

## بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت Al-5%Cu/SiC تولید شده به روش متالورژی پودر

لیلا وفائی<sup>۱\*</sup>، احمد منشی<sup>۲</sup> و ابراهیم کرمان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی، گروه مهندسی مواد، واحد نجف آباد، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۴/۳۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۲/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۲/۱۱/۲۳

**چکیده** این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت Al-5%Cu/SiC با درصدهای مختلف وزنی ۲، ۴ و ۸ درصد SiC می‌پردازد. از فرآیند متالورژی پودر برای ساخت نانوکامپوزیت استفاده شده است. پس از آسیاب کاری، پودرهای حاصل در فشار ۱۰۰ MPa تحت پرس سرد و زیترینگ در دمای ۵۹۰ درجه سانتی-گراد برای مدت یک ساعت در محیط آرگون قرار گرفتند. آزمایش‌های چگالی سنجی، سختی، استحکام فشاری و خمشی و سایش پین روی دیسک برای نمونه‌ها صورت گرفت. ساختار میکروسکوپی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نوری بررسی شد و آنالیز فازی با دستگاه (XRD) انجام شد. در مورد خواص فیزیکی حداکثر چگالی و حداقل تخلخل در ۴ درصد وزنی کاربید سیلیسیم و بهترین استحکام فشاری و خمشی به ترتیب در صفر درصد وزنی و ۲ درصد وزنی کاربید سیلیسیم حاصل شد. شیب کاهش وزن نمونه در اثر سایش نسبت به مسافت طی شده ۰/۰۳۹ بود. در این نانوکامپوزیت مشکلات عدم ترشوندگی و اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین زمینه و تقویت کننده دیده می‌شود اما با وجود مشکلات موجود افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم تا هشت درصد وزنی می‌تواند ۵۰ درصد سختی را افزایش دهد.

**کلمات کلیدی:** نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم، مس، کاربید سیلیسیم، متالورژی پودر

## Investigation of microstructure, mechanical and wear properties of nanocomposite Al-5%Cu/SiC produced by powder metallurgy method

L. Vafaie<sup>\*1</sup>, A. Monshi<sup>2</sup> and E. Karamian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University

**Abstract** This study investigated and compared mechanical and wear properties and microstructure of Al-5%Cu/SiC nanocomposites with 2, 4 and 8 weight percent of SiC. Powder metallurgy method was used to successfully fabricate the nanocomposites. After milling, the resulted powder was cold pressed into pellets at a pressure of 100 MPa. Then the samples were sintered at 590 °C for 1 hour in an argon atmosphere. Densitometry, hardness, compression and bending strength and wearing of pin on the disk tests were performed for all samples. The microstructure was examined by scanning electron microscopy (SEM) and optical microscopy. Phase analysis was conducted using XRD method. The sample with 4wt% of SiC had the maximum density and minimum porosity. However, the best compressive strength and bending strength results were obtained for samples with 0 and 2wt% SiC, respectively. In the wear resistance experiments, the proportion of the slope of the weight loss due to abrasion to distance travelled by the sample was 0.039. In the nanocomposites studied there are some problems like unwetability and difference in thermal expansions between the matrix and the reinforcement; however, addition of up to 8wt% nano SiC can increase the hardness by 50%.

**Keywords:** Aluminum-based Nano Composite, Copper, Silicon Carbide, Powder Metallurgy.

\*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: اصفهان - خیابان شمس آبادی - خیابان پارس - بن بست مهر - پلاک ۸۲

تلفن: ۰۹۱۳۲۰۰۰۷۰، دورنگار: ۰۳۱۱۳۳۵۸۹۸۰، پیام‌نگار: vafaeleila@yahoo.com

## ۱- مقدمه

پودر Al-Cu به روش متالورژی پودر مورد بررسی قرار گرفت. مخلوط پودر Al-Cu و نانو ذرات کاربید سیلیسیم با درصدهای مختلف وزنی ۲، ۴ و ۸ به مدت ۳۰ دقیقه و پنج ساعت توسط آسیاب سیاره‌ای در محیط آرگون آسیاب کاری شد. زمان بهینه در مخلوط سازی مکانیکی برای پودرهای آسیاب شده ۳۰ دقیقه مشخص شد زیرا در آسیاب کاری به مدت پنج ساعت ناخالصی زیادی وارد مخلوط پودر شد و خواص مکانیکی قطعه ساخته شده از پودر فوق را به مقدار زیادی کاهش داد. همچنین احتمال ایجاد فاز  $Al_2Cu$  در زمینه را افزایش می‌دهد. پس از آسیاب کاری پودرهای حاصل در فشار  $100\text{MPa}$  تحت پرس سرد و زینترینگ در دمای  $590^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در محیط آرگون قرار گرفتند و پس از گذشت یک ساعت قطعه‌ها را از کوره خارج نموده و سریعاً در دمای اتاق قرار داده شد. سرمایه‌ش سریع بعد از زینترینگ برای جلوگیری از ساختار لایه‌ای در مرزهای دانه در نتیجه انجماد متوالی لازم است [۵]. ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مدل OLYMUS CK40M بررسی شد. سطح شکست نمونه‌های حاصل از پرس سرد و زینترینگ پس از آزمون خمش توسط دستگاه میکروسکوپ الکترون روبشی مدل LEO 435VP بررسی شد. سختی سنجی برینل به کمک دستگاه WOLPERT با بار ۳۰ کیلوگرم انجام گرفت. چگالی نمونه‌ها به روش غوطه‌وری محاسبه شد. همچنین خواص سایشی این نانوکامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- مشخصه یابی فاز

