

ارزیابی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت Al/WC ایجاد شده بر آلیاژ Al6061 به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز

ساسان خورشید، صاحبعلی منافی* و سید حسین بدیعی

دانشکده فنی و مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۰۹/۲۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۱۱/۲۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴

چکیده

در این تحقیق از فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز جهت ایجاد لایه کامپوزیت آلومینیم-کاربید تنگستن بر زیر لایه Al6061 استفاده گردید و خواص مکانیکی آن با توجه به ریزساختار ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. برای نمونه‌ها جوشکاری با جریان‌های مختلف ۱۵۵ و ۱۶۵ آمپر ایجاد گردید. بررسی‌های ریزساختاری، سختی‌سنجی و تست سایش روی نمونه‌ها انجام شد و ارتباط بین داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اعمال پودرهای نانوساختاری کاربید تنگستن با محدود کردن رشد دانه طی انجماد، باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود. با بررسی نتایج تست‌های سختی و سایش، افزایش بیش از ۱/۵ برابری سختی و همچنین افزایش مقاومت به سایش قابل توجه نسبت به نمونه اولیه مشاهده شد که کارآمدی این روش کامپوزیت‌سازی را در افزایش مقاومت سطحی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، نانوکامپوزیت، تست سایش، تست سختی، Al6061.

۱- مقدمه

در شاخه‌های گسترده‌ای از صنایع مطرح شده است، که از آن جمله صنایع هوافضا، اتومبیل، کامپیوتر، ارتباطات و الکترونیک می‌باشد. در دسترس بودن فراوان آلومینیم با قیمت نازل از دیگر عوامل استفاده از آلومینیم در اجزاء ساختاری می‌باشد. از سوی دیگر در بسیاری از کاربردها عمر مفید اجزا به شرایط سطحی آنها، مانند مقاومت به سایش بستگی دارد. در اینگونه کاربردها مطلوب است که سطح با فازهای سرامیکی تقویت شده و بالک با ترکیب

با رشد تاثیر کارایی در فضای رقابتی در تولید تجهیزات، منابع کمیاب و الزام در کاهش استفاده از انرژی، تحقیقات و تلاش‌ها برای بدست آوردن مواد سبک وزن با خواص مکانیکی بالا متمرکز شده است. با این پیش زمینه، آلومینیم و آلیاژهای آن به طور مداوم اهمیت بیشتری پیدا نمودند. آلیاژهای آلومینیم به عنوان مواد مهمی در تولیدات صنعتی

* عهده‌دار مکاتبات: صاحبعلی منافی

نشانی: شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۹۴۲۸۳، پست الکترونیکی: a_manafi@iau-shahrood.ac.ir

حدود 0.008 g/m نمونه اولیه به 0.002 برای نمونه بهینه کاهش یافت [۱۱].

همچنین در تحقیقی دیگر مشابه، که توسط Gan و همکارانش بر کامپوزیت‌سازی آلیاژ Al6061 به کمک ذراتی میکرونی SiC به روش فرآیند اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفت، میزان سختی به سبب عدم توزیع مناسب ذرات در زمینه بسیار متغیر اندازه‌گیری شد و در مقدار ماکزیمم نوسانات سختی، به حدود 190 HV رسید. نتایج تست سایش کاهش نرخ سایش از حدود 0.04 mg/m نمونه اولیه به 0.01 mg/m برای نمونه بهینه در طول لغزش 1000 متر را نشان داد [۱۲].

در این تحقیق، کامپوزیت‌سازی در حضور پودر نانو ساختاری کاربرد تنگستن توسط فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن گاز باعث ایجاد لایه‌های ریزدانه گردید و با بهینه‌سازی آمپر جوشکاری، دانه‌هایی ریزتر تشکیل شدند. لایه سطحی نانو کامپوزیتی Al6061/WC که با سرعت پیشروی 10 mm/s و آمپر 165 ایجاد شد، ریزترین دانه‌ها را ایجاد نمود. بهینه شدن میزان سختی و مقاومت به سایش لایه سطحی نانو کامپوزیتی Al6061/WC به توزیع مناسب ذرات در مقیاس نانو و ریز شدن بیشتر دانه‌ها به انتخاب پارامتر بهینه فرآیند نسبت داده می‌شود.

