلیسیومی و توزیع این ذرات در فلز پایه را بهبود می‌بخشد. سپس توزیع ذرات و کیفیت پیوند بین ذرات تقویت کننده ZrO_2 و آلومینیوم با استفاده از SEM مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای تعیین خواص مکانیکی و سایش کامپوزیت‌ها، آزمون‌های سختی و سایش انجام شد. آزمایش‌های سایش پین بر دیسک با سرعت‌های ۱ متر بر ثانیه و ۲ متر بر ثانیه و بارهای اعمالی ۵ نیوتن، ۱۰ نیوتن و ۲۰ نیوتن انجام شد. نتایج آزمون سایش نشان داد که مقاومت به سایش کامپوزیت تولید شده در مقایسه با آلیاژ پایه حدود ۱۷۲ درصد بهبود یافته است.

Improving the wear and microstructural properties of piston alloys using ZrO_2 reinforcing particles

Hossein Rahimi Asiabaraki¹, Mostafa Akbari^{1*}, Parviz Asadi²

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

* P.O.B. 1435761137 Tehran, Iran, mo-akbari@tvu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 15 March 2022
First Decision: 13 May 2022
Accepted: 28 June 2022

Keywords:

FSP
Microstructure
Piston alloy
Reinforcing particles
Wear

Abstract

Al-Si alloys are commonly used in the manufacture of auto parts, including pistons. Although this alloy offers desirable properties for use in pistons, several microstructural properties, such as the presence of needle-like silicones or dendrites, interfere with the performance of the components produced. In this study, ZrO_2 reinforcing particles were used to produce metal-based composites by friction stir process. First, the microstructural characteristics of the stir zone (SZ) of the samples produced were studied using an optical microscope. The results showed that the friction stir process improves the microstructural properties of the base metal, including the size of the silicon particles, and the distribution of these particles in the base metal. Then the particle distribution and bond quality between ZrO_2 and aluminum reinforcing particles were investigated using SEM. Then, hardness and wear tests were performed to determine the wear and hardness of the composites. Pin-on-disk wear tests were performed at speeds of 1 m/s and 2 m/s and normal applied loads of 5 N, 10 N and 20 N. The wear test results showed that the wear resistance of the produced composite was improved by about 172% compared to the base alloy.

۱- مقدمه

آلیاژها برای تحمل اصطکاک و دماهای بالا به‌منظور بهبود عملکرد موتورهای احتراق داخلی، مانند افزایش نسبت تراکم این موتورها که کارایی آن‌ها را افزایش می‌دهد، ضروری است. علی‌رغم مقاومت در برابر سایش بالا، برخی از عیوب این آلیاژها، مانند ساختار دندریتی^۱، حفره‌ها و ذرات سیلیسیومی سوزنی

آلیاژهای Al-Si از جمله آلیاژی هستند که به دلیل استفاده گسترده در صنعت، به ویژه در صنعت خودروسازی، توجه محققین را برای اصلاح و افزایش عملکرد به خود جلب کرده‌اند. این آلیاژها معمولاً برای ساخت اجزای موتورهای احتراق داخلی مانند پیستون استفاده می‌شوند [۱، ۲]. بهبود عملکرد این

¹ Dendritic structure

Please cite this article using:

H. Rahimi Asiabaraki, M. Akbari, P. Asadi, Improving the wear and microstructural properties of piston alloys using ZrO_2 reinforcing particles, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 52- 59, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.157562>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سرعت‌های مختلف حاصل آید. در تحقیقات پیشین عموماً در یک شرایط خاص آزمون‌های سایش انجام می‌پذیرفت که کافی نیست. در این مقاله با استفاده از ذرات تقویت‌کننده خواص کامپوزیت تولیدشده در شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تأثیر ذرات تقویت‌کننده و اصلاح ریزساختار توسط فرایند بر افزایش خواص کامپوزیت مورد بحث قرار خواهد گرفت. در این تحقیق به منظور افزایش مقاومت به سایش آلیاژ A356 با استفاده از ذرات تقویت‌کننده ZrO₂ کامپوزیت به روش FSP تولید شد. ابتدا یک نمونه بدون استفاده از ذرات تقویت‌کننده برای بررسی اثر فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی ریزساختار تولید می‌شود. سپس کامپوزیت با استفاده از قرار دادن ذرات در فلز پایه تولید شد. توزیع ذرات و کیفیت پیوند بین تقویت‌کننده و ماتریس آلومینیوم با استفاده از SEM مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی و سایش کامپوزیت‌ها با آزمون سختی و سایش تعیین شد. از آنجایی که کامپوزیت تولیدشده به منظور استفاده در پیستون خودرو تولید شده است و پیستون‌ها در سرعت‌ها و بارهای مختلف کار می‌کنند، عملکرد کامپوزیت تولیدشده در شرایط مختلف (سرعت‌ها و نیروهای مختلف) ارزیابی شد که از نوآوری‌های این مقاله است. آزمون‌های سایش پین روی دیسک^۲ در دمای اتاق با بارهای اعمال‌شده معمولی ۵ نیوتن، ۱۰ نیوتن و ۲۰ نیوتن و همچنین سرعت‌های ۱ متر بر ثانیه و ۲ متر بر ثانیه انجام شد.

