

## بررسی خواص سایشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و کامپوزیت حاوی نانولوله‌های کربنی تولیدشده به روش آلیاژسازی مکانیکی و فرایند پرس داغ

مهدی امیدی<sup>۱</sup>، سعید ناطق<sup>۲</sup>، آرش اعتماد\*<sup>۳</sup>، محمد رضا رستمی<sup>۴</sup> و محمد اسماعیل شفیعی<sup>۵</sup>  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۰۹، ش.ص: ۶۶-۵۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶)

### چکیده

در این پژوهش آلیاژ آلومینیوم نانو ساختار و کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی حاوی مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی (۵/۵-۱ wt.%) به روش ترکیبی آلیاژسازی مکانیکی و پرس داغ تولید شدند. آزمایش‌ها نشان داد که افزودن نانولوله کربنی تا ۱ درصد وزنی به میزان جزئی چگالی نسبی کامپوزیت آلومینیوم- نانولوله کربنی را افزایش می‌دهد. این در حالی است که مقادیر سختی کامپوزیت فوق با افزایش نانولوله‌های کربنی به دلیل قرارگیری نانولوله‌های کربنی در فضای خالی بین ذرات پودر و پر شدن میکرو حفرات به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. مقدار سختی از HV ۹۳/۳ مربوط به آلومینیوم درشت‌دانه به HV ۲۱۹/۱۸ رسید. مقادیر بیش‌تر نانولوله‌های کربنی، موجب کاهش سختی و چگالی نسبی کامپوزیت تولیدی گردید. رفتار سایشی کامپوزیت‌های آلومینیومی حاوی نانولوله‌های کربنی به روش پین روی دیسک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اضافه کردن نانولوله‌های کربنی تا میزان ۱ درصد وزنی به کامپوزیت، موجب کاهش ضریب اصطکاک و کاهش وزن شده است. مقدار ضریب اصطکاک آلومینیوم درشت‌دانه در محدوده ۰/۳۳-۰/۹۱ و برای نمونه حاوی ۱ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حالت پایدار در محدوده ۰/۴۲-۰/۴۵ تغییر کرد. همچنین کاهش وزن نیز از ۴۴/۱ به ۷/۴ میلی‌گرم رسید. این در حالی است که افزایش مقادیر بیش از آن به دلیل ایجاد پدیده توده‌ای شدن، موجب افزایش ضریب اصطکاک و کاهش وزن کامپوزیت آلومینیومی شد. نتایج آزمون‌های سایش برای آلومینیوم درشت‌دانه، نانو ساختار و کامپوزیت آلومینیوم حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی نشان داد که مکانیزم سایش به ترتیب چسبان، ورقه ورقه شدن و خراشان است.

**واژه‌های کلیدی:** آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، کامپوزیت، نانولوله‌های کربنی، پرس داغ، سایش.

<sup>۱</sup> - استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

<sup>۲</sup> - استاد، دانشکده مهندسی مواد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی نانو مواد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

<sup>۴</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی نانو مواد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

<sup>۵</sup> - کارشناسی، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

\*-نویسنده مسئول مقاله: arashetamad@yahoo.com

## پیشگفتار

در سال‌های اخیر، نانولوله‌های کربنی، به دلیل ویژگی‌های خاص و منحصر به فرد شیمیایی، فیزیکی، الکتریکی و مکانیکی، تمایل پژوهشگران را در جنبه‌های مختلف علمی به خود جلب کرده‌اند. نانولوله‌های کربنی از انواع دگرشکلی‌های کربن می‌باشند. آن‌ها استوانه‌ای شکل هستند و ویژگی‌های قابل ملاحظه‌ای مانند چگالی سطحی بالا، نسبت طول به قطر زیاد، مدول یانگ بالا، وزن کم و پایداری حرارتی و شیمیایی بالا را دارا هستند [۱]. وزن کم، استحکام بالا و بهبود خواص سایشی نانولوله‌های کربنی باعث شده که آن‌ها برای تقویت کامپوزیت‌های زمینه فلزی استفاده شوند. در این رابطه کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با مشتقات کربنی نظیر نانولوله‌های کربنی، گرافن اکسید و گرافن توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی عدم توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه، تأثیر نامطلوبی را بر خواص کامپوزیت ایجاد خواهد کرد. افزایش بیش از حد مجاز نانولوله‌های کربنی، باعث توده‌ای شدن و تجمع آن‌ها در زمینه می‌شود و به دلیل وجود این توده‌ها، خواص مکانیکی کامپوزیت کاهش خواهد یافت که می‌تواند تأثیر بسزایی روی خواص سایشی کامپوزیت داشته باشد. در اغلب تحقیقات انجام شده در زمینه سایش مشاهده شده است که با افزودن مقدار کم نانولوله‌های کربنی به داخل فاز زمینه ضریب اصطکاک کاهش و مقاومت سایشی افزایش یافته است. توزیع مناسب نانولوله‌های کربنی که معمولاً در مقادیر کم اتفاق می‌افتد، حجم زیادی از زمینه فلزی را اشغال کرده و احتمال اینکه نوک مواد ساینده با نانولوله‌های کربنی تماس داشته باشد را بیش تر می‌کند و از فرورفتن نوک مواد ساینده به داخل زمینه نرم جلوگیری می‌نماید که این امر از شخم زدن سطح سایش جلوگیری به عمل می‌آورد [۲]. چوی و همکارانش [۳]، کامپوزیت آلومینیوم با ۴/۵ درصد حجمی نانولوله کربنی را توسط فرایند نورد گرم تولید نمودند. پس از آلیاژسازی مکانیکی به مدت ۶ ساعت و انجام آزمون سایش با سرعت لغزش ۰/۱۲m/s، پایین‌ترین ضریب اصطکاک در محدوده ۰/۲۵ - ۰/۱ و کاهش وزن کم‌تر از ۵۰ میلی‌گرم برای این کامپوزیت گزارش

شد. در تحقیقی دیگر، Bastwros و همکارانش [۴] کامپوزیت آلومینیوم خالص تقویت شده با ۵ درصد وزنی نانولوله کربنی را با روش آلیاژسازی مکانیکی تولید کردند. در این تحقیق سرعت دوران ۴۰۰ rpm و نسبت وزنی پودر به گلوله ۱:۵ اعمال گردیده است. شکل‌دهی این نمونه با روش پرس سرد و اکستروژن انجام شد. مشاهده گردید که با افزایش بار در یک سرعت لغزش مشخص، نرخ سایش افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر توسط Kim و همکارانش [۵] با فرایند شکل‌دهی تف جوشی جرقه پلاسمایی در دمای ۶۰۰°C با نرخ ثابت ۵۰min /°C و شرایط خلأ با اعمال فشار ۵۰MPa به مدت ۱۰ دقیقه، کامپوزیت آلومینیوم حاوی نانولوله‌های کربنی تولید شد. نتایج نشان داد، نانو کامپوزیت حاوی ۱ درصد وزنی دارای ضریب اصطکاک و نرخ سایش کم بوده است. همچنین Al-Qutub و همکارانش [۶] نیز با افزودن ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ کامپوزیت تولید نمودند و رفتار سایشی آن را با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ فرآوری شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و شکل‌دهی شده به روش تف جوشی جرقه پلاسمایی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در بارهای تا ۱۵ N، با افزودن نانولوله‌های کربنی نرخ سایش کمتری برای کامپوزیت حاصل شده است.

