

# بررسی سختی و رفتار تریبولوژیکی نانوکامپوزیت سطحی $Al/Al_2O_3-TiB_2$ ساخته شده با فرآوری هم‌زن اصطکاکی

محمد مسائلی<sup>۱</sup>، کامران امینی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف

آباد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، اصفهان، ایران

\*K\_amini@iautiran.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۲۵، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۰۸)

## چکیده

در این پژوهش از روش جدید فرآوری هم‌زن اصطکاکی (FSP) جهت ایجاد لایه نانوکامپوزیت سطحی  $Al/Al_2O_3-TiB_2$  استفاده شد. بررسی ریزساختار، نحوه توزیع ذرات تقویت کننده و چسبندگی لایه کامپوزیتی به زیر لایه، توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج سختی نشان داد که سختی لایه نانوکامپوزیتی به دلیل ریز شدن دانه‌ها بر اثر تبلور مجدد دینامیکی و وجود ذرات سخت سرامیکی  $Al_2O_3-TiB_2$  در حدود ۷۰ درصد بالاتر از سختی آلومینیوم اولیه است و در بیشینه مقدار خود به ۹۵ ویکرز می‌رسد. به منظور بررسی رفتار سایشی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، آلومینیوم اولیه و همچنین آلومینیوم FSP شده از آزمون سایش استفاده شد و مکانیزم‌های غالب در سایش نمونه‌ها و نرخ سایش آنها با یکدیگر مقایسه گردید. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه مقاومت به سایش لایه نانوکامپوزیت  $Al/Al_2O_3-TiB_2$  می‌باشد که به دلیل سختی بالا و ریز شدن دانه‌ها ناشی از تبلور مجدد در ناحیه هم‌زده می‌باشد.

## کلمات کلیدی:

فرآوری هم‌زن اصطکاکی، نانوکامپوزیت سطحی، آلومینیوم ۶۰۶۱-O، سختی، سایش رفت و برگشتی.

## ۱- مقدمه

سازه‌های هوایی و ریلی استفاده می‌شود [۱-۵]. فرآوری هم‌زن اصطکاکی یک روش حالت جامد برای ایجاد لایه سطحی با ریز ساختار ریز دانه است. اخیراً یکی از کاربردهای فرآوری هم‌زن اصطکاکی در اضافه کردن ذرات سرامیکی به درون لایه سطحی آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم است که نتیجه آن ایجاد کامپوزیت سطحی است. فرآوری هم‌زن اصطکاکی با تغییر شکل پلاستیکی شدید علاوه بر ریز کردن دانه‌ها و بهسازی ساختار با همگن کردن توزیع ذرات پودر سرامیکی در زمینه باعث ایجاد

آلیاژ ۶۰۶۱ با عناصر اصلی سیلیسیم و منیزیم جزء آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی‌پذیر نقش مهمی را در صنایع هوا-فضا بازی می‌کند. این آلیاژ بخاطر قابلیت شکل‌پذیری، جوش‌پذیری، ماشینکاری، مقاومت خوردگی و استحکام خوب بطور گسترده در صنایع خودروسازی، دوچرخه‌سازی، هواپیماسازی، سازه‌های دریایی، خطوط لوله، مخازن ذخیره و

ذرات نانوسرامیک  $AA6061/Al_2O_3$  را با بکارگیری فرآوری همزن اصطکاکی ساختند. نتایج نشان می‌دهد که عمق پوشش کامپوزیت به اندازه طول پین ابزار است. جدایش فصل مشترک بین پوشش و فلز پایه ایجاد نشد. با افزایش نیروی محوری و تعداد پاس، ناحیه کامپوزیت بزرگتر گردید [۱۱]. مظاهری و همکاران سطح نانوکامپوزیت  $A356/Al_2O_3$  را با فرآوری همزن اصطکاکی توسعه دادند. نتایج نشان داد که میکروسختی لایه سطحی زیرلایه آلومینیوم، با کاهش اندازه ذرات  $Al_2O_3$  بطور محسوسی افزایش می‌یابد [۱۲]. رفتار تریبولوژی و میکروساختار کامپوزیت ترکیبی بر پایه آلیاژ ریختگی آلومینیوم A356 با استفاده از پودر  $SiO_2$  و  $MoS_2$  و توسط فرآوری همزن اصطکاکی توسط علیدخت و همکاران مورد تحقیق قرار گرفت. مشاهده گردید که هر دو مقدار سایش و نرخ سایش در نمونه های کامپوزیت و  $A356$  تحت FSP به طور محسوسی کمتر از آلیاژ ریختگی  $A356$  است. علاوه بر آن، کامپوزیت سطحی با ترکیبی از هر دو پودر، بیشترین مقاومت را در برابر سایش نشان می‌دهد [۱۳].

هدف از تحقیق حاضر ایجاد نانوکامپوزیت سطحی  $Al/Al_2O_3-TiB_2$  شامل زمینه ریز دانه آلومینیوم همراه با توزیع ذرات  $Al_2O_3-TiB_2$  در جهت بهبود رفتار سایشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ است. بدین منظور پس از ساخت کامپوزیت به روش فرآوری همزن اصطکاکی ریز ساختار، سختی و رفتار سایشی کامپوزیت حاصله ارزیابی می‌گردد.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

ورق مورد استفاده در تحقیق از آلیاژ آلومینیوم A6061-T6 به ضخامت ۱۰ میلیمتر ساخت شرکت Aloca با آنالیز شیمیایی جدول ۱ می‌باشد که ابتدا تحت عملیات آنیل انحلالی در کوره قرار گرفت و نتیجه حاصل 6061-O بود. اندازه دانه ورق 6061-O، ۱۲۰ میکرون و سختی آن ۵۸ ویکرز اندازه‌گیری شد. پودر ذرات نانو  $Al_2O_3-TiB_2$  با میانگین قطر ۵۰ نانومتر به عنوان ذرات

کامپوزیت زمینه فلزی در سطح می‌گردد [۶]. در این حالت، تنها لایه سطحی قطعات توسط ذرات تقویت کننده تقویت می‌شوند، در حالی که توده قطعه همچنان خواص اصلی خود را حفظ می‌کند. اساس فرایند شامل چرخش ابزار که معمولاً ابزار شامل یک شانه با قطر بزرگتر و یک پروب با شکل خاص و قطر کوچکتر است که در اولین تماس به داخل ناحیه اتصال فرو می‌رود. ابزار به درون خط جوش فرو می‌رود تا شانه تماس با سطح ورق ایجاد کند. زمانی که قطعه بر اثر اصطکاک به میزان کافی گرم شد و وارد منطقه پلاستیک گردید، ابزار در حال چرخش در مسیر خط جوش حرکت طولی می‌کند و مواد پلاستیک شده بر اثر چرخش پین، با حرکت دورانی به سمت بالا آمده و زیر شانه ابزار فورج می‌شوند. در حین این فرآیند، مواد تحت یک تغییر شکل پلاستیک شدید در دمای بالا قرار می‌گیرند که در اثر آن، دانه‌های تبلور مجدد هم‌محور و ریز به وجود می‌آید. این ساختار ریز در این فرآیند، باعث ایجاد خواص مکانیکی مطلوب می‌شود [۷-۹].

