ساخت و بررسی خواص سایشی نانوکامپوزیت Al6061/CNT

مهدیه جمشیدیجم، علی اکبری و مهرداد خاکبیز گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان m_ jamshidijam@yahoo.com

چکیدہ

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 اندازه گیری اندازه ذرات توسط لیزر بررسی و تأثیر پارامترهای فر آیند آلیاژسازی بر توزیع ذرات در طول فر آیند آلیاژسازی مشخص شد. نمونههای متراکم شده با روش اکستروژن داغ، تهیه گردید و خواص سایشی این کامپوزیت بهدست 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 هم محور آلومینیوم شده که این ذرات حاوی نانولولههای کربنی بهصورت محبوس می باشند. نتایج آنالیز اندازه ذرات توسط لیزر نشان می دهد که اندازه متوسط ذرات (000) و تشایلولههای کربنی بهصورت محبوس می باشند. نتایج آنالیز اندازه ذرات توسط لیزر نشان می دهد که اندازه متوسط ذرات (000) و نانولولههای کربنی به صورت محبوس می باشند. نتایج آنالیز اندازه درات توسط لیزر نشان می دهد که اندازه متوسط درات (000) و نانولولههای کربنی به صورت محبوس می باشند. نتایج آنالیز اندازه درات توسط لیزر نشان می دهد که اندازه متوسط درات (000) و نانولولههای کربنی به صورت محبوس می باند. تایج آنالیز اندازه درات توسط لیزر نشان می دهد که اندازه متوسط درات (000) و نانولولههای کربنی به می نانو کامپوزیت تولید شده CNT می می افزایش میزان نانولولههای کربنی کاهش می باید. نتایج نشان می دهند، خواص سایشی نانو کامپوزیت تولید شده CNT می می می می می باز می می می در حدود ۲۲٪ و ۲۸

واژههای کلیدی: ان کار نوب اینان ایک آلاش

نانوكامپوزيت زمينه فلزي، نانولوله كربن، آلياژسازي مكانيكي، سايش.

۱ – مقدمه

در سالهای اخیر نانولولههای کربنی توجه زیادی را بهخود جلب نمودهاند. بر اساس مطالعات تئوری و تجربی، مدول یانگ و دانـسیته نانولولـههای کربنـی بـهتر تیـب بـین TPa –۱ و ۱/۲–۱/۸ g/cm³ میباشد [۱]. با توجه بـهآگلومره شدن شدید نانولولههای کربنی، توزیع آنها در زمینه فلزی با روشهای معمولی

تولید کامپوزیت مشکل بوده و از طرفی با توجه به امکان واکنش نانولوله های کربنی با زمینه های فلزی و به ویژه آلومینیوم (تولید (Al₄C₃) تولید این دسته از کامپوزیتها با روشهای ذوبی محدودیت دارد. علیرغم موارد مذکور، نانو کامپوزیتهای AI-CNT با روشهای مختلف تولید شده اند. به طور مثال لاها و فصلنامه علمي پژوهشي مهندسي مواد مجلسي / سال سوم / شماره دوم / تابستان ١٣٨٨

همکارانش [۲]، نانو کامیوزیتهای Al-CNT را با روش اسیری پلاسما تهیه کرده و نشان دادند که نانولولههای کربنبی باعث افىزايش قابىل توجـه سـختى زمينـه آلومينيـومي مـيشـوند. در نانو کامیوزیتھای Al-CNT تھیے شدہ با روش تزریق مذاب، حضور نانولولهها باعث افزایش ۱۵۰٪ در میکروسختی و کاهش ۳۹٪ ضریب اصطکاک شده است [۳]. دنگ و همکارانش [۴]، نانو کامپوزیت Al-5%CNT را با روش متالورژی پودر تھیے کرده و افزایش ۷۸٪ در میکروسختی نسبت بهزمینه فاقد نانولوله های کربنی را مشاهده کردند. از جمله روشهایی که بهسرعت جهت توليد محدوده وسيعي از مواد پيشرفته مثل نانو کریـستالها، نانو کامپوزیتها و غیره توسعه یافتـهاسـت، روش آلیاژسازی مکانیکی می باشد [۵ و ۶]. آلیاژسازی – آسیاکاری مكانيكي روش مناسبي براي توليد نانو كامپوزيتهايي با توزيع یکنواخت از فاز مستحکم کننده نانومتری میباشد. در طول فرآيند آسياكاري نانوذرات در پودر فلزات نرم، تغيير شكل پلاستیکی، شکست و جوش سرد ذرات اتفاق افتاده و پودر نانوكامپوزيتي با توزيع يكنواخت ذرات نانو در پودر فلز ايجاد مي شو د.