دلیل استفاده از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به عنوان زمینه کامپوزیت، بهبود سختی و خواص سایشی از طریق تولید آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار و کامپوزیت آن با افزودن نانولوله کربنی به روش آلیاژسازی مکانیکی و فرایند پرس داغ بود. از طرفی اکثر محققین روش‌های نورد گرم، پرس سرد و اکستروژن و تف جوشی جرقه پلاسمایی را به عنوان روش شکل‌دهی مورد استفاده قرار داده‌اند؛ اما تاکنون تحقیقی مبنی بر تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی درصد‌های مختلف نانولوله کربنی فرآوری شده به روش پرس داغ و بررسی خواص سایشی منتشر نشده است.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق پودر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه با ترکیب مشخص شده در جدول ۱ استفاده شد.

پودر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه تحت عملیات آسیاکاری مکانیکی قرار گرفت. گلوله‌های استفاده شده از جنس فولاد پرکربن بود. زمان آسیاکاری ۳۰ ساعت و نسبت وزنی گلوله به پودر و سرعت چرخش محفظه به ترتیب ۲۰:۱ و ۶۰۰ rpm بود.

لازم به ذکر است جهت کاهش نرخ جوش سرد ذرات پودر به میزان ۰/۱ درصد وزنی اسید استناریک نیز به این پودر اضافه شد.

نانولوله‌های کربنی به مدت ۱۲ ساعت در داخل اسید نیتریک غلیظ برای زدودن ناخالصی کاتالیستی شامل کبالت و نیکل قرار گرفتند. سپس چندین مرتبه با آب مقطر شستشو شده تا pH آن‌ها برابر ۷ شد. در آن دمای  $120^{\circ}\text{C}$  خشک گردید. سپس در محلول اتانول به مدت ۹۰ دقیقه با فرکانس ۴۰ KHz تحت عملیات آلتراسونیک قرار گرفت [۷].

پس از انجام عملیات آلتراسونیک روی نانولوله‌های کربنی پودر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانوساختار به محلول اتانول-نانولوله کربنی اضافه شد. این فرایند به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات آلتراسونیک با فرکانس ۴۰ KHz انجام گرفت. ظرف حاوی اتانول-نانولوله کربنی-پودر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانوساختار روی دستگاه همزن مغناطیسی تحت دمای حدود  $130^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت و محلول خشک و پودرهای کامپوزیتی اولیه تهیه شد [۷]. عملیات آسیاکاری پودرهای کامپوزیتی در زمان ۴ ساعت با سرعت ۳۶۰ rpm و نسبت گلوله به پودر ۲۰ به ۱ انجام شد. پودرهای کامپوزیتی پایه آلومینیومی حاوی ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی تهیه گردید.

آزمون دیفرانسیل حرارتی روی پودر کامپوزیت آلومینیوم

۶۰۶۱ حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی جهت بررسی احتمال تشکیل فاز کاربید آلومینیوم در دمای پرس داغ انجام شد. این پودر در داخل محفظه سرامیکی دستگاه قرار گرفت و تحت اتمسفر آرگون در حال گردش با نرخ  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  از دمای ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد.

نمونه‌های دیسکی شکل از پودرهای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه، آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانوساختار و کامپوزیت‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی نانولوله‌های کربنی با روش پرس گرم تک محوره ساخته شد. دمای پرس  $540^{\circ}\text{C}$ ، زمان پرس ۳۰ دقیقه و فشار پرس ۱۵۰ MPa انتخاب گردید. تمام نمونه‌های دیسکی دارای قطر ۴۳ mm و ضخامت ۱۵ mm بودند. این پارامترها بر اساس مرجع شماره [۷] و نتایج آنالیز دیفرانسیل حرارتی انتخاب گردیدند.

سختی نمونه‌ها با استفاده از روش سختی سنجی ویکرز تحت نیروی ۱ کیلوگرم و زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه به دست آمد. از روش ارشمیدوس نیز برای تعیین چگالی نسبی قطعات تولید شده با روش پرس داغ استفاده شد.

از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک جهت بررسی خواص سایشی نمونه‌های کامپوزیتی استفاده شد. پین مورد استفاده از جنس فولاد AISI-E-52100 با سختی HRC ۶۴ بود. رفتار سایشی نمونه‌ها به وسیله این دستگاه با سرعت  $0.08\text{ m/s}$  و تحت بار ۱۰ N نیوتن با شعاع دایره سایش ۱۶ mm مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها تا مسافت ۶۰۰ m تحت آزمون سایش قرار گرفتند و مقادیر کاهش وزن آن‌ها با دقت ۰/۱ mg به ثبت رسید. بدین ترتیب مقادیر کاهش وزن نمونه‌های مختلف به دست آمد. نمودارهای ضرایب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش نیز بوسیله دستگاه سایش ترسیم شد. جهت تعیین مکانیزم حاکم بر سایش پس از انجام آزمون‌های سایش، مورفولوژی سطح سایش نمونه‌ها و ذرات سایشی به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی توزیع انرژی مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده

Sb,ppm	Ti,ppm	Ni,ppm	V, wt. %	Cr, wt. %	Mn, wt. %	Fe, wt. %	Si, wt. %	Mg, wt. %	Cu, wt. %	Al, wt. %	عنصر
۶/۹۷۲	۷۵/۹۸۱	۲۵/۵۷۳	۰/۰۱۰	۰/۱۶۲	۰/۰۲۲	۰/۳۵۹	۰/۶۱۲	۰/۹۲۱	۰/۱۷۲	۹/۷۳۱	ترکیب شیمیایی
										۷	آبی