۲- فعالیت‌های تجربی

صفحات آلیاژ Al6061 با ضخامت 6 mm به عنوان نمونه اولیه مورد استفاده قرار گرفت. پس از برش ورق‌ها به قطعاتی با ابعاد $150 \times 100 \text{ mm}^2$ ، سنباده‌زنی و استون شویی به منظور رفع آلودگی انجام گردید. این آلیاژ دارای نقطه ذوب $582-652^\circ \text{C}$ و سختی پایه 107 HV بود. سعی بر آن شد که با کنترل پارامترهای فرآیند مانع از افزایش بی‌رویه دمای آن شده و در بهترین شرایط مانع از ذوب زیاد و عمیق لایه سطحی آلیاژ پایه شد. پودر نانو ساختاری کاربرد تنگستن (WC) با خلوص 99.9% و اندازه متوسط دانه‌های 20

اولیه باقی بماند تا چقرمگی آن بالا باشد، که این امر منجر به توسعه کامپوزیت‌های سطحی شد [۱]. فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز یکی از روش‌های نوین صنعتی برای دستیابی به خواص سطحی مطلوب در قطعات می‌باشد. یکی از ویژگی‌های این روش ایجاد لایه‌های با دانه‌های ریز می‌باشد، چرا که لایه‌ای سطحی از ماده به واسطه بکارگیری از حجم قوس محدود و قابلیت تنظیم حرارت ورودی توسط کنترل آمپر و سرعت پیشروی تحت حرارت محدود قرار می‌گیرد [۲]. تحقیقات زیادی نیز در زمینه قابلیت این فرآیند برای ایجاد لایه سطحی کامپوزیتی انجام شده و نتایج امیدوار کننده‌ای نیز حاصل شده است [۳-۷].

بنابراین به واسطه کاربرد وسیع آلیاژ آلومینیم و ضعف‌های مکانیکی آن (سختی و مقاومت به سایش)، سعی بر آن شد که در این تحقیق به منظور ارتقاء خواص موضعی سطحی به ایجاد لایه کامپوزیت سطحی با استفاده از فرآیند ذوبی جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پرداخته شود. در طی اعمال فرآیند، دمای سطح به دلیل اعمال فرآیند جوشکاری تا دمای ایجاد فاز مذاب بالا می‌رود و به دلیل فاز مذاب به وجود آمده، قابلیت مخلوط شدن پودر مورد نظر و ایجاد کامپوزیت سطحی با انجماد فاز مذاب حاصل گردید. از چالش‌های مهم در دستیابی به کامپوزیت با ساختار مناسب و بدون عیب، کنترل پارامترهای فرآیند به منظور ممانعت از انجام واکنش‌های مخرب فصل مشترک مذاب و پودر و تشکیل فازهای مضر می‌باشد [۸-۱۰].

بررسی‌های زیادی برای دستیابی به روشی جهت تقویت موضعی آلیاژ آلومینیم از طریق کامپوزیت‌سازی انجام گردید. در تحقیقی که توسط Aruri و همکارانش بر روی کامپوزیت‌سازی آلیاژ Al6061 به کمک ذراتی میکرونی (SiC+Gr) و همچنین $\text{SiC} + \text{Al}_2\text{O}_3$ به کمک فرآیند اصطکاکی اغتشاشی صورت گرفت. نتایج نشان داد که میزان سختی در بهینه حالت پارامتر اعمالی، حدود 30% افزایش می‌یابد و به حدود 130 HV رسید. همچنین نرخ کاهش وزن نمونه سایش در طول لغزش 1000 متر، از