۲- روش‌های تجربی

در صنعت خودرو، آلیاژ A356 یکی از پرکاربردترین آلیاژهای سری Al-Si است. در این تحقیق شمش‌های A356 برای تولید کامپوزیت‌ها به صورت ورق‌هایی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بریده شدند. جدول ۱ ترکیبات شیمیایی آلیاژ مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی A356 (%wt)

Table 1 A356 Chemical composition (wt%)						
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
۷	۰/۳۱	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۱	۰/۲۵

برای ساخت کامپوزیت‌ها از ذرات تقویت‌کننده ZrO₂ استفاده شد. اندازه ذرات ZrO₂ مورد استفاده ۳ میکرون است. به همین منظور، شیارهایی بر روی سطح ورق‌های آلومینیومی به ابعاد ۲ میلی‌متر عرض و ۳ میلی‌متر عمق ایجاد شد (شکل ۱).

شکل، مانع استفاده از آن‌ها در بسیاری از کاربردها شده است [۳، ۴]. برای این هدف، محققان از تکنیک‌های مختلفی برای افزایش عملکرد این آلیاژها استفاده کرده‌اند. راثو و همکاران [۵] از روش ریخته‌گری همزنی برای تقویت آلیاژ آلومینیومی با ذرات تقویت‌کننده MoS₂ استفاده کردند. با توجه به یافته‌های آن‌ها، گنجاندن ذرات MoS₂ به طور قابل توجهی ویژگی‌های میکرو سختی و کششی را بهبود بخشید. در تحقیقی دیگر باشا و همکاران [۶] برای تولید کامپوزیت‌های ترکیبی آلومینیومی از ریخته‌گری هم زنی با فرآیند اولتراسونیک استفاده کردند.

فرآیند اغتشاشی اصطکاکی^۱ که بر اساس اصول جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی توسعه داده شده است یکی از روش‌های پرکاربرد جهت اصلاح ریزساختار فلزات و همچنین تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی است. اساساً پارامترها و تغییرات ریزساختاری این دو فرآیند مشابه هستند [۷، ۸]. با این حال، هدف از فرآیند اغتشاشی اصطکاکی، اتصال یا جوش دادن دو ورق فلزی نیست، بلکه اصلاح ساختار، تغییر اندازه دانه، افزایش استحکام، یکنواخت ساختن سازه از نظر اندازه دانه، توزیع رسوب و ایجاد کامپوزیت است [۹]. در فرآیند اغتشاشی اصطکاکی، ابزار دوار در ورق فرو می‌رود تا پس از فرآیند، تغییرات ریزساختاری را برای بهبود خواص مورد نظر ایجاد کند [۱۰، ۱۱]. از این فرآیند برای تولید کامپوزیت‌های سطحی، همگن‌سازی قطعات تولیدشده توسط متالورژی پودر، اصلاح ریزساختار کامپوزیت‌های مبتنی بر فلز و بهبود خواص آلیاژهای ریخته‌گری نیز استفاده می‌شود [۱۲، ۱۳]. تاکنون تحقیقاتی در زمینه افزایش خواص مکانیکی آلومینیوم‌های ریخته‌گری با استفاده از روش اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است. جلیوند و همکاران [۱۴] نانو کامپوزیت تقویت‌شده با پودرهای Al₂O₃ و SiO₂ بر روی آلیاژ آلومینیوم ریخته‌گری شده A356 با فرایند اغتشاشی اصطکاکی (FSP) تولید کردند. آن‌ها بیان کردند، نانو کامپوزیت ترکیبی سطحی در مقایسه با فلز پایه خواص مکانیکی و خوردگی بهتری را دارا است. مظاهری و همکاران [۱۵] کامپوزیت‌های A356 حاوی Al₂O₃ میکرو و نانو را با استفاده از فرایند اغتشاشی اصطکاکی تولید کردند. ریز سختی کامپوزیت‌های تولیدشده حاوی Al₂O₃ میکرو و نانو سائز به ترتیب HV ۲,۶ ± ۸۹,۸ و HV ۲,۵ ± ۱۰۹,۷ بود که از فلز پایه با سختی HV ۷۹,۹ بالاتر بود. از آنجا که این آلیاژها در شرایط مختلف بارگذاری و سرعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیاز است درک درستی از خواص سایشی کامپوزیت در نیروها و

^۲ Pin-on-disk tribometer

^۱ Friction stir processing

و دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب معرفی شده‌اند. بر اساس مطالعات قبلی [۱۷]، استفاده از یک پاس فرآیند برای تولید کامپوزیت کافی نیست و امکان توزیع یکنواخت ذرات در فلز پایه را نمی‌دهد؛ بنابراین، نمونه‌ها در چهار پاس فرآیند ساخته شدند. علاوه بر این، دولت‌خواه و همکاران [۱۷] دریافتند که ذرات تقویت‌کننده به دلیل جریان نامتقارن مواد ایجادشده در فرآیند اغتشاشی اصطکاکی به سمت ناحیه پیشرو^۲ حرکت می‌کنند. اگر جهت چرخش ابزار در هر پاس فرآیند تغییر نکند، ذرات تقویت‌کننده در هر پاس بیشتر و بیشتر به ناحیه پیشرو منتقل می‌شوند و پس از چهار پاس تجمع ذرات در این ناحیه رخ می‌دهد. با تغییر جهت چرخش ابزار بین پاس‌های فرآیند، نواحی پیشرو و پس‌رو^۳ در هر پاس تغییر می‌کنند، که منجر به تغییر در الگوی جریان مواد شده و توزیع ذرات را بهبود می‌دهد. در نتیجه، تمام آزمایش‌ها با استفاده از چهار پاس فرآیند و با تغییر جهت چرخش بین پاس‌ها انجام می‌شود.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری متالورژیکی برای تجزیه و تحلیل ریزساختار کامپوزیت‌ها استفاده شد. با استفاده از تکنیک‌های متالوگرافی استاندارد، نمونه‌های تولید شده با استفاده از کلر (۹۵ میلی‌لیتر آب، ۲/۵ میلی‌لیتر HNO₃، ۱/۵ میلی‌لیتر HCl، ۱ میلی‌لیتر HF) اچ و پرداخت شدند. آزمایش‌های ریزسختی در مکان‌های مختلف در ناحیه اغتشاشی کامپوزیت‌ها به ترتیب با بار ۲۰۰ گرم و زمان مکث ۱۵ ثانیه انجام شد.

