

ساخت و بررسی خواص سایشی نانوکامپوزیت Al6061/CNT

مهدیه جمشیدی جم، علی اکبری و مهرداد خاکبیز
گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان
m_jamshidijam@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق مخلوط پودری آلومینیوم حاوی مقادیر مختلف نانولوله‌های کربنی (۲ و ۵ درصد وزنی) با روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه شد. جهت بررسی توزیع نانولوله‌های کربنی در پودر آلومینیوم از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. توزیع اندازه ذرات در مخلوط‌های پودری با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری اندازه ذرات توسط لیزر بررسی و تأثیر پارامترهای فرآیند آلیاژسازی بر توزیع ذرات در طول فرآیند آلیاژسازی مشخص شد. نمونه‌های متراکم شده با روش اکستروژن داغ، تهیه گردید و خواص سایشی این کامپوزیت به دست آمد و این خواص بر اساس روابط موجود شبیه‌سازی شد. بررسیها نشان داد که پس از چهار ساعت آسیاکاری مخلوط پودری آلومینیوم حاوی ۵ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، یک توزیع یکنواخت از نانولوله‌های کربنی در ذرات ورقه‌ای شکل آلومینیوم حاصل می‌شود. آسیاکاری مخلوط پودری در مدت زمانهای بیش از چهار ساعت باعث ایجاد ذرات هم‌محور آلومینیوم شده که این ذرات حاوی نانولوله‌های کربنی به صورت محبوس می‌باشند. نتایج آنالیز اندازه ذرات توسط لیزر نشان می‌دهد که اندازه متوسط ذرات (D50) و گستردگی توزیع اندازه ذرات (D90-D10) با افزایش زمان آسیاکاری و همچنین افزایش میزان نانولوله‌های کربنی کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند، خواص سایشی نانوکامپوزیت تولید شده Al-2%CNT و Al-5%CNT نسبت به نمونه آلومینیوم خالص در حدود ۳۲٪ و ۳۸٪ افزایش می‌یابد. همچنین نتایج شبیه‌سازی شده میزان سایش بر حسب فاصله، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.

واژه‌های کلیدی:

نانوکامپوزیت زمینه فلزی، نانولوله کربن، آلیاژسازی مکانیکی، سایش.

۱- مقدمه

تولید کامپوزیت مشکل بوده و از طرفی با توجه به امکان واکنش نانولوله‌های کربنی با زمینه‌های فلزی و به‌ویژه آلومینیوم (تولید Al_4C_3) تولید این دسته از کامپوزیتها با روشهای ذوبی محدودیت دارد. علیرغم موارد مذکور، نانوکامپوزیت‌های AI-CNT با روشهای مختلف تولید شده‌اند. به‌طور مثال لاه^۱ و

در سالهای اخیر نانولوله‌های کربنی توجه زیادی را به‌خود جلب نموده‌اند. بر اساس مطالعات تئوری و تجربی، مدول یانگ و دانسیته نانولوله‌های کربنی به‌ترتیب بین ۵-۱ TPa و $1/2-1/8 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد [۱]. با توجه به آگلمره شدن شدید نانولوله‌های کربنی، توزیع آنها در زمینه فلزی با روشهای معمولی

سایشی (مدل S_1) در مدت زمانهای مختلف بین ۲ تا ۲۰ ساعت تحت آسیاکاری در محیط آرگن قرار گرفتند. نسبت وزنی گلوله به پودر در فرآیند آسیاکاری ۲۰ و از اتانول به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند استفاده شد. پس از آسیاکاری در زمانهای مختلف نمونه‌های پودری از مخلوط پودری تهیه شد. این نمونه‌ها جهت بررسی مورفولوژی و اندازه‌گیری اندازه ذره‌ای توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل کمبریج و آنالیز ذرات به وسیله لیزر مدل Cillas مورد بررسی قرار گرفتند. بعد از تهیه نمونه‌های پودری این مخلوطها با روش اکستروود داغ فشرده شدند. به منظور بررسی رفتار سایشی از دستگاه Pin On Disk استفاده شد. بار اعمالی به نمونه‌ها ۱۰ نیوتن بوده و سرعت چرخش نمونه‌ها نیز ۴۲۰ rpm بوده است. در مقاله حاضر، نمونه‌های پودر کامپوزیتی به صورت $AI-x\%CNT$ معرفی شده‌اند که x نشان‌دهنده میزان نانولوله‌های کربنی اضافه شده به مخلوط پودری می‌باشد.

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- بررسی مورفولوژی

شکل (۱)، تغییرات مورفولوژی مخلوط پودری $AI-2\%CNT$ در طول فرآیند آسیاکاری را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود پس از ۲ و ۴ ساعت آسیاکاری ذرات ورقه‌ای شکل آلومینیوم ایجاد شده است. تغییرات مورفولوژی ذرات در طول فرآیند آسیاکاری ناشی از اثرات متقابل و پیچیده فرآیندهای ضربه، فشار و برش در طول فرآیند آسیاکاری مکانیکی می‌باشد. در اثر برخورد گلوله‌ها به پودرها، کارسختی در پودرها صورت گرفته، می‌شکنند و سطوح شکست صاف و تمیز در اثر برخورد ایجاد می‌شوند. سطوح تمیز ذرات به واسطه وجود اتمسفر آرگن پایدار بوده و تحت تأثیر تنشهای برشی موجود جوش سرد بین این سطوح ایجاد می‌شود، لذا ذرات به صورت موضعی به هم جوش سرد می‌شوند و خوشه‌هایی را ایجاد می‌کنند. چنانچه مشاهده می‌شود، پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری، ذرات ورقه‌ای

همکارانش [۲]، نانوکامپوزیتهای $AI-CNT$ را با روش اسپری پلاسما تهیه کرده و نشان دادند که نانولوله‌های کربنی باعث افزایش قابل توجه سختی زمینه آلومینیومی می‌شوند. در نانوکامپوزیتهای $AI-CNT$ تهیه شده با روش تزریق مذاب، حضور نانولوله‌ها باعث افزایش ۱۵۰٪ در میکروسختی و کاهش ۳۹٪ ضریب اصطکاک شده است [۳]. دنگ^۲ و همکارانش [۴]، نانوکامپوزیت $AI-5\%CNT$ را با روش متالورژی پودر تهیه کرده و افزایش ۷۸٪ در میکروسختی نسبت به زمینه فاقد نانولوله‌های کربنی را مشاهده کردند. از جمله روشهایی که به سرعت جهت تولید محدوده وسیعی از مواد پیشرفته مثل نانو کریستالها، نانوکامپوزیتها و غیره توسعه یافته است، روش آلیاژسازی مکانیکی می‌باشد [۵ و ۶]. آلیاژسازی - آسیاکاری مکانیکی روش مناسبی برای تولید نانوکامپوزیتهایی با توزیع یکنواخت از فاز مستحکم کننده نانومتری می‌باشد. در طول فرآیند آسیاکاری نانوذرات در پودر فلزات نرم، تغییر شکل پلاستیکی، شکست و جوش سرد ذرات اتفاق افتاده و پودر نانوکامپوزیتی با توزیع یکنواخت ذرات نانو در پودر فلز ایجاد می‌شود.