میشرا و همکارانش کامپوزیت سطحی  $Al/SiC$  را توسط فرآوری همزن اصطکاکی ایجاد کردند و نشان دادند که ذرات  $SiC$  به خوبی در فلز پایه آلومینیوم پخش می‌شوند و پیوند خوبی با فلز زمینه آلومینیوم به وجود می‌آورد. میکروسختی سطح کامپوزیتهای تقویت شده با ۲۷٪ حجمی ذرات  $SiC$  با میانگین اندازه ۰/۷ میکرومتر در حدود ۱۷۳ ویکرز بود، که تقریباً دو برابر سختی زیرلایه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، (۸۵ ویکرز) می‌باشد [۸]. خواص مکانیکی و ریزساختار لایه نانوکامپوزیت سطحی  $Al6061/Al_2O_3$  با استفاده از فرآوری همزن اصطکاکی توسط زرقانی و همکاران آنالیز گردید. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پاس، FSP باعث توزیع بهتر و پراکندگی ذرات نانو آلومینا می‌شود. میکروسختی سطح تحت فرآوری در مقایسه با سطحی از آلیاژ که هیچ عملیاتی روی آن انجام نشده، سه برابر شد. همچنین در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم اولیه افزایش قابل توجهی در مقاومت به سایش در آلومینیوم نانوکامپوزیت سطحی دیده شد [۱۰]. یانگ و همکاران کامپوزیت تقویت شده با

تقویت کننده به کار گرفته شد که از سنتز با روش مکانوشیمیایی به دست آمده بود.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده در تحقیق (درصد وزنی)

عناصر	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
STM B313 استاندارد A6061	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.040.35	0.25	0.15
A6061 آنالیز ورق مصرفی	0.76	0.59	0.21	0.04	0.81	0.17	0.18	0.01

اچ گردیدند و مرز دانه‌ها مشخص گردید. ریزساختارهای نواحی مختلف توسط میکروسکوپ نوری Progres مشخص شدند. با استفاده از استاندارد ASTM E112 اندازه دانه میانگین محاسبه گردید. رفتار سایش لغزشی نمونه‌های تحت فرآوری، با دستگاه سایش رفت و برگشتی طبق استاندارد ASTM G133 در شرایط اتمسفر معمول انجام گرفت (دمای اتاق ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۳۰-۴۰٪). برای انجام آزمون، نمونه‌هایی به طول ۹ سانتی‌متر از وسط هر نمونه فرآوری شده انتخاب گردید. آزمون سایش در بار اعمالی ۱۰ نیوتن، سرعت ۰/۲۱ متر بر ثانیه و در مسافت ۱۰۰۰ متر انجام شد. پین فولادی با قطر ۵ میلی‌متر از جنس AISI 52100 با سختی ۶۴ راکولسی بود. ضریب اصطکاک بین نمونه پین و دیسک توسط اندازه‌گیری نیروی اصطکاک با حس‌گر تنشی محاسبه گردید. به منظور بررسی مورفولوژی و ریزساختار ذرات پودر، نانو کامپوزیت سطحی، سطح سایش و هم‌چنین ذرات سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN و LEO435VP استفاده گردید.

### ۳- نتایج و بحث

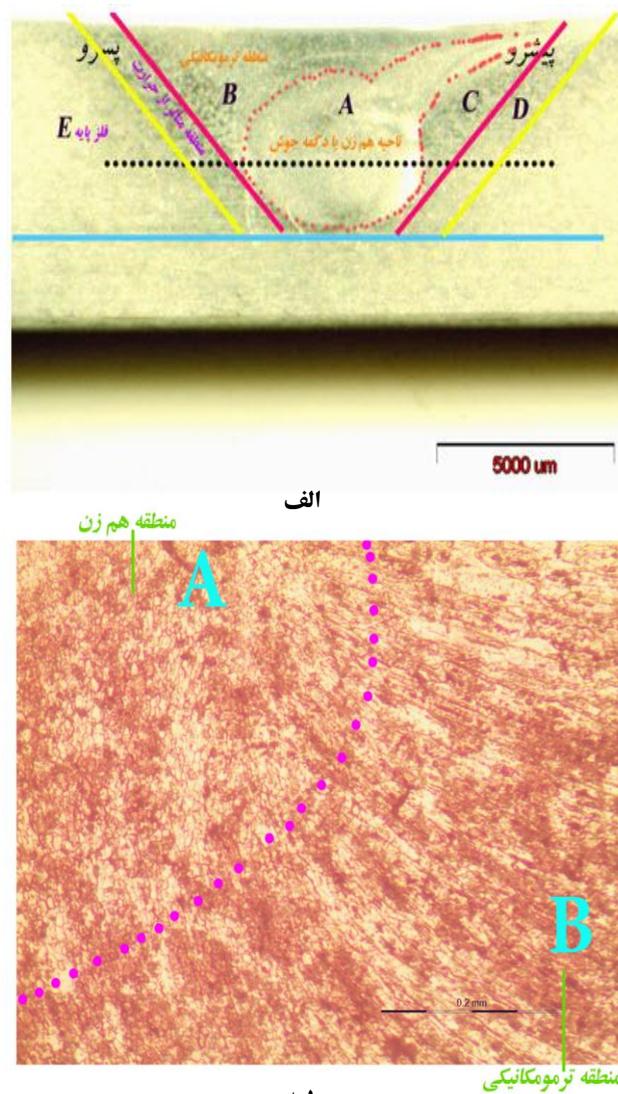
#### ۳-۱- بررسی ریز ساختار

ریزساختارهای مناطق متأثر از حرارت، ترمومکانیکی و هم‌زن توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد. مرز دانه مناطق مختلف و اندازه دانه در ناحیه هم‌زن توسط میکروسکوپ نوری مشاهده و محاسبه گردید. ریزساختار منطقه ترمومکانیکی و منطقه هم‌زن در وسط ناحیه فرآوری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج حاکی از ریز شدن دانه‌ها در منطقه هم‌زن به دلیل تبلور مجدد دینامیکی طی فرآوری هم‌زن اصطکاکی است [۱۴-۱۶]. ناحیه ترمومکانیکی بین دو ناحیه متأثر از حرارت

