

ارزیابی سایشی لایه سطحی نانو کامپوزیت هیبریدی Al7075/SiC-BN تشکیل شده توسط روش همزن اصطکاکی

محمود سلیمانی، سید فرشید کاشانی بزرگ*، علی محمد هادیان

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، قطب علمی مهندسی سطح و حفاظت از خوردگی در صنایع، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس

دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

*fkashani@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۶/۰۵، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۸/۱۷)

چکیده

در این پژوهش، از روش همزن اصطکاکی جهت تشکیل یک لایه سطحی کامپوزیت هیبریدی دارای ذرات SiC و BN بر روی آلیاژ آلومینیوم T6-7075 در راستای بهبود سختی و مقاومت به سایش استفاده شده است. مخلوط ذره ای افزودنی های SiC و BN به نسبت وزنی برابر به ترتیب در مقیاس نانو و میکرومتری در داخل شکافی در مقابل حرکت ابزار قرار داده شدند. جهت پخش ذرات افزودنی و تامین یکنواختی تا پنج پاس دیگر نیز اعمال شد. بررسی های میکروسکوپی نشان داد که ذرات بعد از شش پاس به صورت تقریباً یکنواخت توزیع شده است. در اثر روند ترمومکانیکی فرایند همزن اصطکاکی، میزان سختی زمینه Al7075 به طور چشم گیر کاهش یافته که مرتبط با حل شدن رسوبات آن است. با افزودن مخلوط پودری و تشکیل لایه نانو کامپوزیت هیبریدی Al7075/SiC-BN سختی و مقاومت به سایش نسبت به آلیاژ پایه ارتقا نیافت و این در حالی بود که دانه‌های زمینه آلومینیومی از ۹ به کمتر از ۱ میکرون در اثر فرایند همزن اصطکاکی کاهش یافته بود. لیکن با انجام عملیات حرارتی T6 بر لایه نانو کامپوزیت هیبریدی، میزان سختی و مقاومت به سایش هر کدام تا حدود یک سوم مقادیر آلیاژ پایه افزون بر مقادیر آلیاژ پایه گردید. این موارد مرتبط با تشکیل رسوبات بر مبنای ترکیبات بین فلزی در اثر عملیات حرارتی T6 بود.

واژه های کلیدی:

فرایند همزن اصطکاکی، نانو کامپوزیت هیبریدی، Al7075، SiC، BN، ریزساختار، سختی، سایش.

۱- مقدمه

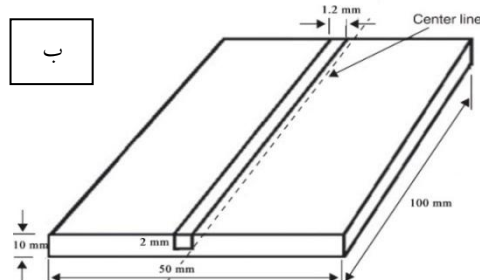
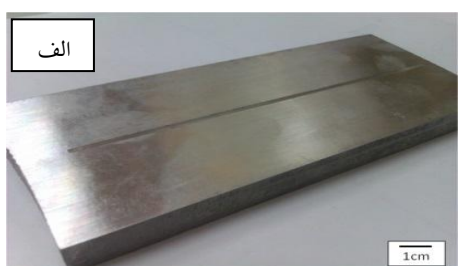
آلومینیوم با افزودن ذرات سرامیکی سخت و مواد روانکار امکان پذیر می باشد. از جمله ذرات افزودنی، کاربید سیلیسیم به عنوان ماده سخت و تقویت کننده [۲-۳] و نیتريد بور شش ضلعی (h-BN) به عنوان روانکار [۴] است. نیتريد بور شش ضلعی (h-BN) یکی از روان کننده های جامد محسوب می شود که دارای

استحکام به وزن بالا، هدایت الکتریکی خوب و مقاومت به خوردگی مناسب باعث شده تا آلیاژهای آلومینیوم در موارد متعدد مورد توجه مهندسين باشند. لیکن در برخی کاربردها ارتقای خواص سایشی لازم می باشد که موجب شده کامپوزیت های آلومینیوم در نظر گرفته شوند [۱]. ایجاد کامپوزیت های

مقاومت به سایش بسیار برتری را نسبت به زمینه آلومینیومی مربوطه ارائه نمود. از آنجا که حضور یک فاز روانکار می تواند بر ضریب اصطکاک کامپوزیت تاثیر گزارده و میزان سایش در حالت سه جسمی را کاهش دهد، ایجاد نانو کامپوزیت سطحی هیبریدی بر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با استفاده از ذرات سخت SiC و ذرات روانکار BN-h در پژوهش حاضر مد نظر قرار گرفته است. تأثیر توزیع ذرات بر ریزساختار و ارتقای خواص مکانیکی با مطالعات میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی با حد تفکیک بالا و آزمایش های میکرو سختی و سایش مورد بررسی واقع شده است.