در تحقیق حاضر مخلوط پودری $AI-CNT$ با روش آلیاژسازی مکانیکی تهیه شده و تأثیر پارامترهای فرآیند شامل زمان آسیاکاری، میزان نانولوله‌های کربنی بر مورفولوژی و اندازه ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه بعد از فشرده سازی پودرها با روش اکستروژن گرم، خواص سایشی نانوکامپوزیتها به دست آمده و بعد از مدل سازی، اثر پارامترهای فرآیند و ترکیب پودر بر روی ضریب اصطکاک و نرخ سایش مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

پودر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ با روش اتمیزه کردن گازی و نانولوله‌های کربنی با قطر ۸۰ نانومتر از شرکت نانوتک^۳ تهیه شد. مخلوط پودر آلومینیوم به همراه مقادیر مختلف از نانولوله‌های کربنی (۲ و ۵ درصد وزنی) توسط آسیای گلوله‌ای پر انرژی

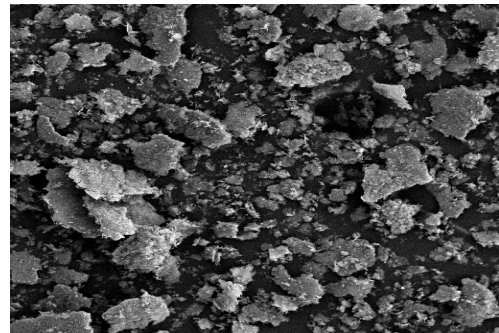
تبدیل به خوشه‌هایی شده‌اند. با ادامه فرآیند آسیاکاری مشاهده می‌شود که پس از ۲۰ ساعت آسیاکاری، ذرات پودری هم‌محور ایجاد می‌شوند (شکل ۱-د).

شکل (۲)، تغییرات مورفولوژی مخلوط پودری AI-5% CNT در طول فرآیند آسیاکاری را نشان می‌دهد. همانند مخلوط پودری AI-2% CNT پس از ۲ و ۴ ساعت آسیاکاری، ذرات ورقه‌ای شکل آلومینیوم ایجاد شده‌است.

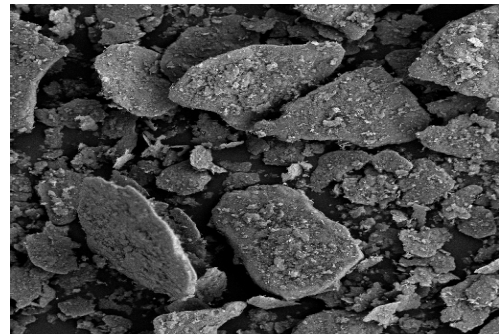
شکل (۲-الف)، تصویر SEM با بزرگنمایی بالا و پائین پودر پس از ۲ ساعت آسیاکاری مخلوط پودری AI-5% CNT را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود خوشه‌هایی از نانولوله‌های کربنی در سطح ذرات پودر آلومینیوم ایجاد می‌شوند. پس از ۴ ساعت آسیاکاری خوشه‌های نانولوله‌های کربن از بین می‌رود، به طوری که با ۴ ساعت آسیاکاری مکانیکی می‌توان به یک توزیع یکنواخت از نانولوله‌های کربنی در پودر آلومینیوم دست یافت. افزایش زمان آسیاکاری در این مخلوط پودری مشابه مخلوط پودری AI-2% CNT است، گرچه به نظر می‌رسد که افزایش نانولوله کربنی از دو به پنج درصد باعث ریز شدن پودر آلومینیوم می‌گردد. تغییرات مورفولوژی پودر آلومینیوم ایجاد شده توسط آسیاکاری مکانیکی در سیستم‌های کامپوزیتی دیگر نیز مشاهده شده‌اند [۷-۹].

۳-۲- بررسی اندازه ذرات

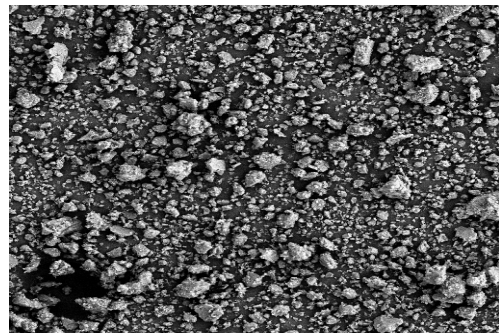
در شکل (۳)، تأثیر زمان آسیاکاری بر توزیع اندازه ذرات در مخلوط‌های پودری AI و AI(5% CNT) نشان داده شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش زمان آسیاکاری، از ۲ به ۲۰ ساعت، نمودار توزیع اندازه ذرات به سمت چپ منتقل می‌شود زیرا با افزایش زمان آسیاکاری، ذرات آلومینیوم ورقه‌ای شکل ریزتری در نتیجه تغییر شکل پلاستیک شدید و شکستن ذرات ایجاد می‌گردد. با افزایش بیشتر زمان آسیاکاری، نمودار توزیع ذرات بیش‌تر به سمت چپ منتقل می‌شود که بیانگر افزایش بیشتر کسر ذرات ریز در پودر آلومینیوم می‌باشد. علت



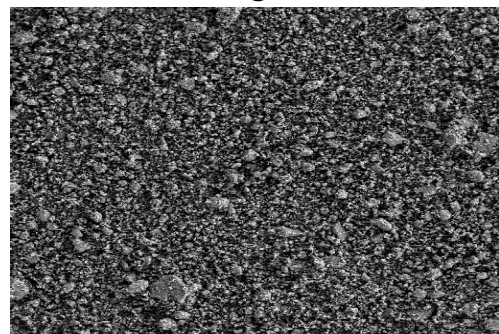
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

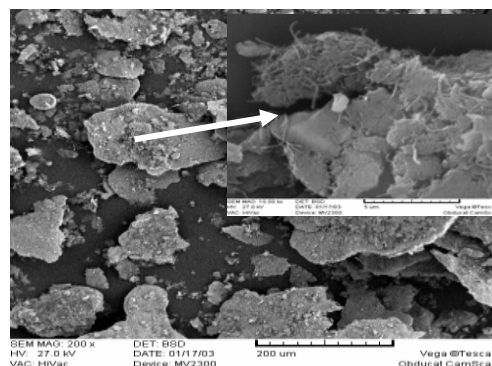
شکل (۱): تصاویر SEM از پودر AI-2% CNT پس از الف) ۲، ب) ۴، ج) ۱۲ و د) ۲۰ ساعت آسیاکاری.