به منظور بررسی مقاومت سایشی کامپوزیت‌ها، آزمایش‌های سایش با استفاده از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک انجام شد. پین‌های مورد نیاز برای آزمون سایش با قطر ۶ میلی‌متر از کامپوزیت‌های تولیدشده، استخراج شد. دیسک فولادی ۲۰۸۰ با زبری سطح تقریباً ۰/۵ میکرومتر و سختی HRC ۶۰ در آزمون سایش مورد استفاده قرار گرفت. نیروهای متغیر ۵، ۱۰ و ۲۰ نیوتن و سرعت‌های مختلف ۱ m/s و ۲ m/s در آزمون سایش استفاده شد. علاوه بر این، تمام آزمون‌های سایش در دمای اتاق انجام گردید.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- نتایج ریزساختاری

به منظور بررسی اثر فرآیند بر روی ریزساختار فلز پایه، ابتدا نمونه‌هایی با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و بدون استفاده از ذرات

پس از آن، ذرات تقویت‌کننده در داخل شیار جاسازی شدند. سپس سطح شیاردار با ابزار بدون پین بسته شد تا از خروج ذرات تقویت‌کننده در طول فرآیند جلوگیری شود (شکل ۱). در نهایت، کامپوزیت با استفاده از ابزار با پین تولید شد.

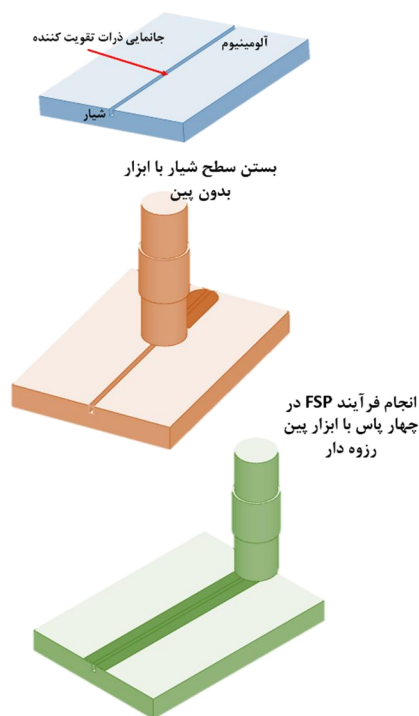


Fig. 1 Terminology and Schematic of FSP

شکل ۱ فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

در این مقاله از پین استوانه‌ای رزوه‌دار برای تولید کامپوزیت استفاده شد. بر اساس کار قبلی برخی از نویسندگان [۱۶]، این پین در توزیع یکنواخت ذرات تقویت‌کننده در فلز پایه بهترین عملکرد را نسب به پین‌های استوانه‌ای، مربعی، مثلثی و شش‌گوش دارد. برخلاف پین‌های استوانه‌ای، مربعی، مثلثی که فقط جریان افقی مواد در اطراف پین ایجاد می‌شود، پین‌های رزوه دار توانایی ایجاد جریان در دو جهت عمودی و افقی را دارند که باعث بهبود توزیع ذرات می‌شود. قطر شانه ابزار استفاده شده ۱۸ میلی‌متر و پین ابزار ۶ میلی‌متر است.

نمونه‌ها در تمام آزمایش‌ها در عمق نفوذ ثابت ۳/۵ میلی‌متر، زاویه کجی ابزار^۱ ۳ درجه، سرعت پیشروی و دورانی ۳۲ میلی‌متر در دقیقه و ۱۲۰۰ دور در دقیقه تولید شدند. بر اساس تحقیقات قبلی برخی از نویسندگان [۲] این پارامترها به عنوان پارامترهای بهینه فرآیند برای توزیع یکنواخت ذرات در فلز پایه

² Advancing Side

³ Retreating Side

¹ Tool tilt angle

تقویت کننده تولید شدند. شکل ۲ ریزساختار فلز پایه و ناحیه اغتشاشی تولید شده بدون ذرات تقویت کننده را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، ذرات سیلیسیوم سوزنی شکل به صورت ناهمگن در سرتاسر فلز پایه پراکنده شده اند (شکل ۲). به دلیل عواملی مانند تمرکز تنش، این ذرات درشت که به صورت ناهمگون در فلز پایه پخش شده اند، خواص مکانیکی این آلیاژ را کاهش می دهند. شکنندگی و ترد بودن این فلز به ریزساختار مشاهده شده نسبت داده می شود [۱۸].

سایر معایب یافت شده در فلز پایه عبارتند از حفره ها و دندریتهای α-Al. ذرات سیلیسیوم در آلیاژ آلومینیوم دارای اندازه متوسط تقریباً ۱۰ میکرون و نسبت ابعادی ۴/۶۷^۱ هستند. نواحی مختلف نمونه فراوری شده در شکل ۲ نشان داده شده است. ذرات سیلیسیومی در نمونه فراوری شده بسیار ریزتر شده و به طور یکنواخت در فلز پایه در ناحیه اغتشاشی پراکنده شده اند. این ذرات سیلیسیومی به دلیل کرنش زیاد ایجاد شده در مواد ناشی از پین ابزار خرد شده و دوباره در فلز پایه توزیع می شوند. به دلیل جریان بالای مواد در این ناحیه، دندریتهای و حفره ها در ساختار فلز پایه به طور کامل حذف شده اند. ایجاد این ریزساختار مشکلات اساسی فلز پایه را از بین می برد و انتظار می رود خواص مکانیکی بهبود یابد.