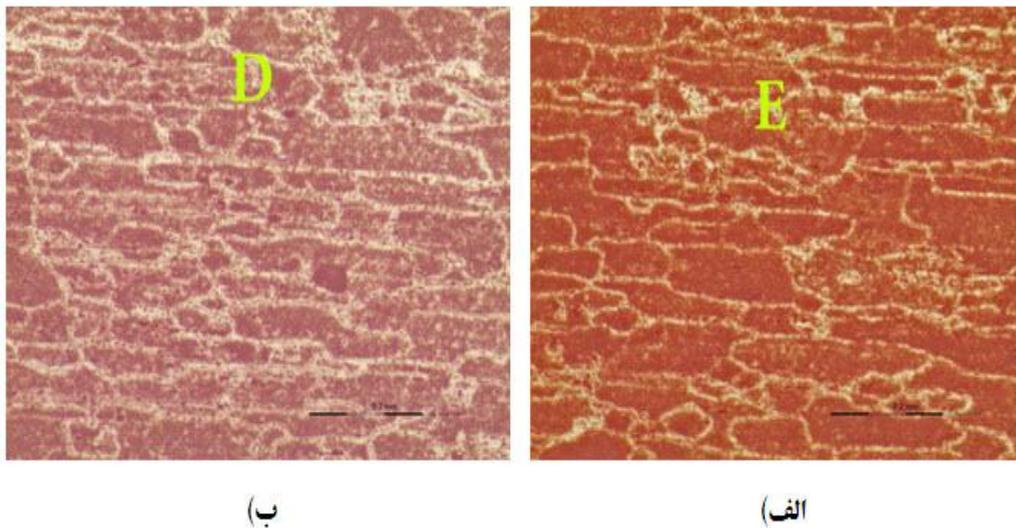
برای سادگی، عملیات فرآوری هم‌زن اصطکاکی با اصلاح ماشین فرز معمولی انجام گرفت. ابزار از جنس فولاد ابزار گرم کار H13 می باشد که با روش عملیات حرارتی القایی، سخت کاری سطحی شد. طراحی پین به شکل مخروط ساده به ابعاد ۴×۶ میلی‌متر بود و قطر شانه آن ۱۸ میلی‌متر و زاویه انحراف اسپیندل دستگاه سه درجه در نظر گرفته شد. سرعت چرخش در ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. برای افزودن پودر نانو Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - TiB<sub>2</sub> یک شیار به عمق سه میلی‌متر و عرض یک میلی‌متر ایجاد شد و پودر نانو درون آن قرار گرفت. برای فرآوری به منظور جلوگیری از پاشش پودر نانو Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - TiB<sub>2</sub> و عدم بیرون زدگی آن از شیار، گپ شیار توسط ابزاری که شامل شانه بدون پین بود، بسته شد. نمونه‌های با پودر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - TiB<sub>2</sub> و بدون پودر نانو در دو پاس تحت عملیات فرآوری هم‌زن اصطکاکی قرار گرفته و بعد از هر پاس در هوا سرد گردیدند. مشاهدات ریزساختاری با به کارگیری میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع قطعه در جهت عمود بر مسیر حرکت ابزار انجام شد. اندازه گیری میکرو سختی با به کارگیری دستگاه کوپا با اعمال نیروی ۲۰۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه بر طبق استاندارد ASTM A384 انجام شد. میانگین میکروسختی در طول یک خط در فاصله ۳ میلی‌متری زیر سطح در دو طرف خط مرکزی اندازه‌گیری شد. جهت متالوگرافی سطح مقطع عرضی، ورق آلومینیوم فرآوری شده را ابتدا مانع سرد کرده و سپس به طور مکانیکی پولیش گردید. ترتیب کار بدین صورت بود که از سنباده‌های ۳۲۰ تا ۲۵۰۰ استفاده گردید و سپس با خمیر الماسه پولیش شد. نمونه‌ها پس از پولیش جهت ظاهر سازی ساختار بلافاصله با محلول کلر

بزرگ شدن دانه در ناحیه متأثر از حرارت به میزان فرآیندهای جوشکاری ذوبی نمی‌شود. همچنین پهنا و وسعت این ناحیه در این فرآیند بسیار اندک خواهد بود. تصاویر بدست آمده در اشکال زیر با نتایج تحقیقات آقاییان میسر و همچنین زحمتکش و همکارانش مقایسه شد و نتایج کاملاً مطابقت دارد [۱۶-۱۷].

و هم‌زن است که به دلیل کاهش میزان گرما و کرنش ایجاد شده در مقایسه با منطقه هم‌زن، دارای اندازه دانه بزرگتر و در مقایسه با فلز پایه، دارای اندازه دانه کوچکتر است (شکل ۱(ب)). جهت سیلان مواد در این ناحیه به وضوح مشخص است. ریزساختار نواحی متأثر از حرارت و فلز پایه در شکل ۲ حاکی از تفاوت اندک اندازه دانه منطقه متأثر از حرارت در مقایسه با فلز پایه است که نشان می‌دهد که فرآوری هم‌زن اصطکاکی باعث