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 فشردهسازی پودرها با روش اکستروژن گرم، خواص سایشی نانوکامپوزیتها بهدست 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 تحقيق

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 بههمراه مقادیر مختلف از نانولولههای کربنی (۲ و ۵ درصد وزنی) توسط آسیای گلولهای پر انرژی

سایشی (مدل _IS) در مدت زمانهای مختلف بین ۲ تا ۲۰ ساعت تحت آسیاکاری در محیط آرگن قرار گرفتند. نسبت وزنی گلوله بهپودر در فرآیند آسیاکاری ۲۰ و از اتانول بهعنوان 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 اندازه گیری اندازه ذرهای توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل کمبریج و آنالیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل کمبریج و آنالیز ندرات بهوسیله لیزر مدل Cillas مورد بررسی قرار گرفتند. بعد از تهیه نمونههای پودری این مخلوطها با روش اکسترود داغ فشرده شدند. بهمنظور بررسی رفتار سایشی از دستگاه Pin On Disk استفاده شد. بار اعمالی بهنمونهها ۱۰ نیوتن بوده و سرعت نمونههای پودر کامپوزیتی بهصورت ۲۸۲ «مداله حاضر» نمونههای پودر کامپوزیتی بهصورت Ar-S معرفی شدهاند که ۲ نشاندهنده میزان نانولولههای کربنی اضافه شده بمخلوط پودری می.باشد.

3- نتایج و مباحث 1-3- بررسی مورفولوژی

شکل (۱)، تغییرات مورفولوژی مخلوط پودری CNT%-Al- در طول فرآیند آسیاکاری را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود پس از ۲ و ۴ ساعت آسیاکاری ذرات ورقه ای 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 می باشد. در اثر برخورد گلوله ها به پودرها، کار سختی در پودرها صورت گرفته، می شکنند و سطوح شکست صاف و تمیز در اثر بر خورد ایجاد می شوند. سطوح تمیز ذرات به واسطه وجود اتمسفر آرگن پایدار بوده و تحت تأثیر تنشهای برشی موجود جوش سرد بین این سطوح ایجاد می شود، لذا ذرات به صورت موضعی به هم مشاهده می شود، پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری، ذرات ورقه ای مشاهده می شود، پس از ۱۲ ساعت آسیاکاری، ذرات ورقه ای

ساخت و بررسی خواص سایشی نانو کامپوزیت Al6061/CNT



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

تبدیل به خوشه هایی شده اند. با ادامه فر آیند آسیا کاری مشاهده می شود که پس از ۲۰ ساعت آسیا کاری، ذرات پودری هم محور ایجاد می شوند (شکل ۱– د). شکل (۲)، تغییرات مورفولوژی مخلوط پودری AI-5% CNT در طول فر آیند آسیا کاری را نشان می دهد. همانند مخلوط پودری deb فر آیند آسیا کاری را نشان می دهد. همانند مخلوط پودری شکل آلومینیوم ایجاد شده است.

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، بهطوری 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 CNT %CNT است، گر چه بهنظر میرسد که افزایش نانولوله کربنی از دو به پنج درصد باعث ریز شدن پودر آلومینیوم می گردد. تغییرات مورفولوژی پودر آلومینیوم ایجاد شده توسط آسیاکاری مکانیکی در سیستمهای کامپوزیتی دیگر نیز مشاهده

۲-۲- بررسی اندازه ذرات

در شکل (۳)، تأثیر زمان آسیاکاری بر توزیع اندازه ذرات در مخلوطهای پودری AI و (CNT %ک)AI نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش زمان آسیاکاری، از ۲ به ۲۰ ساعت، نمودار توزیع اندازه ذرات به سمت چپ منتقل می شود زیرا با افزایش زمان آسیاکاری، ذرات آلومینیوم ورقه ای شکل ریز تری در نتیجه تغییر شکل پلاستیک شدید و شکستن ذرات ایجاد می گردد. با افزایش بیشتر زمان آسیاکاری، نمودار توزیع ذرات بیش تر به سمت چپ منتقل می شود که بیانگر افزایش بیشتر کسر ذرات ریز در پودر آلومینیوم می باشد. علت