توزیع همگن ذرات تقویت کننده در فاز فلزی یکی از چالش های اصلی در ساخت کامپوزیت های زمینه فلزی است. تجمع ذرات تقویت کننده ویژگی های مکانیکی کامپوزیت تولید شده را کاهش می دهد و در برخی شرایط، به دلیل تمرکز تنش، کیفیت مکانیکی کامپوزیت را نسبت به فلز پایه کاهش می دهد. شکل ۳ تصاویر SEM کامپوزیت تقویت شده با ZrO₂ را به منظور ارزیابی پراکندگی ذرات در ناحیه اغتشاش نشان می دهد. همان طور که مشخص است، ذرات تقویت کننده به طور یکنواخت در ماتریس فلزی توزیع شده اند. انتخاب پارامترهای مناسب مانند نوع پین ابزار، سرعت دورانی و پیشروی مهم ترین عامل در دستیابی به کامپوزیتی با توزیع یکنواخت ذرات است.

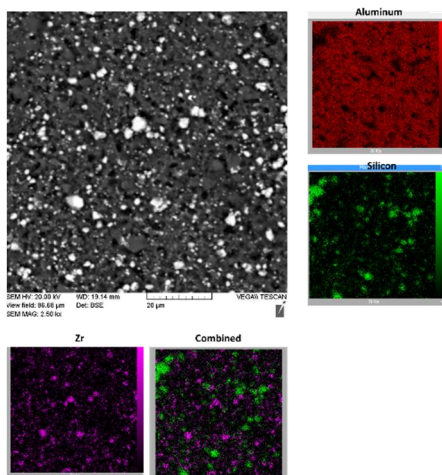
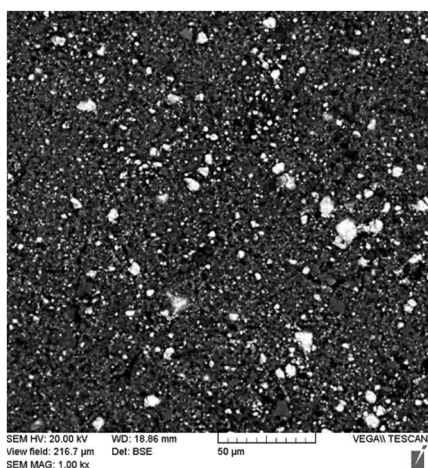


Fig. 3 SEM images of the ZrO₂-reinforced composite

شکل ۳ تصاویر SEM از کامپوزیت تقویت شده با ZrO₂

شکل ۲ ریزساختار فلز پایه و ناحیه اغتشاشی تولید شده بدون ذرات تقویت کننده را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، ذرات سیلیسیوم سوزنی شکل به صورت ناهمگن در سرتاسر فلز پایه پراکنده شده اند (شکل ۲). به دلیل عواملی مانند تمرکز تنش، این ذرات درشت که به صورت ناهمگون در فلز پایه پخش شده اند، خواص مکانیکی این آلیاژ را کاهش می دهند. شکنندگی و ترد بودن این فلز به ریزساختار مشاهده شده نسبت داده می شود [۱۸].

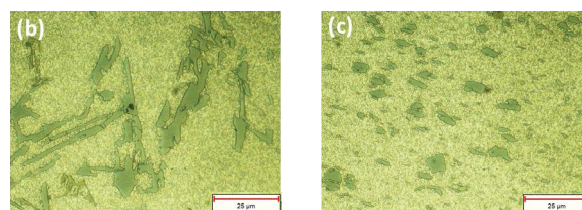
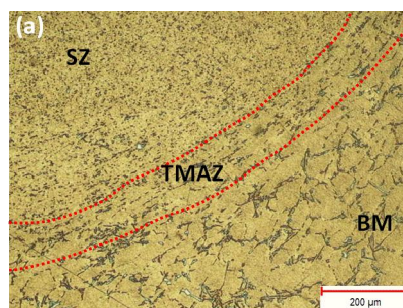


Fig. 2 Microstructure of a) Different areas of FSPed samples b) Silicon particles of base metal c) Silicon particles of SZ

شکل ۲ ریزساختار (الف) مناطق مختلف نمونه های فراوری شده (ب) ذرات سیلیسیوم در فلز پایه (ج) ذرات سیلیسیومی در ناحیه اغتشاشی

ناحیه متأثر ترمومکانیکی^۲ منطقه بعدی مشاهده شده در نمونه های فراوری شده است (شکل ۲). از آنجایی که این ناحیه

¹ Aspect ratio

² TMAZ

سختی فلز پایه HV ۴۵ است، اما در نمونه‌های فرآوری شده بدون ذرات تقویت کننده این مقدار به ۷۰ HV می‌رسد که ۵۵ درصد افزایش یافته است. این بهبود در نتیجه اصلاحات ریزساختاری مانند پالایش ذرات سیلیسیومی و توزیع مجدد آن‌ها و حذف دندریته‌های درشت α -Al به دست می‌آید. در نتیجه، حتی بدون استفاده از ذرات تقویت کننده، روش اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش سختی می‌شود. استفاده از ذرات تقویت کننده سبب افزایش سختی نسبت به کامپوزیت تولید شده می‌شود. سختی کامپوزیت تولید شده حدود HV ۸۱ است که بسیار بیشتر از سختی فلز پایه است. بخشی از این افزایش را می‌توان به تغییرات در ویژگی‌های ریزساختاری فلز پایه، همان‌طور که در بالا بیان شد، نسبت داد و بقیه را می‌توان به استفاده از ذرات تقویت شده مرتبط کرد.