شکل‌گیری فاز  $Al_2Cu$  بعد از زینترینگ نانو کامپوزیت  $Al-5\%Cu/8\text{wt}\%SiC$  و  $Al-5\%Cu/2\text{wt}\%SiC$  به ترتیب در شکل (۱) و (۲) یک محلول فوق اشباع از مس در آلومینیوم را نشان می‌دهد که در نتیجه نفوذ متقابل آلومینیوم و مس در میان فرآیند آسیاب کاری است. تشکیل  $Al_2Cu$  نشان دهنده پدیده پیر سختی است. در حالی که این ترکیب بین فلزی در نمونه  $Al-5\%Cu/8\%SiC$  آسیاب کاری شده به مدت پنج ساعت قبل از زینترینگ تشکیل نشده است. وجود ناخالصی آهن ناشی از

آلیاژهای آلومینیوم، به علت وزن سبک و رسانایی الکتریکی بالا و مقاومت خوردگی مطلوب دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف می‌باشند. استفاده از آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف به خاطر استحکام، سختی و مقاومت سایشی پایین آنها در مقایسه با آلیاژهای آهنی محدود شده است. اضافه نمودن ذرات تقویت کننده سرامیکی به این آلیاژها و تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی یک راه حل برای ارتقا خواص مکانیکی و سایشی این آلیاژها بشمار می‌رود [۱]. آلیاژسازی مکانیکی لایه اکسیدی در سطوح پودر آلومینیوم را می‌شکند و بنابراین توزیع اکسیدی همگنی در آلیاژ آلومینیوم را تولید می‌کند [۲].

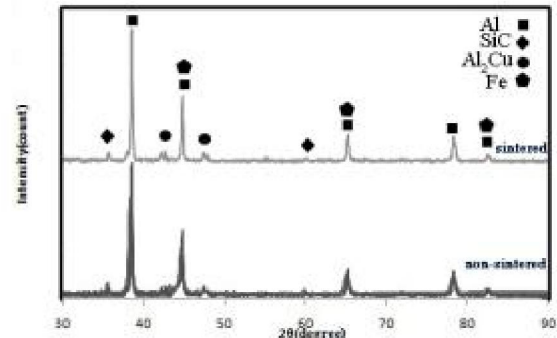
اضافه کردن عوامل تقویت کننده سرامیکی به آلیاژهای آلومینیوم موجب افزایش خواص مکانیکی و سایشی آنها می‌شود. عمده ذرات تقویت کننده که به آلیاژهای پودری آلومینیوم اضافه می‌شوند کاربیدها، بوریدها، اکسیدها و نیتريد‌ها می‌باشند. کاربید سیلیسیم با دمای ذوب بالا، چگالی پایین، استحکام بالا، سختی بالا، مقاومت به شوک حرارتی عالی، انبساط حرارتی پایین، هدایت حرارتی بالا، مدول الاستیک بالا یک تقویت کننده مناسب برای کاربردهای دمای بالا بشمار می‌رود [۳]. چنانچه این تقویت کننده در ابعاد نانومتری به زمینه آلومینیومی اضافه شود انتظار می‌رود خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم را نسبت به تقویت کننده‌های با ابعاد میکرو به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۴]. البته این موضوع نیازمند آن است که نانو ذرات را بتوان بدون آگلومره شدن به طور همگن در زمینه پخش کرد.

## ۲- روش آزمایش

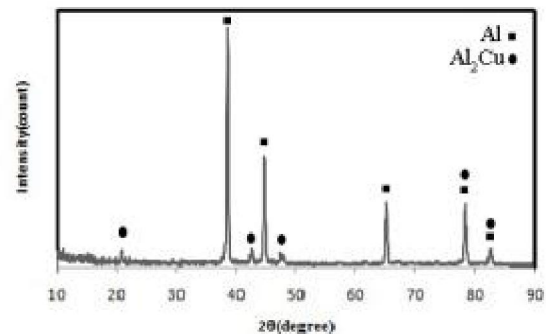
مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل پودر آلومینیوم (خلوص ۹۹٪)، میانگین اندازه ذرات  $45\mu\text{m}$ ، شرکت متالورژی پودر خراسان)، پودر مس (خلوص ۹۹٪)، میانگین اندازه ذرات  $60\mu\text{m}$ ، شرکت متالورژی پودر خراسان)، پودر نانو کاربید سیلیسیم (خلوص ۹۸٪)، میانگین اندازه متوسط ذرات  $50\text{nm}$ ، ساخت کشور چین) است. در این تحقیق اثر نانو ذرات کاربید سیلیسیم بر روی خواص مکانیکی مخلوط