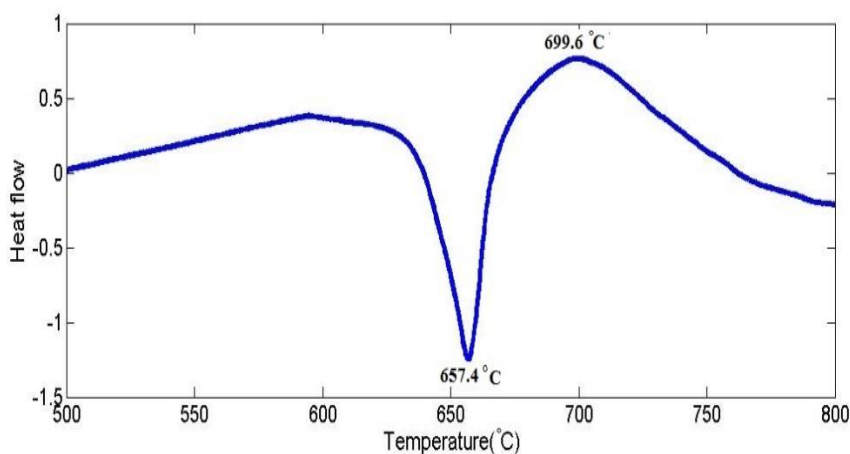
## نتایج و بحث

### بررسی واکنش بین زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱ با نانولوله‌های

#### کربنی

مشترک زمینه و نانولوله کربنی، باعث کاهش استحکام و انعطاف پذیری کامپوزیت خواهد شد [۷]. در شکل ۱ آنالیز دیفرانسیل حرارتی پودر کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی، نشان داده شده است. این شکل پیک گرماگیری در دمای تقریبی  $657.4^{\circ}\text{C}$  به دلیل ذوب شدن زمینه آلومینیوم را نشان می‌دهد. در محدوده دمایی  $699.6^{\circ}\text{C}$  نیز یک پیک گرمازا ناشی از واکنش زمینه آلومینیومی ۶۰۶۱ با نانولوله کربنی و تشکیل فاز کاربید آلومینیم قابل مشاهده است. همان‌گونه که مشخص است در دمای انتخابی پرس داغ احتمال ذوب شدن زمینه آلومینیومی و تشکیل این فاز کاربیدی وجود ندارد.

از آنجا که در مرحله ساخت قطعات دیسکی شکل از فرایند پرس داغ استفاده شده است، لذا تشکیل فاز کاربید آلومینیوم با استفاده از آنالیز دیفرانسیل حرارتی در حین عملیات حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. هدف تعیین محدوده دمایی تشکیل این فاز و طراحی صحیح فرایند پرس داغ بود. این مورد توسط دیگر محقق و همکارانش نیز گزارش شده است [۷]. این فاز در فصل



شکل ۱- نمودار آنالیز دیفرانسیل حرارتی پودر کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی

### بررسی سختی و چگالی نسبی

پودر در اثر قرارگیری نانولوله‌های کربنی در فضای خالی بین ذرات پودر است [۱ و ۹-۷].

در محدوده ۰-۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی و با توجه به مقدار چگالی نسبی حدودی ثابت، سختی نانو کامپوزیت افزایش یافته است. دلیل آن ناشی از توزیع یکنواخت نانولوله کربنی در زمینه است. با افزایش میزان نانولوله کربنی به ۱/۵ درصد وزنی چگالی نسبی تا ۹۳/۳ درصد و سختی تا HV ۱۸۸/۵۵ کاهش یافت. به نظر می‌رسد برای کامپوزیت حاوی ۱/۵ درصد وزنی، نانولوله‌های کربنی به صورت در هم پیچیده در آمده و در حین فرایند پرس گرم از چگالش مطلوب نانو کامپوزیت جلوگیری می‌کند [۱۰ و ۱۱].

در جدول ۲ اثر درصد نانولوله کربنی بر میزان سختی و چگالی نسبی نمونه‌های کامپوزیتی نشان داده شده است. آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار چگالی نسبی در حدود ۹۸/۳ درصد را نشان می‌دهد. مقدار میانگین سختی این آلیاژ نیز برابر با HV ۲۰۱/۴۵ است. این مقادیر چگالی نسبی و سختی در گزارش دیگر محقق و همکارانش نیز گزارش شده است [۷]. دلیل آن به کاهش اندازه دانه و کاهش کرنش داخلی شبکه آلومینیوم به دلیل آسیاکاری ارتباط داده شده است [۷]. برای کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی، میزان سختی افزایش یافته و به حدود HV ۲۱۹/۱۸ و چگالی نسبی به ۹۸/۸ درصد رسید. این مقدار چگالی نسبی بالا در مقایسه با سایر نمونه‌ها به دلیل پر شدن میکرو حفرات موجود در میان ذرات

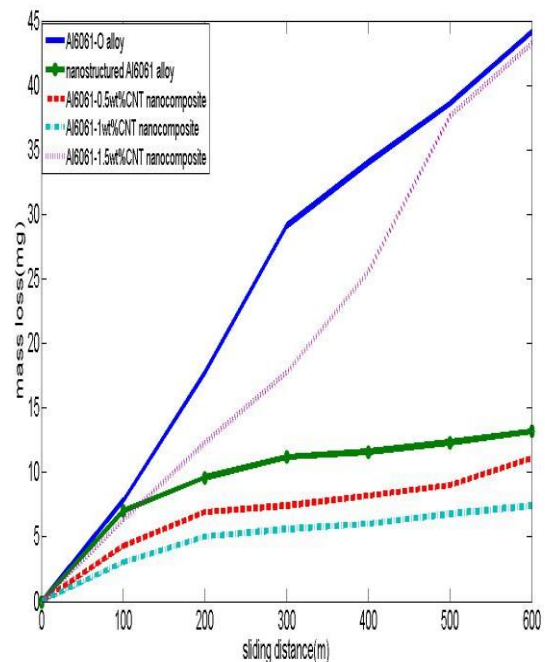
جدول ۲- میانگین سختی و چگالی نسبی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه، نانو ساختار و کامپوزیتی

چگالی نسبی (درصد)	میانگین سختی (HV)	نمونه
۹۸	۹۳/۳	آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه
۹۸/۳	۲۰۱/۴۵	آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار
۹۸/۴	۲۰۵/۹	کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی
۹۸/۸	۲۱۹/۱۸	کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی
۹۳/۳	۱۸۸/۵۵	کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی

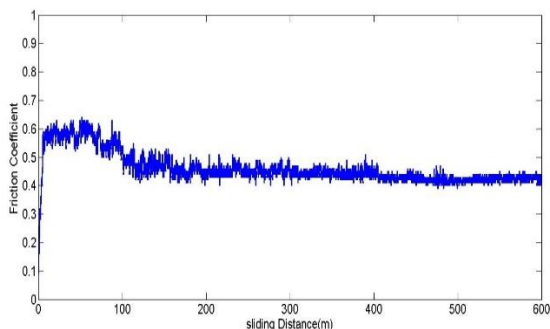
## بررسی خواص سایشی

برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه (شکل ۳) در بار  $10\text{ N}$  و سرعت  $0.08\text{ m/s}$  مقدار ضریب اصطکاک تا فاصله  $600\text{ m}$  در محدوده  $0.91-0.33$  تغییر کرده که با نوسانات زیادی نیز همراه است. در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار (شکل ۴) در  $84\text{ m}$  اول، افزایش ضریب اصطکاک تا حدود  $0.72$  و برای  $66\text{ m}$  بعد کاهش ضریب اصطکاک و سپس میل کردن به مقادیر پایا ( $0.5$ ) - دیگر محققان نیز بیان شده است [۶ و ۱۴-۱۲]. علت اصلی این پدیده سختی بالاتر این آلیاژ در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه گزارش شده که در اثر کوچک بودن اندازه دانه‌های این نمونه حاصل شده است [۱۳، ۱۵ و ۱۶]. برای کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی  $1$  درصد وزنی نانولوله کربنی (شکل ۵) در  $60\text{ m}$  اول افزایش ضریب اصطکاک تا حدود  $0.62$  و برای  $48\text{ m}$  بعد کاهش ضریب اصطکاک و پایدار ماندن آن در محدوده  $0.45-0.42$  را تا  $492\text{ m}$  باقیمانده نشان داده است. به عبارتی ذرات ریزتر، باعث افزایش سختی و کاهش میزان سایش شده است [۶ و ۱۷]. برای کامپوزیت حاوی  $1/5$  درصد وزنی نانولوله کربنی، میزان زبری سطح به دلیل بالا بودن میزان تخلخل، بیشتر بوده و در نتیجه ضریب اصطکاک حالت پایدار نسبت به کامپوزیت تقویت شده با  $1$  درصد وزنی نانولوله کربنی در بازه وسیع تری تغییر کرده است (شکل ۶). به عبارتی مقدار ضریب اصطکاک تا فاصله  $600\text{ m}$  در محدوده  $0.86-0.43$  تغییر نموده است. نتیجه اینکه در اثر اضافه شدن نانولوله کربنی تا  $1$  درصد وزنی به زمینه کامپوزیت تماس مستقیم میان زمینه کامپوزیت و پین فولادی کمتر می‌شود. همچنین به دلیل خاصیت خود روغنکاری نانولوله‌های کربنی در این درصد وزنی، در میان سطوح فلزی زمینه آلیاژی کامپوزیت و پین به راحتی لغزش کرده و در نتیجه سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌شوند [۱۱ و ۱۶].

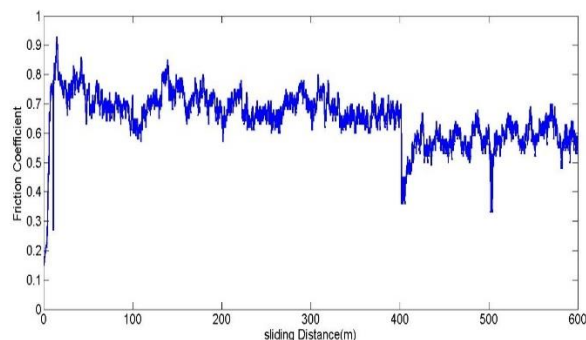
در شکل (۲) نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای نمونه‌ها نشان داده شده است. برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه، نانو ساختار و کامپوزیت حاوی  $10/5$  و  $1/5$  درصد وزنی نانولوله کربنی، پس از طی مسافت لغزش  $600\text{ m}$  تحت نیروی  $10\text{ N}$ ، مقدار کاهش وزن به ترتیب برابر با  $44/1$ ،  $13/2$ ،  $11/1$ ،  $7/4$  و  $43/2$  میلی گرم است. با توجه به کم‌تر بودن نرخ کارسختی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه در حین انجام آزمون سایش به دلیل جدا شدن ذرات سایش کم‌تر، میزان کاهش وزن آن نیز کم‌تر است. برای کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی  $1$  درصد وزنی نانولوله کربنی کاهش وزن تا  $7/4\text{ mg}$  و بیشینه سختی به  $219/18\text{ HV}$  می‌رسد، لذا کمینه بودن کاهش وزن در این درصد وزنی قابل درک است. با افزودن  $1/5$  درصد وزنی نانولوله کربنی میزان کاهش وزن افزایش و به حدود  $43/2\text{ mg}$  می‌رسد.



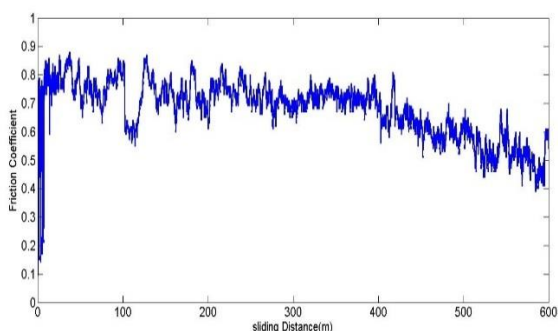
شکل ۲- مقایسه مقادیر کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه، نانو ساختار، نانو ساختار حاوی درصد‌های مختلف از نانولوله‌های کربنی



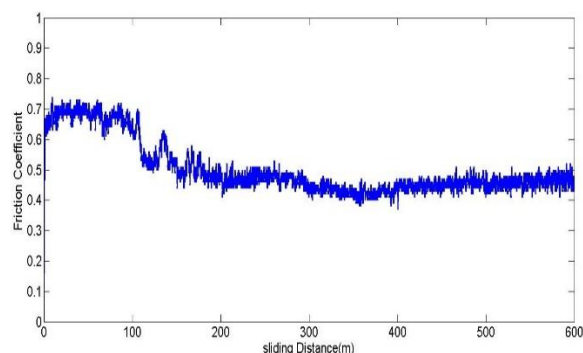
شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله های کربنی



شکل ۳- تغییرات ضریب اصطکاک آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه



شکل ۶- تغییرات ضریب اصطکاک کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانولوله های کربنی