۳-۳- نتایج سایش

به منظور ارزیابی مقاومت سایشی کامپوزیت‌های تولید شده و همچنین مقایسه آن با مقاومت سایشی فلز پایه، آزمایش سایش بر روی کامپوزیت و فلز پایه انجام شد. نتایج نشان داد که کاهش جرم در کامپوزیت تولید شده حدود ۶/۶ میلی‌گرم بوده که نسبت به فلز پایه که برابر با ۱۸ میلی‌گرم است، پیشرفتی در حدود ۱۷۲ درصد را نشان می‌دهد. لازم به تأکید است که بخشی از این بهبود، همان‌طور که اشاره شد، به دلیل تغییرات ریزساختاری در فلز پایه است، در حالی که بقیه به دلیل استفاده از ذرات تقویت کننده است. ذرات تقویت کننده، به‌طور کلی، به دلیل سختی بالا، به‌عنوان اجزای تحمل کننده بار عمل می‌کنند، که منجر به کاهش قابل توجهی در سطح تماس بین کامپوزیت‌ها و دیسک مربوطه می‌شود و مقاومت به سایش کامپوزیت را افزایش می‌دهد [۲۰، ۲۱]. علاوه بر این، بر اساس معادله آرچارد^۱، افزایش سختی کامپوزیت‌ها باعث بهبود مقاومت به سایش آن‌ها می‌شود [۲۲].

در شکل ۵ ضریب اصطکاک در مقابل مسافت برای فلز پایه و کامپوزیت تولید شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، میانگین ضریب اصطکاک آلیاژ پایه کمتر از کامپوزیت‌های تولید شده می‌باشد. این به دلیل وجود ذرات تقویت کننده است که به‌عنوان یک مانع عمل می‌کند و منجر به افزایش میانگین ضریب اصطکاک می‌شود.

شکل ۶ میکروگراف‌های SEM سطوح سایش نمونه فلز پایه، فرآوری شده بدون پودر و کامپوزیت تولید شده را نشان می‌دهد.

استحکام پیوند بین ذرات تقویت کننده و ماتریس آلومینیومی یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که بر کیفیت کامپوزیت تأثیر می‌گذارد. ذرات تقویت کننده در کامپوزیت‌ها به‌شدت به استحکام پیوند بین زمینه فلزی و ذرات تقویت کننده برای استحکام متکی هستند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، ریز حفره‌ای در سطح مشترک بین زمینه فلزی آلومینیومی و ذرات تقویت کننده قابل مشاهده نیست. در نتیجه، پیوندهای تقویت کننده/ماتریس برای این کامپوزیت‌ها مناسب به نظر می‌رسد.

۳-۲- نتایج سختی

یکی از مشکلات آلیاژهای آلومینیوم Al-Si این است که سختی آن‌ها پایین بوده و در نتیجه مقاومت سایشی پایینی دارند. فرایند اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های بهبود خواص مکانیکی با تغییر ریزساختار آلیاژ است. سختی نمونه‌ها در طول این فرآیند تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد. اول، فرایند اصطکاکی اغتشاشی سختی نمونه‌ها را با تغییر ریزساختار آلیاژهای پایه، مانند خرد کردن ذرات سیلیسیومی و پراکندگی یکنواخت آن‌ها در آلومینیوم، افزایش می‌دهد. دوم، استفاده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی در ساخت کامپوزیت، به دلیل استفاده از ذرات تقویت کننده سختی را تا سطح بالاتری افزایش می‌دهد.

برای بررسی نقش هر عامل در سختی نمونه تولید شده، ابتدا دو سری نمونه با و بدون ذرات تقویت کننده ZrO_2 تولید شدند. منحنی تغییرات سختی در سطح مقطع نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. در مقایسه با فلز پایه، سختی نمونه‌های تولید شده بدون ذرات تقویت شده ZrO_2 بسیار بالاتر است.

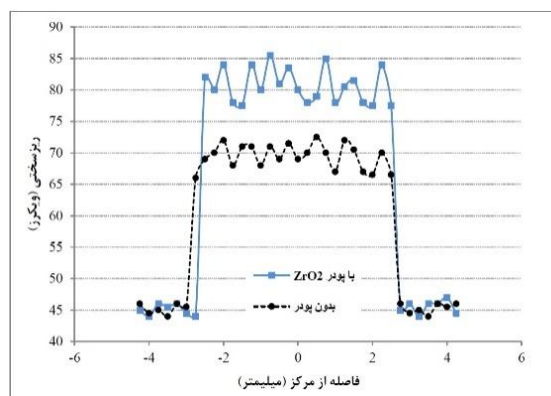


Fig. 4 Microhardness variations curves at the cross section of the samples FSPed without reinforcement and with ZrO_2 reinforcement

شکل ۴ منحنی تغییرات سختی در سطح مقطع نمونه‌های فرآوری شده بدون پودر و کامپوزیت تقویت شده با ZrO_2