به وسیله آلیاژسازی مکانیکی، سختی و استحکام این آلیاژ را به میزان بیشتری نسبت به ذرات میکرومتری افزایش داده است [۴]. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار تقویت‌کننده سختی نمونه‌ها به صورت تدریجی افزایش یافته است، زیرا ذرات کاربید سیلیسیم همانند موانعی در برابر حرکت نابجایی‌ها در زمینه عمل می‌کنند. نانو ذرات کاربید سیلیسیم نقش مؤثری را در افزایش سختی ایفا کرده‌اند این امر می‌تواند به دلیل فصل مشترک بزرگتر ما بین تقویت‌کننده و زمینه باشد. با افزایش نانو ذرات کاربید سیلیسیم سختی افزایش می‌یابد ولی در نمونه نانوکامپوزیت Al-5%Cu/4wt%SiC کاهش سختی مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل تفاوت زیاد در ضریب انبساط حرارتی کاربید سیلیسیم و آلومینیوم باشد. با توجه به اینکه ضریب انبساط حرارتی کاربید سیلیسیم  $2.77 \times 10^{-6}$  بر درجه سانتی‌گراد و ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم  $22.2 \times 10^{-6}$  بر درجه سانتی‌گراد است یعنی حدوداً ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم ۱۰ برابر کاربید سیلیسیم می‌باشد [۸]. با اضافه کردن مقادیر بیشتری از کاربید سیلیسیم دو مکانیزم مختلف به وجود می‌آید. مکانیزم اول جلوگیری بیشتر از حرکت نابجایی‌ها می‌باشد که با زیاد کردن مقدار کاربید سیلیسیم طبیعتاً استحکام و سختی را افزایش می‌دهد. این موضوع بین صفر و دو درصد وزنی کاربید سیلیسیم کاملاً مشهود است که وجود کاربید سیلیسیم موجب بهبود خواص مکانیکی شده است. اما مکانیزم دوم این است که پس از حرارت دهی در دمای ۵۹۰ درجه سانتی‌گراد برای انسجام قطعه و رشد ذرات آلومینیوم پیوستگی بین آلومینیوم و ذرات کاربید سیلیسیم ایجاد می‌شود و یک حالت  $L_0$  (طول اولیه) بین ذرات مختلف کاربید سیلیسیم می‌توان در نظر گرفت پس از آن با  $\Delta T = 590 - 25 = 565$  روبرو هستیم که به ازای واحد طول کاربید سیلیسیم میزان  $\Delta L = 0.0016$  و به ازای واحد طول آلومینیوم میزان  $\Delta L = 0.0125$  خواهد بود. در این شرایط امکان دارد که دو ذره کاربید سیلیسیم تقریباً به جای خود باقی مانده اما بین آنها ذرات آلومینیوم کاهش طول چشم‌گیری نشان دهند که منجر به ایجاد ترک در کنار دو ذره ابتدایی و انتهایی خواهد شد. وجود ترک‌ها بین ذرات در شکل (۴) دیده می‌شود. چنانچه ترکی به وجود آید تمرکز تنش در نوک ترک

بهم خوردن گلوله‌های فولادی به یکدیگر است. و بدین جهت مخلوط سازی مکانیکی در این تحقیق فقط به مدت ۳۰ دقیقه به کار گرفته شد.



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه نانوکامپوزیت Al-5%Cu/8%SiC.



شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه نانوکامپوزیت Al-5%Cu/2wt%SiC بعد از زینترینگ.

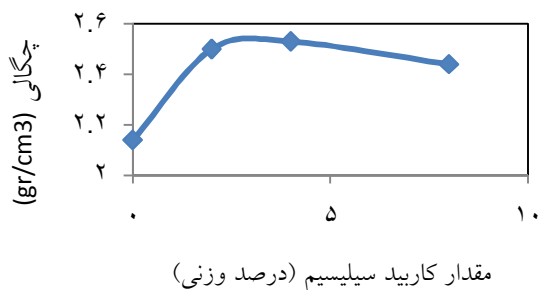
### ۳-۲- اثر نانو ذرات کاربید سیلیسیم بر روی سختی