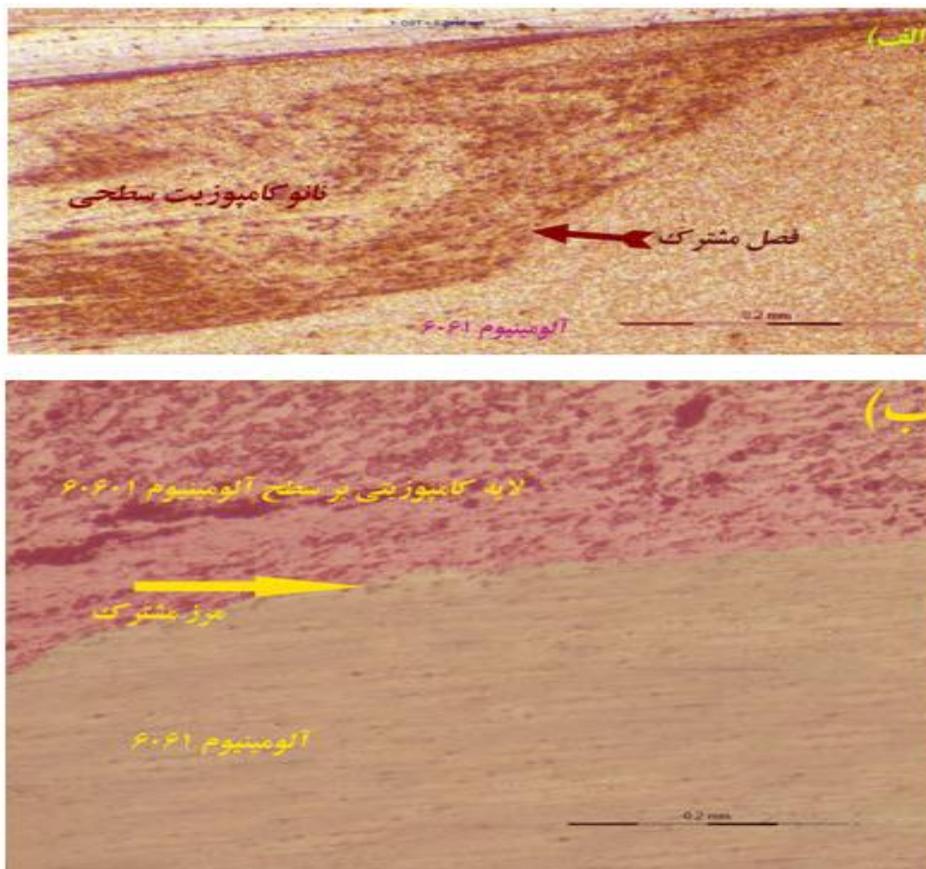
شکل (۱): (الف): تصویر ماکروگرافی از سطح مقطع تحت فرآوری هم‌زن اصطکاکی و مشخص کردن نواحی مختلف آن و (ب): ریزساختار میکروسکوپی نوری از ناحیه A یا منطقه هم‌زن، ناحیه B یا ترمومکانیکال



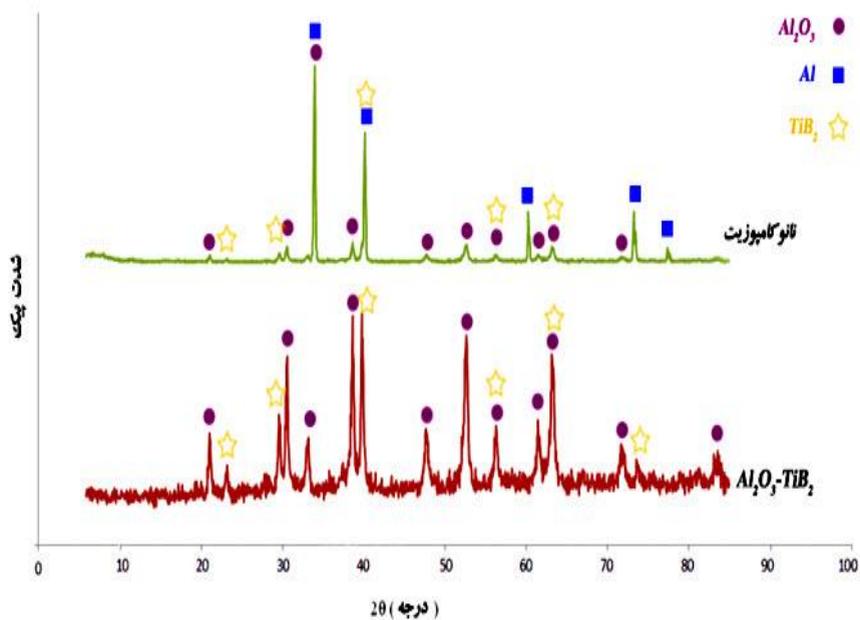
شکل (۲): تصاویر میکروسکوپ نوری از مناطق مختلف: (الف): فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ نقطه E و (ب): منطقه متأثر از حرارت نقطه D

مناطق دیگر دارای خواص مکانیکی برتر نسبت به فلز پایه هستند. بنابراین با کنترل دما حین فرآیند و افزودن پودر سرامیکی مناسب، یک ساختار ریز بدون عیب و یکنواخت که بر سطح آن لایه نانو کامپوزیت قرار دارد، ایجاد می‌شود. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی لایه نانو کامپوزیت سطحی تشکیل شده بر روی سطح آلومینیوم ۶۰۶۱ در شکل ۳ نشان داده شده است که حاکی از فصل مشترک بین فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ و نانو کامپوزیت سطحی است. آنالیز فازی XRD از نانو کامپوزیت سطحی در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودار پایین، پیک‌های حاصل از پراش اشعه ایکس پودر  $Al_2O_3/TiB_2$  مورد استفاده را نشان می‌دهد و نمودار بالایی پیک حاصل از سطح نانو کامپوزیت شده را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر موفقیت آمیز بودن فرآیند در ایجاد نانو کامپوزیت سطحی است. در جدول ۲ اندازه دانه در ناحیه همزن نمونه FSP شده و نانو کامپوزیت در سرعت پیشروی ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه ۲ آورده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌گردد در نمونه کامپوزیت سطحی ساختار ریز دانه تری بدلیل نقش ذرات سرامیکی در کنترل رشد دانه‌ها حاصل می‌گردد. این موضوع توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۱۴].

تغییر شکل پلاستیکی شدید حاصل از چرخش ابزار و در معرض قرار گرفتن منطقه تحت فرآیند در دمای بالا، باعث ایجاد دانه‌های تبلور مجدد یافته هم‌محور و ریز در ناحیه هم‌زن می‌شود. بنابراین ریزساختار دانه منطقه هم‌زن تحت تأثیر فاکتورهای جوانه‌زنی و رشد طی فرآیند تبلور مجدد دینامیکی مشخص می‌گردد. علاوه بر این فاکتورها، توزیع یکنواخت ذرات ریز  $Al_2O_3/TiB_2$ ، دارای اثر زیادی بر فرایند تبلور مجدد دینامیکی طی سیکل‌های حرارتی فرآوری هم‌زن اصطکاکی و ریزساختار دانه ناشی از آن دارد. ذرات  $Al_2O_3/TiB_2$  با افزایش دادن کرنش موضعی در زمینه، باعث جوانه‌زایی بیشتر برای دانه‌های جدید تبلور مجدد یافته می‌شود و باعث دگرگونی جهتی در شبکه می‌گردد که می‌تواند منجر به ایجاد یک ساختار فوق ریز دانه گردد، این عوامل با همدیگر خواص مکانیکی را در دکمه جوش به طور چشمگیری بهبود می‌دهند. گرمای حاصل از فرآوری هم‌زن اصطکاکی می‌تواند باعث درشت شدن رسوبات و یا انحلال نسبی رسوبات درشت شود. بیشینه دما می‌تواند از ۰/۸ نقطه ذوب در آلیاژهای آلومینیوم تجاوز کند که این دما به اندازه کافی برای انحلال رسوبات رسوب سختی است. منطقه متأثر از حرارت معمولاً ضعیف‌ترین ناحیه اتصال فرآوری هم‌زن اصطکاکی است. بنابراین به غیر از این منطقه،