¹ Archard's equation

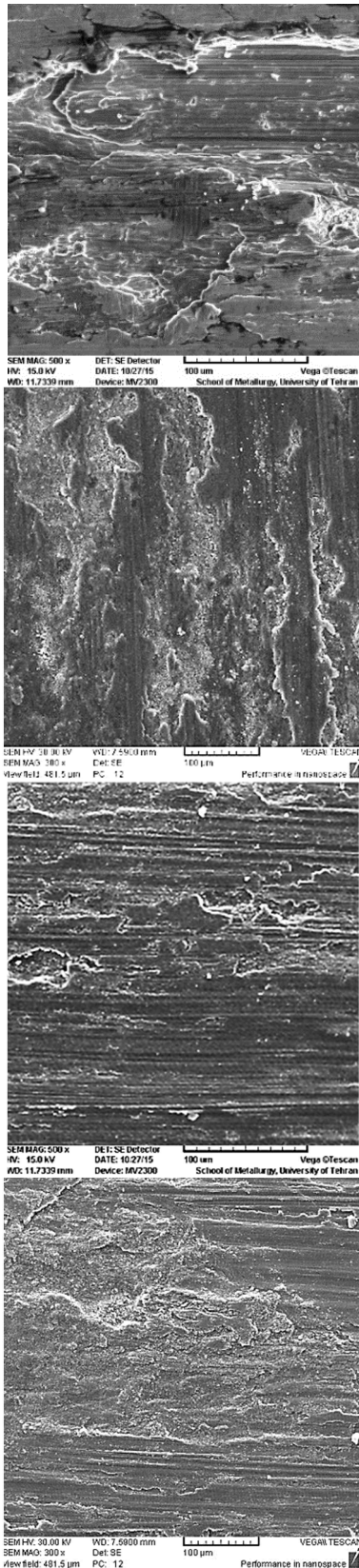


Fig. 6 Worn surface micrograph of the (a) A356 alloy at 1 m / s, (b) FSPed sample at 1 m / s, (c) A356 / ZrO₂ composite at 1 m / s and (d) A356 / ZrO₂ composite at 2 m / s

شکل ۶ میکروگراف سطح سایش (الف) آلیاژ A356 در سرعت ۱ متر بر ثانیه، (ب) فراوری شده بدون پودر در سرعت ۱ متر بر ثانیه، (ج) کامپوزیت A356/ZrO₂ در سرعت ۱ متر بر ثانیه و (د) کامپوزیت A356/ZrO₂ در سرعت ۲ متر بر ثانیه

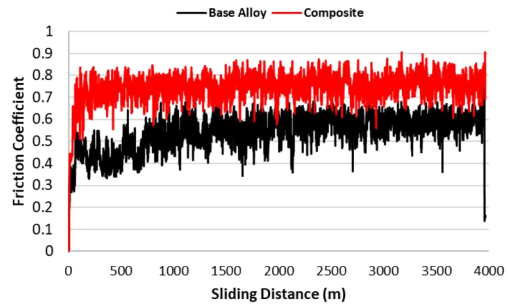


Fig. 5 variation of the friction coefficient versus sliding distance for composite reinforced with ZrO₂, and base alloy at sliding speed of 1 m/s and applied load of 5 N

شکل ۵ تغییر ضریب اصطکاک در مقابل فاصله برای کامپوزیت تقویت شده ZrO_2 و آلیاژ پایه در سرعت ۱ متر بر ثانیه و نیروی ۵ نیوتن

برای بررسی اثر سرعت سایش بر سطح سایش برای نمونه‌ی با پودر تصاویر سطح سایش در دو سرعت مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶- الف مشخص است مکانیسم سایش چسبان و خراشان هر دو سبب وقوع سایش نمونه فلز پایه شده است. آثار شیارهای موازی با خطوط سایش روی سطح نمونه مشهود است که بیانگر مکانیسم سایش خراشان در این نمونه است. علاوه بر این نشانه‌هایی از کنده شدن‌های سطحی دیده می‌شود. این مسئله بیانگر فعال بودن مکانیسم سایش چسبان همراه به کنده شدن‌های لایه‌ای در این نمونه است. در شکل ۶- ب سطح ساییده شده برای نمونه فراوری شده بدون پودر نمایش داده شده است که مکانیزم سایشی مشابه به ماده پایه را نشان می‌دهد. اما ریز شدن ذرات سیلیسیوم و افزایش سختی اندکی سبب بهبود خواص مقاومت به سایش شده است. تصاویر ۶- ج و ۶- د سطح سایش را برای نمونه کامپوزیتی در دو سرعت مختلف نشان می‌دهد.

با مقایسه سطوح سایش نمونه ماده پایه و نمونه فراوری شده بدون پودر با سطوح نمونه کامپوزیتی (در هر دو سرعت سایشی) به‌وضوح دیده می‌شود که سایش کمتری در سطوح کامپوزیت ایجاد شده است. علاوه بر این، وجود تقویت‌کننده سخت در آلومینیوم، مکانیسم سایش چسبان را کم اثرتر کرده است و به‌ندرت نشانه‌هایی از کنده شدن لایه‌ای می‌توان در سطح سایش یافت. علاوه بر این با مقایسه تصاویر ۶- ج و ۶- د به‌خوبی مشخص است که با اضافه شدن سرعت لغزش از ۱ به ۲ متر بر ثانیه، مکانیسم کنده شدن لایه‌ای تشدید شده است. این امر دلیل افزایش گرما با بالا رفتن سرعت سایش در شرایط سایش خشک اتفاق افتاده است.

شکل ۷ نمودار تغییرات وزن کاهش‌یافته و ضریب اصطکاک را در حین آزمون سایش برای کامپوزیت تولید شده در نیروها و سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

۴- جمع بندی

هدف از این تحقیق، ساخت کامپوزیت‌های آلومینیوم ZrO_2 با استفاده از روش FSP و به منظور بهبود ویژگی‌های آلیاژ ریختگی A356 است. در ابتدا، منطقه اغتشاشی اصطکاکی از نظر ریزساختاری مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل عکس‌های SEM برای تعیین چگونگی توزیع ذرات در کامپوزیت و کیفیت پیوند بین ذرات و ماتریس آلومینیوم استفاده شد. آزمون‌های سایش پین روی دیسک با استفاده از انواع سرعت‌ها و نیروها مختلف به منظور بررسی مقاومت سایشی نمونه‌ها انجام شد. نتایج زیر به طور خلاصه به دست آمد:

- ذرات سیلیسیومی سوزنی شکل فلز پایه پس از فرایند اغتشاشی اصطکاکی خرد شده و به ذرات ریزتر تبدیل شدند.