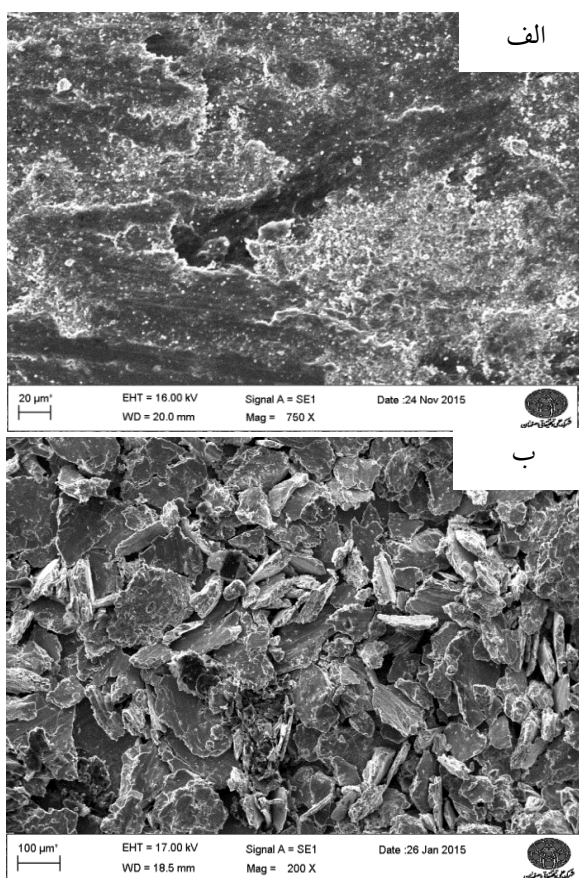


شکل ۴- تغییرات ضریب اصطکاک آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار

درشت دانه ریزتر است (شکل ۸-ب). به نظر سایش اکسیداسیون ناشی از عدم پایداری لایه اکسید آهن در این آلیاژ نیز فعال است [۶، ۱۳ و ۲۳]. طیف سنجی توزیع انرژی از سطح سایش یافته آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار (شکل ۹) فعال بودن مکانیزم اکسیداسیون را تأیید می‌کند؛ زیرا میزان اکسیژن در سطح سایش یافته این آلیاژ ۳۸% wt است. شکل (۱۰-الف و ب) به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش و ذرات سایش کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. مورفولوژی سطح سایش این نمونه آثار مکانیزم سایش خراشان را نشان داده است. مورفولوژی ذرات سایش نیز از حالت ورقه‌ای شکل مربوط به نمونه آلیاژ نانو ساختار به صورت ذرات ریزتر درآمده‌اند. این گزارش توسط دیگر محققان نیز ارائه شده است [۱۳، ۲۳ و ۲۴]. طیف‌سنجی توزیع انرژی (شکل ۱۱-الف) از ذرات سایش،

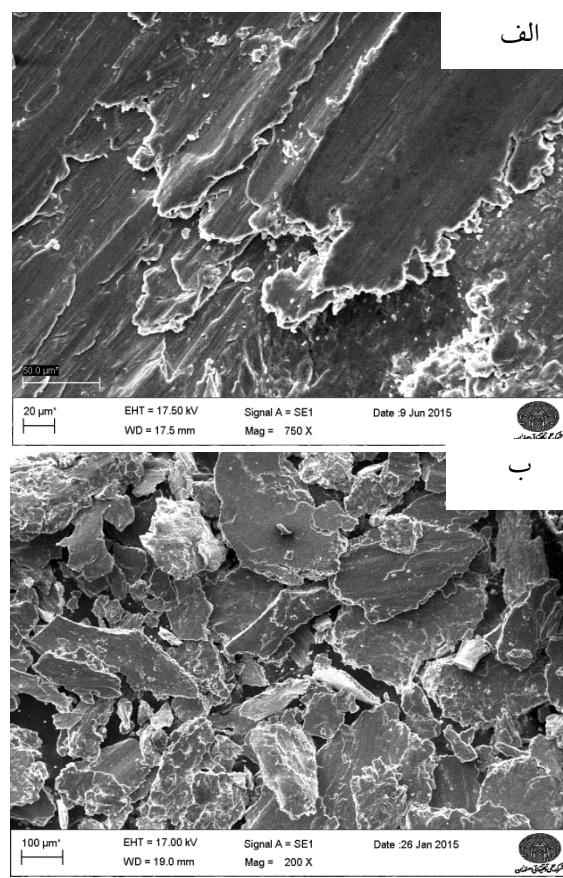
در شکل (۷-الف) نشانه‌هایی از کندگی عمیق روی سطح سایش آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت‌دانه قابل مشاهده است. ذرات درشت در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات سایشی (شکل ۷-ب) نیز قابل مشاهده است. دلیل این موضوع تغییر شکل پلاستیک شدید نمونه در حین آزمون سایش است [۱۳ و ۲۰-۱۸]. مکانیزم سایش این آلیاژ چسبان است. شکل (۸-الف) مربوط به آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار می‌باشد که سطح سایش مناسب‌تر در مقایسه با آلیاژ درشت‌دانه را نشان می‌دهد. در سطح سایش این آلیاژ مکانیزم ورقه ورقه شدن دیده می‌شود. مطابق این مکانیزم آلیاژ محتوی چگالی بالایی از نابعایی است. همچنین کارسختی اعمال شده روی این نمونه در حین آزمون سایش، سبب تجمع نابعایی‌ها در قسمت زیر سطح می‌شود [۲، ۲۱، ۱۳ و ۲۲] و در نتیجه سطح سایش ورقه ورقه خواهد شد. اندازه ذرات سایش نیز در مقایسه با نمونه

سایش کامپوزیت حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی نشان داده شده است. سطح سایش تحت تأثیر تخلخل این نمونه قرار گرفته است. در گزارش دیگر، محققان نیز به وجود تخلخل سطح سایش در درصدهای بالاتر نانولوله کربنی اشاره شده است [۱۳ و ۲۸-۳۰]. با توجه به تخلخل ایجادشده در سطح سایش این نمونه مقدار ضریب اصطکاک بالاتر و میزان نوسانات آن در مقایسه با نانو کامپوزیت حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی نیز بیشتر است.