شکل (۳): (الف): تصویر میکروسکوپ نوری از لایه نانو کامپوزیت سطحی بر روی سطح آلومینیوم ۶۰۶۱ و (ب): مرز مشترک بین فلز پایه (آلومینیوم ۶۰۶۱) و نانو کامپوزیت سطحی



شکل (۴): آنالیز فازی XRD از نانو کامپوزیت سطحی

جدول (۲): اندازه دانه ناحیه همزن در دو نمونه نانو کامپوزیت و نمونه FSP شده بر طبق استاندارد ASTM E112

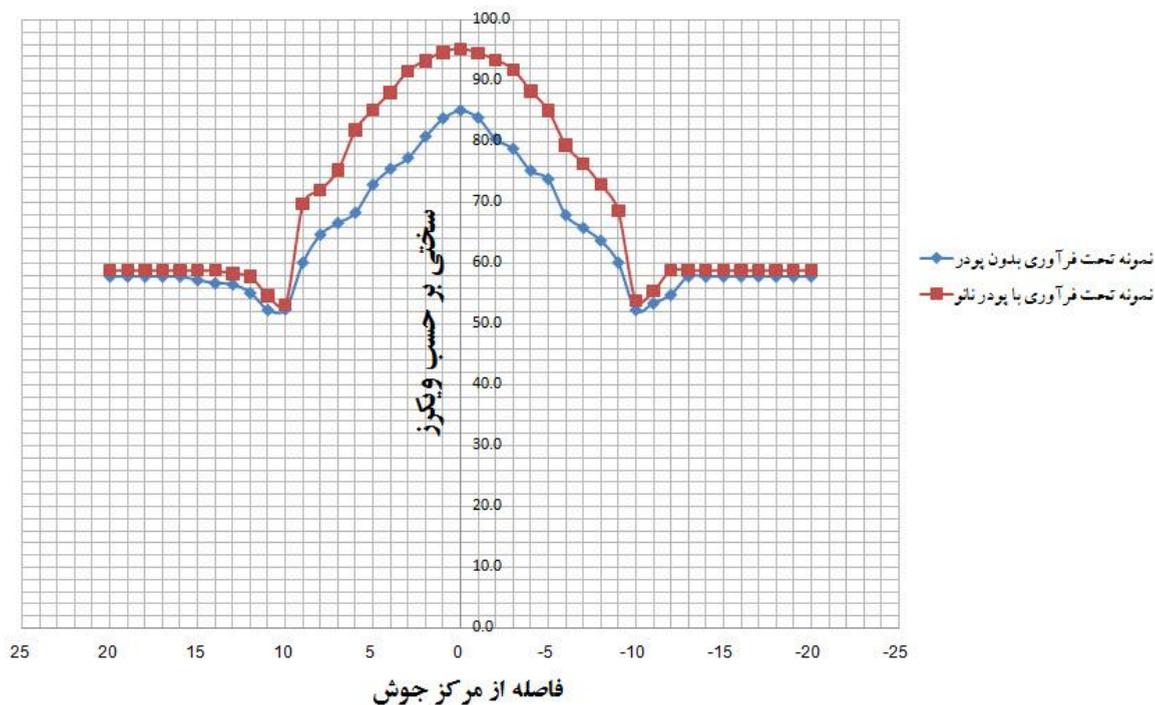
نمونه	اندازه دانه بر حسب میکرون	عدد اندازه دانه
نمونه FSP شده FSP(1400,80)	۵/۱	۱۲/۲۵
نمونه نانو کامپوزیت FSP(1400,80)	۴/۷	۱۲/۵

ویکرز می‌رسد. در هر دو نمونه، شرایط و پارامتر فرآوری یکسان در نظر گرفته شد و سختی فلز پایه ۵۶ ویکرز برای آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در حالت آنیل اندازه‌گیری شده بود. پس در ناحیه نانو کامپوزیت، سختی تقریباً ۷۰ درصد افزایش را نسبت به سختی فلز پایه از خود نشان می‌دهد. از منحنی تغییرات ریزسختی می‌توان نتیجه گرفت که مقدار سختی در دو طرف پیشرو و پسرو تقریباً یکسان است. پایین‌ترین سختی در ناحیه HAZ می‌باشد که به دلیل رشد دانه‌ها در این منطقه است.

### ۳-۲- بررسی رفتار سایشی و سختی

منحنی تغییرات ریزسختی بر حسب فاصله از مرکز فرآوری در شکل ۵ نشان داده شده است. بررسی نتایج ریزسختی بدست آمده از نواحی مختلف نشان می‌دهد که سختی مناطق ترمومکانیکی و همزن به طور چشمگیری از فلز پایه بالاتر است که به دلیل تبلور مجدد و ریز شدن دانه‌ها در این نواحی است. همچنین نمونه دارای پودر نانو  $Al_2O_3/TiB_2$  سختی بالاتری را نسبت به نمونه بدون پودر در ناحیه نانو کامپوزیت سطحی دارد. به طوری که در ناحیه همزن نمونه دارای پودر، سختی به ۹۵/۲ ویکرز می‌رسد در حالی که سختی در نمونه بدون پودر به ۸۵/۱

