



بررسی ریزساختار و رفتار مکانیکی کامپوزیت سطحی Al/SiC/CNT تولید شده به روش فراوری اصطکاکی اغتشاشی

علی علیزاده^{۱*}، مهدی عبدالهی آذغان^۲ و حبیب عابدی^۳

^۱ استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه مالک اشتر، تهران

^۲ دانشجوی دکتری، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه مالک اشتر، تهران

^۳ کارشناسی ارشد، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه مالک اشتر، تهران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

چکیده

فراوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP) می‌تواند خواص سطحی مانند مقاومت به سایش، سختی، استحکام و شکل‌پذیری را بدون تاثیر بر خواص حجمی مواد بهبود بخشد. در این پژوهش، کامپوزیت سطحی با استفاده از ذرات کاربید سیلیسیم (SiC) با اندازه میکرو و نانو و نانولوله کربن (CNT) بر زیر لایه آلومینیوم ۶۰۶۱ به وسیله FSP ایجاد شد. ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش نمونه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد، اندازه دانه‌های نمونه حاوی نانوذرات SiC ریزتر و توزیع یکنواخت‌تری در مقایسه با نمونه FSP شده بدون تقویت‌کننده دارد. نتایج آزمون سختی نشان داد، انجام عملیات FSP و افزودن ذرات تقویت‌کننده باعث افزایش سختی نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده شد؛ همچنین، بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه حاوی نانوذرات SiC بود که نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده ۱۸۵ درصد بهبود نشان داد؛ همچنین انجام عملیات FSP بدون افزودن ذرات تقویت‌کننده افزایش ۴۳ درصدی سختی نسبت به نمونه بدون عملیات را به دنبال داشت. بیشترین مقاومت به سایش و کمترین ضریب اصطکاک برای نمونه حاوی نانوذرات SiC و CNT بود که نسبت به نمونه بدون تقویت‌کننده ۸۱ درصد کاهش وزن کم‌تری داشت.

کلمات کلیدی: آلومینیوم Al6061؛ کاربید سیلیسیم؛ نانولوله کربن؛ فراوری اصطکاکی اغتشاشی.

Investigation of Microstructure and Mechanical Behavior of Al/SiC/CNT Surface Composite Fabricated by Friction Stir Processing

A. Alizadeh^{1*}, M. Abdollahi Azghan², H. Abedi³

¹ Assistant Professor, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

² PhD student, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

³ MSc, Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Friction Stir Processing (FSP) can improve surface properties such as abrasion resistance, hardness, strength and formability without affecting the bulk properties of the material. In this study, surface nanocomposites were fabricated using Silicon Carbide (SiC) micro- and nano-size particles and carbon nanotubes (CNT) on 6061 aluminum substrate by the FSP method. The microstructure, hardness and abrasion resistance of nanocomposite samples were studied. The results showed that the specimen containing of nano SiC had a more finer and homogenous distribution in the composite compared to specimen subjected to FSP without reinforcement. The results of the hardness test showed that performing FSP operation and adding reinforcing particles increased the hardness of the sample compared with the unreinforced sample. Moreover, the highest hardness rate was related to the sample containing SiC nanoparticles, which showed 185% improvement in comparison with the unreinforced sample. Furthermore, performing the FSP operation without adding reinforcing particles resulted in a 43% increase in hardness compared with the sample that had not gone through that operation. The highest abrasion resistance and the lowest coefficient of friction belonged to the sample containing SiC nanoparticles and CNT nanotubes, which indicated 81% lower weight loss than the unreinforced sample.

Keywords: Al6061; Silicon Carbide; Carbon Nanotube; Friction Stir Processing.

۱- مقدمه

تقاضای روز افزون برای بهبود عملکرد محصولات به صورت خواسته‌های مختلف از قبیل وزن کمتر، استحکام بیشتر و هزینه‌های کمتر باعث شده است که مواد خالص دیگر جوابگو نباشند. از این رو تحقیقات وسیعی در حال انجام است که یا خواص مواد موجود و متداول را بهبود بخشند و یا مواد جدیدتری تولید نمایند که به عنوان نمونه می‌توان کامپوزیت‌ها را نام برد [۱]. امروزه، کامپوزیت‌های تولید شده بر پایه آلیاژهای آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم به طور روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرند و روی بهبود خواص آن‌ها تحقیقات بسیاری صورت می‌گیرد. در اکثر کاربردهای صنعتی، خواص سطحی قطعه در اولویت قرار داشته و تعیین کننده عمر و دوام آن است [۲].

کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMCs^۱) مزایای فراوانی نسبت به فلزات زمینه دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به مدول الاستیک ویژه و استحکام ویژه بیشتر، خصوصیات بهتر در درجه حرارت بالا، ضریب انبساط حرارتی کمتر و مقاومت بیشتر در مقابل سایش اشاره کرد. به دلیل داشتن همین برتری‌ها، MMCs برای طیف وسیعی از کاربردها در صنایع هوافضا و اتومبیل‌سازی مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این وجود، شکل‌پذیری و چقرمگی آن‌ها به دلیل وجود تقویت‌کننده‌های سرامیکی ترد و غیرقابل تغییر شکل، نسبت به فلزات زمینه کم بوده و از نظر قیمت نیز در حال حاضر گران‌تر می‌باشند [۳].

محدودیت‌های زیادی در استفاده گسترده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی در صنایع مختلف وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به قیمت بالای کامپوزیت‌های زمینه فلزی در مقایسه با فلز زمینه اشاره کرد. علاوه بر این، به دلیل وجود تقویت‌کننده‌های سرامیکی الاستیک، شکل‌پذیری و چقرمگی کامپوزیت‌ها نسبت به زمینه تقویت نشده کاهش می‌یابد و این امر کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. از سوی دیگر در بسیاری از کاربردها عمر مفید اجزا به شرایط سطحی آن‌ها مانند مقاومت به سایش بستگی دارد. در این گونه کاربردها مطلوب است که سطح با فازهای سرامیکی تقویت‌شده و بخش زیرین با ترکیب اولیه باقی بماند تا

چقرمگی آن بالا باشد. این امر منجر به گسترش کامپوزیت‌های سطحی بخصوص در کاربردهای مقاوم به سایش شده است [۴].

از روش‌های مختلف تولید کامپوزیت سطحی، می‌توان به عملیات ذوبی توسط پرتو الکترونی با انرژی بالا، عملیات ذوبی با لیزر انرژی بالا، پاشش پلاسما، جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و فراوری اصطکاکی اغتشاشی اشاره کرد [۵ و ۶].

فراوری اصطکاکی اغتشاشی (FSP) یک نوع فرایند جوشکاری حالت جامد است که در آن اتصال به وسیله دوران یک ابزار غیرمصرفی انجام می‌گیرد. سمتهی که بردار مماس بر جهت دورانی ابزار هم‌جهت با بردار سرعت پیشروی ابزار باشد، سمت پیش رونده (AS^۲) و سمتهی که این دو بردار در خلاف جهت یکدیگر باشند، سمت پس رونده (RS^۳) نامیده می‌شود.

این روش به عنوان یکی از جدیدترین روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک^۴ برای تغییرات و بهسازی ریزساختار و تولید کامپوزیت‌های سطحی حاوی ذرات سرامیکی تقویت‌کننده و همگن‌سازی آلیاژهای حاوی ذرات رسوبی است که عمق اثر بیشتری نسبت به دیگر روش‌های فرآوری سطحی دارد، به گونه‌ای که از آن برای اصلاح ساختار توده‌ای^۵ از ماده می‌توان استفاده کرد؛ همچنین از این روش اصلاح ریزساختار کامپوزیت‌های زمینه فلزی و بهبود خواص در آلیاژهای ریختگی استفاده می‌شود [۷-۹].

ما و همکاران [۱۰]، تأثیر فراوری FSP را بر ریزساختار و خواص آلیاژ A356 بررسی کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که فراوری FSP منجر به شکستن قابل توجه ذرات درشت و سوزنی شکل سیلیسیم شده و توزیع همگنی از آن‌ها را در زمینه آلومینیوم ایجاد می‌کند. فراوری FSP با اختلاط و فورج مواد، تخلخل ایجاد شده در اثر ریخته‌گری را در این آلیاژ حذف می‌کند. این اصلاحات ریزساختاری، خواص مکانیکی آلیاژ A356 ریختگی از جمله شکل‌پذیری،

^۲ Advancing Side

^۳ Retreating Side

^۴ Severe Plastic Deformation

^۵ Bulk

^۱ Metal Matrix Composites

کننده با اندازه‌های متفاوت میکرو و نانو است. علاوه بر این شناسایی مکانیزم‌های تاثیرگذار بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های سطحی نیز از کارهای مهم انجام شده در این تحقیق است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در تحقیق حاضر، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت ۶ میلی-متر با ترکیب شیمیایی به جز پایه آلومینیوم طبق جدول ۱ به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. این آلیاژ به دلیل خواص مناسب مانند استحکام کششی و چقرمگی بالا، شکل‌پذیری مناسب، مقاومت در برابر خوردگی عالی و سهولت در ریخته‌گری مورد توجه بسیاری از صنعتگران قرار گرفته است. آلومینیوم آلیاژی خریداری شده ابتدا حل‌سازی شده، سپس پیرسازی مصنوعی گردید. این آلیاژ در دمای ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه در کوره قرار گرفت. سپس سریعاً از کوره خارج شده و در آب و یخ آبدی گردید. سپس این قطعه در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد مدت ۸ ساعت در کوره قرار گرفت [۱۶].