سختی بیانگر مقاومت ماده در برابر تغییر فرم پلاستیکی ناشی از نفوذ فرورونده می‌باشد. بنابراین سختی آلیاژهای آلومینیوم تحت تأثیر پارامترهایی است که بر روی حرکت نابجایی‌ها تأثیر گذار هستند. مهم‌ترین عواملی که باعث افزایش سختی می‌شوند، کاهش اندازه دانه‌ها و تشکیل ترکیبات بین فلزی است [۶]. سختی کامپوزیت آلیاژسازی مکانیکی شده Al-Cu/SiC تحت تأثیر دوفاکتور است، فاکتور اول سختی آلیاژ زمینه در نتیجه آسیاب‌کاری و فاکتور دوم نقش ذرات کاربید سیلیسیم به عنوان تقویت‌کننده است [۷]. همان‌طور که گفته شده اندازه ذرات تقویت‌کننده تأثیر قابل توجهی بر روی استحکام دارد. اضافه کردن نانو ذرات  $Al_3Ti$  به آلیاژ AA6061

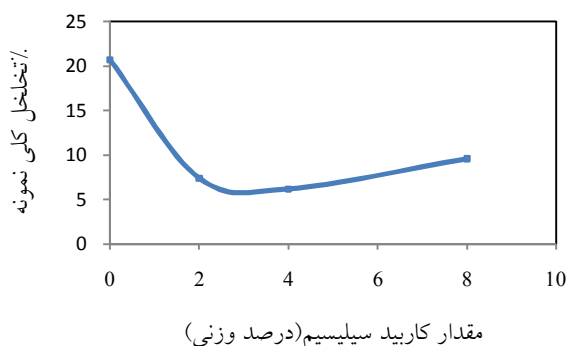
مصرفی می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که ذرات تقویت‌کننده که دارای اندازه کوچکتری نسبت به ذرات زمینه هستند در بین ذرات زمینه قرار گرفته‌اند و باعث پرشدن تخلخل‌ها می‌شوند و این باعث افزایش چگالی می‌شود. اما با افزایش درصد تقویت‌کننده به بیشتر از چهار درصد وزنی چگالی کاهش یافته است، زیرا با افزایش درصد تقویت‌کننده احتمال آگلومراسیون ذرات افزایش یافته و تخلخل‌ها در مناطق آگلومره شده افزایش می‌یابند و باعث کاهش چگالی کامپوزیت می‌شوند. درصد تخلخل کلی نمونه‌ها از رابطه (۱) [۹] بدست آمد. شکل (۶) مقادیر درصد تخلخل کلی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

(معادله ۱)

$$\text{درصد تخلخل کلی نمونه} = \left[ 1 - \frac{\rho}{2.70} \right] \times 100$$



شکل ۵. نمودار چگالی نانوکامپوزیت Al-5%Cu/SiC.

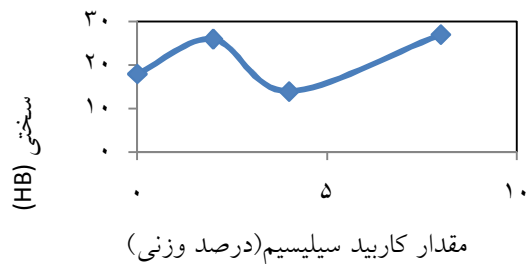


شکل ۶. نمودار درصد تخلخل کلی نانوکامپوزیت Al-5%Cu/SiC

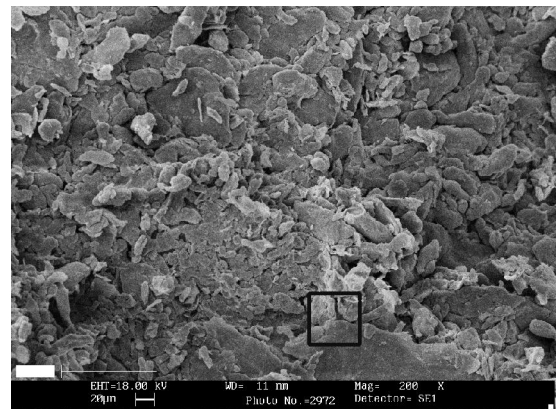
### ۳-۴- اثر نانو ذرات کاربید سیلیسیم بر روی استحکام فشاری

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود تقویت مخلوط پودر Al-Cu توسط نانو ذرات کاربید سیلیسیم نشان

باعث افزایش تنش خواهد شد و پیشرفت ترک را موجب می‌شود که به نوبه خود استحکام و سختی را پایین می‌آورد.



شکل ۳. نمودار سختی نمونه‌های نانوکامپوزیت Al-5%Cu/SiC.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان دهنده ترک در نمونه نانوکامپوزیت Al-5%Cu/4wt%SiC

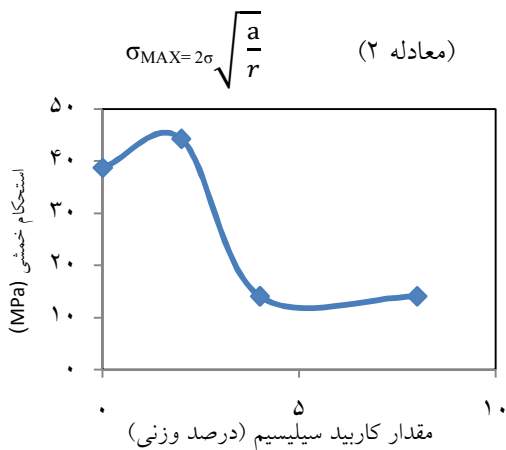
اما در نانوکامپوزیت Al-5%Cu/8wt%SiC به دلایل مذکور و وجود دو مکانیزم متفاوت در هشت درصد وزنی شاهد افزایش در سختی می‌باشیم.