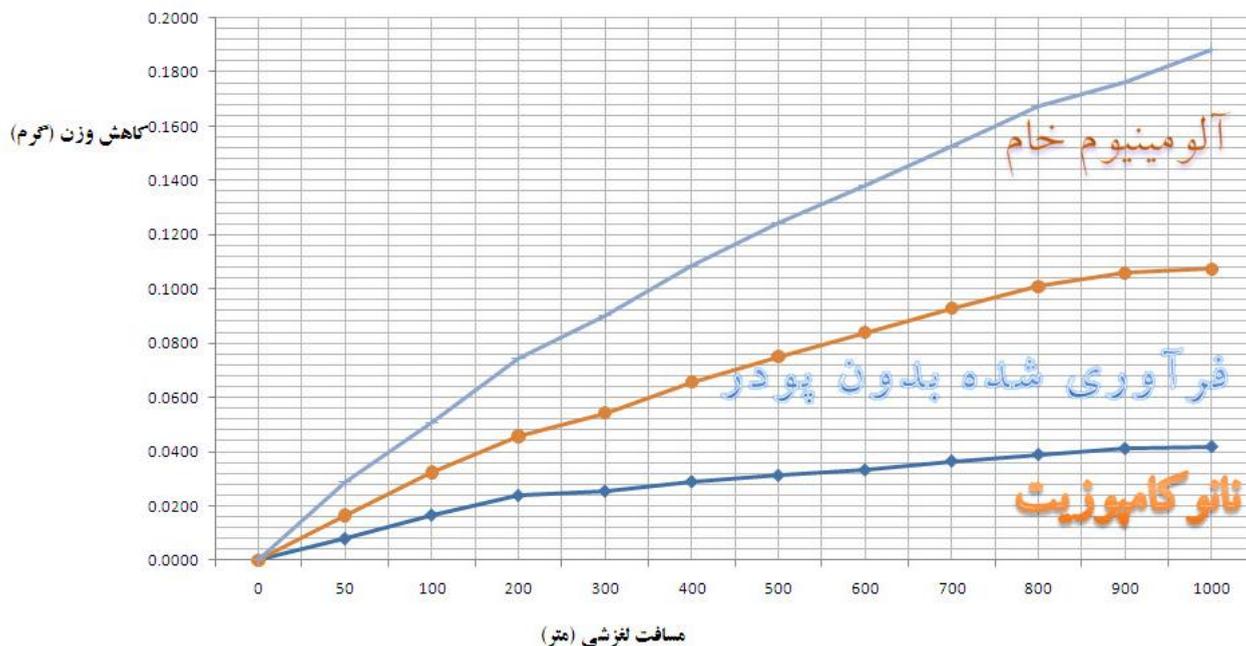
نمودار تغییرات سختی بر حسب ویکرز



شکل (۵): نمودار تغییرات سختی مناطق مختلف بر حسب ویکرز

نمونه فرآوری شده با ذرات پودر می باشد. علت بهبود مقاومت به سایش در نمونه های نانو کامپوزیت سطحی و فرآوری همزن اصطکاکی شده در مقایسه با آلومینیوم خام در ارتباط با افزایش سختی و ریز شدن دانه ها ناشی از فرآوری همزن اصطکاکی و لایه کامپوزیت سطحی است.

منحنی مشخصه سایش شامل ارتباط بین کاهش وزن و مسافت سایش برای سه نمونه آلومینیوم خام، نمونه فرآوری شده بدون پودر و نمونه نانو کامپوزیت تحت بار اعمالی ۱۰ نیوتن، سرعت ۰/۲۱ متر بر ثانیه و در مسافت ۱۰۰۰ متر در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطوریکه مشخص است بالاترین کاهش وزن مربوط به نمونه آلومینیوم خام و کمترین کاهش وزن مربوط به



شکل (۶): نمودار کاهش وزن در ۱۰۰۰ متر مسافت لغزشی برای نمونه های آلومینیوم خالص، آلومینیوم تحت فرآوری و نانو کامپوزیت، تحت سایش رفت و برگشتی با بار ۱۰ نیوتن

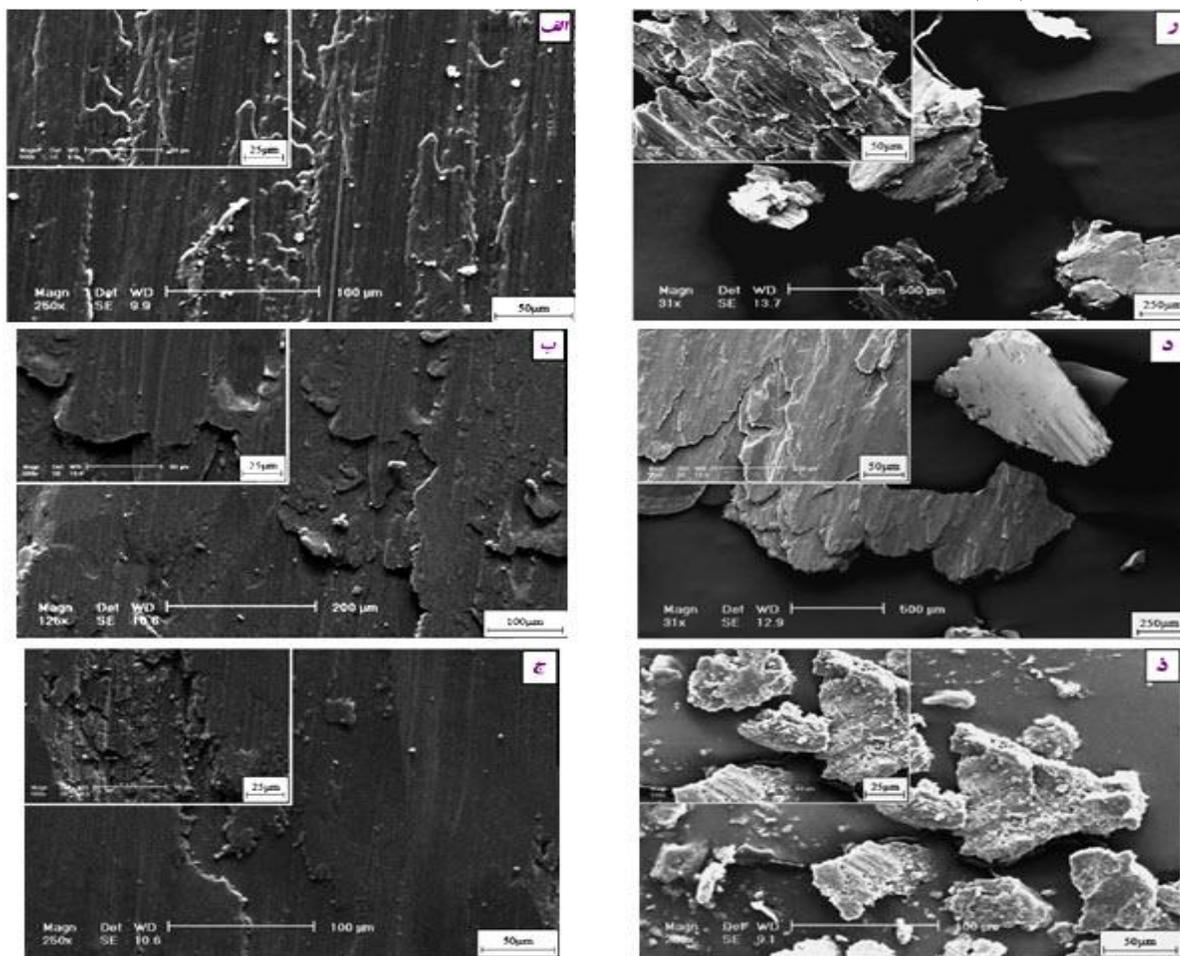
می یابد. در تحقیقی که توسط زرکانی و همکاران در مورد ایجاد کامپوزیت سطحی  $Al/Al_2O_3$  بر روی آلومینیوم، انجام شده است، نتایج مشابهی بدست آمده است [۱۴]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سایش از نمونه های آلومینیوم ۶۰۶۱، آلومینیوم فرآوری شده و نانو کامپوزیت سطحی تحت بار ۱۰ نیوتن در شکل ۷ الف تا ۷ ج آورده شده است.