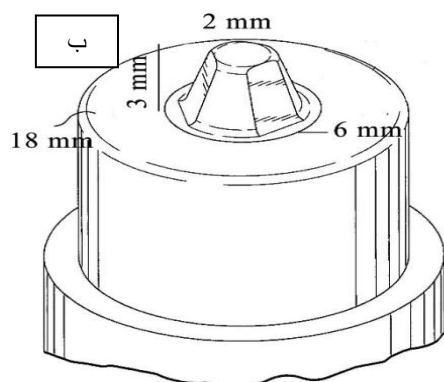
۲- روش انجام آزمایش ها

صفحات آلومینیوم 7075-T6 به ضخامت ۱۰۰ میلی متر و طول و عرض به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ میلی متر انتخاب شده و بر روی هر کدام یک شیار به عرض و عمق به ترتیب یک و دو دهم و ۲ میلی متر در وسط نمونه در راستای طول نمونه ایجاد گردید (شکل ۱). پودرهای SiC و BN-h به ترتیب با ابعاد ۱۰ میکرومتر و ۶۰ نانومتر جهت کامپوزیت سازی مورد استفاده قرار گرفتند که مورفولوژی آنها در تصاویر میکروسکوپی شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۱): نمونه یک قطعه کار: (الف): با شیار ایجاد شده در وسط سطح و (ب): طرح واره ابعاد آن

ساختار بلوری لایه لایه است. پیوند بین مولکولها در هر لایه کووالانسی می باشد، درحالی که اتصال بین لایه های مجاور به صورت پیوند ضعیف واندروالس است [۴]. این خصوصیات ساختاری BN-h، آنرا به عنوان روان کننده حالت جامد مناسب می سازد [۴-۵]، کامپوزیت سازی آلومینیوم عمدتاً به روش های ریخته گری متالورژی پودر صورت گرفته است [۶-۷]. مشکلی که در ریخته گری کامپوزیت های حاوی ذرات در مقیاس نانو و زیر میکرون وجود دارد، چگالی کم این پودرها و اشغال حجم بالا توسط آنها است که افزودن آنها به مذاب را با دشواری روبرو می کند و درصد حجمی ذرات در کامپوزیت های تولید شده را به حدود ۲ درصد محدود می کند [۸]. از طرف دیگر، ذرات در مقیاس نانومتری دارای انرژی سطحی بالنسبه زیاد هستند [۹] و با توجه به دمای بالای فرایند ریخته گری تجمع حاصل نموده و عدم یکنواختی کامپوزیت ایجاد شده را باعث می گردند [۱۰]. روش همزن اصطکاکی فرایندی است که بر پایه روش جوشکاری همزن اصطکاکی است [۱۱-۱۲] و در آن ذرات سرامیکی به داخل ماده فلزی پلاستیک شده رانده شده و با توجه به جریان های ایجاد شده در اثر حرکات چرخشی و طولی ابزار هم خورده، امکان حصول ماده کامپوزیتی با توزیع یکنواخت ذرات سرامیکی میسر می گردد [۱۳-۱۴]. از آنجا که فرایند در حالت جامد صورت می گیرد، مسائل مربوط به ساختارهای ریخته گری چون تجمع و نقائص ناشی از حل شدن گازها همراه نمی باشند. همچنین با توجه به هم خوردن ماده پلاستیک شده توسط ابزار، فرایند از نوع تغییر شکل شدید بوده و ساختاری ریز با دانه های به اندازه کمتر از یک میکرو متر قابل حصول می گردند [۱۵]. میسر و همکارانش [۱۵] ذرات سرامیکی SiC را توسط فرایند همزن اصطکاکی وارد زمینه آلومینیوم کرده و کامپوزیت سطحی Al/SiC را ایجاد کرده که باعث افزایش سختی آلیاژ زمینه شد. در همین راستا شفیع و همکاران [۱۴] با استفاده از ذرات Al_2O_3 در مقیاس نانو متری، لایه سطحی یکنواخت نانو کامپوزیت Al/Al_2O_3 را با استفاده از چهار پاس فرایند همزن اصطکاکی ایجاد نمودند که سختی و

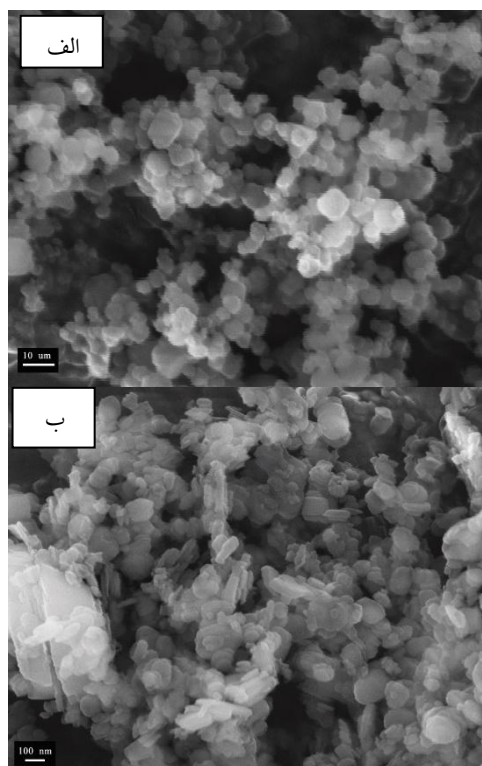


شکل (۳): (الف): نمایی از ابزار استفاده شده در فرایند و (ب): طرح واژه ابعاد آن

انتخاب متغیرهای فرایند چون سرعت های چرخشی و طولی ابزار با توجه به پژوهش دیگر که بر آلومینیوم ۷۰۷۵ صورت گرفته بود، انجام شد [۱۵] (سرعت چرخشی ۱۱۸۰ rpm و سرعت حرکت طولی ۲۰ میلی متر بر دقیقه). جهت تامین توزیع یکنواخت ذرات افزودنی، فرایند همزن اصطکاکی در ۴، ۲ و ۶ پاس بر روی نمونه ها اعمال شد به صورتی که پاس های فرد ساعت گرد و پاس های زوج پادساعت گرد بودند. این تغییر جهت حرکتی ابزار به منظور توزیع بهتر ذرات در زمینه و تامین تقارن لایه سطحی در نظر گرفته شد. ابزار در حین فرایند به میزان ۳ درجه زاویه رو به جلو در راستای عمود بر افق کج گردید. بعد از انجام هر پاس، نمونه به مدت ۳ دقیقه به وسیله جت هوا خنک می گردید و سپس پاس بعدی اعمال می شد. لایه کامپوزیتی حاصل مورد عملیات حرارتی T6 قرار گرفت (افزایش دما تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد و نگهداری به مدت ۲۴ ساعت).