از پودر سرامیکی کاربید سیلیسیم (SiC) (خریداری شده از Us- nano [۱۸]) با مقیاس نانو به میانگین اندازه ذرات و بیشینه اندازه ذرات به ترتیب ۲۰ و ۵۰ نانومتر و در مقیاس میکرون به میانگین اندازه و بیشینه ۲۰ و ۵۰ میکرون به عنوان ذره تقویت‌کننده استفاده شد و همچنین از نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNT) (خریداری شده از Sigma Aldric [۱۹]) با قطر خارجی ۸-۱۵ نانومتر و قطر داخلی ۳-۵ نانومتر و طول ۵۰ میکرون و سطح ویژه بالای استفاده شد. شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت سطحی را نشان می‌دهد.

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

ابتدا سطح آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل از انجام فرآوری FSP توسط

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فلز پایه Al6061 [۱۷]

عنصر	Mn	Si	Mg	Fe	V	Cu	Ti
Wt.%	۰/۵۲	۰/۶۳	۱/۰۸	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۳۲	۰/۰۲

استحکام تسلیم و کششی و عمر خستگی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد.

خرمی و همکاران [۱۱] تأثیر نانوذرات SiC و محیط نیتروژن مایع بر ریزساختار آلومینیوم تغییر شکل شدید یافته حین فرآوری اصطکاکی اغتشاشی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که پس از سه پاس فرآوری، توزیع مناسبی از نانوذرات در منطقه اغتشاش یافته حاصل می‌شود؛ همچنین در مقایسه با نمونه فرآوری شده به همراه نانوذرات و در محیط نیتروژن مایع از وقوع رشد دانه شدید در منطقه اغتشاش یافته جلوگیری کرده و ساختار بسیار ریزدانه حاصل می‌کند.

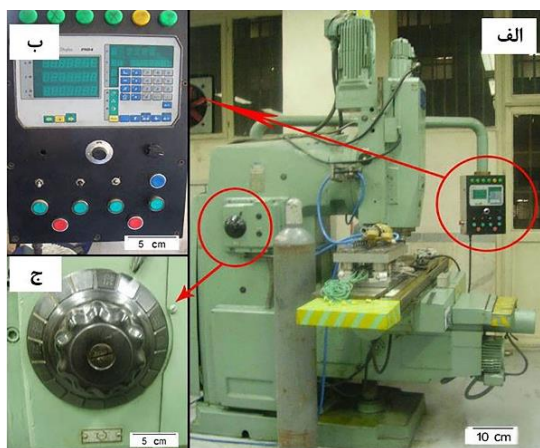
احمدی‌فر و همکاران [۱۲] با استفاده از فرآوری اصطکاکی اغتشاشی به اصلاح ریزساختار آلیاژ A356 و توسعه نانوکامپوزیت‌های سطحی A356/TiO₂/Gr و A356/TiO₂ پرداختند. بررسی ریزساختاری نشان داد که توزیع یکنواختی از ذرات تقویت‌کننده در سطح نانوکامپوزیت در منطقه اغتشاش وجود دارد و تشکیل نانوکامپوزیت سطحی منجر به بهبود خواص مکانیکی و رفتار سایشی آن می‌گردد؛ همچنین آن‌ها مشاهده کردند افزودن روانکار جامد گرافیت باعث بهبود خواص سایشی نانوکامپوزیت می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر احمدی فرد و همکاران [۱۳]، به بررسی تأثیر ذرات میکرومتری و نانومتری اکسید تیتانیم پرداختند و نشان دادند که تأثیر ذرات نانومتری بر خواص مکانیکی و سایشی بسیار مطلوب‌تر از ذرات میکرومتری است.

مظاهری و همکاران [۱۴] 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 [۱۵] 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.

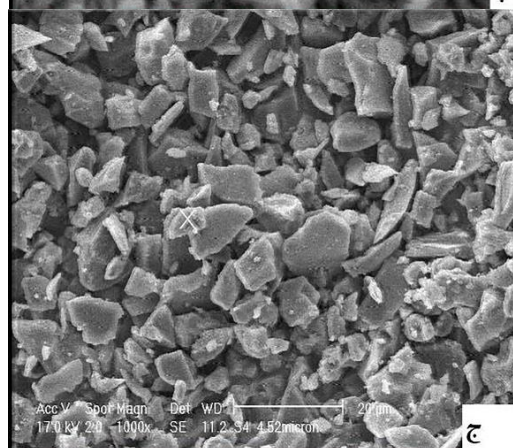
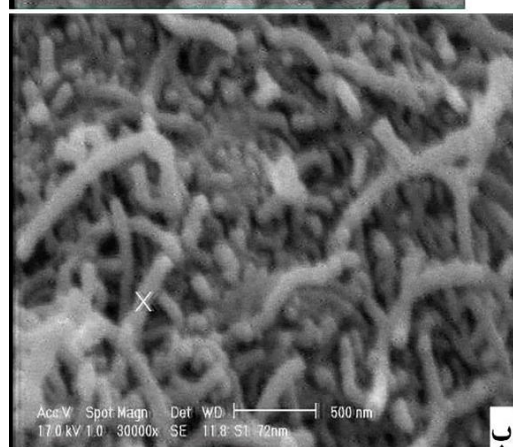
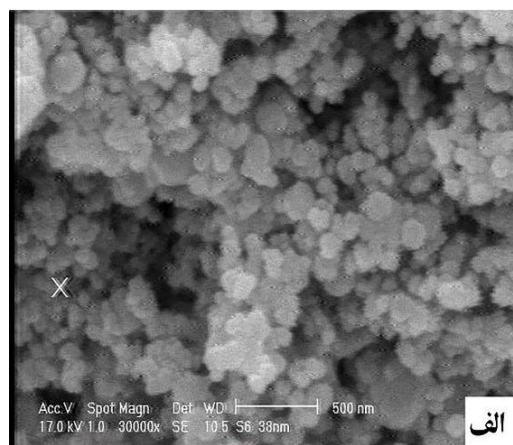
در تحقیق حاضر، تأثیر افزودن ذرات تقویت‌کننده SiC و CNT بر ریزساختار، خواص سایشی و سختی کامپوزیت زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد مطالعه قرار گرفت. مزیت‌های تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات پیشین تعیین ریزساختار و خواص مکانیکی در حضور دو نوع ذره و استفاده از تقویت-

کامپوزیت‌سازی، ابتدا یک مرحله FSP با ابزاری بدون پین جهت پوشاندن درز شیپار استفاده شد. سپس پودرهای منظور با نسبت حجمی یکسان مخلوط و داخل شیپارها ریخته شدند. جهت دستیابی به نتایج مطلوب، سرعت‌های مختلف دورانی و انتقالی استفاده گردید تا شرایط بهینه‌ی سرعت چرخش ابزار ۱۰۰۰ rpm و سرعت حرکت ۳۵ mm/min و زاویه پیشروی ابزار ۳ درجه نسبت به محور عمود تحت نیروی عمودی ۵ KN حاصل گردد. شکل ۲ و ۳ بترتیب ماشین اجرای فراوری، مشخصات هندسی، ابعادی شانه و پین ابزار مورد استفاده و همچنین شکل ۴ تصاویر مربوط قبل، حین و بعد از انجام فراوری اصطکاکی اغتشاشی در تحقیق حاضر را نشان می‌دهند. جدول ۲ شماره نمونه‌ها و درصد حجمی هر کدام تقویت‌کننده‌ها را نشان می‌دهد.