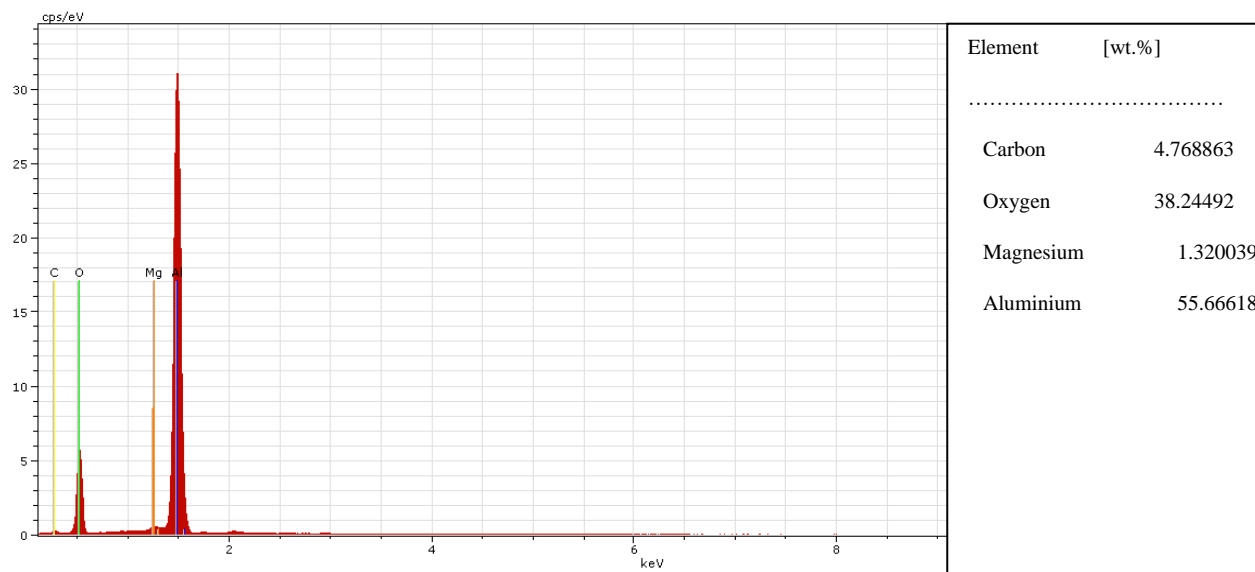
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) سطح سایش (ب) ذرات سایش آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار

اکسیدی بودن این ذرات را تأیید می‌کند. زمینه آلیاژ به تدریج دچار خراشیدگی شده و نانولوله‌های کربنی نزدیک به سطح یک‌لایه کربنی روغن‌کار را تشکیل داده و سایش چسبان میان پین فولادی و زمینه کامپوزیت را کاهش می‌دهد [۲۷ و ۲۵]. نتیجه اینکه سایش اکسیداسیونی نسبت به نمونه نانو ساختار کاهش یافته است [۵]. درصد اکسیژن سطح سایش از ۳۸% wt مربوط به آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار به ۲۷% wt برای نمونه کامپوزیتی دلیلی بر کاهش میزان اکسیداسیون است (شکل ۱۱- ب). در شکل ۱۲ (الف و ب) نیز مورفولوژی سطح

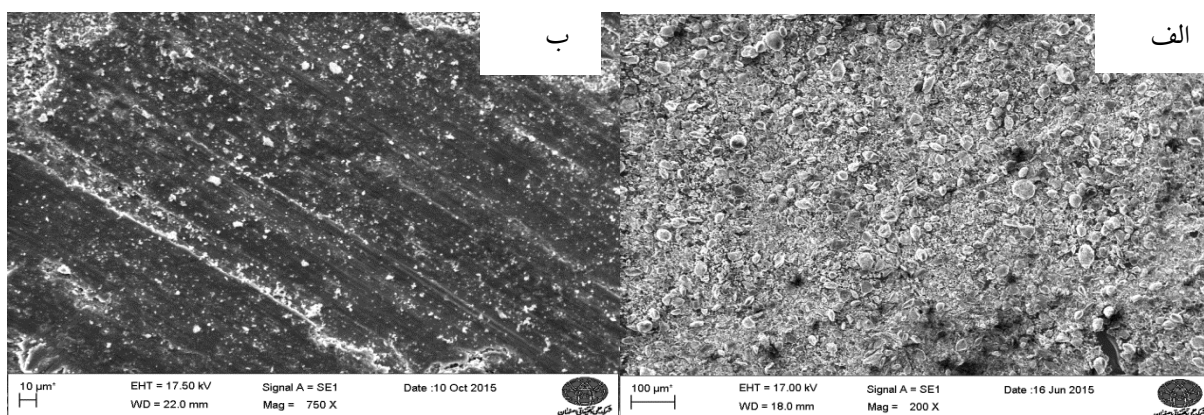


شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) سطح سایش (ب) ذرات سایش آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه

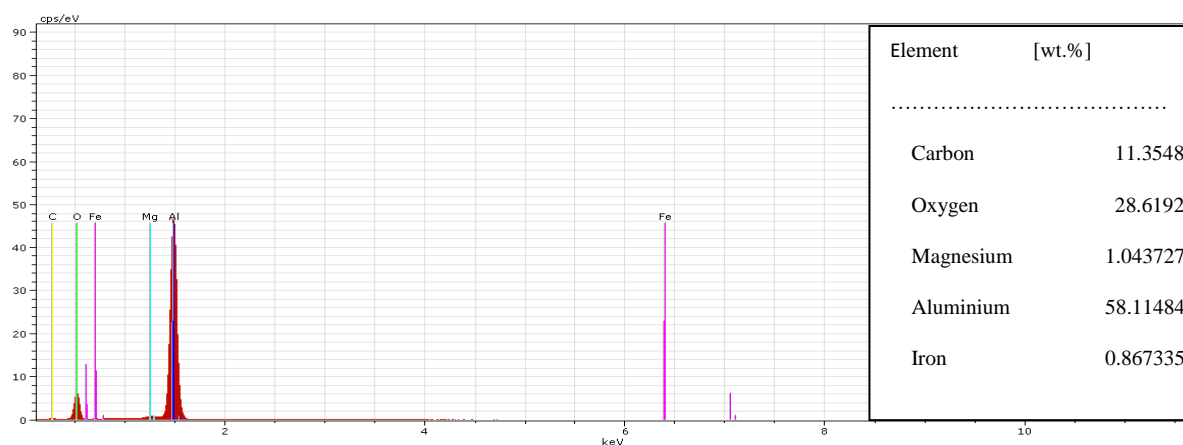




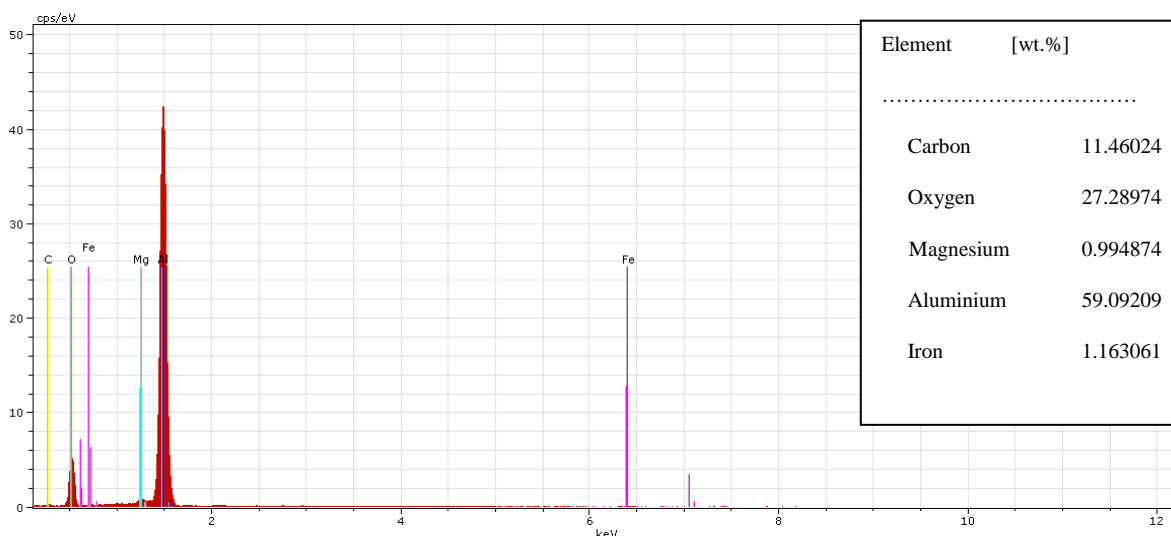
شکل ۹- طیف سنجی توزیع انرژی از سطح سایش یافته آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ نانو ساختار



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از (الف) سطح سایش و (ب) ذرات سایش نانو کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱ درصد وزنی نانو لوله کربنی

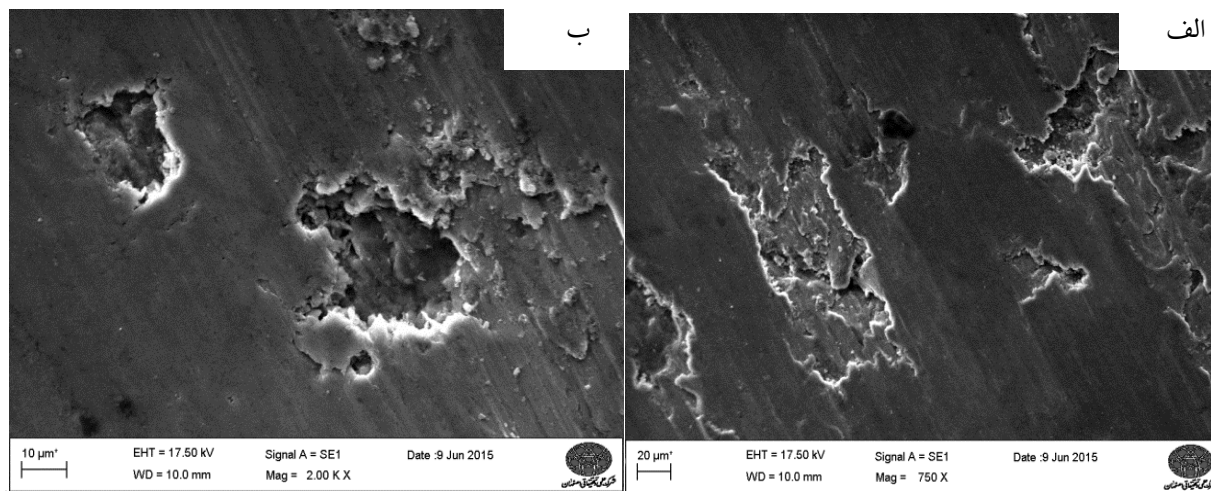


الف



ب

شکل ۱۱- طیف سنجی توزیع انرژی از (الف) ذرات سایش (ب) سطح سایش یافته کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) سطح سایش نانو کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانولوله کربنی (ب) از محل دیگر با بزرگنمایی بالاتر

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ درشت دانه، نانوساختار و کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی با روش آسیاکاری مکانیکی و فرایند پرس داغ تولید و سختی، چگالی نسبی و خواص سایش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق به‌طور خلاصه در ادامه ارائه شده‌اند:

۱- با اضافه کردن نانولوله‌های کربنی به میزان (۱-۰/۵) درصد وزنی به آلیاژ آلومینیوم، رفتار سایشی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. این در حالی است که افزودن مقادیر بیشتر نانولوله کربنی تا میزان ۱/۵ درصد وزنی باعث کاهش مقاومت سایشی کامپوزیت آلومینیومی گردید.

۲- نتایج آزمون سایش کامپوزیت پایه آلومینیومی نشان داد که مکانیزم سایش کامپوزیت حاوی ۱ درصد وزنی نانولوله کربنی خراشان است. این در حالی است که مکانیزم سایش آلومینیوم نانوساختار و آلومینیوم درشت دانه به ترتیب ورقه ورقه شدن و چسبان است.

۳- نتایج سختی و چگالی نسبی نشان داد، افزودن نانولوله های کربنی تا میزان ۱ درصد وزنی به آلیاژ آلومینیوم موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در سختی گردید. ولی چگالی نسبی کامپوزیت را به‌طور جزئی افزایش داده است. در مقادیر بیشتر نانولوله کربنی به دلیل افزایش نرخ توده‌ای شدن و عدم نفوذ کامل به داخل کامپوزیت موجب کاهش سختی می‌گردد.