مقاطع عرضی لایه های سطحی ایجاد شده پس از مسطح و براق نمودن با میکروسکوپ الکترونی روبشی با حد تفکیک بالا^۱ مدل Tescan مورد بررسی واقع شد. سپس همین نمونه ها بعد از حکاکی با محلول Keller توسط یک میکروسکوپ نوری مطالعه شدند و اندازه دانه به روش تقاطع خط مستقیم استفاده گردید (ASTM E112-13).

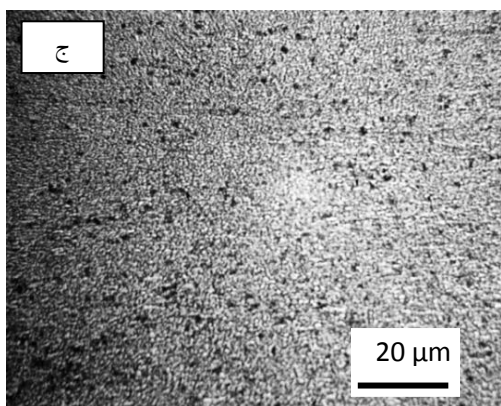
برای اندازه گیری سختی از سطوح کامپوزیت از میکرو سختی سنجی ویکرز (ASTM E384) تحت وزنه ۱۰۰ گرم و در مدت



شکل (۲): (الف): نانو ذرات BN و (ب): ذرات SiC، کنتراست الکترونی های ثانویه داخل عدسی میکروسکوپ الکترونی روبشی با حد تفکیک بالا

برای انجام فرایند همزن اصطکاکی از ابزاری با اندازه شانه ۱۸ میلی متر از جنس فولاد H13 و پینی به شکل هرم ناقص از جنس کاربید تنگستن به ارتفاع سه میلیمتر استفاده گردید (شکل ۳). فرایند هم زن اصطکاکی با به کارگیری یک فرز عمودی صورت گرفت.





شکل (۴): تصاویر میکروسکوپی نوری از: (الف): ریزساختار زمینه آلیاژ زیر لایه، (ب): لایه ایجاد شده بدون ذرات بعد از شش پاس و (ج): لایه ایجاد شده در حضور ذرات بعد از شش پاس

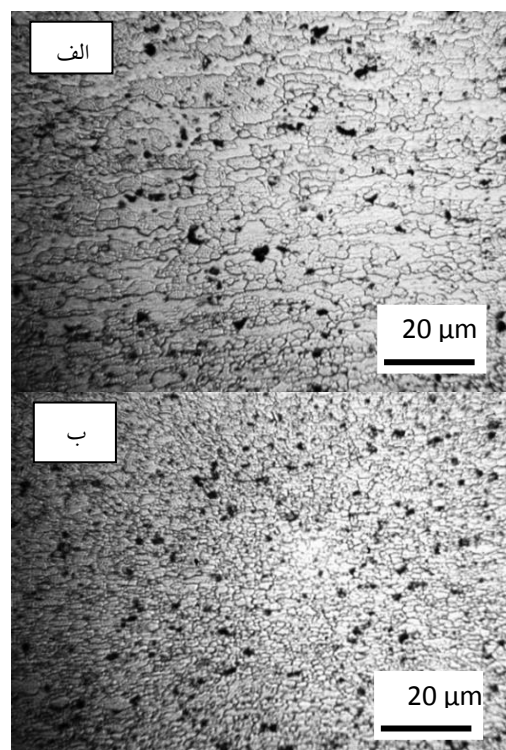
اساساً، فرایند همزن اصطکاکی موجب ریز شدن دانه های زمینه آلومینیومی شده است. دانه ها به لحاظ اندازه یکسان نبوده و در مناطق مختلف همزده متفاوت بوده، لیکن به طور کلی از اندازه دانه های آلیاژ زیر لایه کوچکتر هستند. با پلاستیک شدن لایه سطحی آلیاژ پایه و همزدن آن در اثر حرکات چرخشی و طولی ابزار، تغییر شکل شدید لایه سطحی در حالت گرم روی می دهد. لذا حصول ساختارهای بازیابی دینامیکی شده انتظار می رود. نابجائی هائی که در اثر کارمکانیکی در ماده ایجاد شده اند، در اثر حرارت همراه با تغییر شکل، امکان چنین ساختارهایی را که با نظم مجدد نابجائی ها همراه است و دانه/زیردانه های کوچکتری را رقم می زند [۱۶]. از آنجا که میزان تغییر شکل ایجاد شده در اثر این فرایند، ذاتاً در نواحی مختلف لایه سطحی یکسان نیست، و این نواحی دارای شیب نرخ کرنش می باشند؛ لذا یکنواختی در اندازه دانه ها وجود ندارد. نتایج شبیه سازی در خصوص فرایند همزن اصطکاکی حاکی از محدوده کرنشی 10^{-2} تا 10^{-1} است [۱۷]. همچنین حسب میزان متغیرها، دمای فرایند در محدوده ۰/۶ تا ۰/۹۵ دمای ذوب ماده قرار می گیرد [۱۸-۱۹]. میانگین دانه های آلیاژ اولیه حدود ۹ میکرومتر است. لیکن در اثر عملیات همزن اصطکاکی بدون افزودن پودری، به ۳ میکرومتر و با افزودن مخلوط پودری به کمتر از یک میکرومتر کاهش یافته است. به نظر می رسد که ورود ذرات، تحرک