به منظور تشخیص و کنترل دما از دماسنج‌های نوع K (شکل ۵-الف) در صفحه پشت بند و در فواصل مختلف (۴ و ۸ میلی‌متر) در عرض خط مرکزی عبور ابزار استفاده شد. در این روش از دماسنج‌های T_1 و T_2 برای ناحیه پیش‌رونده و دماسنج‌های T_3 و T_4 برای ناحیه پس‌رونده استفاده شد. محل قرارگیری دماسنج‌ها داخل صفحه پشت‌بند و شماتیک قرارگیری دماسنج‌ها در زیر قطعه‌کار در شکل ۵-ب و شکل ۵-ج نشان داده شده است؛ همچنین بیشینه دمای هر کدام از دماسنج‌ها برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

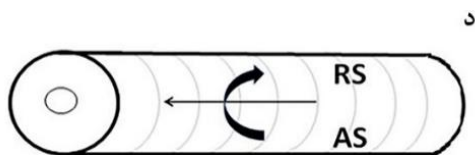
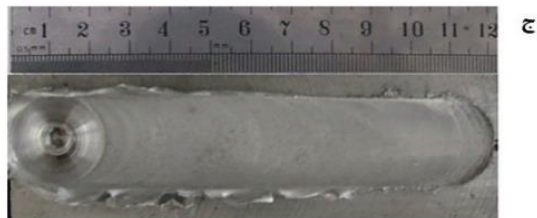
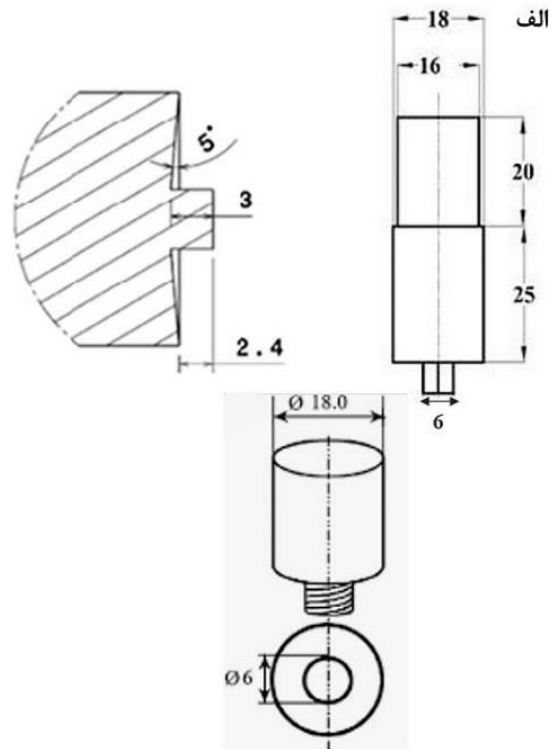


شکل ۲- تصویر الف) دستگاه فرز سنگین هیدرولیکی NC، ب) کنترل کننده میزان فروری و حرکت طولی ابزار و ج) کنترل کننده سرعت دورانی ابزار



شکل ۱- تصویر SEM پودر الف) نانو SiC، ب) CNT و ج) SiC میکرون

سنباده پولیش گردید تا هر گونه اکسیدها و چربی زدوده شود. به‌منظور نشاندن پودر بر روی قطعه شیپاری به ارتفاع ۳ میلی-متر و ضخامت ۱ میلی‌متر روی نمونه ایجاد شد. برای جلوگیری از پاشش ذرات تقویت‌کننده به بیرون در مرحله



شکل ۴- الف) آلومینیوم شیاردار (ب) حین اجرای فرآوری (ج) بعد از اجرای فرآوری (د) نواحی AS و RS

شکل ۳- الف) مشخصات هندسی و ابعادی ابزار (ابعاد بر حسب میلی‌متر) و ب) ابزار فرآیند

سایش توسط اره نواری و دستگاه وایرکات برش خوردند. پس از طی مراحل متالوگرافی استاندارد (سنباده‌زنی، پرداخت کاری^۱

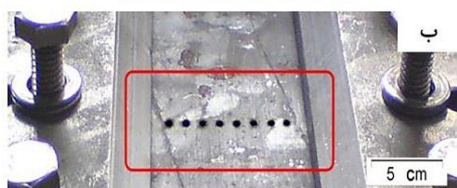
۲-۳- بررسی ریزساختار

پس از انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی، ورق‌ها جهت تهیه نمونه‌های متالوگرافی، میکروسکوپ نوری، الکترونی و آزمون

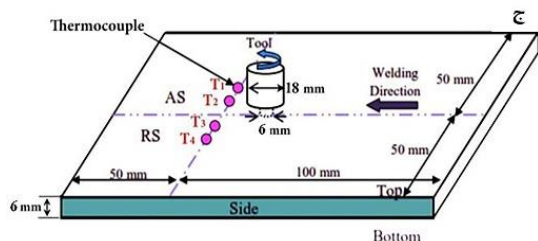
^۱ Polishing



الف



ب



ج

شکل ۵- الف) ترمومتر سری K شرکت Center، ب) محل قرارگیری دماسنج‌ها درون صفحه فولادی پشت‌بند و ج) شماتیک محل قرارگیری دماسنج‌ها T_1 ، T_2 ، T_3

ASTM E99 و طبق استاندارد Micromet1-Buehler Ltd. [۲۰] انجام گرفت. سختی در مقطع تمام نمونه‌ها و به فاصله ۱۰۰-۴۰۰ میکرومتر از یکدیگر (مطابق شکل ۶) اندازه‌گیری شد و نمودار سختی آن رسم گردید. به طوری که سختی‌سنجی از منطقه اغتشاشی آغاز شد، به سمت ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی پیش رفت و در نهایت به فلز پایه رسید.

یکی از اهداف اصلی ایجاد لایه نانوکامپوزیتی در سطح، افزایش مقاومت به سایش سطح است. به منظور بررسی تأثیر ریزدانه شدن در اثر کرنش پلاستیک و نیز تأثیر فاز تقویت‌کننده بر مقاومت به سایش سطح اصطکاک یافته، آزمون سایش پین روی دیسک^۱ در دمای اتاق بر روی نمونه‌های

جدول ۲- شماره نمونه، نوع و درصد تقویت‌کننده‌ها

شماره نمونه	نوع و درصد	فراوری
۱	بدون تقویت	FSP نشده
۲	بدون تقویت	FSP شده
۳	۱۰۰٪ SiC میکرون	FSP شده
۴	۱۰۰٪ SiC نانو	FSP شده
۵	۱۰۰٪ MWCNT	FSP شده
۶	۵۰٪ SiC نانو	FSP شده
	۵۰٪ MWCNT	FSP شده

جدول ۳- دماهای بیشینه ($^{\circ}\text{C}$) اندازه‌گیری شده به وسیله ترمومتر

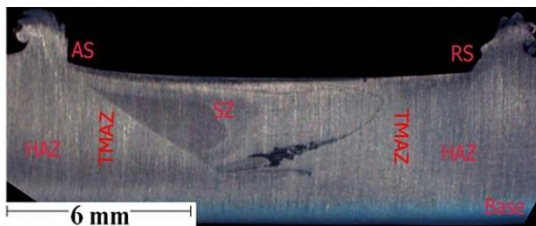
شماره نمونه	Max. T1	Max. T2	Max. T3	Max. T4
۲	۲۰۵/۲	۲۱۰/۳	۲۰۸/۴	۲۰۳/۳
۳	۱۶۰/۸	۱۷۸/۱	۱۷۳/۷	۱۲۷/۷
۴	۱۶۱/۳	۱۸۰/۲	۱۷۵/۱	۱۳۰/۳
۵	۱۶۳/۵	۱۷۹/۰	۱۷۶/۳	۱۲۹/۶
۶	۱۶۱/۸	۱۷۸/۵	۱۷۶/۶	۱۲۸/۱

و حکاکی) و مشخص شدن ریزساختار مقطع نمونه‌ها، نواحی مختلف آنها توسط میکروسکوپ نوری (Olympus XB60) و Philips XL-30 و میکروسکوپ الکترونی (Olympus G71) ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند، مجهز به سیستم EDS مورد بررسی قرار گرفت. برای حکاکی به منظور متالوگرافی از محلول کلر استفاده شد. محلول کلر حاوی آب، HNO_3 ، HCl ، HF با مقادیر ۹۵، ۲/۵، ۱/۵ و ۱ میلی‌لیتر است. مدت زمان نگهداری در این محلول ۶۰ ثانیه بود.

۲-۴- بررسی خواص مکانیکی

سختی‌سنجی نمونه‌ها به روش میکروسختی ویکرز با بار ۵۰ گرم و مدت زمان بارگذاری ۱۵ ثانیه توسط دستگاه

^۱ Pin on Disk



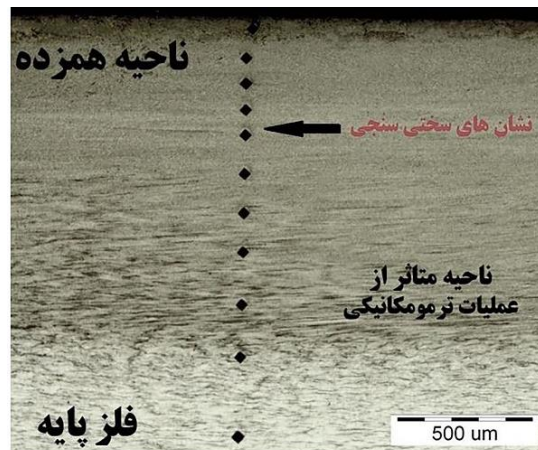
شکل ۷- قسمت‌های ریزساختاری بدست آمده نمونه ۶ پس از انجام فرآوری FSP

ناحیه متأثر از حرارت (HAZ^۴) به وجود می‌آید. شکل ۷ قسمت‌های ریزساختاری بدست آمده نمونه ۶ (کامپوزیت حاوی ۰.۵٪ CNT و ۰.۵۰٪ nano SiC) پس از انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. AS و RS نیز به ترتیب نشان‌دهنده قسمت پیش‌رونده و پس‌رونده هستند.