این تغییر را می‌توان به تکه تکه شدن ذرات درشت مربوطه دانست به طوری که کسر ذرات درشت در پودر آلومینیوم و مخلوط کامپوزیت کاهش یافته و کسر حجمی ذرات ریز افزایش می‌یابد. در شکل (۴)، تأثیر زمان آسیاکاری بر پارامترهای D50 و D90-D10 مخلوط پودرها نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش میزان نانولوله‌های کربنی از ۲٪ به ۵٪ وزنی، اندازه ذرات در زمانهای آسیاکاری یکسان کاهش می‌یابد (شکل ۴-الف). در واقع نانولوله‌های کربنی سخت‌تر از پودر آلومینیوم بوده و لذا نقشی مشابه گلوله‌های آسیاکنده را در طول فرآیند آسیاکاری خواهند داشت. لذا با افزایش میزان نانولوله‌های کربنی در مخلوط پودری تعداد ضربات اعمالی به ذرات پودر آلومینیوم افزایش یافته و ذرات در مخلوط پودری ریزتر می‌شوند. در شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود که با افزایش زمان آسیاکاری D90-D10 که معیاری از پهن شدگی نمودارهای توزیع ذرات می‌باشد، کاهش می‌یابد. در واقع هر چه میزان پهن شدگی کمتر باشد پودرهای آسیاب شده از توزیع یکنواخت‌تری برخوردار می‌باشند و نشان می‌دهد که به فرآیند تعادل نزدیکتر می‌باشیم. با توجه به نتایج مذکور می‌توان این گونه استنباط نمود که دستیابی به یک شرایط مشابه آسیاکاری در نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی بیشتر، در زمان کمتر اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال ایجاد ذرات هم‌محور، در مورد مخلوط پودری کامپوزیتی Al-5%CNT در زمان کوتا‌هتری نسبت به پودر Al-2%CNT حاصل می‌شود.

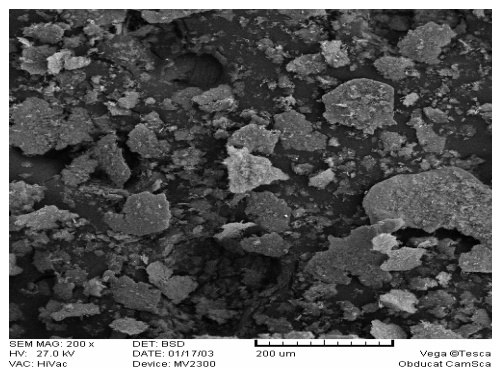
۳-۳- بررسی نتایج سایش

۳-۳-۱- نمودارهای ضریب اصطکاک

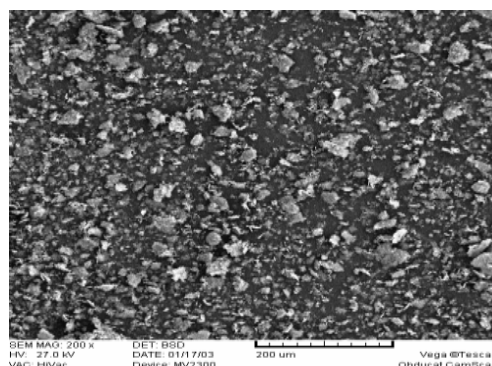
در شکل (۵)، نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت برای نمونه‌های مختلف در بار ۱۰ نیوتن نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اکثر نمونه‌ها در مسافت‌های اولیه، ضریب اصطکاک افزایش یافته که مربوط به مرحله بارگذاری می‌باشد و سپس ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و در محدوده‌های مشخصی شروع به نوسان می‌کند. همچنین



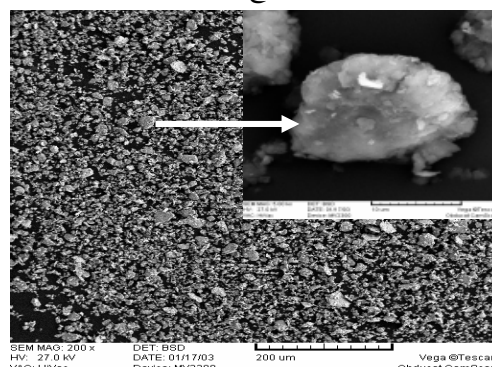
(الف)



(ب)

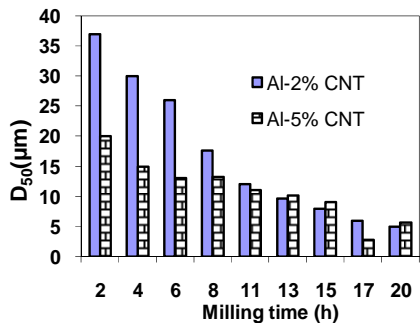


(ج)

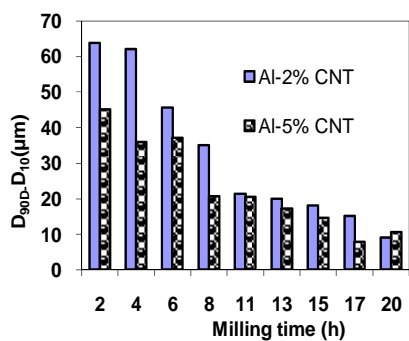


(د)

شکل (۲): تصاویر SEM از پودر Al-5%CNT پس از الف) ۲، ب) ۴، ج) ۱۲ و د) ۲۰ ساعت آسیاکاری.