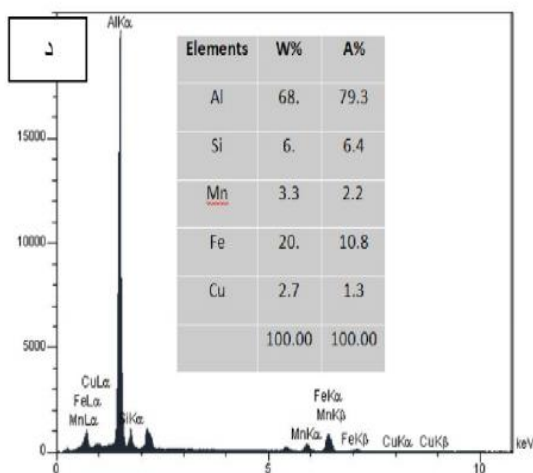
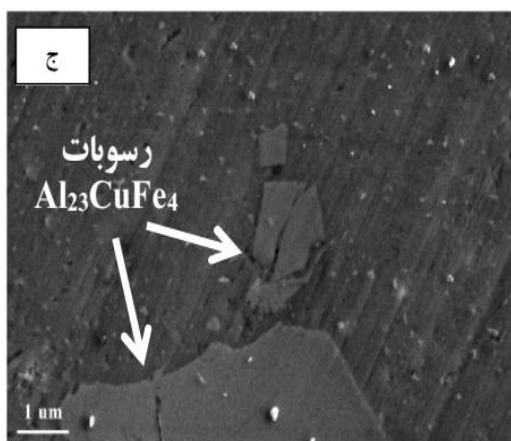
زمان ۱۵ ثانیه استفاده گردید. مقادیر سختی از بالای سطح لایه های ایجاد شده اندازه گیری شد و میانگین پنج آزمون ثبت شد. ارزیابی سایشی با آزمون پین بر دیسک^۲ (ASTM G99) انجام شد که در آن نمونه پین از لایه های کامپوزیت سطحی و دیسک از فولاد آبداده و بازگشت داده شده با میانگین سختی ۷۵۰ ویکرز بود. در این پژوهش، نمونه های تحت فرایند همزن اصطکاکی قرار گرفته شده بدون استفاده از پودر و کامپوزیت سازی شده با پودرهای SiC و BN مورد بررسی قرار گرفتند. آزمون های سایش تحت نیروی ۱۰ نیوتن و با سرعت چرخشی پین ۰/۵ متر بر ثانیه تا مسافت ۱۶۰۰ متر انجام گرفت. سطح پین ها بعد از سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

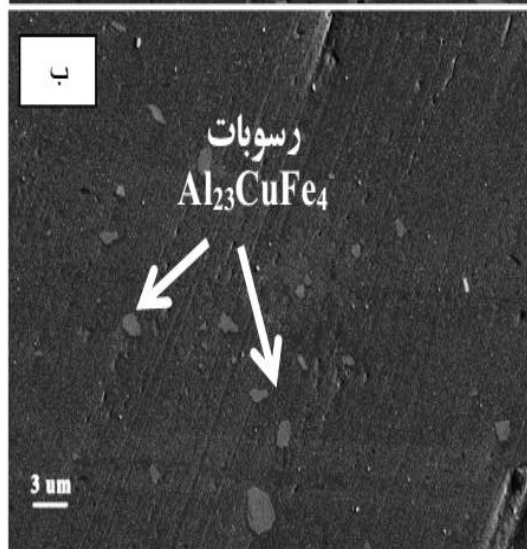
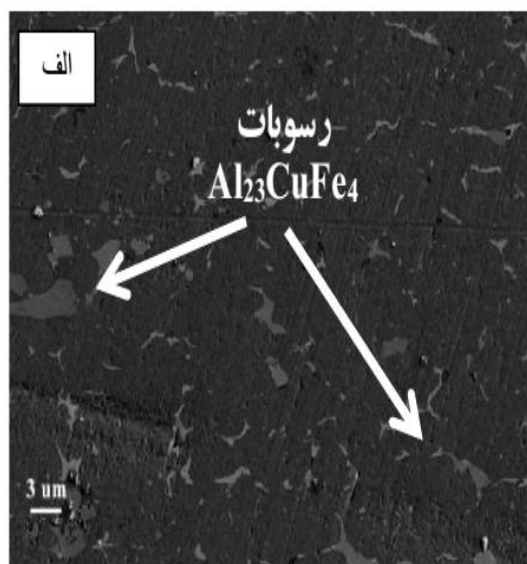
شکل ۴ ریز ساختار مقاطع عرضی ورق آلومینیوم 7075-T6 اولیه و لایه های همزن اصطکاکی شده (بدون افزودن ذرات) و کامپوزیتی (با افزودن مخلوط ذرات) سطحی ایجاد شده توسط فرایند همزن اصطکاکی را بعد از حکاکی نشان می دهد.