برای مشخص شدن تغییرات ریزساختاری، ریزساختار آلیاژ زمینه بدون تقویت‌کننده قبل و بعد از FSP (نمونه ۱ و ۲) در شکل ۸ در بزرگنمایی بالا نشان داده شده است. اندازه دانه ناحیه اغتشاش در مقایسه با اندازه دانه فلز پایه (۴۰ میکرون) در نتیجه اختلاط و تغییر شکل شدید با کرنش حدود 50 s^{-1} در اثر FSP تا حدود ۲ برابر ریزتر شده‌اند.

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار سطح نمونه‌های ۳ تا ۶ را نشان می‌دهد. اندازه دانه در منطقه اغتشاشی (SZ) برای هر یک از نمونه‌های FSP شده اندازه-گیری شد. طبق نتایج بدست آمده نمونه Al/nanoSiC با اندازه دانه‌های متوسط ۴ میکرون دارای کوچک‌ترین اندازه دانه و نمونه ۲ (بدون ذرات تقویت‌کننده) دارای بزرگ‌ترین اندازه دانه (تقریباً ۱۲ میکرون) است. به نظر می‌رسد ایجاد کامپوزیت در سطح نمونه‌ها با توجه به تأثیری که در جوانه‌زنی و تبلور مجدد ایفا می‌کند، می‌تواند عامل مؤثری در ریزدانگی باشد؛ همچنین سیلان مواد و کار مکانیکی نیز از عوامل مربوط به ریزدانگی می‌باشند [۷].

شکل ۱۰ تصویر SEM مربوط به سطح مقطع نمونه Al/nanoSiC را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ذرات SiC با توزیع یکنواخت در زمینه آلومینیوم به وضوح دیده می‌شوند. این ذرات به اشکال مختلف و اندازه‌های



شکل ۶- نشان‌های سختی‌سنجی در مقطعی از نمونه FSP شده

زمینه و FSP شده صورت گرفت. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM G99 [۲۱] انجام گرفت. در پژوهش حاضر نمونه دیسک از جنس فولاد ابزار سردکار است که سختی آن در حدود Rockwell-C ۶۰ بود. این آزمون در سرعت خطی 200 cm/s ، سرعت دورانی 191 rpm و نیروی عمودی 5 KgF انجام گرفت. نمونه‌های در نظر گرفته شده برای انجام این آزمون، استوانه‌هایی با قطر ۷ میلی‌متر بود که از مرکز مناطق FSP شده توسط دستگاه وایرکات^۱ بریده شد. برای هر نمونه ۵ مرحله آزمون صورت گرفت که در هر مرحله صفحه ساینده از جنس فولاد AISI-D3 مسافت ۲۰۰ متر را روی سطح نمونه‌ها پیمود. جهت اندازه‌گیری نرخ کاهش وزن و نرخ سایش، وزن نمونه‌ها پس از هر مرحله از سایش توسط ترازوی اندازه‌گیری دیجیتال با دقت 10^{-5} g اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار

در اثر انجام فرآوری اصطکاکی اغتشاشی براساس ویژگی‌های ریزساختاری دانه‌ها، سه ناحیه مجزا شامل ناحیه اغتشاشی (SZ^۳)، ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و

^۱ Wirecut

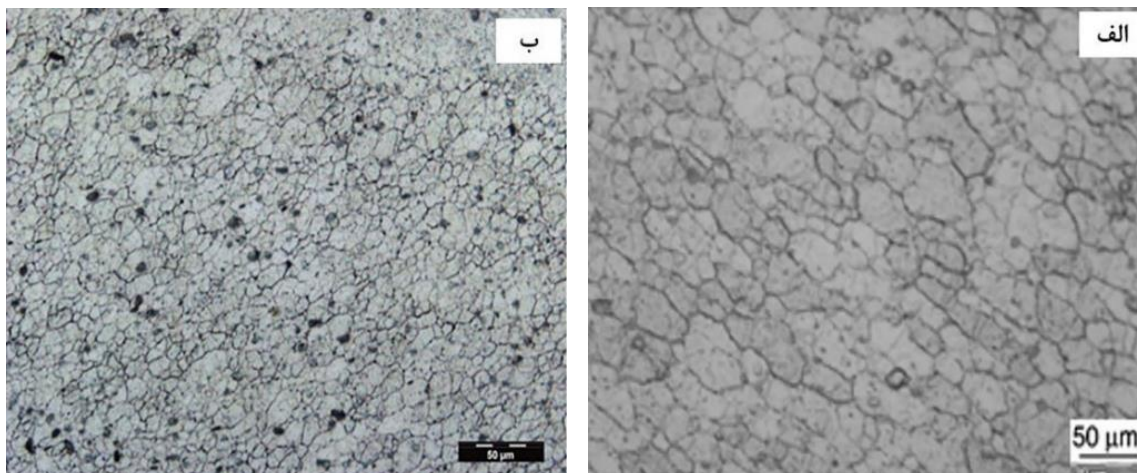
^۲ Stir Zone

^۳ Thermo-Mechanically Affected Zone

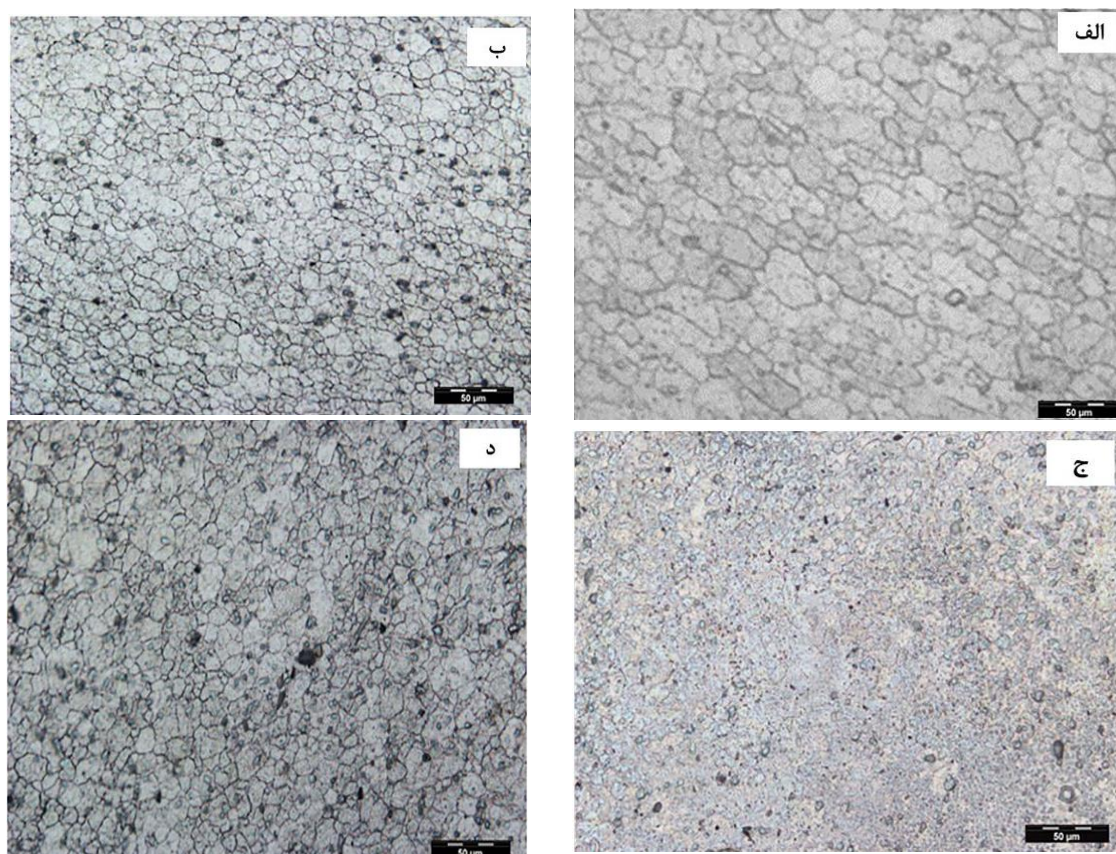
^۴ Heat-Affected Zone

شکل ۱۱ قابل مشاهده است، تجمع این نانولوله‌ها در زمینه ناپیوستگی ایجاد می‌کند.