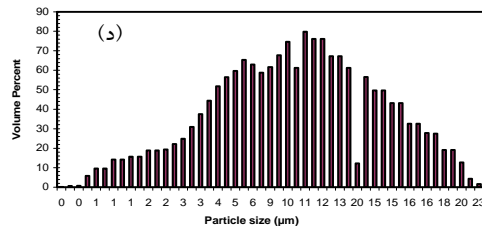
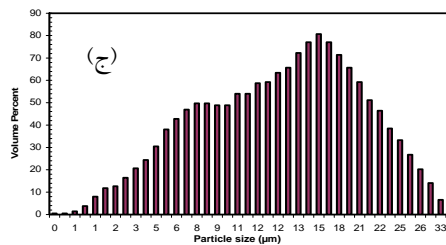
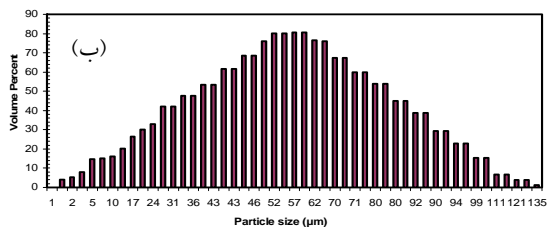
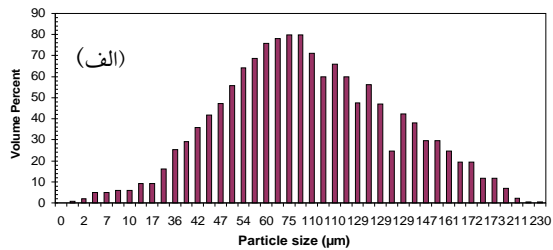


(الف)

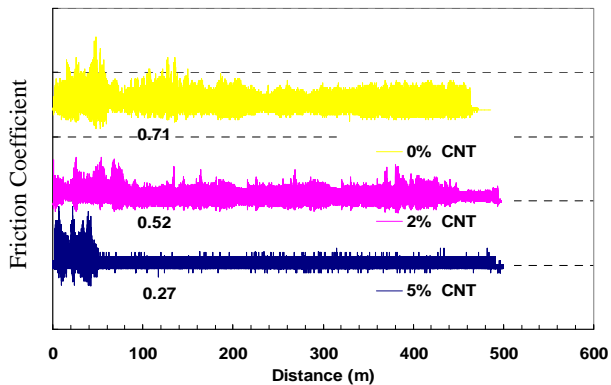


(ب)

شکل (۴): تأثیر زمان آسیاکاری بر الف) D₅₀ و ب) D₉₀-D₁₀ نمونه‌های Al-CNT.



شکل (۳): تأثیر زمان آسیاکاری بر توزیع اندازه ذرات آلومینیوم Al خالص و Al-5% CNT (الف) Al-2hr، (ب) Al-20hr، (ج) Al-5% CNT-2hr و (د) Al-5% CNT-20hr.



شکل (۵): ضریب اصطکاک نمونه‌های مختلف بر حسب فاصله.

تحقیقات زیادی در مورد رفتار سایشی نانوکامپوزیتها انجام شده است و تقریباً نتیجه اکثر تحقیقات افزایش خواص سایشی نانوکامپوزیتها را در مقایسه با میکروکامپوزیتها و فلز پایه عنوان می کنند.

علیرغم همه این تحقیقات هنوز علت این امر به خوبی اثبات نشده است. این موضوع در حالی است که برای میکروکامپوزیتهای زمینه فلزی کاهش اندازه ذرات تقویت کننده در بعضی از تحقیقات سبب کاهش مقاومت به سایش نیز شده است. مکانیزمهای زیادی در افزایش مقاومت به سایش دخالت دارند که در ادامه تعدادی از آنها به صورت مختصر توضیح داده می شوند.

الف) مکانیزم کاهش ضریب اصطکاک:

با افزودن نانوذرات به داخل فاز زمینه ضریب اصطکاک کاهش می یابد. باید توجه داشت که ضریب اصطکاک یک مفهوم فیزیکی می باشد و لذا قاعداً نباید با افزودن ذرات تقویت کننده کاهش یا افزایش یابد. در واقع ضریب اصطکاک به زبری و یا صافی سطح بستگی دارد و هر چه سطح صاف تر باشد میزان ضریب اصطکاک آن کمتر است. طبیعی است با کاهش ضریب اصطکاک طبق معادله آرچارد^۴، میزان نرخ سایش نیز کاهش می یابد. در واقع از آنجا که ضریب اصطکاک با زبری سطح در ارتباط است، به نظر می رسد که افزودن نانوذرات سختی را افزایش داده و از فرو رفتن ماده ساینده و ازدیاد زبری سطح جلوگیری می کند.

ب) مکانیزم جلوگیری از رشد ترک:

مکانیزم سایش همراه با ایجاد ترکها و رشد آنها می باشد. هر عاملی که سبب جلوگیری از رشد ترک شود، می تواند سبب کاهش میزان سایش گردد. همانطور که در بخشهای پیشین عنوان شد در نانوکامپوزیتها پیوند خوبی بین زمینه و تقویت کننده برقرار می شود و لذا این ذرات می توانند به عنوان عاملی در مقابل رشد ترک عمل کنند. از طرف دیگر گزارشهای فراوانی مبنی بر مطلوب نبودن پیوند بین میکروذرات و زمینه در کامپوزیتهای زمینه فلزی وجود دارد. لذا در اثر فرآیند سایش این ذرات از سطح سایش کنده شده و خود می توانند محلی برای جوانه زنی

ضریب اصطکاک متوسط نمونه های مختلف به دست آمده و بر روی نمودار نشان داده شده است. مشاهده می شود که ضریب اصطکاک با تغییر درصد نانولوله های کربنی تغییر نموده است که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

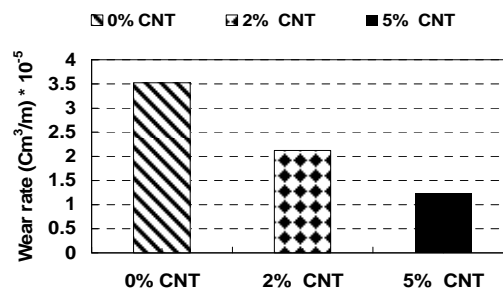
۳-۲-۳- اثر درصد نانولوله های کربنی روی ضریب اصطکاک

اثر افزایش درصد نانولوله های کربنی بر روی ضریب اصطکاک نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش درصد نانولوله های کربنی ضریب اصطکاک کاهش پیدا نموده است. از طرف دیگر نتایج نشان می دهد که با افزودن ۲٪ وزنی نانولوله های کربنی ضریب اصطکاک نانوکامپوزیت از ضریب اصطکاک نمونه آلومینیوم در حدود ۲۷٪ کمتر می باشد.