شکل (۵): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی: (الف): رسوبات $Al_{23}CuFe_4$ در زمینه آلیاژ اولیه Al7075-T6، (ب): لایه همزن اصطکاکی شده بدون افزایش مخلوط پودری، (ج): شکسته شدن برخی از آنها در لایه همزن اصطکاکی شده بدون افزودن مخلوط پودری و (د): نمونه تجزیه شیمیایی طیف تفکیک انرژی پرتو ایکس آنها

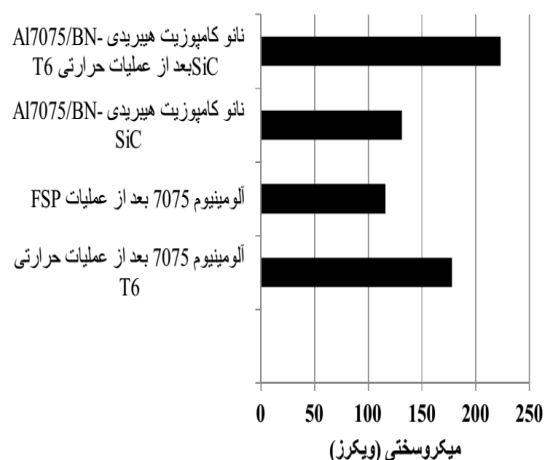
ناجائی های ایجاد شده در اثر فرایند را کمتر نموده و با قفل نمودن مرزها از رشد دانه ها در دمای بالا ممانعت به عمل آورده است. یکی از جلوه های ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، تشکیل رسوبات با ترکیب $Al_{23}CuFe_4$ حین عملیات حرارتی است [۲۰-۲۱]. مشاهدات میکروسکپ الکترونی روبشی حاکی از حضور بالنسبه گسترده این فاز در ریز ساختار آلیاژ Al 7075-T6 دارد (شکل ۵ الف). این در حالی است که با انجام فرایند همزن اصطکاکی، از میزان حضور آنها در زمینه لایه سطحی کاسته می گردد (شکل ۵ ب).



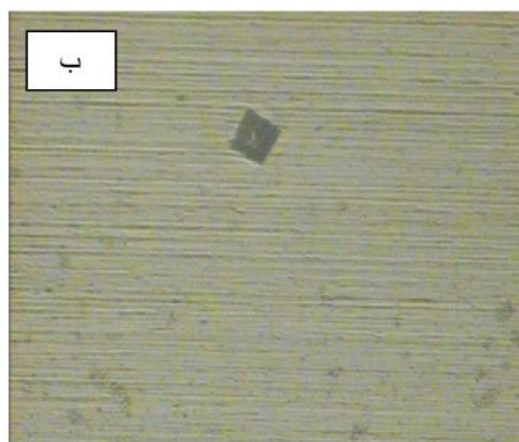
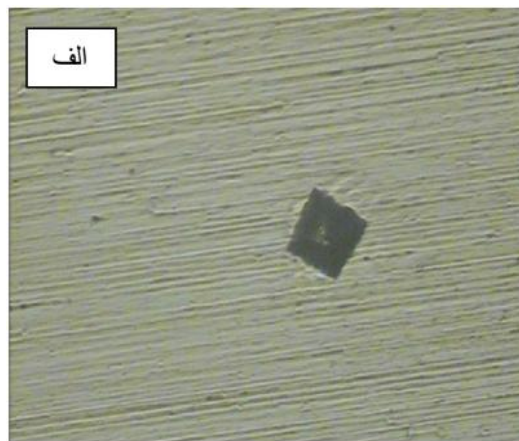
نتایج پژوهشهای محققین نشان داده که این رسوبات در محدوده حرارتی ایجاد شده توسط فرایند همزن اصطکاکی در زمینه آلومینیومی حل می گردند [۱۶]. بنابراین در فرصت کمی که دما بالا رفته محتملا بسیاری از رسوبات حل شده و با توجه به عبور ابزار و کاهش سریع دما به خاطر انتقال سریع حرارت از آلیاژ، مقدار کمتر از قبل در زمینه راسب شده اند (شکل ۵ ب). با افزایش تعداد پاس فرایند، میزان رسوبات کاهش می یابد. بررسی مناطق مختلف لایه نشان داد که رسوبات بزرگتر که کامل حل نشده اند، بعضا شکسته شده اند (شکل ۵ ج). تشکیل

مشاهده می شود که انجام فرایند همزن اصطکاکی اگر چه ریزدانگی لایه همزده را به همراه داشته (شکل ۴)، لیکن موجب کاهش میزان سختی شده است. کاهش سختی در اتصال همزن اصطکاکی نقطه‌ای آلیاژ Al7075-T6 گزارش شده است [۲۲]. همچنانکه نشان داده شد آلیاژ Al7075-T6 بر اساس عملیات حرارتی صورت پذیرفته دارای حجم بالنسبه قابل توجهی از رسوبات ترکیب بین فلزی چندتایی است (شکل ۵ الف). فرایند همزن اصطکاکی یک فرایند وابسته به حرارت و کار مکانیکی است. اندازه گیری دمای عملیات بر زمینه های آلومینیومی حسب متغیر های فرایند، نشان داده که لایه همزن اصطکاکی در محدوده حرارتی بالاتر از ۳۴۰ درجه سانتیگراد مورد کار گرم واقع شده و سپس با توجه به انتقال حرارت زیر لایه بالنسبه سریع سرد می شود [۲۳]. بررسی میکروسکوپی نشان داد که رسوبات ذاتی آلیاژ Al7075-T6 در این محدوده دمائی در زمینه حل می شوند و با توجه به سریع سرد شدن امکان راسب شدن آنها در اثر زمان کوتاه محدود می شود. بررسی ریز ساختار لایه همزده اصطکاکی و میزان حضور بالنسبه کم این ترکیبات فلزی گواہ بر این مطلب است (شکل ۵ ب).