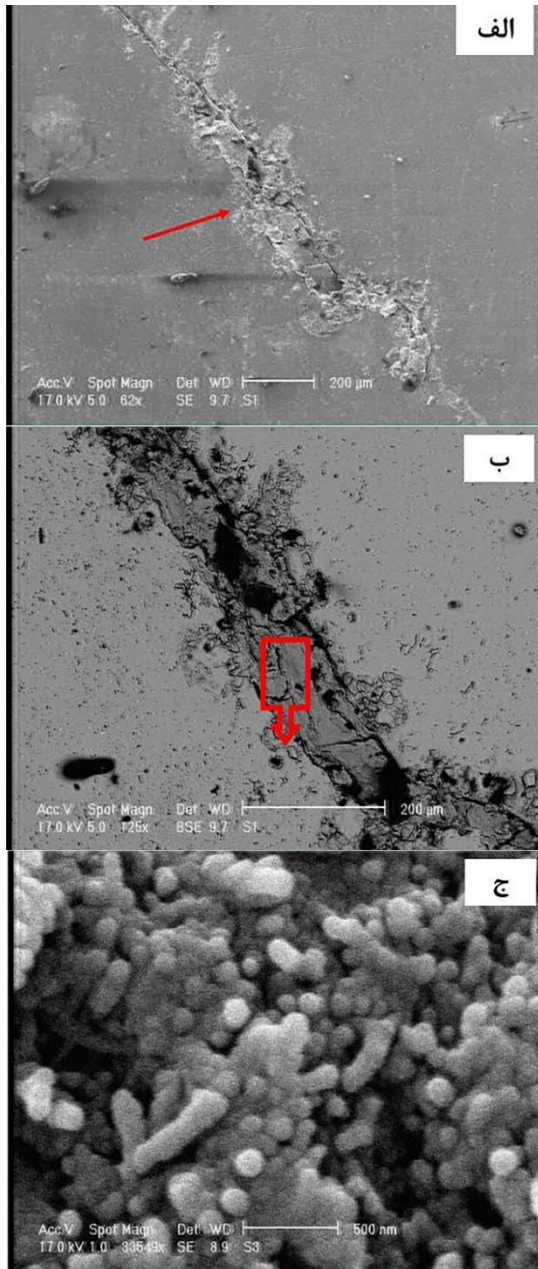
متفاوت در زمینه آلومینیوم پراکنده شده‌اند؛ اما نانولوله‌های کربن در زمینه توزیع مناسبی نداشته و همان‌طور که در



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ نوری از آلومینیوم Al6061، (الف) قبل و (ب) بعد از انجام فراوری اصطکاکی اغتشاشی

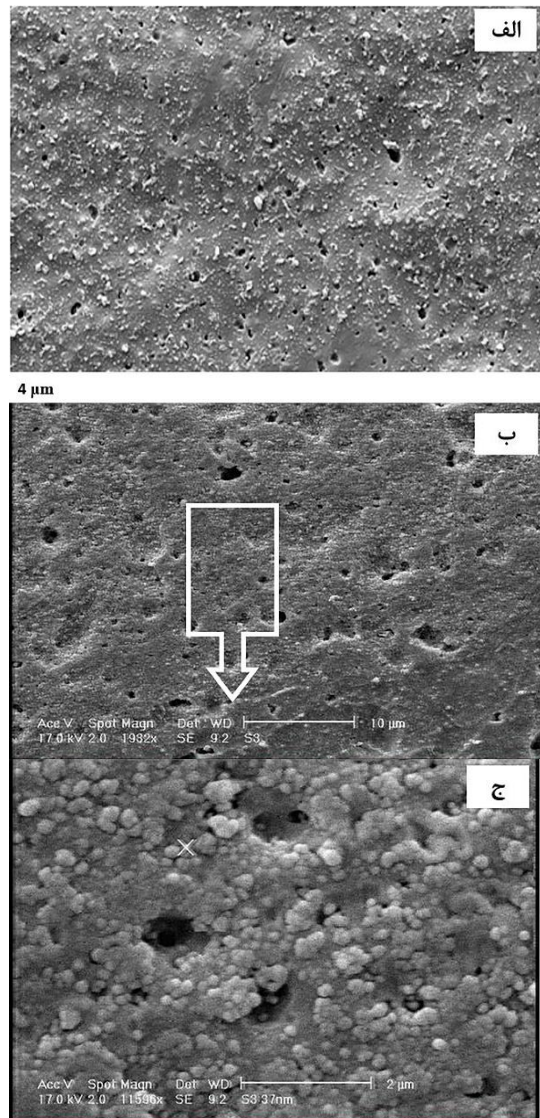


شکل ۹- تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه (الف) ۳، (ب) ۴، (ج) ۵ و (د) ۶



شکل ۱۱- تصاویر SEM از مقطع نمونه ۵ (Al/MWCNT) با بزرگنمایی (الف) ۶۰X، (ب) ۱۲۵X و (ج) ۳۳۵۰۰X

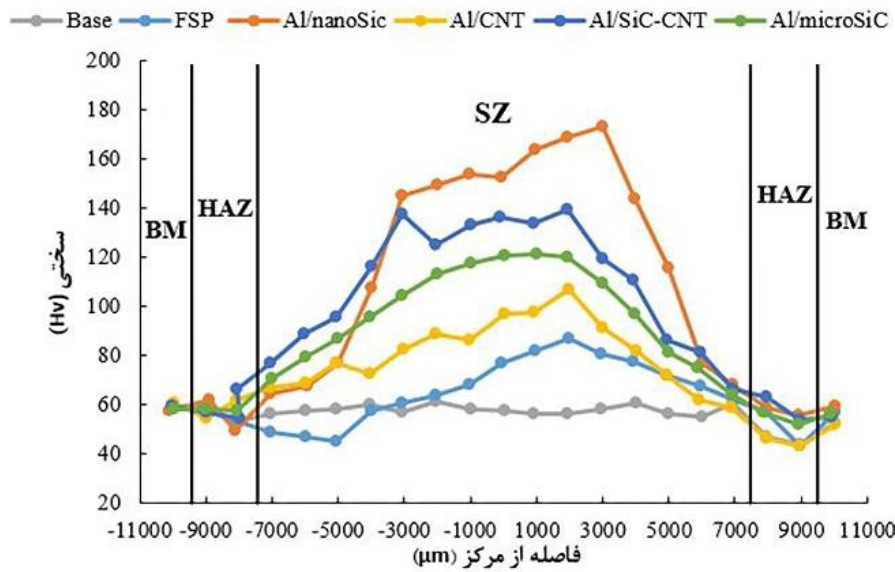
همچنین سختی نمونه کامپوزیت SiC نانو بیشتر از نمونه بدون اعمال تقویت کننده (فقط FSP شده) است. در نواحی کامپوزیت سازی شده به دلیل حضور ذرات تقویت کننده SiC، سختی بالاتری مشاهده می شود. با مقایسه سختی نمونه ها به خوبی می توان تأثیر ذرات تقویت کننده در افزایش سختی



شکل ۱۰- تصاویر SEM از مقطع نمونه ۴ (Al/nanoSiC) با بزرگنمایی (الف) ۱۰۰۰X، (ب) ۲۰۰۰X و (ج) ۱۰۰۰۰X

۳-۱- خواص سختی

همان طور که در شکل ۱۲ ملاحظه می شود، سختی نمونه FSP شده در ناحیه اغتشاشی نسبت به نمونه بدون فراوری بیشتر است. ما و همکاران [۲۲]، گزارش کردند که در آلیاژهای آلومینیوم FSP شده، تصاویر TEM نشان دهنده تعداد بی شماری ذرات فاز ثانویه با اندازه نانومتری است که با میکروسکوپ نوری قابل تشخیص نیستند. آنها وجود این ذرات ریز را نتیجه شکسته شدن در اثر برخورد با ابزار و همچنین انحلال و رسوب دوباره ذرات بیان کردند.



شکل ۱۲- پروفیل مقایسه میکروسختی نمونه‌ها

موانع در مقابل حرکت نابجایی‌ها بیشتر شده و در نتیجه سختی و استحکام افزایش می‌یابد [۲۴]؛ همچنین افزایش دما در طی فراوری FSP، منجر به افزایش سرعت نفوذ ذرات و در نتیجه تسریع انحلال رسوبات می‌شود. علاوه بر افزایش دما، اختلاط و تغییر شکل پلاستیک شدید، چگالی بالایی از نابجایی‌ها را به وجود می‌آورد. با توجه به ضریب نفوذ بالا در امتداد نابجایی‌ها سرعت نفوذ بالا رفته و انحلال رسوبات سریع‌تر می‌شود. سرد کردن در دمای محیط بعد از چرخه حرارتی ناشی از FSP، باعث می‌شود که رسوبات به صورت محلول جامد باقی بمانند. سپس رسوب‌گذاری در دمای محیط اتفاق افتاده و منجر به افزایش سختی و استحکام شود [۲۴].