- سختی نمونه‌ها با دو عامل اندازه ذرات سیلیسیوم و توزیع ZrO_2 تعیین می‌شود.

- با توجه به تغییر ریزساختاری آلیاژ پایه به دنبال FSP و ساخت کامپوزیت‌هایی با توزیع یکنواخت ZrO_2 ، مقاومت سایشی کامپوزیت‌های تولید شده در مقایسه با مقاومت به سایش فلز پایه تا حدود ۱۷۲٪ بهبود یافت.

- جرم از دست رفته در حین آزمون سایش کامپوزیت‌ها با افزایش بار نرمال افزایش می‌یابد. در سرعت ۲ متر بر ثانیه افزایش بار از ۵ نیوتن تا ۲۰ نیوتن سبب افزایش جرم از دست رفته تا حدود ۱۵۰٪ می‌شود.

- با افزایش بارهای اعمال شده، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. در سرعت ۲ متر بر ثانیه با افزایش بار از ۵ نیوتن تا ۲۰ نیوتن، ضریب اصطکاک حدود ۷۳٪ افزایش یافت.

- بیشترین کاهش جرم در بالاترین سرعت لغزش رخ می‌دهد و با کاهش سرعت لغزش کاهش می‌یابد. در نیرو ۲۰ نیوتن با افزایش سرعت از ۱ متر بر ثانیه تا ۲ متر بر ثانیه، جرم از دست رفته حدود ۲۵۰٪ افزایش یافت.

۵- مراجع

- [1] M. Akbari, A. Khalkhali, S.M.E. Keshavarz, E. Sarikhani, Investigation of the effect of friction stir processing parameters on temperature and forces of Al-Si aluminum alloys, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 232, pp. 213-229, 2015.
- [2] M. Akbari, P. Asadi, P. Zolghadr, A. Khalkhali, Multicriteria optimization of mechanical properties of aluminum composites reinforced with different reinforcing particles type, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* Vol. 232, pp. 323-337, 2017.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، جرم کاهش یافته برای نمونه کامپوزیتی در مقایسه با نمونه ماده پایه به شدت افت پیدا کرده است. تغییر مکانیسم سایش با افزودن ذرات تقویت کننده سبب شده میزان سایش و ماده از دست رفته به شدت کاهش یابد. همچنین کاهش جرم سایشی در هر دو ماده به طور پیوسته با افزایش نیرو افزایش می‌یابد. با افزایش بار اعمال شده، نمونه بر روی دیسک فشرده می‌شود که باعث افزایش دما در محل تماس و در نتیجه تخریب سریع تر فیلم انتقال می‌شود [۲۳]. در نتیجه، فیلم‌های انتقال جدید با سرعت بیشتری تولید می‌شوند و سایش را افزایش می‌دهند.

علاوه بر این، هنگامی که بار اعمال شده افزایش می‌یابد، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. از آنجایی که فیلم انتقال پایدارتر است و افزایش دما در بارهای اعمال شده پایین تر، کمتر است، ضریب اصطکاک در بارهای اعمال شده بیشتر بزرگ تر است، اما فیلم انتقال در بارهای بالاتر با سرعت بیشتری از بین می‌رود.

شکل ۷ نشان می‌دهد که حداکثر جرم سایشی در بالاترین سرعت رخ می‌دهد و با کاهش سرعت لغزش مقدار سایش کاهش می‌یابد. این امکان وجود دارد که افزایش سرعت لغزش دیسک مربوطه، دمای نمونه را افزایش داده و باعث چسبندگی و افزایش تغییر شکل در تماس شود. همچنین، افزایش سرعت لغزش ضریب اصطکاک کامپوزیت‌ها را کاهش می‌دهد. در واقع افزایش سرعت لغزش (برای مسافت یکسان) سبب می‌شود قله‌ها و دره‌های سطوح متقابل در سایش کمتر در یکدیگر گیر کرده و در نتیجه هم ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و هم نیروی لازم برای لغزش سطوح کم می‌شود [۲۴-۲۶].