### ۳-۳- اثر نانو ذرات کاربید سیلیسیم بر روی چگالی و درصد تخلخل کلی نمونه‌ها

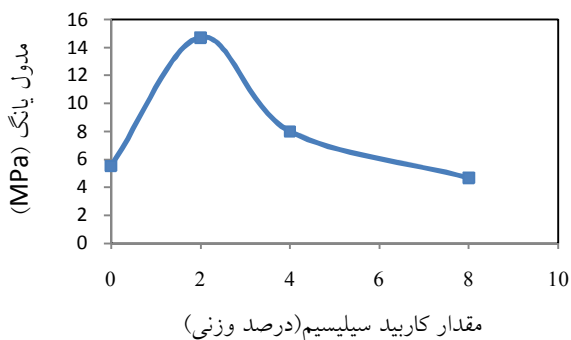
همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود با افزایش درصد نانو ذرات کاربید سیلیسیم تا چهار درصد وزنی، چگالی نمونه‌ها افزایش یافته است و پس از آن در نمونه هشت درصد وزنی کاربید سیلیسیم چگالی نمونه‌ها کاهش یافته است. افزایش چگالی کاهش میزان تخلخل در ماده را نشان می‌دهد. این به معنای این است که با افزایش میزان تقویت‌کننده احتمالاً بعضی از این تقویت‌کننده‌ها تخلخل‌ها را پر نموده و چگالی را افزایش داده‌اند. اما کاهش چگالی در نمونه هشت درصدی وزنی کاربید سیلیسیم می‌تواند نشان دهنده تخلخل‌های بیشتری در این نمونه باشد. با توجه به ابعاد مواد اولیه‌ی

مجموع کم تر است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تا حد دو درصد وزنی نانو ذرات کاربرد سیلیسیم برای بهبود خواص مکانیکی بهترین گزینه باشد.

مقاومت خمشی در اصل استحکام کششی است و براساس تئوری گریفیت به طول و شعاع انحنای نوک ترک مربوط است. در رابطه (۲)،  $\sigma$  تنش وارده به قطعه ای است که ترکی به طول  $a$  و شعاع انحنای  $r$  دارد و باعث ایجاد  $\sigma_{MAX}$  در نوک ترک می شود که پیشرفت ترک و شکسته شدن قطعه را به همراه دارد. این مطالعه نشان می دهد که حضور دو درصد نانو ذرات کاربرد سیلیسیم بیشترین مقاومت را در برابر رشد ترک از خود نشان می دهد. همچنین طبق اندازه گیری های به عمل آمده، مدول یانگ از شیب خط تنش- کرنش مقادیر زیر بدست آمد که در شکل (۹) آورده شده است.

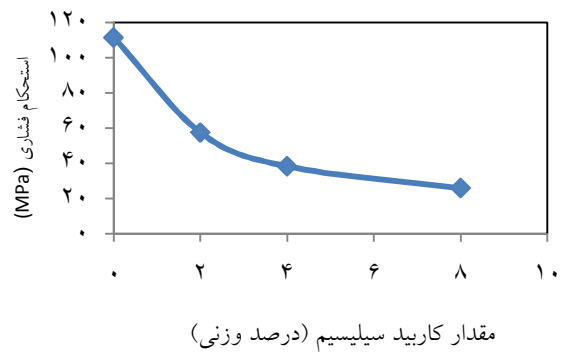


شکل ۸. نمودار استحکام خمشی نانو کامپوزیت Al-5%Cu/SiC.



شکل ۹. نمودار تغییرات مدول یانگ نانو کامپوزیت Al-5%Cu/SiC.

می دهد که این ذرات باعث افت استحکام فشاری می شوند که این نشان دهنده فصل مشترک ضعیف بین آلومینیوم و ذرات کاربرد سیلیسیم می باشد. زیرا نانو ذرات کاربرد سیلیسیم دارای ترشوندگی بسیار کمی هستند. همچنین ایجاد ترک در بین نانو ذرات کاربرد سیلیسیم در زمینه آلومینیوم به خاطر اختلاف ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم و کاربرد سیلیسیم می تواند باعث کاهش استحکام فشاری شود.



شکل ۷. نمودار استحکام فشاری نانو کامپوزیت Al-5%Cu/SiC.