عدم توزیع مناسب CNT در زمینه (شکل ۸) تجمع ذرات و تمرکز تنش را به دنبال دارد که باعث می‌شود، میزان سختی این نمونه نسبت به سایر نمونه‌های کامپوزیتی کم‌تر باشد.

۲-۳- بررسی خواص سایشی

۲-۳-۱- تغییرات جرم پین و نرخ سایشی

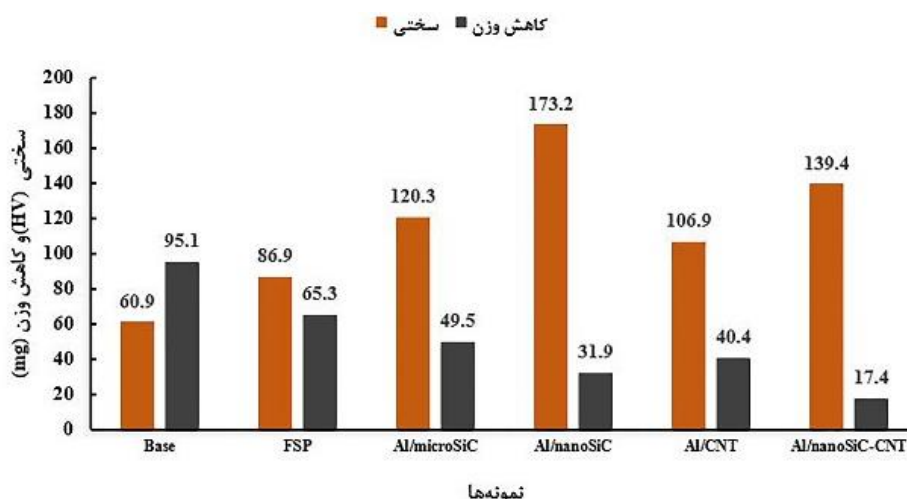
آزمایش سایش در ۵ مرحله ۰ تا ۲۰۰ متر - ۰ تا ۴۰۰ متر - ۰ تا ۶۰۰ متر - ۰ تا ۸۰۰ متر و ۰ تا ۱۰۰۰ متر انجام گردید. شکل ۱۳ نتایج آزمون سایش به صورت جرم از دست رفته

نواحی کامپوزیتی را تشخیص داد. در حالت کلی سختی در ناحیه‌ی اغتشاشی بالاتر از نواحی اطراف است، اما تغییرات سختی در نمونه‌ها متفاوت و وابسته به شرایط فراوری است [۲۳]. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه ۴ دارای بیشترین سختی و نمونه ۱ دارای کمترین سختی سطحی است. سختی نمونه‌های کامپوزیتی هم به مسئله ریزدانگی ایجاد شده در اثر فراوری اصطکاکی اغتشاشی و هم به حضور ذرات سرامیکی در نواحی اغتشاشی بستگی دارد. ذرات تقویت‌کننده بر اساس مکانیزم اوروان^۱، به صورت موانعی در مقابل حرکت نابجایی‌ها عمل کرده و منجر به افزایش تنش لازم برای حرکت نابجایی‌ها و تغییر شکل می‌شوند؛ بنابراین با حضور ذرات تقویت‌کننده سختی و استحکام افزایش می‌یابد [۲۴]. به طور کل هرچه میانگین اندازه دانه در منطقه اغتشاشی کاهش می‌یابد میزان سختی افزایش پیدا می‌کند. بر همین اساس نتایج بدست آمده نیز مطابق انتظار بود. علاوه بر این با ایجاد ریزدانگی در ماده مرزدانه‌ها افزایش پیدا می‌کنند. به طور کل مرزدانه‌ها به صورت موانع مؤثری در مقابل حرکت نابجایی‌ها عمل می‌کنند. بر اساس رابطه‌ی هال-پچ با کاهش اندازه دانه‌ها و افزایش مساحت مرزدانه‌ها،

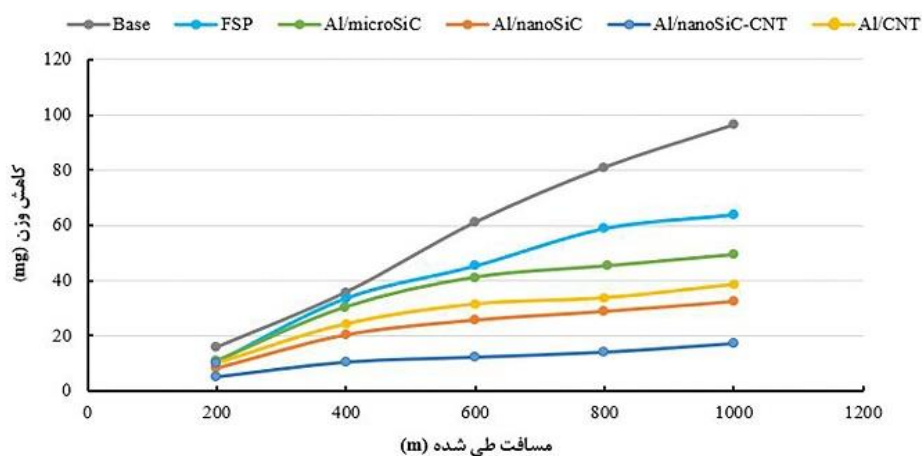
¹ Orowan Mechanism

در شکل ۱۴ نمودار تغییرات وزن در مقابل مسافت سایش رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمونه فلز پایه به دلیل داشتن اندازه دانه‌های بزرگ در بالاترین قسمت نمودار و نمونه کامپوزیتی Al/SiC/CNT به دلیل داشتن اندازه دانه پایین و حضور CNT و توزیع یکنواخت ذرات SiC دارای کمترین مقدار سایش است. همان‌طور که نشان داده شده است برای نمونه کامپوزیتی، هم میزان وزن کاهش یافته و هم نرخ سایش که همان شیب نمودارها است، کمتر از نمونه‌های دیگر است و با افزایش مسافت طی شده توسط پین، این اختلاف بیشتر می‌شود.

پس از انجام آزمون سایش برای ۰ تا ۱۰۰۰ متر و بیشینه سختی منطقه اغتشاشی را نشان می‌دهد. نمونه ۱ به دلیل سختی کم به صورت قابل توجهی بیش از سایر نمونه‌ها دچار سایش شد. با افزایش اندازه دانه سطح و متعاقب آن کاهش سختی نمونه‌ها، میزان سایش بیشتری اتفاق افتاد؛ بنابراین لزوماً اگر سختی سطحی بیشتر باشد، جرم از دست رفته نمونه‌ها کمتر نمی‌شود. ملاحظه می‌شود کمترین جرم از دست رفته در حین سایش مربوط به نمونه ۶ است، ولی نمونه ۴ بیشترین سختی را دارد. به طور کل سختی نمی‌تواند کلیه خصوصیات سایشی کامپوزیت‌های ساخته شده را توجیه نماید. لذا باید پارامترهای دیگری از قبیل ضریب اصطکاک و همچنین ویژگی‌های ریزساختاری را نیز مدنظر قرار داد.



شکل ۱۳- نمودار مقایسه کاهش وزن پس از سایش با مسافت ۱۰۰۰ متر و سختی بیشینه نمونه‌ها



شکل ۱۴- نمودار تغییرات وزن نمونه‌ها در مقابل مسافت سایش پس از انجام آزمون سایش

جدول ۴- میانگین ضریب اصطکاک نمونه‌ها تحت آزمون سایش

نمونه	میانگین ضریب اصطکاک دینامیکی
۱	۰/۷۱
۲	۰/۶
۳	۰/۴۴
۴	۰/۳۹
۵	۰/۳۵
۶	۰/۳

اصطکاک کاهش پیدا می‌کند که علت آن افزایش استحکام سطح نمونه‌های ۲ تا ۶ است.