با افزودن ۵٪ نانولوله های کربنی ضریب اصطکاک در حدود ۶۷٪ کاهش می یابد. نتایج به دست آمده در این تحقیق مشابه نتایج به دست آمده از تحقیق فنگگ و همکاران [۱۰]، می باشد. در تحقیق انجام گرفته توسط این محققین نیز مشاهده شده است که با افزایش درصد نانوذرات Al_2O_3 در زمینه نیکل ضریب اصطکاک کاهش یافته است.

۳-۳-۳- اثر درصد و اندازه نانولوله های کربنی بر نرخ سایش

نرخ سایش به صورت میزان حجم سایش یافته بر مسافت طی شده $(\frac{cm^3}{m})$ تعریف می شود. این پارامتر برای نمونه های مختلف در بار ۱۰ نیوتن محاسبه شده و در شکل (۶) رسم شده است. با افزودن ۲٪ نانولوله های کربنی نرخ سایش در حدود ۳۲٪ و با افزودن ۵٪ نانولوله های کربنی نرخ سایش ۴۳٪ کاهش یافته است.



شکل (۶): نرخ سایش نمونه های مختلف بر حسب میزان نانولوله ها.

ساینده وجود داشته باشند و به جای اینکه دو سطح سایش بر روی هم بلغزند، این ذرات مانند غلتک بین دو سطح عمل کنند.

۳-۳-۴- بررسی ارتباط نرخ سایش با ضریب اصطکاک

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که میزان سایش بر حسب فاصله از دو منطقه تشکیل می‌شود که شامل منطقه انتقالی یا موقتی و منطقه پایدار می‌باشد. حجم سایش یافته در منطقه انتقالی به صورت منحنی بوده و نرخ سایش بر حسب فاصله در این منطقه کاهش می‌یابد. اما در منطقه پایدار نرخ سایش ثابت شده و میزان سایش نیز بر حسب فاصله به صورت خطی می‌شود. یانگ^۵ و همکاران [۱۱]، یک مدل ریاضی را برای بررسی نرخ سایش کامپوزیت Al-Al₂O₃ پیشنهاد دادند که به صورت زیر عنوان می‌شود:

$$V_c = \frac{g_1}{g_3} \frac{P}{H} \frac{d(1-f_v)}{f_v} \left[1 - \exp\left(\frac{-g_3 f_v L}{d(1-f_v)}\right) \right] \quad (1)$$

که در آن V_c میزان حجم سایش یافته، H میزان سختی، P فشار وارده، f_v درصد حجمی ذرات، L فاصله، d اندازه متوسط ذرات و g_1 و g_3 مقادیر ثابت می‌باشند، با در نظر گرفتن معادله زیر:

$$A = \left[1 - \exp\left(\frac{-g_3 f_v L}{d(1-f_v)}\right) \right] \quad (2)$$

معادله (۳) به صورت زیر در می‌آید:

$$V_c = \frac{g_1}{g_3} \frac{P}{H} \frac{d(1-f_v)}{f_v} [A] \quad (3)$$

رابطه (۳)، نشان می‌دهد که A یک رابطه اکسپونشیالی از L می‌باشد. به طوری که با افزایش L ، A افزایش یافته تا اینکه به مقدار ثابتی برسد با مشتق‌گیری از معادله (۳) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dV_c}{dL} = \frac{g_1 P}{H} \exp\left[\frac{-g_3 f_v L}{d(1-f_v)}\right] \quad (4)$$

به منظور به دست آوردن g_1 و g_3 به صورت زیر عمل می‌شود که در شرایط $L = 0$ و $L = L_b$ مشتق V_c ، mB و mA در نظر گرفته می‌شود، لذا روابط زیر به دست می‌آیند:

$$g_1 = \frac{Hm_A}{P} \quad (5)$$

ترک محسوب شوند. از طرف دیگر در میکرو کامپوزیتها از آنجا که سطح تماس ذرات میکرونی با ماده سایش دهنده زیاد می‌باشد، امکان شکستن این ذرات وجود دارد و این امر باعث می‌شود تا اینکه این ذرات با این مکانیزم به تدریج از سطح مشترک خارج شده و حفرات ریز در سطح ایجاد شوند.

همانطور که عنوان شده در مکانیزم لایه لایه شدن افزایش تجمع نابعایی‌ها در روی سطح یکی از فرآیندهای غالب می‌باشد. در میکرو کامپوزیتها از آنجا که فصل مشترک بین زمینه و تقویت کننده مناسب نیست، لذا امکان حرکت نابعایی به سطح وجود دارد. اما در نانو کامپوزیتها مکانیزمهایی مانند مکانیزم اروان حاکم است و تنش اروان خود مانعی برای حرکت نابعایی‌ها است، لذا تغییر دانسیته نابعایی‌ها در روی سطح نسبت به عمق نمونه چندان زیاد نمی‌باشد که همین عامل می‌تواند خود مانعی برای ایجاد ترک و رشد آن در نانو کامپوزیتها باشد.

ج) تسریع فرآیند اکسید شدن سطح در نانو کامپوزیتها نسبت به میکرو کامپوزیتها:

همانطور که عنوان شد در نانو کامپوزیتها سختی زمینه نسبت به میکرو کامپوزیتها بیشتر می‌باشد. این امر باعث می‌شود که دمای نانو کامپوزیتها در هنگام فرآیند سایش بیشتر افزایش یابد، لذا تشکیل لایه‌های اکسیدی فلز که لازمه آن افزایش دما است در نانو کامپوزیتها نسبت به میکرو کامپوزیتها بیشتر می‌باشد که این امر خود باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود.

د) جلوگیری از فرو رفتن ماده ساینده:

به دلیل ریز بودن نانو ذرات حتی درصد کمی از آنها حجم زیادی از زمینه را اشغال می‌کنند و این امر باعث می‌شود که احتمال اینکه نوک مواد ساینده با این ذرات تماس داشته باشد بیشتر شود، لذا از فرو رفتن نوک مواد ساینده به داخل ماده نرم جلوگیری می‌شود که این امر باعث می‌گردد تا از شخم زدن سطح سایش جلوگیری به عمل آید.