با افزودن مخلوط پودری به لایه همزن اصطکاکی و انجام پاس های بعدی که جریان مواد پلاستیک شده سطحی را افزایش داده لایه سطحی نانو کامپوزیت هیبریدی با توزیع بالنسبه یکنواخت افزودنی ها ایجاد شده است. با توجه به سختی بالای SiC (۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ ویکرز) [۲۴]، انتظار می رود که سختی لایه نسبت به آلیاژ پایه افزایش یابد. از طرفی h-BN دارای سختی خیلی کمی است (1.65Mohs) [۲۵]، و لذا انتظار می رود که حسب قانون مخلوط ها در کامپوزیت، سهم کاهش در سختی داشته باشد. با توجه به سختی بسیار زیاد SiC و نسبت یکسان آن با h-BN میانگین سختی بهر حال بالاتر از یک هزار ویکرز می گردد که به عنوان مخلوط سخت به لایه اضافه شده است. لیکن میزان سختی افزایش یافته نسبت به آلیاژ پایه قابل توجه نیست. این امر هم چنانکه مشاهده شد به علت کاهش قابل توجه زمینه Al7075 حین فرایند همزن اصطکاکی است چرا که همچنان که

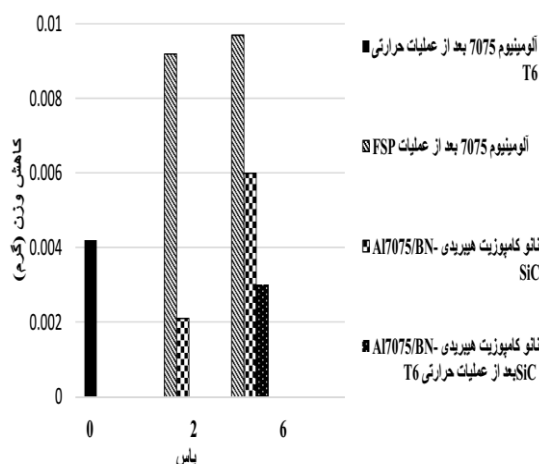


شکل (۷): میانگین میزان میکرو سختی آلیاژ اولیه Al7075-T6، لایه همزده سطحی بدون افزودن مخلوط پودری (FSPed Al7075)، لایه سطحی نانو کامپوزیت هیبریدی (Hybrid Al7075/BN-SiC) ایجاد شده بعد از پنج پاس دیگر و همین لایه که مورد عملیات حرارتی T6 قرار گرفته است



شکل (۸): تصاویر میکروسختی سطحی را برای لایه سطحی نانو کامپوزیت هیبریدی: (الف): قبل و (ب): بعد از انجام عملیات حرارتی T6

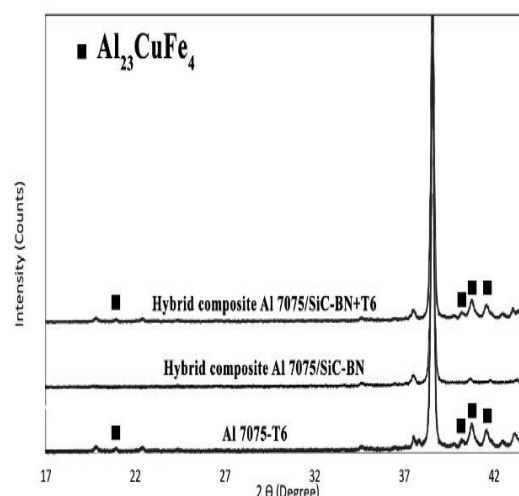
می شود. سایر رسوبات پایدار حل نشده و باقی می ماند. با توجه به تأثیر همزمان دو عامل ذکر شده، مشاهده می شود که با حل شدن رسوبات در اثر اصطکاک و افزایش دما خواص سایشی نمونه لایه هم زده شده بدون افزودن مخلوط پودری در تمامی پاس ها در مقایسه با نمونه آلیاژ اولیه Al7075-T6 افت پیدا کرده است.



شکل (۱۰): نمودار کاهش وزن برای آلیاژ زیر لایه آلومینیوم 7075-T6. لایه همزن اصطکاکی شده بدون ذرات و لایه نانو کامپوزیت هیبریدی ایجاد شده در حضور ذرات در پاس های مختلف بعد از طی مسافت ۱۶۰۰ متر آزمون سایش

مشخصه دیگر این فرایند همزدن ماده پلاستیک شده است که می تواند موجب شکسته شدن و در نتیجه ریز شدن رسوبات باقیمانده گردد. با افزودن پودر سرامیکی به ناحیه پلاستیک شده و هم خوردن آن، توزیع پودر سرامیکی در زمینه صورت می پذیرد. هر چه پاس های فرایند بیشتر شود میزان هم خوردن بیشتر شده و توزیع یکنواختی حاصل می گردد. همان گونه که مشاهده می شود نمونه لایه کامپوزیتی ایجاد شده بعد از دو پاس میزان اتلاف وزن کمتر و به تبع آن، مقاومت به سایش برتری را از خود نشان داده است و با افزایش تعداد پاس ها و حصول توزیع بالنسبه یکنواخت ذرات افزودنی در لایه، افت بیشتری در حین سایش حاصل می گردد. همچنانکه مشاهده شد به دلیل کافی نبودن جریان ماده بعد از دو پاس، تجمع پودرهای

مشاهده شد با کاهش شدید میزان رسوبات ترکیب بین فلزی همراه است. بدین لحاظ لایه نانو کامپوزیت هیبریدی ایجاد شده بعد از تشکیل مورد عملیات حرارتی T6 قرار گرفت. الگوی پراش پرتو ایکس لایه نانو کامپوزیتی مورد عملیات حرارتی قرار گرفته نشان داد که میزان ترکیب بین فلزی سه تایی بعد از عملیات حرارتی T6 افزایش می یابد (شکل ۹). این مورد افزایش میزان سختی را نیز باعث می شود که در بخش بعدی مورد توصیف واقع می گردد.