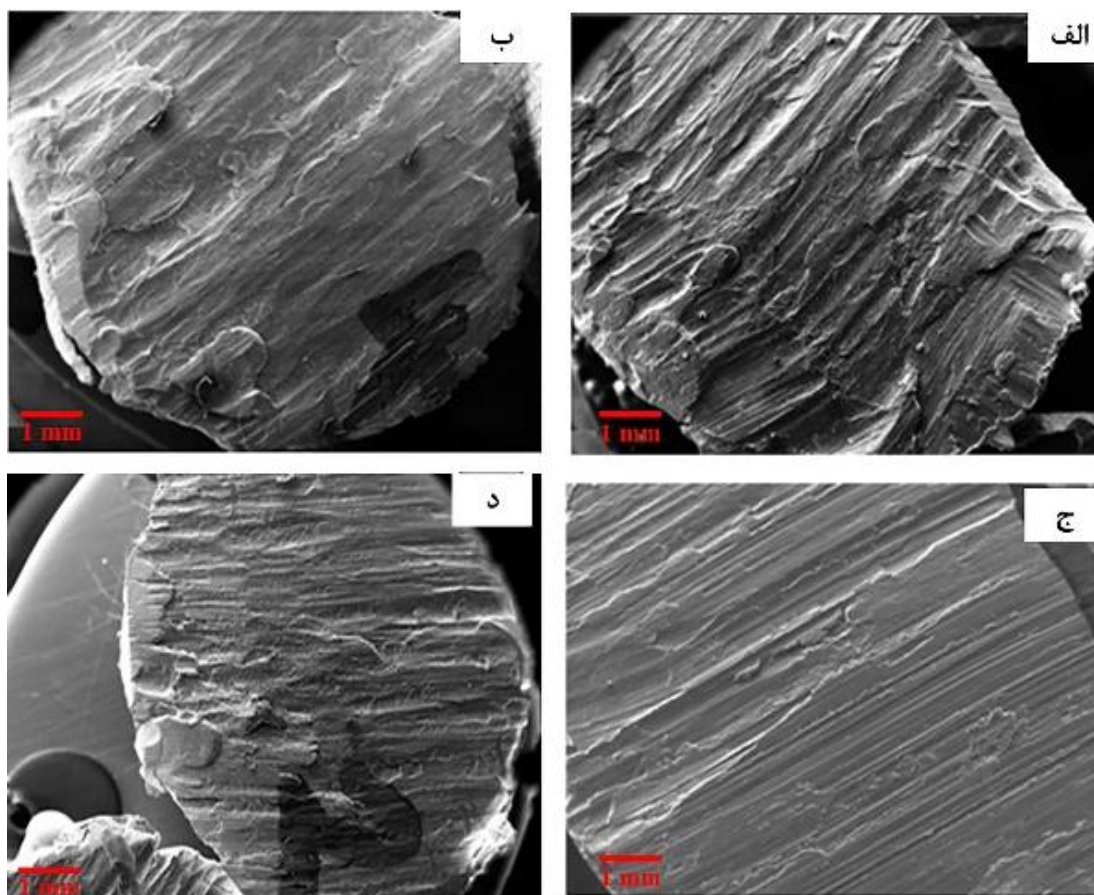
اگر رفتار سایشی صرفاً وابسته به استحکام سطحی نمونه بود باید رفتاری مشابه با سختی نشان می‌داد؛ درحالی‌که در نمونه‌های کامپوزیتی کم‌ترین کاهش وزن و ضریب اصطکاک مربوط به نمونه حاوی ذرات تقویت‌کننده SiC و CNT (نمونه ۶) است؛ همچنین نمونه حاوی CNT ضریب اصطکاک کم‌تری در مقایسه با نمونه حاوی نانوذرات SiC دارد.

شکل ۱۵ سطح سایش نمونه‌های ۱، ۲، ۴ و ۶ بعد از ۱۰۰۰ متر را نشان می‌دهد. در تصاویر SEM از سطح سایش نمونه ۱، آثار کندگی و شیارهای موازی دیده می‌شود که به ترتیب مربوط به مکانیزم‌های چسبان و خراشان است. در سطح سایش نمونه ۲ نیز، آثار کندگی و شیارهای موازی با ابعاد متفاوت قابل مشاهده است که عمق و وسعت آن در مقایسه با نمونه ۱ کاهش یافته است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سختی و اصلاح قابل توجه ریزساختار در اثر FSP منجر به بهبود مقاومت به سایش در این نمونه شده است. مورفولوژی سطح سایش حاکی از آن است که مکانیزم سایش در نمونه ۱ ترکیبی از سایش چسبان و سایش ورقه‌ای است؛ همچنین در نمونه ۲ نیز سطح سایش حاکی از ترکیب سایش خراشان شدید و سایش چسبان خفیف است. نانو ذرات SiC در نمونه ۴ علاوه بر افزایش سختی و مقاومت به سایش منجر به افزایش نوسان در ضریب اصطکاک شد. علت این امر کنده شدن یا شکستن ذرات SiC در اثر سایش و قرار گرفتن این ذرات سخت بین سطوح در حال حرکت و ایجاد

بر اساس تحقیقات [۲۲]، در ابتدای سایش، لایه اتمسفری نازک بین دو سطح به عنوان روانکار جامد عمل می‌کند؛ بنابراین در ابتدای سایش، میزان سایش و نرخ سایش برای همه نمونه‌ها مقدار تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد. در مرحله بعدی، لایه اتمسفری دیگر قادر به مقاومت در برابر نیروهای وارده نیست و نرخ سایش به وسیله ذرات، زمینه و سطح مقابل کنترل می‌شود و در این مرحله شیب نمودارها یا نرخ سایش افزایش پیدا می‌کند. در نمونه کامپوزیت شده، در این مرحله مشخص می‌شود که ذرات SiC و CNT، منجر به بهبود مقاومت به سایش زمینه آلومینیم شده است. در آلومینیم زمینه، به دلیل مقاومت پایین در مقابل تغییر شکل، مواد در تماس با دیسک در اثر وجود تنش‌های فشاری و برشی به شدت تغییر شکل پلاستیک می‌دهند. تغییر شکل پلاستیک شدید در سطح، منجر به تخریب لایه‌های سطحی مواد می‌شود [۲۲]. این امر منجر به افزایش میزان کاهش وزن و نرخ سایش در آلومینیم زمینه شده است. درحالی‌که با ورود ذرات تقویت‌کننده SiC و CNT به زمینه، مقاومت زمینه در مقابل تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت زمینه در مقابل تغییر شکل پلاستیک باعث کاهش سایش در نمونه کامپوزیتی شده است. علاوه بر این، وجود ذرات SiC و CNT منجر به کاهش ضریب اصطکاک و کاهش بیشتر سایش می‌شود. در نمونه FSP شده بدون اعمال پودر نیز، به دلیل ساختار همگن‌تر و ریزدانه‌تر، مقاومت در مقابل تغییر شکل پلاستیک نسبت به زمینه بالاتر است. این امر باعث کاهش نرخ سایش در این نمونه نسبت به زمینه شده است.

۳-۲-۲- تغییرات ضریب اصطکاک

جدول ۴ میانگین ضریب اصطکاک نمونه‌های تحت عملیات FSP و حاوی ذرات تقویت‌کننده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه ۱ ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده و FSP شده دارد. می‌توان اذعان داشت که در آلومینیم به سبب نبود ذرات تقویت‌کننده، پین سایش، توانایی بیشتری در نفوذ به سطح نمونه دارد که جوانب پین نیز با نمونه درگیر شده و موجب افزایش ناهموازی‌ها و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. با انجام عملیات FSP و افزودن ذرات تقویت‌کننده، ضریب



شکل ۱۵- تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه‌های الف) ۱، ب) ۲، ج) ۴ و د) ۶ پس از آزمون سایش با مسافت ۱۰۰۰ متر

۱۶ شماتیکی از مکانیزم سایش نمونه‌های حاوی CNT و بدون CNT را نشان می‌دهد. در نمونه بدون CNT پین سایش به داخل نمونه نفوذ کرده و نمونه را تخریب می‌کند (شکل ۱۶ الف)؛ اما در نمونه حاوی CNT، با توجه به اینکه بین لایه‌های CNT پیوند ضعیفی وجود دارد؛ بنابراین این لایه‌ها از هم جدا شده و بین پین سایش و نمونه قرار گرفته و به عنوان روان‌کننده و انتقال‌دهنده پین عمل می‌کند؛ بنابراین کاهش وزن کم‌تر شده و ضریب اصطکاکی نیز کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی دقیق تاثیر افزودن ذرات تقویت‌کننده دیگر متغیرها از قبیل سرعت چرخش، سرعت حرکت، زاویه ابزار و دمای نمونه حین کار ثابت و کنترل شده بود. ویژگی‌های ریزساختاری و رفتار تریبولوژیکی کامپوزیت‌هایی

مانع در مقابل حرکت سطوح است [۲۵]. وجود نانو ذرات بسیار سخت SiC در زمینه می‌تواند به آسیب سطحی شدید به دیسک چرخان فولادی منجر شود که نقش ساینده را بازی می‌کند. ذرات شکسته شده و یا جدا شده از سطح نمونه، در بین دو سطح تحت سایش قرار می‌گیرند. از آنجایی که این ذرات بسیار سخت بوده و با توجه به شکل ۱ دارای مورفولوژی لبه‌دار است، خود به عنوان یک ساینده عمل نموده و آسیب شدیدتری به هر دو سطح نمونه و دیسک وارد می‌کند. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که با ادامه سایش، ذرات کنده شده از هر دو سطح باهم مخلوط شده و بین دو سطح قرار گرفته و لذا مانع تماس کامل دو سطح شده، منجر به کاهش میزان سایش می‌شوند [۲۵]. به نظر می‌رسد که وجود این لایه محافظ پایدار در سطح منجر به افزایش مقاومت به سایش کامپوزیت Al/nanoSiC در مقایسه با نمونه FSP شده و نمونه زمینه شده است. شکل