در شکل ۷ الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح سایش یافته آلومینیوم خام در برابر دیسک فولادی نشان داده شده است. همانطوریکه مشخص است مکانیزم سایش در

پس به طور کلی می توان نتیجه گرفت در نمونه هایی که نانو کامپوزیت بر سطح آلومینیوم ایجاد شده است به علت کاهش اندازه دانه و وجود ذرات سرامیکی سخت، میزان کاهش وزن کمتر از ۰/۱ گرم در ۱۰۰۰ متر است، در صورتی که در نمونه های FSP شده که در شرایط یکسان تحت فرآوری همزن اصطکاکی قرار گرفته اند و در آنها از پودر  $Al_2O_3-TiB_2$  استفاده نشد، میزان کاهش وزن بالاتر از ۰/۱ گرم در ۱۰۰۰ متر بوده است. در نمونه های نانو کامپوزیت ذرات  $Al_2O_3-TiB_2$  سخت تر از زمینه آلومینیوم می باشند، بنابراین از سطح آلومینیوم در حین سایش محافظت نموده و لذا مقاومت در برابر سایش در این نمونه بهبود

آورده شده است. همانطوریکه مشخص است در آلومینیوم خام براده های حاصل از سایش درشت می باشند اما در نمونه کامپوزیت سطحی براده های کوچکتری بدست آمده است. با توجه به سختی بالاتر و ترد بودن نمونه کامپوزیت سطحی، این نتیجه منطقی می باشد.

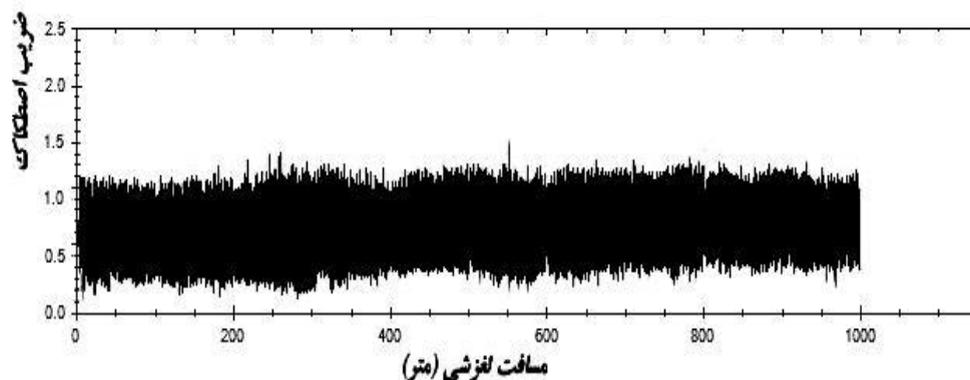
این نمونه شامل مناطق چسبان چند لایه و ورقه ای است. در شکل ۷ ب و ج سطح سایش مربوط به نمونه های فرآوری و کامپوزیت سطحی آورده شده است. بررسی تصاویر حاکی از وقوع سایش چسبان ضعیف تر در این نمونه ها دارد که با توجه به سختی و مقاومت به سایش بالاتر در این نمونه ها قابل انتظار است. در شکل های ۷ ر تا ذ تصاویر مربوط به براده های سایش در نمونه های آلومینیوم خام، فرآوری شده و کامپوزیت سطحی



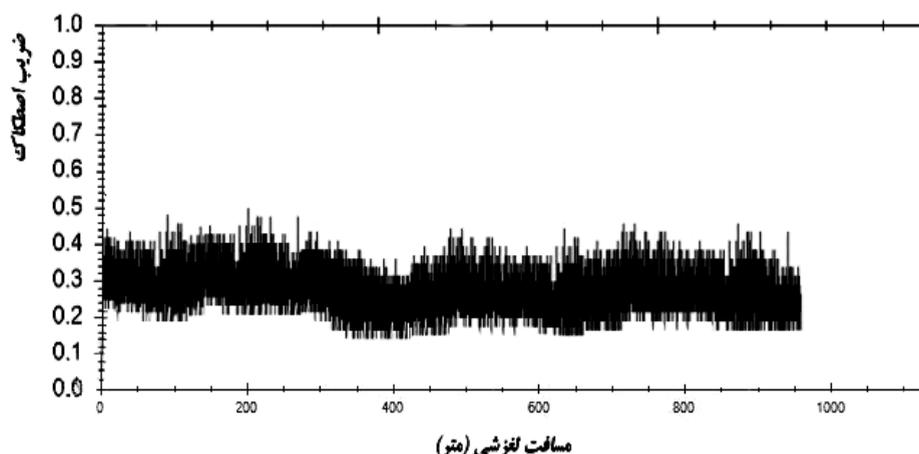
شکل (۷): (الف): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش یافته نمونه آلومینیوم خام، (ب): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش یافته نمونه آلومینیوم فرآوری شده، (ج): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش یافته نمونه نانو کامپوزیت، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از خرده سایش، (ر): نمونه آلومینیوم خام، (د): نمونه آلومینیوم فرآوری شده و (ذ): نمونه نانو کامپوزیت سطحی

آلومینیوم خام بدلیل سختی پایین تر ذرات سایش جدا شده از سطح بدلیل مکانیزم سایش چسبان شدید به سطح چسبیده و لذا باعث افزایش ضریب اصطکاک میگردند. این نتایج با نتایج تحقیق حسینی و همکارانش مطابقت دارد [۱۸].