شکل (۹): الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژ پایه (Al7075+T6)، لایه نانو کامپوزیت هیبریدی ایجاد شده (Al7075/SiC-BN) و لایه نانو کامپوزیت هیبریدی بعد از عملیات حرارتی T6 (Al7075/SiC-BN+T6)

۳-۳- خواص سایشی

شکل ۱۰ میزان کاهش وزن در حین انجام آزمون سایش را برای مسافت یکسان طی شده آلیاژ زیر لایه 7075-T6، نمونه های تحت فرایند همزن اصطکاکی قرار گرفته بدون پودر، کامپوزیت سازی شده با پودرهای SiC و BN در تعداد پاس های متفاوت نشان داده شده است.

فرایند همزن اصطکاکی همواره با اصطکاک سطحی ماده و همزدن ماده پلاستیک شده همراه می باشد. اصطکاک باعث افزایش دمای قطعه و حل شدن رسوبات ناپایدار در حین فرایند

۶- مقادیر اتلاف وزن آزمایش سایش حاکی از کاهش مقاومت به سایش لایه همزده سطحی نسبت به آلیاژ پایه دارد که به علت حل شدن و کاهش میزان ترکیبات بین فلزی آن است. نانو کامپوزیت هیبریدی دارای ذرات SiC و BN ایجاد شده بعد از شش پاس نیز با کاهش مقاومت به سایش نسبت به آلیاژ پایه همراه بود. به نظر می رسد که میزان افزایش سختی در اثر حضور SiC در مقابل کاهش سختی ناشی از کم شدن ترکیبات بین فلزی حین چرخه حرارتی فرایند همزن اصطکاکی قابل نبوده است. با انجام عملیات حرارتی T6 بر لایه نانو کامپوزیت هیبریدی، میزان مقاومت به سایش نسبت به آلیاژ پایه به طور چشمگیر افزایش یافت.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از ستاد فناوری نانو معاونت علمی ریاست جمهوری و دانشگاه تهران به دلیل کمک‌های مالی در راستای تحقق این پژوهش تشکر و سپاسگزاری می‌نماید.

۶- مراجع

- [1] R. L. Deuis, C. Subramanian & J. M. Yellup, "Dry sliding wear of aluminum composites-A review", *Composites Science and Technology*, Vol. 57, , pp. 415-435, 1997.
- [2] T. W. Gustafson, P. C. Panda, G. Song & R. Raj, "Influence of microstructural scale on plastic flow behavior of metal matrix composites", *Acta Mater*, Vol. 45, pp. 1633-1643, 1997.
- [3] M. Kouzeli & A. Mortensen, "Size dependent strengthening in particle reinforced aluminum", *Acta Mater*, Vol. 50, pp. 39-51, 2002.
- [4] G. Yi & F. Yan, "Effect of hexagonal boron nitride and calcined petroleum coke on friction and wear behavior of phenolic resin-based friction composites", *Mater. Sci. Eng*, Vol. 425A, pp. 330-338, 2006.
- [5] J. M. Carrapichano, J. R. Gomes & R. F. Silva, "Tribological behaviour of Si₃N₄-BN ceramic materials for dry sliding applications", Vol. 253, pp. 1070-1076, 2002.

سرامیکی افزوده شده در سطح لایه روی داده است. این تجمع ذرات سخت SiC موجب اتلاف کمتر حین آزمون سایش شده است. اما با افزایش تعداد پاس این ذرات در داخل لایه توزیع شده و لذا از میزان حضور آنها در سطح که در جبهه اول سایش است کمتر شده و لذا سایش بیشتر گردید. از آنجا که حین فرایند همزن اصطکاکی رسوبات ذاتی زمینه آلیاژ آلومینیومی حل شده‌اند، لایه کامپوزیتی یکنواخت حاصل مقاومت به سایش برتری را نسبت به آلیاژ اولیه نشان نداد. جهت حصول مجدد رسوبات، لایه نانو کامپوزیت هیبریدی شش پاسه را مورد عملیات حرارتی T6 قرار داده شد. ملاحظه می شود که اتلاف وزنی نسبت به آلیاژ اولیه حدود یک سوم کاهش پیدا نموده و باعث برتری مقاومت به سایش شده است. این مورد با میزان سختی بالاتر آن نیز هماهنگی دارد.