فصلنامه علمي پژوهشي مهندسي مواد مجلسي / سال سوم / شماره دوم / تابستان ١٣٨٨

این تغییر را می توان به تکه تکه شدن ذرات در شت مربوطه دانست بـهطوری کـه کـسر ذرات درشـت در پـودر آلومينيـوم و مخلوط كامپوزيت كاهش يافته و كسر حجميي ذرات ريىز افزایش می یابند. در شکل (۴)، تا ثیر زمان آسیاکاری بر پارامترهای D50 و D90-D10 مخلوط پودرها نیشان داده شدهاست. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش میزان نانولوله های کربنی از ۲٪ به ۵٪ وزنی، اندازه ذرات در زمانهای آسیاکاری یکسان کاهش مییابد (شکل ۴- الف). در واقع نانولولههای کربنی سخت تر از پودر آلومینیوم بوده و لـذا نقـشی مشابه گلولههای آسیاکننده را در طول فرآیند آسیاکاری خواهند داشت. لذا با افزایش میزان نانولولههای کربنی در مخلوط پودری تعداد ضربات اعمالي بهذرات پودر آلومينيوم افزايش يافته و ذرات در مخلوط پودری ریزتر می شوند. در شکل (۴– ب) مشاهده می شود که با افزایش زمان آسیاکاری D90-D10 که معیاری از پهنشدگی نمودارهای توزیع ذرات میباشد، کاهش مییابد. در واقع هر چه میزان پهن شدگی کمتر باشد پودرهای آسیاب شده از توزیع یکنواخت تری برخوردار میباشند و نشان مىدهد كه بهفر آيند تعادل نزديكتر مىباشيم. بـا توجـه بـهنتـايج مذکور می توان این گونه استنباط نمود که دستیابی به یک شرایط مشابه آسیاکاری در نمونههای حاوی نانولولههای کربنی بیشتر، در زمان كمتر اتفاق ميافتد. بهعنوان مثال ايجاد ذرات هممحور، در مورد مخلوط پودری کامپوزیتی Al-5%CNT در زمان كو تاهترى نسبت بەپودر Al-2%CNT حاصل مىشود.

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 می شود در اکثر نمونه ها در مسافت های اولیه، ضریب اصطکاک افزایش یافته که مربوط به مرحله بار گذاری می باشد و سپس ضریب اصطکاک کاهش می یابد و در محدوده های مشخصی شروع به نوسان می کند. همچنین



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

Archive of SID

5

0

٣٣



2 4 6 8 11 13 15 17 20 Milling time (h)





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



شكل (۵): ضريب اصطكاك نمونه هاي مختلف بر حسب فاصله.





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.

فصلنامه علمي پژوهشي مهندسي مواد مجلسي / سال سوم / شماره دوم / تابستان ١٣٨٨

ضریب اصطکاک متوسط نمونههای مختلف بهدست آمده و بر روی نمودار نشان داده شدهاست. مشاهده میشود که ضریب اصطکاک با تغییر درصد نانولولههای کربنی تغییر نمودهاست که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۳-۲- اثر درصد نانولوله های کربنی روی ضریب اصطکاک اثر افزایش درصد نانولوله های کربنی بر روی ضریب اصطکاک نیز در شکل (۵) نیشان 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 نانو کامپوزیت از ضریب اصطکاک نمونه آلومینیوم در حدود ۲۷٪ کمتر می باشد.

با افزودن ۵٪ نانولولههای کربنی ضریب اصطکاک در حدود ۶۷٪ کاهش مییابد. نتایج بهدست آمده در این تحقیق مشابه نتایج بهدست آمده از تحقیق فنگ و همکاران [۱۰]، میباشد. در تحقیق انجام گرفته توسط این محققین نیز مشاهده شدهاست که با افزایش درصد نانوذرات Al₂O₃ در زمینه نیکل ضریب اصطکاک کاهش یافتهاست.