### ۳-۵- اثر نانو ذرات کاربرد سیلیسیم بر روی استحکام خمشی

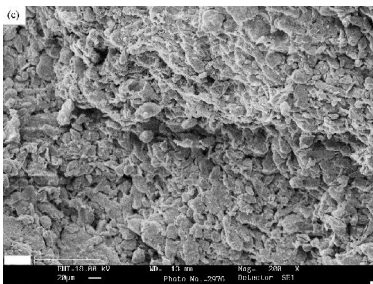
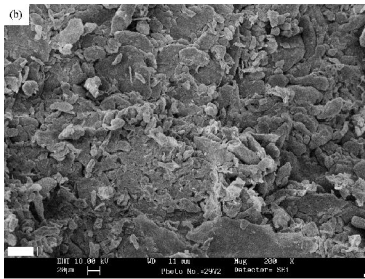
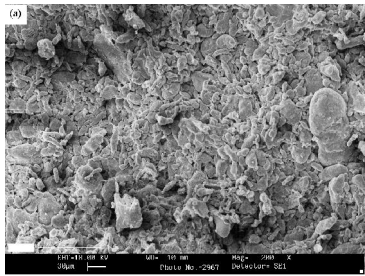
هنگامی که زمینه و تقویت کننده انتخاب می شوند، این ویژگی های ناحیه فصل مشترک است که خواص نهایی کامپوزیت را تعیین می کنند. در این رابطه، شناسایی و اندازه گیری این ویژگی های ناحیه فصل مشترک از اهمیت زیادی برخوردار است. تکنیک های ویژه زیادی برای شناسایی مشخصات مکانیکی فصل مشترک وجود دارند. به طور خاص، اندازه گیری کمی استحکام پیوند فصل مشترک زمینه و تقویت کننده اهمیت زیادی دارد. آزمایش خمشی یکی از روش های اندازه گیری این پارامتر است.

شکل (۸) نشان می دهد که افزایش مقدار نانو ذرات کاربرد سیلیسیم باعث کاهش استحکام خمشی شده است به جز در دو درصد وزنی نانو ذرات کاربرد سیلیسیم که استحکام خمشی بطور چشمگیری نسبت به نمونه پایه افزایش یافته است. این مطالعه بیانگر این است که در دو درصد وزنی نانو ذرات کاربرد سیلیسیم پیوستگی بین زمینه بیشتر حفظ شده است و وجود مناطق فصل مشترک بین زمینه و ذرات در

## ۳-۶- بررسی ساختار نمونه‌ها

## ۳-۶-۱- بررسی ساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

نانو ذرات کاربید سیلیسیم باعث پرشدن حفرات بین ذره‌ای می‌شوند و در نتیجه ساختار متراکمی را ایجاد می‌کند. با مقایسه بین شکل (a-۱۰) با شکل (b-۱۰) و شکل (c-۱۰) در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر به ترتیب مشاهده می‌شود که سطح شکست خمشی نمونه دارای دو و چهار درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم در مقیاس میکروسکوپی دارای برآمدگی و فرورفتگی‌های بسیاری است. این نشان دهنده این است که در حین فشار، تغییر فرم‌های بیشتری در زمینه به وجود آمده و شکست به وسیله بهم پیوستن ترک‌های ناشی از این تغییر فرم-ها به وجود آمده است. این نوع شکست از ویژگی‌های شکست نرم می‌باشد. اما نمونه دارای هشت درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم تغییر فرم کم‌تری بر روی سطح ایجاد شده است و شکست بر روی صفحات اتفاق افتاده است و سطح شکست بسیار صاف است. این نشان دهنده شکست ترد نمونه با هشت درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم در حین آزمون خمشی است.



شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح شکست:

Al-5%Cu/2wt%SiC (a)

Al-5%Cu/4wt%SiC (b)

Al-5%Cu/8wt%SiC (c)

در بخشی از این تصویر مشاهده می‌کنیم که کلوخه‌های بهم پیوسته‌ای ایجاد شده و خود را از زمینه جدا کرده است. احتمال می‌رود که وجود چهار درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم در افزایش انرژی سطحی و بهم پیوستن پاره‌ای از ذرات به یکدیگر به صورت یک کره مؤثر واقع شده است و سبب ایجاد کلوخه‌های درشت نسبتاً کروی گردیده است و خود را از زمینه جدا کرده است. یکی از دلایل کاهش استحکام خمشی در این نمونه را می‌توان به این پدیده نسبت داد. شکل (d-۱۱) ساختار نانوکامپوزیت Al-5%Cu/8%SiC را نشان می‌دهد. در این تصویر توزیع ذرات بسیار یکنواخت‌تر و بهتر از نمونه‌های (b) و (c) شده است. اگرچه استحکام خمشی تغییر چندانی نسبت به چهار درصد وزنی نشان می‌دهد.