ر) اثر روانکاری نانو ذرات:

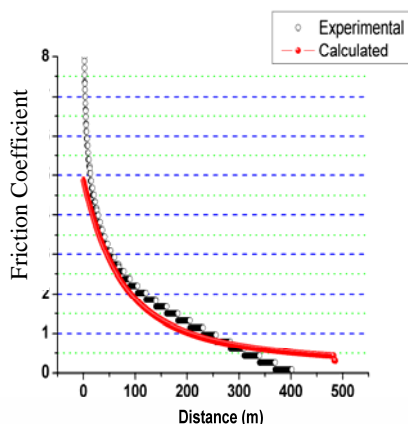
نانو ذرات می‌توانند مانند ذراتی نقش غلتک را داشته باشند، به این مفهوم که بعد از کنده شدن در مرز مشترک بین زمینه و ماده

شکل (۸)، تعدادی از نمودارهای مدل شده نرخ سایش بر حسب فاصله را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۹)، نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی شده میزان نرخ سایش نشان داده شده‌است. چنانچه مشاهده می‌شود، روش شبیه‌سازی به کار رفته با دقت بالایی می‌تواند میزان نرخ سایش را پیش‌بینی نماید.

۳-۳-۶- بررسی اثر پارامترهای سایش روی مدل ارائه شده همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی، نمودارهای نرخ سایش - فاصله به سمت پایین حرکت می‌کند (نرخ سایش کم می‌شود). این موضوع نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی شکل (۶) را تأیید می‌کند و بنابراین مشاهده می‌شود که مدل ارائه شده به خوبی می‌تواند اثر پارامترهای فرآیند مانند درصد تقویت‌کننده را بر روی رفتار سایشی کامپوزیتها پیش‌بینی نماید.

۳-۳-۷- محاسبه مرز منطقه انتقالی و بررسی اثر پارامترهای فرآیند سایش

همانطور که عنوان شد، مرز منطقه انتقالی، میزان فاصله سایش یافته تا حالت پایدار می‌باشد. این فاصله از این نقطه نظر اهمیت دارد که مشخص می‌شود بعد از چه مقدار از فرآیند سایش، نرخ سایش بر حسب فاصله خطی می‌شود.



شکل (۷): نمودارهای شبیه‌سازی شده و تجربی ضریب اصطکاک بر حسب فاصله برای نمونه AI-5%CNT.

$$m_B = \frac{g_1 P}{H} \exp\left[\frac{-g_3 f_v L_B}{d(1-f_v)}\right] \quad (6)$$

با لگاریتم‌گیری از طرفین معادله رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\ln m_B = \ln\left(\frac{g_1 P}{H}\right) - \frac{g_3 f_v L_B}{d(1-f_v)} \quad (7)$$

$$g_3 = \frac{d(1-f_v)(\ln m_A - \ln m_B)}{L_B} \quad (8)$$

اگر مقادیر مربوط به g_1 و g_3 محاسبه شود در این صورت میزان حجم سایش انتقالی و همچنین فاصله انتقالی نیز به دست می‌آید.

۳-۳-۵- مدل نمودن میزان سایش بر حسب فاصله

در این بخش هدف به دست آوردن تغییرات میزان سایش بر حسب مسافت برای نمونه‌های مختلف و نیز به دست آوردن میزان مرز منطقه انتقالی (میزان مسافت طی شده تا منطقه پایدار) و مقایسه آن با نتایج تجربی می‌باشد. همانطور که عنوان شد ضریب اصطکاک و میزان سایش طبق رابطه آرچارد به یکدیگر ارتباط دارند، لذا با تلفیق دو رابطه آرچارد و معادله (۱) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_w = \frac{3Hm_A d(1-f_v)}{PLg_3 f_v} \left[1 - \exp\left(\frac{-g_3 f_v L}{d(1-f_v)}\right)\right] \quad (9)$$

رابطه ساده شده معادله فوق به صورت زیر خواهد بود:

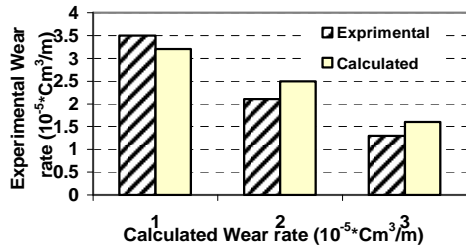
$$K_w = \frac{a}{L} [1 - \exp(-bL)] \quad (10)$$

که در آن a و b به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$a = \frac{3Hm_A d(1-f_v)}{Pg_3 f_v} \quad (11)$$

$$b = \frac{-g_3 f_v}{d(1-f_v)} \quad (12)$$

اگر معادله (۱۲) از نتایج تجربی به دست آمده از آزمایشات گذرانده شود در این صورت مقادیر a و b به دست می‌آید. در شکل (۷)، تعدادی از نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب فاصله برای نمونه‌های مختلف رسم شده و معادله (۱۰) از آن گذرانده شده‌است. بعد از به دست آوردن مقادیر a و b جایگزینی مقادیر آن در رابطه (۱۰) معادله ضریب اصطکاک به دست می‌آید و با تلفیق رابطه آرچارد و معادله (۱۰)، رابطه نرخ سایش با مسافت به دست می‌آید.



شکل (۹): نمودار نرخ سایش تجربی بر حسب نرخ سایش محاسبه شده در فاصله ۵۰۰ متر برای بار ۱۰ N.

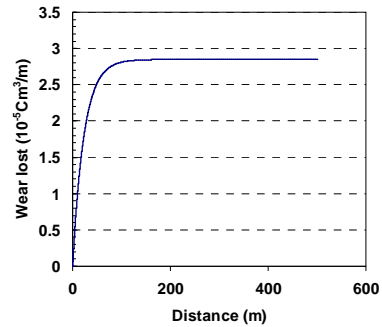
به ترتیب برای AI، AI-2% CNT و AI-5% CNT برابر ۲۷۰، ۲۱۰ و ۱۵۰ می باشد.

مطابق این داده ها درصد نانولوله های کربنی بر روی مرز منطقه سایش تأثیر دارد و مشاهده می شود که افزایش درصد نانولوله های کربنی، مرز منطقه انتقالی را افزایش می دهد به عبارت دیگر نمونه های با درصد بالاتر دیرتر به منطقه پایدار سایش می رسند.