۳-۳-۳ اثر درصد و اندازه نانولولههای کربنی بر نرخ سایش

نرخ سایش بهصورت میزان حجم سایش یافته بر مسافت طی شده ($\frac{cm^3}{m}$) تعریف میشود. این پارامتر برای نمونههای مختلف در بار ۱۰ نیوتن محاسبه شده و در شکل (۶) رسم شدهاست. با افزودن ۲٪ نانولولههای کربنی نرخ سایش ۲۳٪ کاهش یافتهاست.



شکل (۶): نرخ سایش نمونههای مختلف بر حسب میزان نانولولهها.

تحقیقات زیادی در مورد رفتار سایشی نانوکامپوزیتها انجام شدهاست و تقریباً نتیجه اکثر تحقیقات افزایش خواص سایشی نانوکامپوزیتها را در مقایسه با میکروکامپوزیتها و فلز پایه عنوان میکنند.

علیرغم همه این تحقیقات هنوز علت این امر به خوبی اثبات نشده است. این موضوع در حالی است که برای میکرو کامپوزیتهای 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) مكانيزم كاهش ضريب اصطكاك:

با افزودن نانوذرات بهداخل فاز زمینه ضریب اصطکاک کاهش مییابد. باید توجه داشت که ضریب اصطکاک یک مفهوم فیزیکی میباشد و لذا قاعدتاً نباید با افزودن ذرات تقویت کننده کاهش یا افزایش یابد. در واقع ضریب اصطکاک بهزبری 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^ع، میزان نرخ سایش نیز کاهش مییابد. در واقع از آنجا که ضریب اصطکاک با زبری سطح در ارتباط است، بهنظر 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 میباشد. هر عاملی که سبب جلوگیری از رشد ترک شود، میتواند سبب کاهش میزان سایش گردد. همانطورکه در بخشهای پیشین عنوان شد در نانوکامپوزیتها پیوند خوبی بین زمینه و تقویت کننده برقرار میشود و لذا این ذرات میتوانند بهعنوان 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 میتوانند محلی برای جوانهزنی

ساخت و بررسی خواص سایشی نانو کامپوزیت Al6061/CNT

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

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

ج) تسریع فرآیند اکسید شدن سطح در نانوکامپوزیتها نسبت بهمیکروکامپوزیتها:

همانطور که عنوان شد در نانو کامپوزیتها سختی زمینه نسبت بهمیکرو کامپوزیتها بیشتر میباشد. این امر باعث میشود که دمای نانو کامپوزیتها در هنگام فرآیند سایش بیشتر افزایش یابد، لذا تشکیل لایه های 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 می شود.

د) جلوگیری از فرو رفتن ماده ساینده:

بهدلیل ریز بودن نانوذرات 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 داشتهباشد بیشتر شود، لذا از فرو رفتن نوک مواد ساینده بهداخل ماده نرم جلوگیری میشود که این امر باعث میگردد تا از شخم زدن سطح سایش جلوگیری به عمل آید. ر) اثر روانکاری نانوذرات: نانوذرات می توانند مانند ذراتی نقش غلتک را داشتهباشند، به این مفهوم که بعد از کنده شدن در مرز مشترک بین زمینه و ماده

ساینده وجود داشتهباشند و بهجای اینکه دو سطح سایش بر روی هم بلغزند، این ذرات مانند غلتک بین دو سطح عمل کنند. ۳-۳-٤-بورسی ار تباط نرخ سایش با ضریب اصطکاک نتایج آزمایشات نشان می دهد که میزان سایش بر حسب فاصله از دو منطقه تشکیل می شود که شامل منطقه انتقالی یا موقتی و منطقه پایدار می باشد. حجم سایش یافته در منطقه انتقالی به صورت منحنی بوده و نرخ سایش بر حسب فاصله در این منطقه کاهش می یابد. اما در منطقه پایدار نرخ سایش ثابت شده و میزان سایش نیز بر حسب فاصله به صورت خطی می شود. یانگ⁶ و همکاران [11]، یک مدل ریاضی را برای بررسی نرخ سایش کامپوزیت AI-AI2O3 پیشنهاد دادند که به صورت زیر عنوان می شود:

$$V_{c} = \frac{g_{1}}{g_{3}} \frac{P}{H} \frac{d(1 - f_{v})}{f_{v}} \left[1 - \exp(\frac{-g_{3}f_{v}L}{d(1 - f_{v})}) \right]$$
(1)