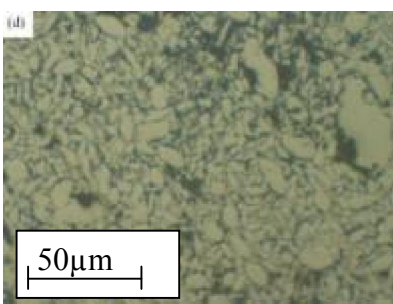
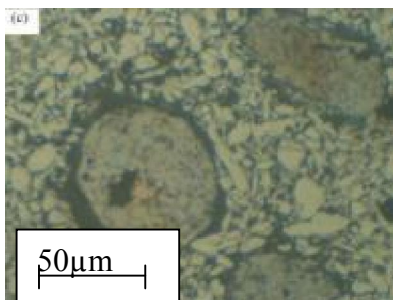
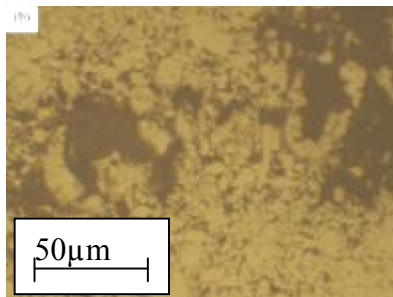
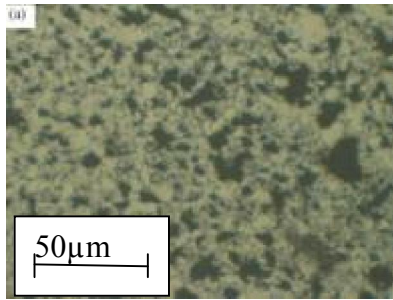
## ۳-۶-۲- بررسی ساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری

شکل (a-۱۱) ساختار نمونه Al-5%Cu را نشان می‌دهد. وجود مناطق سیاه رنگ در این شکل نشان‌دهنده حفرات و جاهای خالی در زمینه Al-Cu است. شکل (b-۱۱) ساختار نانوکامپوزیت Al-5%Cu/2%SiC را نشان می‌دهد. در این تصویر مناطق تیره بزرگی دیده می‌شود که به نظر می‌رسد تخلخل است و احتمالاً از حبس شدن حباب‌های هوا بین ذرات Al-Cu زمینه ایجاد شده است اما مناطق تیره کوچک احتمال تجمع نانو ذرات کاربید سیلیسیم و ایجاد آگلومره را نشان می‌دهد. در شکل (c-۱۱) ساختار نانوکامپوزیت Al-5%Cu/4%SiC دیده می‌شود.

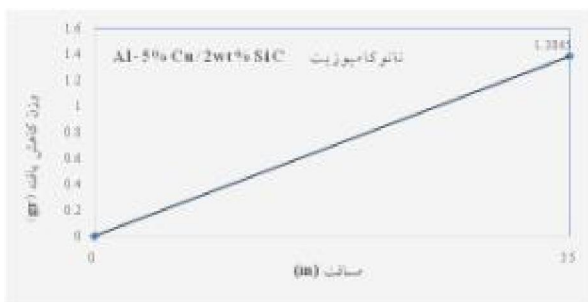
## ۳-۷- خواص سایشی

همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود آزمون سایش نمونه نانوکامپوزیت  $Al-5\%Cu/2wt\%SiC$  خواص مطلوبی را ایجاد نکرده است و شیب کاهش وزن در اثر سایش نسبت به مسافت طی شده  $0/039$  بدست آمده است. به نظر می‌رسد که در آزمایش سایش پین روی دیسک بر روی نمونه نانوکامپوزیت  $Al-5\%Cu/2wt\%SiC$  ضخامت نوک پین بسیار بزرگتر از ابعاد نانو ذرات کاربرد سیلیسیم بوده است. به طوری که نانو ذرات کاربرد سیلیسیم نتوانسته‌اند مانع بزرگی در مقابل حرکت سایشی پین از خود نشان دهند. عملکرد نامطلوب نانو کامپوزیت  $Al-5\%Cu/2wt\%SiC$  می‌تواند به دلیل کم بودن مقدار ذرات تقویت‌کننده باشد. و نیز در بار کم ذرات کاربرد سیلیسیم به عنوان اجزا انتقال بار عمل نموده و بنابراین مقاومت سایشی نانوکامپوزیت نسبت به کامپوزیت کاهش یافته است زیرا ذرات کاربرد سیلیسیم با ابعاد نانو نمی‌توانند این نیرو را تحمل کنند و خود دچار شکست می‌شوند. همچنین در کامپوزیت‌ها پس از مدتی که از زمان آزمایش می‌گذرد، مقداری کاهش وزن در اثر سایش به وجود می‌آید.

در حین عملیات سایش بیشتر زمینه نرم ساییده شده و قسمت تقویت‌کننده همانند پایه‌ای در برابر سایش مقاومت می‌کند. با افزایش مقدار تقویت‌کننده تا یک مقدار بهینه سطح تماس در برابر سایش مقاومت می‌کند و نرخ سایش کاهش می‌یابد. شکل (۱۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه نانوکامپوزیت  $Al-5\%Cu/2wt\%SiC$  را در بار پنج نیوتن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در بار پنج نیوتن در نانوکامپوزیت  $Al-5\%Cu/2wt\%SiC$  سایش چسبان اتفاق افتاده است. سایش چسبان نشان‌دهنده وجود تغییر فرم‌های شدید بر روی سطح می‌باشد.



شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپ نوری نانوکامپوزیت: (a)  $Al-5\%Cu$ , (b)  $Al-5\%Cu/2wt\%SiC$ , (c)  $Al-5\%Cu/4wt\%SiC$ , (d)  $Al-5\%Cu/8wt\%SiC$



شکل ۱۲. نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت سایشی تحت شرایط اعمال بار ۵N برای نانوکامپوزیت  $Al-5\%Cu/2wt\%SiC$



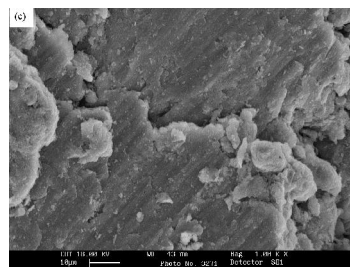
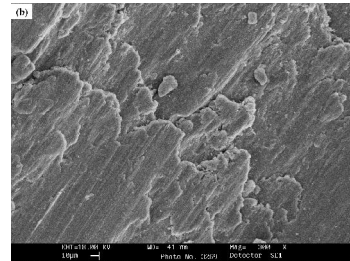
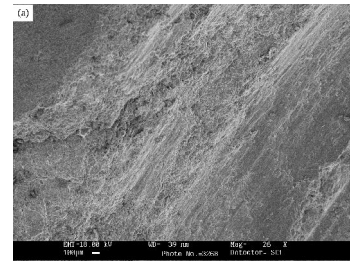
۶- آزمایشات میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان داد که با افزودن نانو ذرات تا دو و چهار درصد شکست از نوع نرم و در هشت درصد وزنی از نوع ترد می‌باشد.

۷- نمونه نانو کامپوزیت Al-5%Cu/2wt%SiC مقاومت سایشی پایینی نشان داد.

### مراجع

1. Suryanarayana. C., "Mechanical alloying", Marcel Dekker, USA ,New York. (2004).
2. Fogagnolo. J.B., Amador. D., Ruis-Navas. E.M., Torralba J.M., "Solid solution in Al-4.5wt%Cu produced by mechanical alloying", 2006, *Materials Science and Engineering*. 433 45-49.
3. Cory. A.S., "Discontinously reinforcement for metal matrix composites", Handbook. 21, Composites, The ASM Handbook Comittee, ASM International, 1<sup>th</sup> edition. (2001) 51-55.
4. Adamiak. M., Fogagnolo J.B., Ruiz-Navas. E.M., Dobrzanski. L.A., Torralba. J.m., "mechanically milled AA6061/(Ti<sub>3</sub>Al)<sub>p</sub> MMC reinforced with intermetallics-the structure and properties", *Materials Processing*. 155-156 (2004) 2002-2006.
5. Zhou. J., Duszczczyk. J., "Liquid phase sintering of AA2014-based composite prepared from an elemental powder mixture", *Journal of Materials Science*. 34 (1999) 545-550.
6. Moon. K., Park. H.S., Lee. K.S., "Consolidation of nanocrystalline Al-5 at.% Ti alloy powder by ultra high-pressure hot pressing", *Materials Science and Engineering A*. 323 (2002) 293-300.
7. Parvin. N., Assadifard. R., Safarzadeh. P., Sheibani. S., Marashi. P., " Preparation and mechanical properties of SiC-reinforced Al6061 composite by mechanical alloying", *Materials Science and Engineering A*. 492 (2008) 134-140.
8. Available from: URL: <http://www.Engineering Tool Box.com>, Last visit June 2013.

۹. منشی، ا.، سرامیک‌ها و مواد نسوز، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۵.



شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه نانو کامپوزیت Al-5%Cu/2wt%SiC در بار ۵N: (a) بزرگنمایی ۲۶ برابر، (b) بزرگنمایی ۳۰۰ برابر، (c) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر.

### ۴- نتیجه گیری

۱- افزودن دو درصد نانو ذرات کاربید سیلیسیم به زمینه ۱۴ درصد استحکام خمشی را افزایش داده است.

۲- برای افزایش چگالی نمونه‌ها نانو ذرات کاربید سیلیسیم تا چهار درصد وزنی قابل افزودن است.

۳- ارزیابی استحکام فشاری نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه فاقد تقویت‌کننده، استحکام فشاری بالاتری را ایجاد کرده است.

۴- برای افزایش سختی نانو ذرات کاربید سیلیسیم تا هشت درصد وزنی قابل افزودن هستند و سختی را حدود ۵۰ درصد افزایش داده است.

۵- با ورود نانو ذرات کاربید سیلیسیم به زمینه آلومینیوم فصل مشترک‌ها بیشتر شده و جلوی حرکت نابجایی‌ها را بیشتر گرفته و سختی و استحکام خمشی کامپوزیت را بالا می‌برد.