۴- نتیجه گیری

- ۱- اعمال فرایند همزن اصطکاکی بر سطح آلیاژ Al7075-T6 موجب کاهش سختی می شود که به علت حل شدن رسوبات بین فلزی Al₂₃CuFe₄ در اثر چرخه حرارتی این روش است.
- ۲- با به کار گیری فرایند همزن اصطکاکی بر زیر لایه آلیاژ Al7075-T6 میانگین اندازه دانه‌های زمینه آلومینیومی از حدود ۹ به کمتر از ۱ میکرو متر کاهش می یابد.
- ۳- فرایند همزن اصطکاکی در حضور مخلوط پودری شامل ذرات میکرو متری و نانومتری به ترتیب SiC و BN موجب تشکیل نانو کامپوزیت هیبریدی Al7075-SiC/BN گردید.
- ۴- با اعمال پنج پاس بعدی توزیع نزدیک به یکنواخت ذرات افزودنی در لایه نانو کامپوزیتی ایجاد شده حاصل گردید.
- ۵- لایه نانو کامپوزیتی ایجاد شده میزان سختی بیشتری را نسبت به آلیاژ پایه Al7075-T6 نشان داد (۲۲۳ در مقابل ۱۷۸ ویکرز) که مرتبط با افزودن ذرات سخت SiC و نیز ریز شدن زمینه آلومینیومی است. لیکن با انجام عملیات حرارتی T6 و راسب شدن ترکیبات بین فلزی در زمینه میزان سختی و مقاومت به سایش به طور چشمگیر نسبت به آلیاژ پایه افزایش می یابد.

- [16] R. S. Mishra & Z. Y. MA, "Friction stir welding and processing", *Mater. Sci. Eng*, Vol. 50, pp. 1–78, 2005.
- [17] A. Askari, S. Silling, B. London & M. Mahoney, in: K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S. Mishra, S. L. Semiatin, D. P. Field (Eds.), "Friction Stir Welding and Processing", TMS, Warrendale, PA, pp. 43–50, 2001.
- [18] K. Oh-Ishi & T. R. McNelley, "Microstructural modification of as-Cast NiAl bronze by friction stir processing", *Metall. Mater. Trans*, Vol. 35A, pp. 2951-2961, 2004.
- [19] Y. S. Sato, M. Urata & H. Kokawa, "Parameters controlling microstructure and hardness during friction stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063", *Metall. Mater. Trans*, Vol. 33A, pp. 625-635, 2002.
- [20] R. P. Wei, C. M. Liao & M. Gao, "Transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys", *Met and Mat. Trans*, Vol. 29A, pp. 1153, 1998.
- [21] M. Gao, C. R. Feng & R. P. Wei, "An analytical electron microscopy study of constituent particles in commercial 7075-T6 and 2024-T3 alloys", *Met. And Mat. Trans*, Vol. 29A, pp. 1145, 1998.
- [22] A. Gerlich, G. Avramovic-Cingara & T. H. North, "Stir zone microstructure and strain rate during Al 7075-T6 friction stir spot welding", *Met and Mat. Trans*, Vol. 37A, pp. 2773, 2006.
- [23] M. A. Moghaddas & S. F. Kashani-Bozorg, "Effects of thermal conditions on microstructure in nanocomposite of Al/Si₃N₄ produced by friction stir processing", *Mater. Sci. Eng*, Vol. 559A, pp. 187, 2013.
- [24] J. CheolOha, E. Yuna, M. G. Golkovskib & S. Leea, "Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron beam", *Materials Science and Engineering*, Vol. 351A, pp. 98-108, 2003.
- [25] N. V. Novikov, Yu. V. Sirota, V. I. Mal'nev & I. A. Petrusha, *Diamond and Related Materials*, Vol. 2, pp. 1253- 1256, 1993.
- [6] J. M. Wu & Z. Z. Li, "Nanostructured composites obtained by mechanically driven reduction reaction of CuO and Al powder mixture", *J. Alloys Compd*, Vol. 299, pp. 9–16, 2000.
- [7] H. Zhang, N. Maljkovic & B. S. Mitchell, "Structure and interfacial properties of nanocrystalline aluminum/mullite composites", *Mater. Sci. Eng*, Vol. 326A, pp. 317–323, 2002.
- [8] J. Qu, L. An & P. J. Blau, "Sliding friction and wear characteristics of Al₂O₃-Al composites", in: *Proceedings of IJTC2006 STLE/ASME Int. Joint Tribology Conf*, San Antonio, TX, October, pp. 23–25, 2006.
- [9] J. Tomas, "Adhesion of ultrafine particles—Energy absorption at contact", *Chem. Eng. Sci*, Vol. 62, pp. 5925, 2007.
- [10] H. Rumpf, *the Strength of Granules and Agglomerates*, Interscience, New York, 1962.
- [۱۱] ع. ناظم الرعايا و م. فاضل نجف آبادی، "بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد API-X65 به روش جوشکاری هم زن اصطکاکی"، فصلنامه علمی-پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۴، صفحه ۷۵-۸۴، زمستان ۱۳۹۵.
- [۱۲] ح. آقاجانی درازکلا، م. الیاسی و م. حسین زاده، "بررسی شکل گیری عیوب و لایه‌های بین فلزی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیم AA1100 به فولاد A441 AISI"، فصلنامه علمی-پژوهشی فرایندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۳، صفحه ۱-۲۶، پاییز ۱۳۹۴.
- [13] R. S. Mishra, Z. Y. Ma & I. Charit, "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", *Mater. Sci. Eng*, Vol. 341A, pp. 307–310, 2003.
- [14] A. Shafiei Zarghani, S. F. Kashani-Bozorg & A. Zarei-Hanzaki, "Ultrafine grained 6082 aluminum alloy fabricated by friction stir processing", *Journal of Mat. Phys*, Vol. 22B, pp. 2874-2878, 2008.
- [15] S. F. Kashani-Bozorg & K. Jazayeri, "Formation of Al/B₄C surface nano-composite layers on 7075 Al alloy employing friction stir processing", *AIP Conf. Proc*, Vol. 1136, pp. 715-719, 2009.

۲- پی نوشت

- [1] Field emission scanning electron microscope, FE-SEM
- [2] Pin-on-disk