شکل ۸ و ۹ روند تغییرات ضریب اصطکاک را در دو نمونه کامپوزیت سطحی و آلومینیوم خام تحت بار ۱۰ نیوتن نشان می دهد. همانطوریکه مشخص است ضریب اصطکاک در نمونه کامپوزیت سطحی پایین تر است. دلیل این امر آنستکه در نمونه



شکل (۸): نمودار تغییرات ضریب اصطکاکی در نمونه آلومینیوم خالص



شکل (۹): نمودار تغییرات ضریب اصطکاکی در نمونه نانو کامپوزیت حاصل از فرآوری هم‌زن اصطکاکی

#### ۴- نتیجه گیری

بررسی اندازه دانه در دو نمونه کامپوزیت سطحی و فرآوری شده، مشخص گردید در نمونه کامپوزیت سطحی بدلیل نقش ذرات سرامیکی در کنترل رشد دانه ها، ساختار ریز دانه تری حاصل میگردد. نتیجه این امر سختی و مقاومت سایشی بالاتر نمونه کامپوزیت سطحی در مقایسه با نمونه فرآوری شده است. ۳- سختی در منطقه هم‌زن در نمونه‌های کامپوزیت شده به دلیل حضور ذرات سخت سرامیکی و نیز کاهش اندازه دانه در پی وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی و مطابق رابطه هال پیچ به طور چشمگیری نسبت به فلز پایه افزایش می‌یابد به نحویکه سختی از

۱- ذرات  $Al_2O_3-TiB_2$  توسط فرایند FSP، با موفقیت و به طور همگن در ناحیه هم‌زن توزیع می‌شود و لایه کامپوزیت سطحی ایجاد شده با زیر لایه آلومینیوم دارای چسبندگی مناسب است. ۲- بررسی ریز ساختار حاکی از ریز شدن دانه‌ها در منطقه هم‌زن به دلیل تبلور مجدد دینامیکی طی فرآوری هم‌زن اصطکاکی است. ناحیه ترمومکانیکی بین دو ناحیه متأثر از حرارت و هم‌زن است که به دلیل کاهش میزان گرما و کرنش ایجاد شده در مقایسه با منطقه هم‌زن، دارای اندازه دانه بزرگتر و در مقایسه با اندازه دانه فلز پایه، دارای اندازه دانه کوچکتر است. همچنین در

- [5] G. Mathers, "The welding of aluminium and its alloys", Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington Cambridge CB1 6AH, England, pp. 37-50, 2002.
- [6] G. Nandipati, N. Rao. Damera & R. Nallu, "Effect of Microstructural changes on Mechanical properties of Friction stir welded Nano SiC reinforced AA6061 composite", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2, pp. 6491-6499, 2010.
- [7] Kurt, I. Uygur & E. Cete, "Surface Modification of aluminium by friction stir processing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, pp. 313-317, 2011.
- [8] R. S. Mishra, Z. Y. Ma & I. Charit, "Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite", Materials Science and Engineering, Vol. 341A, pp. 307-310, 2003.
- [9] R. S. Mishra, "Friction Stir Welding and Processing, Center for Friction Stir Processing", University of Missouri-Rolla Murray W. Mahoney, Rockwell Scientific Company, ASM International, pp. 1-5, 2007.
- [10] S. A. Zarghani, S. F. Kashani-Bozorg & A. Zarei-Hanzaki, "Microstructures and mechanical properties of  $Al/Al_2O_3$  surface nano-composite layer produced by friction stir processing", Material Science Engineering, Vol. 500A, pp. 84-91, 2009.
- [11] M. Yang, C. Xu, C. Wu, K. Lin, Y. Chao & L. An, "Fabrication of AA6061/ $Al_2O_3$  nano ceramic particle reinforced composite coating by using friction stir processing", Journal of Materials Science, Vol. 45, pp. 4431-4438, 2010.
- [12] Y. Mazaheri, F. Karimzadeh & M. H. Enayati, "A novel technique for development of A356/ $Al_2O_3$  surface nanocomposite by friction stir processing", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 10, pp. 04-15, 2011.
- [13] S.A. Alidokht, A. Abdollah-zadeh, S. Soleymani, H. Assadi, "Microstructure and tribological performance of an aluminum alloy based hybrid composite produced by friction stir processing", Material Design, Vol. 32, pp. 2727-2733, 2011.
- ۵۶ ویکرز در آلومینیوم خام به ۸۵.۱ در نمونه فرآوری شده و ۹۵.۲ در نمونه کامپوزیت سطحی میرسد.
- ۴- سختی در منطقه HAZ به دلیل ساختار درشت و همچنین عدم وجود ذرات سرامیکی در این ناحیه دارای کمترین مقدار است.
- ۵- مقاومت سایشی نمونه کامپوزیت سطحی بالاترین مقدار می باشد، پس از آن نمونه فرآوری شده و پایین ترین مقاومت سایشی مربوط به آلومینیوم خام است. دلیل افزایش مقاومت سایشی در نمونه کامپوزیت سطحی ریزشیدن دانه ها، تاثیر ذرات  $Al_2O_3-TiB_2$  در افزایش سختی و کنترل اندازه دانه ها می باشد.
- ۶- مکانیزم سایش در نمونه آلومینیوم خام شامل چسبان شدید و لایه ای، در نمونه فرآوری شده چسبان نسبتاً شدید و در نمونه کامپوزیت سطحی چسبان ضعیف است. همچنین در نمونه کامپوزیت سطحی بدلیل سختی بالاتر و تردی بیشتر، براده های ناشی از سایش کوچکتر و ظریف تر است.

## ۵- مراجع

- [1] M. Indira Rani, R. N. Marpu & A. C. S. Kumar, "A study of process parameters of friction stir welded AA 6061 Aluminum alloy in O and T6 conditions", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 6, No. 2, pp. 293-297, 2011.
- [2] V. Balasubramanian, "Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters", Materials Science and Engineering: A, Vol. 480, pp. 397-40, 2008.
- [3] K. Kalaiselvan & N. Murugan, "Role of friction stir welding parameters on tensile strength of AA6061-B4C composite joints", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 23, pp. 616-624, 2013.
- [4] M. Samiee, A. Honarbakhsh & F. Kashani, "Microstructural and mechanical evaluations of  $Al/AlN$  Nano-Composite surface layer produced via friction stir processing", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 9, pp. 1622-1626, 2011.

[14] Zarghani, S. F. Kashani-Bozorg & A. Zarei-Hanzaki, "Wear assessment of Al/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites surface layer produced using friction stir processing", *Wear*, Vol. 270, pp. 403-412, 2011.

[۱۵] م.ع. صفرخانیان، م. گودرزی و س.م.ع. بوتراپی، " مکانیزم تشکیل دانه ها در منطقه اختلاط حین جوشکاری اصطکاکی اختلاطی و بررسی سرعت دورانی ابزار و سرعت جوشکاری بر اندازه دانه ها"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۶، شماره ۲، صفحه ۹-۱۹، ۱۳۹۱.

[16] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering R* 50, pp. 1-78, 2005.

[17] B. Zahmatkesh, M. H. Enayati & F. Karimzadeh, "Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024 alloy", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 4891-4896, 2010.

[18] N. Hosseini, F. Karimzadeh, M. H. Abbasi & M. H. Enayati, "A comparative study on the wear properties of coarse-grained Al6061 alloy and nanostructured Al6061-Al2O<sub>3</sub> composites", *Tribology International*, Vol. 54, pp. 58-67, 2012.