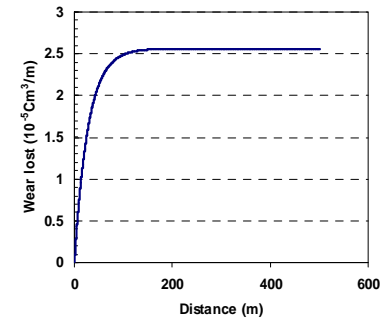
در واقع منطقه انتقالی منطقه ای است که تا آن نقطه تغییر شکل شدیدی بر روی نمونه اعمال می شود و این امر باعث می گردد لایه های تغییر شکل یافته در زیر سطح سایش ایجاد شود. ارتباط مستقیمی بین تشکیل لایه های تغییر شکل یافته و مرز منطقه انتقالی وجود دارد. هر چه ماده نرم تر باشد میزان تغییر شکل لایه های سطح و تشکیل لایه های تریبولوژی راحت تر خواهد بود. افزودن نانولوله های کربنی به پودر آلومینیوم سبب می شود تا اینکه سختی کامپوزیت تولید شده افزایش یافته و در نتیجه تشکیل لایه تریبولوژی سخت تر باشد و مرز منطقه انتقالی بیشتر شود.

۳-۳-۸- بررسی مورفولوژی سطح سایش، آنالیز سطح سایش و براده های سایش

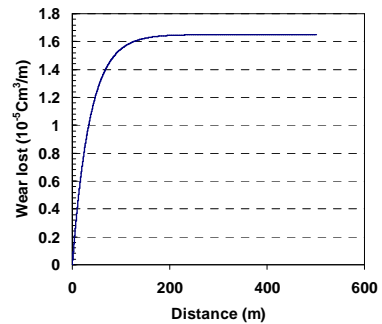
بررسی های میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش، آنالیز سطح سایش و بررسی مورفولوژی براده های سایش اطلاعات ارزشمندی را در مورد مکانیزم سایش و همچنین اثر پارامترهای



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۸): نمودارهای مدل شده نرخ سایش بر حسب فاصله برای نمونه های مختلف، (الف) آلومینیوم، (ب) AI-2% CNT و (ج) AI-5% CNT.

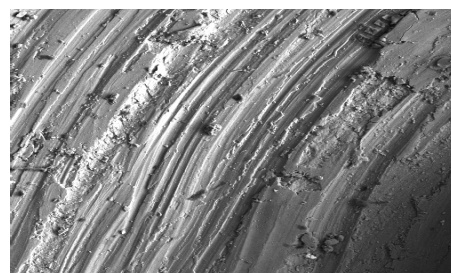
همانطور که در بخش قبل عنوان شد، مدل ارائه شده قادر به پیش بینی میزان سایش بر حسب فاصله بود و لذا می توان با به دست آوردن منحنی های سایش بر حسب فاصله و محاسبه نمودن نقطه ای که نرخ سایش از حالت منحنی خارج می شود، مرز منطقه انتقالی را به دست آورد. با روش ارائه شده مرز منطقه انتقالی برای نمونه های مختلف از شکل (۸) محاسبه شده و

به سرعت رشد می‌کنند. سرانجام تعدادی از لایه‌ها از بین رفته و از سطح سایش کنده می‌شوند. در مقابل کامپوزیت AI/CNT حاوی نانولوله‌های کربنی مقاومت بیشتری نسبت به تنش برشی در مقایسه با فلز خالص آلومینیوم دارد، اگر چه در اینجا هم نیروهای اصطکاکی ایجاد می‌شود ولی از آنجا که اتصال آنها با زمینه قوی می‌باشد به راحتی کنده نمی‌شوند.

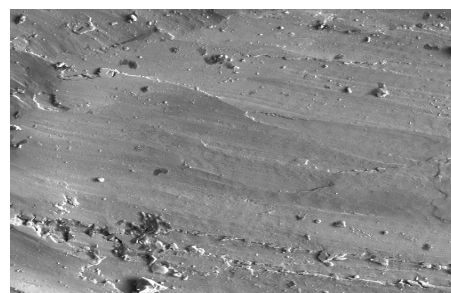
شکل (۱۰-ب) و (۱۰-ج) نشان می‌دهد که با افزودن نانولوله‌های کربنی عمق سایش کاهش پیدا نموده‌است. همچنین میزان تغییر شکل ایجاد شده بر روی نمونه‌ها کمتر از نمونه بدون نانولوله‌های کربنی می‌باشد. در این نمونه‌ها سطح سایش بسیار پیوسته و فشرده می‌باشد و این امر باعث شده‌است که به جای تغییر شکل عمودی و فرو رفتن ماده ساینده بیشتر سیلان مواد به اطراف خطوط سایش وجود داشته‌باشد. شکل (۱۱)، تصاویر SEM براده‌های ناشی از سایش نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

باندهای لغزش در این ذرات به خوبی مشخص هستند و همچنین به دلیل میزان تنش برشی که وارد شده‌است تعدادی از ذرات به یکدیگر جوش سرد خورده‌اند. مشاهده می‌شود که این ذرات برای آلومینیوم خالص، به صورت ورقه‌هایی بوده و با اضافه نمودن نانولوله‌های کربنی اولاً اندازه ذرات کوچکتر شده و ثانیاً شکل آنها از حالت ورقه‌ای به صورت چند وجهی تغییر می‌کند.

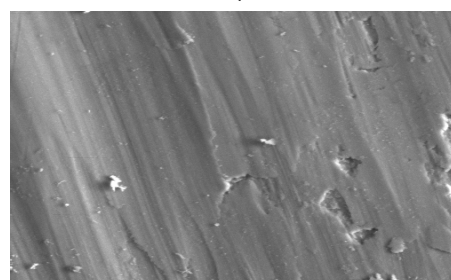
آنالیز EDS ذرات سایش در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان عناصر اکسیژن و آهن در نمونه‌های کامپوزیتی بیش از نمونه آلومینیوم خالص می‌باشد. این امر به دلیل سختی بیشتر نمونه‌های حاوی نانولوله‌های کربنی و انتقال بیشتر آهن از سطح پین به داخل براده‌های آلومینیوم می‌باشد. همچنین به دلیل افزایش سختی گرمای ایجاد شده بر روی سطح نمونه‌های کامپوزیتی بیشتر بوده و امکان اکسید شدن آن نیز بیشتر می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۰): تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نمونه‌های مختلف، (الف) آلومینیوم، (ب) AI-2% CNT و (ج) AI-5% CNT.