P میزان سختی، V_c میزان میزان حجم سایش یافته، H میزان سختی، V_c میزان سختی، f_v 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 \mathcal{R}_c فتن معادله زیر:

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

معادله (۳) بهصورت زیر در می آید:

$$V_{c} = \frac{g_{1}}{g_{3}} \frac{P}{H} \frac{d(1 - f_{v})}{f_{v}} [A]$$
(٣)

رابطه (۳)، نشان میدهد که A یک رابطه اکسپونشیالی از L میباشد. بهطوری که با افزایش L، A افزایش یافته تا اینکه بهمقدار ثابتی برسد با مشتق گیری از معادله (۳) رابطه زیر بهدست می آید:

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

به منظور به دست آوردن $g_1 ext{ g}_3 ext{ g}_3$ به صورت زیر عمل می شود که در شرایط D = L و L = Lb مشتق mB ، Vc و mA در نظر گرفته می شود، لذا روابط زیر به دست می آیند: $g_1 = \frac{Hm_A}{P}$ (۵) فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی / سال سوم / شماره دوم / تابستان ۱۳۸۸

شکل (۸)، تعدادی از نمودارهای مدل شده نرخ سایش بر حسب

$$m_B = \frac{g_1 P}{H} \exp\left[\frac{-g_3 f_\nu L_B}{d(1-f_\nu)}\right]$$
(9)

$$\ln m_{B} = \ln(\frac{g_{1}P}{H}) - \frac{g_{3}JVL_{B}}{d(1 - f_{v})}$$
(V)

$$g_{3} = \frac{d(1 - f_{v})(\ln m_{A} - \ln m_{B})}{L_{B}}$$
(A)

اگر مقادیر مربوط به g₁ و g₃ محاسبه شود درایی صورت میزان حجم سایش انتقالی و همچنین فاصله انتقالی نیز بهدست می آید. ۳-۳-۵- م**دل نمودن میزان سایش بر حسب فاصله**

در این بخش هدف بهدست آوردن تغییرات میزان سایش بر حسب مسافت برای نمونه های مختلف و نیز به دست آوردن میزان مرز منطقه انتقالی (میزان مسافت طی شده تا منطقه پایدار) و مقایسه آن با نتایج تجربی می باشد. 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 می آید:

$$K_{w} = \frac{3Hm_{A}d(1-f_{v})}{PLg_{3}f_{v}} \left[1 - \exp(\frac{-g_{3}f_{v}L}{d(1-f_{v})}) \right]$$
(9)

$$K_w = \frac{a}{L} \left[1 - \exp(-bL) \right] \tag{1.1}$$

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

$$b = \frac{-g_3 f_v}{d(1 - f_v)} \tag{11}$$

اگر معادله (۱۲) از نتایج تجربی به دست آمده از آزمایشات گذرانده شود در این صورت مقادیر a و d به دست می آید. در شکل (۷)، تعدادی از نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب فاصله برای نمونه های مختلف رسم شده و معادله (۱۰) از آن گذرانده شده است. بعد از به دست آوردن مقادیر a، d و جایگزینی مقادیر آن در رابطه (۱۰) معادله ضریب اصطکاک به دست می آید و با تلفیق رابطه آر چارد و معادله (۱۰)، رابطه نرخ سایش با مسافت به دست می آید.

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 Al-5%CNT.



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

به تر تیب برای Al-2%CNT و Al-5%CNT برابر ۲۷۰، ۲۱۰ و ۱۵۰ می باشد.

مطابق این دادهها درصد نانولولههای کربنی بر روی مرز منطقه سایش تأثیر دارد و مشاهده می شود که افزایش درصد نانولولههای کربنی، مرز منطقه انتقالی را افزایش می دهد به عبارت دیگر نمونههای با درصد بالاتر دیرتر به منطقه پایدار سایش می رسند.

در واقع منطقه انتقالی منطقهای 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 بی شتر شود.