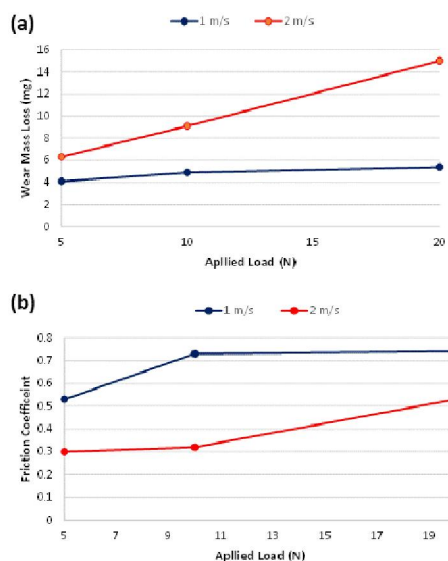


Fig. 7 a) Wear and b) friction properties of composites

شکل ۷ خواص الف) سایش و ب) اصطکاک کامپوزیت‌ها

- Tribological Behavior of A356/Al₂O₃ Surface Nanocomposite Prepared by Friction Stir Processing, *Metall and Mat Trans A* Vol. 45, pp. 2250-2259, 2014.
- [16] M.H. Shojaeefard, M. Akbari, A. Khalkhali, P. Asadi, Effect of tool pin profile on distribution of reinforcement particles during friction stir processing of B4C/aluminum composites, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications* (2016).
- [17] 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.
- [18] S. Tutunchilar, M. Haghpanahi, M.K. Besharati Givi, P. Asadi, P. Bahemmat, Simulation of material flow in friction stir processing of a cast Al-Si alloy, *Materials & Design* Vol. 40, pp. 415-426, 2012.
- [19] P. Zolghadr, M. Akbari, P. Asadi, Formation of thermo-mechanically affected zone in friction stir welding, *Materials Research Express* Vol. 6, 2019.
- [20] A. Mazahery, M. Alizadeh, M.O. Shabani, Study of Tribological and Mechanical Properties of A356-Nano SiC Composites, *Trans Indian Inst Met* Vol. 65, pp. 393-398, 2012.
- [21] A. Mazahery, M.O. Shabani, Microstructural and abrasive wear properties of SiC reinforced aluminum-based composite produced by compocasting, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23(7) pp. 1905-1914, 2013.
- [22] T.S. Mahmoud, Surface modification of A390 hypereutectic Al-Si cast alloys using friction stir processing, *Surface and Coatings Technology* Vol. 228, pp. 209-220, 2013.
- [23] M.O. Shabani, F. Heydari, A.A. Tofigh, M.R. Rahimipour, M. Razavi, A. Mazahery, P. Davami, Wear properties of rheo-squeeze cast aluminum matrix reinforced with nano particulates, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* Vol. 52, pp. 486-491, 2016.
- [24] M. Akbari, P. Asadi, Simulation and experimental investigation of multi-walled carbon nanotubes/aluminum composite fabrication using friction stir processing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* Vol. 235, pp. 2165-2179, 2021.
- [25] X. Zhang, K. Zhang, X. Kang, L. Zhang, Friction maps and wear maps of Ag/MoS₂/WS₂ nanocomposite with different sliding speed and normal force, *Tribology International* Vol. 164, 107228, 2021.
- [26] M. Barmouz, P. Asadi, M.K. Besharati Givi, M. Taherishargh, Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles' size and volume fraction, *Materials Science and Engineering: A* Vol. 528(3), pp. 1740-1749, 2011.
- [3] N. Saini, C. Pandey, S. Thapliyal, D.K. Dwivedi, Mechanical Properties and Wear Behavior of Zn and MoS₂ Reinforced Surface Composite Al-Si Alloys Using Friction Stir Processing, *Silicon* Vol. 10, pp. 1979-1990, 2018.
- [4] H.J. Jiang, C.Y. Liu, Z.X. Yang, Y.P. Li, H.F. Huang, F.C. Qin, Effect of Friction Stir Processing on the Microstructure, Damping Capacity, and Mechanical Properties of Al-Si Alloy, *J. of Materi Eng and Perform*, Vol. 28, pp. 1173-1179, 2019.
- [5] G.B. Rao, P.K. Bannaravuri, R. Raja, K.C. Apparao, P.S. Rao, T.S. Rao, A.K. Birru, R.M. Rasalin Prince, Impact on the microstructure and mechanical properties of Al-4.5Cu alloy by the addition of MoS₂, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* Vol. 4, pp. 281-289, 2021.
- [6] A. Chinnamhammad Bhasha, K. Balamurugan, Studies on mechanical properties of Al6061/RHC/TiC hybrid composite, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* Vol. 4, pp. 405-415, 2021.
- [7] K.B. Golafshani, S. Nourouzi, H. Jamshidi Aval, Evaluating the microstructure and mechanical properties of friction stir processed Al-Si alloy, *Materials Science and Technology* Vol. 35, pp. 1061-1070, 2019.
- [8] W. Cheng, C.Y. Liu, Z.J. Ge, Optimizing the mechanical properties of Al-Si alloys through friction stir processing and rolling, *Materials Science and Engineering: A* Vol. 804, pp. 140786, 2021.
- [9] M. Givi, A.H. Ghasemi, M. Abbasi, The effect of friction stir vibration processing on microstructure and mechanical properties of Al5052/SiC surface nano composite, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* Vol. 6, pp. 1-11, 2019.
- [10] V.K. Jain, M.K. Yadav, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan, Fabrication of surface composites on different aluminium alloys via friction stir process - A review report, *Australian Journal of Mechanical Engineering* pp. 1-24 2022.
- [11] K. Suganeswaran, R. Parameshwaran, R. Sathiskumar, T. Ram Prabhu, N. Nithyavathy, Influence of Fly Ash and Emery based particulate reinforced AA7075 surface composite processed through friction stir processing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* (2022) 09544089211072719.
- [12] M. Farhang, M. Farahani, M. Nazari, Incorporation of Al₂O₃ powder for improvement of the mechanical and metallurgical properties of multi-passes friction stir welding of Al 2024, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* Vol. 8, pp. 35-46, 2021.
- [13] R. Tohidi Manesh, M. Ghobeiti Hasab, A. Heidary Moghadam, Composite fabrication and surface reinforcement of aluminum 7075 by pumice micro and nanoparticles using the friction stir process (FSP), *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* Vol. 7, pp. 56-63, 2020.
- [14] M.M. Jalilvand, Y. Mazaheri, A. Heidarpoor, M. Roknian, Development of A356/Al₂O₃ + SiO₂ surface hybrid nanocomposite by friction stir processing, *Surface and Coatings Technology* Vol. 360, pp. 121-132, 2019.
- [15] Y. Mazaheri, F. Karimzadeh, M.H. Enayati,