## References:

- 1- C.F. Deng, D.Z. Wang, Zhang, X.X. & A.B. Li, Processing and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum composite, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 444, pp. 138-145, 2007.
- 2- G.W. Stachowiak & A.W. Batchelor, "Experimental Methods in Tribology", Elsevier Science Ltd, USA, 2004.
- 3- H.J. Choi, S.M. Lee & D.H. Bae, "Wear characteristic of aluminum based composites containing multi walled carbon nanotubes", Wear, Vol. 270, pp. 12-18, 2010.
- 4- M.M.H. Bastwros, M.K. Esawi & A. Wifi, "Friction and wear behavior of Al-CNT composites", Wear, Vol. 307, pp. 164-173, 2013.
- 5- I.Y. Kim, J.H. Lee, G.S. Lee, S.H. Baik, Y.J. Kim & Y.Z. Lee, "Friction and wear characteristics of the carbon nanotube-aluminum composites with different manufacturing conditions", Wear, Vol. 267, pp. 593-598, 2009.
- 6- A.M. Al-Qutub, A. Khalil, N. Saheb & A.S. Hakeem, "Wear and Friction Behavior of Al6061 Alloy Reinforced With Carbon Nanotubes", Wear, Vol. 297, pp. 752-761, 2013.
- 7- M. Jafari, M.H. Abbasi & M.H. Enayati, F. Karimzadeh, "Mechanical properties of nanostructured Al2024-MWCNT composite prepared by optimized mechanical milling and hot pressing methods", Advanced Powder Technology, Vol. 23, pp. 205-210, 2012.
- 8- Shewman, P.G., Transformations in Metals, McGraw-Hill, New York, 1969.

- 9- R. Christopher, Bradbury, Jaana-Kateriina Gomon, L. Kollo, H. Kwon & M. Leparoux, "Hardness of Multi Wall Carbon Nanotubes reinforced aluminium matrix composites" *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 585, pp. 362-367, 2014.
- 10- T.Z. Mohamed Hassan & M.K. Amal Esawi Sayed Metwalli, "Effect of carbon nanotube damage on the mechanical properties of aluminium-carbon nanotube composites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 607, pp. 215-222, 2014.
- 11- R. Perez-Bustamante, F. Perez-Bustamante, I. Estrada-Guel, L. Licea-Jimenez, M. Miki-Yoshida & R. Martínez-Sánchez, "Effect of milling time and CNT concentration on hardness of CNT/Al2024 composites produced by mechanical alloying", *Materials Characterization*, Vol. 75, pp. 13-19, 2013.
- 12- K.M. Shorowordi, A.S.M.A. Haseeb & J.P. Celis, "Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad", *Wear*, Vol. 256, pp. 1176-1181, 2004.
- 13- M. Jafari, M.H. Enayati, M.H. Abbasi & F. Karimzadeh, "Compressive and wear behaviors of bulk nanostructured Al2024 alloy", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 663-669, 2010.
- 14- Y.Y. Chang, D.Y. Wang, C.H. Chang & W.T. Wu, "Tribological analysis of nano-composite diamond-like carbon films deposited by unbalanced magnetron sputtering", *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 184, pp. 349-355, 2004.
- 15- U. Abdullahi, M.A. Maleque & U. Nirmal, "Wear mechanism map of CNT-Al nano-composite", *Procedia Engineering*, Vol. 68, pp. 736-742, 2013.
- 16- K. Lu & J. Lu, "Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials: Presentation of the concept behind a new approach", *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 193-197, 1999.
- 17- D. Lahiri, V. Singh, V. A.K. Keshri, S. Seal & A. Agarwal, "Carbon nanotube toughened hydroxyapatite by spark plasma sintering: microstructural evolution and multiscale tribological properties", *Carbon*, Vol. 48, pp. 3103-3120, 2010.
- 18- S.M. Zhou, X.B. Zhang, X.B., Z.P. Ding, C.Y. Min, G.L. Xu & W.M. Zhu, "Fabrication and tribological properties of carbon nanotubes reinforced Al composites prepared by pressureless infiltration technique", *Composites A*, Vol. 38, pp. 304-306, 2007.
- 19- A.R. Abdollahi, A. Alizadeh & H.R. Baharvandi, "Dry sliding tribological behavior and mechanical properties of Al2024-5 wt.% B<sub>4</sub>C nanocomposite produced by mechanical milling and hot extrusion", *Materials and Design*, Vol. 55, pp. 471-481, 2014.
- 20- S. Kumar, M. Chakraborty, V.S. Sarma & B.S. Murty, "Tensile and wear behavior of in situ Al-7Si/TiB<sub>2</sub> particulate composites", *Wear*, vol. 265, pp. 134-142, 2008.
- 21- F. Akhlaghi & A. Zare-Bidaki, "Influence of graphite content on the dry sliding and oil impregnated sliding wear behavior of Al 2024-graphite composites produced by in situ powder metallurgy method", *Wear*, Vol. 266, pp. 37-45, 2009.
- 22- G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 4<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, 1988.
- 23- N. Hosseini, F. Karimzadeh, M.H. Abbasi & M.H. Enayati, "A comparative study on the wear properties of coarse-grained Al6061 alloy and nanostructured Al6061-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites", *Tribology International*, Vol. 54, pp. 58-67, 2012.

- 24- A.M.Al-Qutub, I.M.Allam & T.W.Qureshi, "Effect of sub-micron Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration on dry wear properties of 6061 aluminum based composite", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.172, pp. 327–331, 2006.
- 25- M.H.Cho, J.Ju, S.J. Kim & H. Jang, "Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, MoS<sub>2</sub>) for automotive brake friction materials", *Wear*, Vol.260, pp.855-860, 2006.
- 26- S.R. Dong, J.P. Tu & X.B. Zhang, "An investigation of the sliding wear behavior of Cu-matrix composite reinforced by carbon nanotubes", *Materials Science and Engineering A: Structural Materials*, Vol.313, pp.83–87, 2001.
- 27- R. PerezBustamante, J.L. BuenoEscobedo, J. Jimenez-Lobato, I. Estrada-Guel, M. Miki-Yoshida, L. Licea-Jiménez & R. MartínezSanchez, "Wear behavior in Al 2024–CNTs composites synthesized by mechanical alloying", *Wear*, Vol.292–293, pp.169–175, 2012.
- 28- K.T. Kim, S. Cha & S.H. Hong, "Hardness and wear resistance of carbon nanotube reinforced Cu matrix nanocomposites", *Mater.Sci.Eng.A*, Vol.449-451, pp.46-50, 2007.
- 29- C.B. Lin, Z.C.Chang, Y.H. Tung & Y.Y.Ko, "Manufacturing and tribological properties of copper matrix/carbonnanotubes composites", *Wear*, Vol.270, pp.382–394, 2011.
- ۳۰- امینی. میلاد، ثابت. حامد. ، کاربخش راوری. بنفشه، ۱۳۹۷، "بررسی تاثیر مقادیر ذرات B4C بر سختی و مقاومت به سایش کامپوزیت Al-SiC-B4C ایجاد شده به روش GTAW بر آلیاژ AA332 ، مجله مواد نوین، دوره ۸ ، شماره ۳۱، ۱۲۳-۱۴۰.