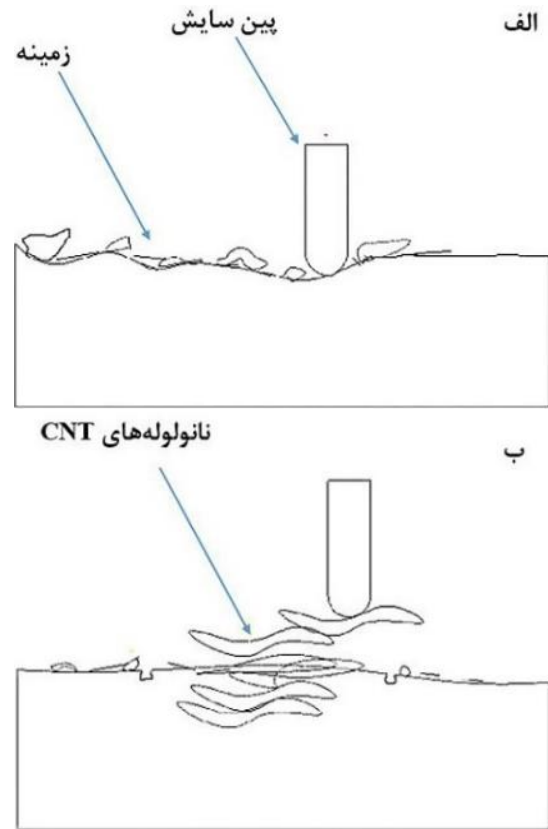
همچنین انجام فرایند FSP رشد ۴۳ درصدی سختی را به دنبال داشت.

۳- کمترین کاهش وزن مربوط به نمونه حاوی CNT و SiC بود؛ به طوری که کاهش وزن آن بعد از ۱۰۰۰ متر مسافت آزمون سایش حدود ۸۲ کم تر از نمونه بدون تقویت کننده بود.

۴- کمترین میانگین ضریب اصطکاک حاصل از آزمون سایش نیز با ۰/۳ مربوط به نمونه حاوی CNT و SiC بود که نسبت به نمونه بدون تقویت کننده ۵۸ درصد کاهش یافت.

۵- مراجع

- [1] Hosseini Abbandanak SN, Abdollahi Azghan M, Zamani A, Fallahnejad M, Eslami-Farsani R, Siadati H (2020) Effect of graphene on the interfacial and mechanical properties of hybrid glass/Kevlar fiber metal laminates. J Ind Text.
- [2] Aberkane SM, Bendib A, Yahiaoui K (2014) Correlation between Fe-V-C alloys surface hardness and plasma temperature via LIBS technique. Appl Surf Sci 301: 225-229.
- [3] Alizadeh A, Abdollahi Azghan M (2021) Investigation on the microstructure and tensile properties of Al5083-TiB2 nanocomposites produced by stir casting method. Journal of Advanced Materials and Technologies 10(2): 45-57. (In Persian)
- [4] Şahin S, Yüksel N, Durmu H, Gençalp S (2014) Wear behavior of Al/SiC/Graphite and Al/FeB/Graphite hybrid composites. Adv Mat Res 48(5): 639-646.
- [5] Wang XH, Song S, Zou Q, Qu S (2006) Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process. Mat Sci Eng A-Struct 441(1-2): 60-67.
- [6] Gui M, Kang SB (2001) Aluminum hybrid composite coatings containing SiC and graphite particles by plasma spraying. Mater Lett 51(5): 396-401.
- [7] Bauri R, Yadav D, Suhas G (2001) Effect of friction stir processing (FSP) on microstructure and properties of Al-TiC in situ composite. Mat Sci Eng A-Struct 528(13-14): 4732-4739.8.
- [8] Barmouz M, Asadi P, Besharati Givi M, Taherishargh M (2011) Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles size and volume fraction. Mat Sci Eng A-Struct 528(3): 1740-1749.



شکل ۱۶- شماتیک مکانیزم سایش در نمونه (الف) بدون CNT و (ب) حاوی CNT

با ذرات تقویت کننده سیلیسیم کاربید (SiC) و نانولوله کربن (CNT) با آلیاژ زمینه آلومینیوم AA6061 تولید شده به روش فراوری اصطکاکی اغتشاشی بررسی شد. سختی سطحی و مقطعی، ضریب اصطکاک و میزان کاهش وزن نمونه های کامپوزیتی و FSP شده بدون اعمال پودر با فلز زمینه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. خلاصه نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- انجام فرایند FSP باعث کاهش دو برابری اندازه دانه نسبت به نمونه بدون FSP شد؛ همچنین افزودن نانوذرات تقویت کننده SiC کاهش سه برابری اندازه دانه نسبت به نمونه بدون FSP و بدون تقویت کننده را به دنبال داشت.

۲- بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه حاوی نانوذرات SiC بود که نسبت به نمونه بدون تقویت کننده حدود ۱۸۰ درصد بهبود نشان داد؛

- [16] Gowri SM, Achutha KU, Sharma SS, Prabhu PR (2015) Influence of aging temperature and aging time on the mechanical property and microstructure during precipitation hardening of Al 6061 alloy. *Int J Appl Eng Res* 10(78): 25-31.
- [17] Christy T, Murugan N, Kumar S (2010) A comparative study on the microstructures and mechanical properties of Al 6061 alloy and the MMC Al 6061/TiB₂/12p. *Mater Charact* 9(1): 57-65.
- [18] Website of the manufacturer of nanoparticles (US-Research Nanomaterials) (<https://us-nano.com>)
- [19] Website of the life science technologies and specialty chemicals (Sigma-Aldrich) (<https://sigmaaldrich.com>)
- [20] ASTM E92-17 (2017) Standard test methods for Vickers hardness and Knoop hardness of metallic materials. ASTM International, West Conshohocken (PA).
- [21] ASTM G99-95a (2000) Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [22] Ma Z, Pilchak A, Juhas M, Williams J (2008) Microstructural refinement and property enhancement of cast light alloys via friction stir processing. *Scr Mater* 58(5): 361-366.
- [23] Fujii H, Cui L, Tsuji N, Maeda M, Nakata K, Nogi K (2006) Friction stir welding of carbon steels. *Mat Sci Eng A-Struct* 429(1-2): 50-57.
- [24] Stoloff N (1989) Physical and mechanical metallurgy of Ni3Al and its alloys. *Int Mater Rev* 34(1): 153-184.
- [25] Venkataraman B, Sundararajan G (2000) Correlation between the characteristics of the mechanically mixed layer and wear behaviour of aluminium, Al-7075 alloy and Al-MMCs. *Wear* 245(1-2): 22-38.
- [9] Vahdati M, Moradi M (2019) Statistical analysis of parameters affecting the mechanical properties of surface composite Al7075/Al2O3 produced by friction stir processing using response surface methodology. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 9(3): 81-94. (In Persian)
- [10] Ma Z, Sharma S, Mishra R (2006) Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum. *Mat Sci Eng A-Struct* 433(1-2): 1740-1749.
- [11] Sarkari Khorrami M, Kazeminezhad M, Kokabi A.H (2016) The Effect of SiC nanoparticles and liquid nitrogen medium on microstructure evolutions of severely deformed Al during friction stir processing. *Journal of Advanced Materials and Technologies* 5(4): 1-9. (In Persian)
- [12] Ahmadifard S, Roknian M, Khodae F, Heidarpour A (2018) Fabrication and investigation of microstructure and mechanical properties of A356-TiO₂-Gr surface hybrid nanocomposite by friction stir processing. *Compos Sci Technol* 5(1): 61-68. (In Persian)
- [13] Ahmadi Fard S, Kazemi S, Heidarpour A (2016) Fabrication of Al5083/TiO₂ surface composite by friction stir processing and investigation of microstructural, mechanical and wear properties. *Modares Mechanical Engineering* 15(12): 61-68. (In Persian)
- [14] Mazaheri Y, Karimzadeh F, Enayati M (2011) A novel technique for development of A356/Al₂O₃ surface nanocomposite by friction stir processing. *J Mater Process* 211(10): 1614-1619.
- [15] Alidokht S, Abdollah-zadeh A, Soleymani S, Assadi H (2011) Microstructure and tribological performance of an aluminium alloy based hybrid composite produced by friction stir processing. *Mater Des* 32(5): 2727-2733.