مختلف بر روی آن ارائه می‌دهد. در شکل (۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه بدون نانولوله‌های کربنی، سایش شدید همراه با عمق سایش بالا مشاهده می‌شود. در واقع در این نمونه مشاهده می‌شود که سطح نمونه توسط ماده ساینده شخم زده شده‌است که علت آن نرم بودن سطح سایش نمونه‌های بدون نانولوله‌های کربنی می‌باشد. بر اساس انجام فرآیند اصطکاک، لایه‌های اصطکاک روی سطح سایش ایجاد شده و ترکها بین لایه اصطکاک و لایه پایه شروع شده و در اثر مقاومت کمی که آلومینیوم نسبت به نرخ برش دارد این ترکها

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق نانوکامپوزیت Al-CNT با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی فرآوری شده و نتایج زیر بدست آمد:

۱- در اثر آسیاکاری مکانیکی مورفولوژی پودرهای آلومینیوم از حالت کروی به حالت لایه‌ای و سپس چند وجهی تغییر یافت. همچنین مشاهده شد که با آسیاکاری مکانیکی می‌توان توزیع همگنی از نانولوله‌های کربنی در زمینه پودر آلومینیوم بدست آورد.

۲- اندازه‌گیری اندازه ذرات با دستگاه لیزر نشان داد که با افزایش زمان آسیاکاری اندازه ذرات کاهش می‌یابد.

۳- نتایج آزمایشات سایش نشان داده که با افزودن ۵٪ نانولوله‌های کربنی ضریب اصطکاک در حدود ۶۷٪ کاهش می‌یابد، همچنین افزودن ۲٪ نانولوله‌های کربنی نرخ سایش در حدود ۳۲٪ و با افزودن ۵٪ نانولوله‌های کربنی نرخ سایش ۴۳٪ کاهش یافته‌است.

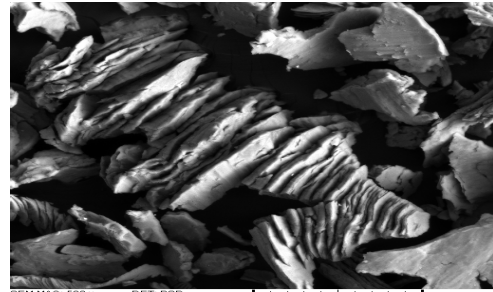
۴- نتایج مدل ارائه شده برای سایش نشان داد که این مدل از دقت بالایی برای تخمین نتایج آزمایش سایش برخوردار می‌باشد.

۵- تشکر و قدردانی

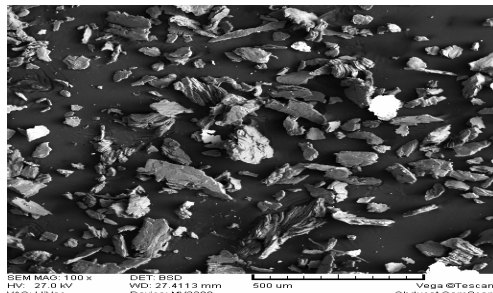
این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان انجام شده‌است که بدینوسیله تقدیر و تشکر می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] A. G. Mamalis, L. O. G. Vogtländer and A. Markopoulos, Precision Engineering, 28, pp. 16-30, 2004.
- [2] T. Laha, A. Agarwal, T. McKechnie and S. Seal, Materials Science and Engineering A 381, pp. 249-258, 2004.
- [3] S. Zhou, X. Zhang, Z. Ding, C. Min, G. Xu and W. Zhu, Composites Part A 38, pp. 301-306, 2007.
- [4] C. F. Deng, D. Z. Wang, X. X. Zhang and A. B. Li, Materials Science and Engineering A 444, pp. 138-145, 2007.
- [5] C. Suryanarayana, Progress in Materials Science, Vol. 46, pp. 1-184, 2001.

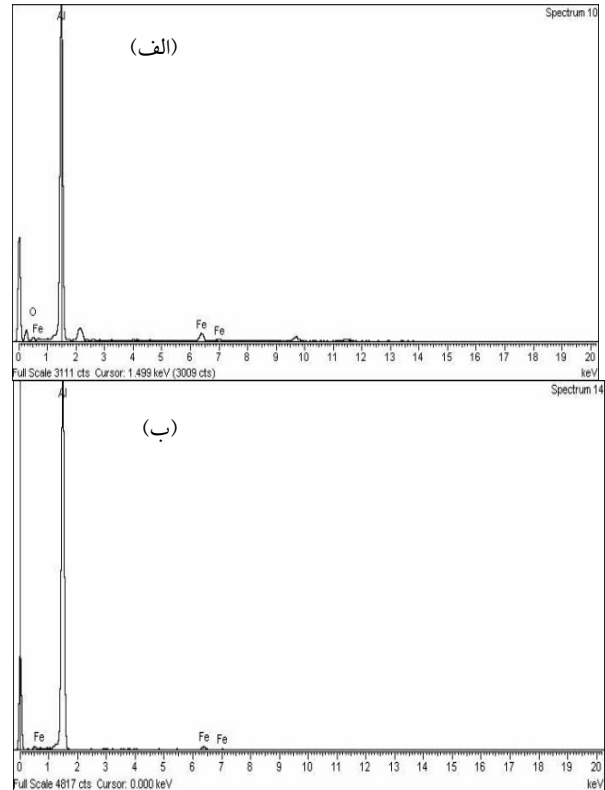


(الف)



(ب)

شکل (۱۱): تصاویر SEM از براده‌های تشکیل شده مختلف، (الف) آلومینیوم و (ب) Al-5% CNT.



شکل (۱۲): آنالیز شیمیایی EDS مربوط به نمونه

(الف) Al و (ب) Al-5% CNT را نشان می‌دهد.

- [10] Q. Feng, T. Li, H. Yue, K. Qi, F. Bai and J. Jin, Applied Surface Science, 254, pp. 2262–2268, 2008.
- [11] L. J. Yang, Composites Science and Technology, 63, pp. 575–583, 2003.
- [6] J. B. Fogagnolo, F. Velasco, M. H. Robert and J. M. Torralba, Materials Science and Engineering A, 342, pp. 131-143, 2003.
- [7] Z. Razavi Hesabi, A. Simchi and S. M. Seyed Reihani, Materials Science and Engineering A, 428, pp. 159-168, 2006.
- [8] J. B. Fogagnolo, E. M. Ruiz-Navas, M. H. Robert and J. M. Torralba, Scripta Materialia, 47, pp. 243-248, 2002.
- [9] J. B. Fogagnolo, F. Velasco, M. H. Robert, and J. M. Torralba, Materials Science and Engineering A, 342, pp. 131-143, 2003.

۷- پی نوشت

- 1- Laha
- 2- Deng
- 3- Nanotech. Co
- 4- Archard
- 5- Yang