۳-۳-۸- بررسی مورفولوژی سطح سایش، آنالیز سـطح سـایش و برادههای سایش

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



شکل (۸): نمودارهای مدل شده نرخ سایش بر حسب فاصله برای نمونههای مختلف، الف) آلومینیوم، ب) Al-2%CNT (و ج) Al-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 بهسرعت رشد می کنند. سرانجام تعدادی از لایهها از بین رفته و از سطح سایش کنده میشوند. در مقابل کامپوزیت Al/CNT حاوی نانولولههای کربنی مقاومت بیشتری نسبت بهتنش 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 بهراحتی کنده

نمی شوند.

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 بهجای تغییر شکل عمودی و فرو رفتن ماده ساینده بیشتر سیلان مواد بهاطراف خطوط سایش وجود داشتهباشد. شکل (۱۱)، تصاویر میدهد.

باندهای لغزش در این ذرات به خوبی مشخص هستند و همچنین به دلیل میزان تنش برشی که وارد شده است تعدادی از ذرات به یکدیگر جوش سرد خور ده اند. مشاهده می شود که این ذرات برای آلومینیوم خالص، به صورت ورقه هایی بوده و با اضافه نمودن نانولوله های کربنی اولاً اندازه ذرات کوچکتر شده و ثانیا شکل آنها از حالت ورقه ای به صورت چند وجهی تغییر می کند. آنالیز EDS ذرات سایش در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود میزان عناصر اکسیژن و آهن در امر به دلیل سختی بیشر نمونه های حاوی نانولوله های کربنی و انتقال بیشتر آهن از سطح پین به داخل براده های آلومینیوم می باشد. همچنین به دلیل افزایش سختی گرمای ایجاد شده بر روی سطح نمونه های کامپوزیتی بیشتر بوده و امکان اکسید شدن آن نیز بیشتر می باشد.





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

مختلف بر روی آن ارائه می دهد. در شکل (۱۰) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود در نمونه بدون نانولوله های کربنی، سایش شدید همراه با عمق سایش بالا مشاهده می شود. در واقع در این نمونه مشاهده می شود که سطح نمونه توسط ماده ساینده شخم زده شده است که علت آن نرم بودن سطح سایش نمونه های بدون نانولوله های کربنی می باشد. بر اساس انجام فر آیند اصطکاک، لایه های 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

ساخت و بررسی خواص سایشی نانو کامپوزیت Al6061/CNT



(الف)



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



٤- نتيجه گيري

در این تحقیق نانو کامیوزیت Al-CNT با درصدهای مختلف نانولوله های کربنی فر آوری شده و نتایج زیر بدست آمد: ۱- در اثر آسیاکاری مکانیکی مورفولوژی پودرهای آلومینیوم از حالت کروی به حالت لایهای و سپس چند وجهبی تغییر یافت. همچنین مشاهده شد که با آسیاکاری مکانیکی می توان توزیع همگنی از نانولولههای کربنی در زمینه پودر آلومینیوم بدست آورد.

۲- اندازه گیری اندازه ذرات با دستگاه لیزر نشان داد که با افزایش زمان آسیاکاری اندازه ذرات کاهش می یابد.

۳- نتایج آزمایـشات سـایش نـشان داده کـه بـا افـزودن ۵٪ نانولوله های کربنی ضریب اصطکاک در حدود ۶۷٪ کاهش می یابد، همچنین افزودن ۲٪ نانولولههای کربنبی نیرخ سایش در حدود ۳۲٪ و با افزودن ۵٪ نانولولههای کربنی نرخ سایش ۴۳٪ كاهش يافتهاست.

۴- نتایج مدل ارائه شده برای سایش نـشان داد کـه ایـن مـدل از دقت بالايي براي تخمين نتايج آزمايش سايش برخوردار مىباشد.

٥- تشكر و قدرداني اين تحقيق با حمايت مالي دانشگاه آزاد اسلامي واحد سيرجان انجام شدهاست که بدینو سیله تقدیر و تشکر می گردد.

- ٦- 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.
- C. F. Deng, D. Z. Wang, X. X. Zhang and A. B. Li, [4] Materials Science and Engineering A 444, pp. 138-145, 2007.
- C. Suryanarayana, Progress in Materials Science, Vol. 46, [5] pp. 1-184, 2001.

فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی / سال سوم / شماره دوم / تابستان ۱۳۸۸

- [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.

۷- پینوشت

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

- [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.