فرآیندهای جوشکاری نقش تعیین کننده‌ای در کیفیت مکانیکی جوش ایفا می‌کند، بطوریکه ریزدانه‌گی به سبب مرزدانه‌های زیاد و ممانعت از حرکت نابجایی‌ها باعث افزایش استحکام و درشت دانگی، کاهش استحکام را در پی دارد. در شرایط کامپوزیت‌سازی کنترل حرارت ورودی بسیار در بدست آوردن زمینه مناسب با توزیع کامل ذرات ثانویه تاثیرگذار است. حرارت اثر دوگانه بر این توزیع دارد بطوریکه حرارت زیاد علاوه بر ذوب فلز پایه می‌تواند باعث ذوب سطحی ذرات کامپوزیتی و بهم پیوستگی آنها و در نتیجه آگلومره شدن شود. همچنین حرارت کم باعث ذوب نامناسب فلز پایه و در نتیجه عدم توزیع نامناسب ذرات کامپوزیتی در زمینه شود [۱۳]. در حین فرآیند GTAW، ماده دستخوش تغییر فرم شدید در دمای بالا (حرارت ایجاد می‌شود به اختلاف پتانسیل دو قطب و جریان قوس) شده که منجر به شکست دانه‌های اولیه و ایجاد دانه‌های جدید و تبلور مجدد دینامیکی داده شده می‌گردد. در واقع دانه‌های جدید در مرزدانه‌های قدیمی جوانه زده و با ادامه تغییر شکل ماده، چگالی نابجایی دانه‌های جدید افزایش می‌یابد و بنابراین، نیروی محرکه لازم برای رشد بیشتر دانه‌ها کاهش یافته و در نهایت رشد دانه‌های در حال تبلور مجدد متوقف می‌شود. عامل دیگر محدود کننده رشد دانه‌های جدید در حین GTAW، وجود ذرات ثانویه در مرزدانه‌های در حال مهاجرت است که اصلی‌ترین عامل در ریزدانه‌گی و افزایش خواص مکانیکی قطعه می‌شود. همانطور که در تصاویر میکروسکوپ‌های نوری (OM) و الکترونی (SEM) شکل ۲ مشاهده می‌شود نمونه‌های ایجاد شده با سرعت ثابت جابجایی جوشکاری ۱۰ mm/s در دو آمپر مختلف آورده شده است که نشان از توزیع مناسب نانوپودرها در فاز زمینه در نمونه ۱۶۵ آمپر (شکل ب و د)، نسبت به نمونه ۱۵۵ آمپر (شکل الف و ج) دارد. در نمونه ۱۵۵ آمپر (شکل ج) آگلومره شدن منطقه‌ای را به واسطه تولید حرارت نامناسب برای توزیع نانوپودرها در طی جوشکاری این نمونه را می‌توان مشاهده نمود.

نانومتری تهیه و جهت اعمال پودر بر روی سطح نمونه شیاری با ابعاد $2 \times 1 \times 10 \text{ mm}^3$ ایجاد و تا سطح قطعه از نانوپودر پر گردید. فرآیند جوشکاری از گاز آرگون با فشار حدود ۲۰ لیتر بر دقیقه به عنوان گاز محافظ و الکتروود جنس تنگستن-توریم با قطر ۲/۴ میلی‌متر و از دمش هوا برای سریع سرد شدن قطعات پس از اتمام فرآیند استفاده گردید. آمپرهای جوشکاری مختلف ۱۵۵، ۱۶۵ در ولتاژ ثابت و سرعت پیشروی جوشکاری ۱۰ mm/s در نظر گرفته شد. انتخاب پارامترهای مختلف جوشکاری با هدف دستیابی به بهترین پارامتر برای پوشش‌دهی نمونه‌ها و دستیابی به بهترین خواص مکانیکی تعیین گردید. پس از اعمال فرآیند جوشکاری نمونه‌ها به منظور بررسی‌های ریزساختاری و تست‌های مکانیکی، مطابق شکل ۱ برش عرضی داده شد. سختی‌سنجی ویکرز تحت نیروی ۲۰۰ گرم و زمان توقف ۱۵ ثانیه و تست سایش پین بر روی دیسک بر اساس استاندارد ASTM G99 انجام شد.



شکل ۱: برش عرضی نمونه کامپوزیت‌سازی شده.

۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا با توجه به متغیرهای فرآیند به بررسی ریزساختار ایجاد شده طی جوشکاری پرداخته و سپس روند تاثیرگذاری ریزساختار بر تست‌های مکانیکی سختی و سایش را مورد بررسی قرار داده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بزرگی دانه در ناحیه ذوب بستگی زیادی به مقدار حرارت ورودی و سرعت سرد شدن قطعه، در حین و پس از فرآیند جوشکاری دارد. بنابراین کنترل حرارت در کلیه

عمدتاً تفسیر سختی در مقاطع مختلف قطعه، بر اساس ریزساختار بدست آمده در آن مناطق قابل توجه می‌باشد. با توجه به آنکه فرآیند کامپوزیت‌سازی با میکرو پودر توسط فرآیند GTAW باعث کاهش اندازه دانه و یکنواختی ساختار در آلیاژها می‌شود، سختی در این فرآیند افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از سختی حساسیت شدید آن به متغیرهای فرآیند را نشان می‌دهد.

طبق رابطه هال-پچ که ارتباط سختی و اندازه دانه را بیان می‌کند با افزایش اندازه دانه سختی کاهش می‌یابد. بنابراین هر عاملی که سبب ریزدانگی بیشتر شود، افزایش سختی را در پی دارد، خواه این عامل افزایش یا کاهش سرعت پیشروی یا کاهش یا افزایش آمپر و یا عملیات حرارتی باشد.

$$\sigma_Y = \sigma_i + \frac{K_Y}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

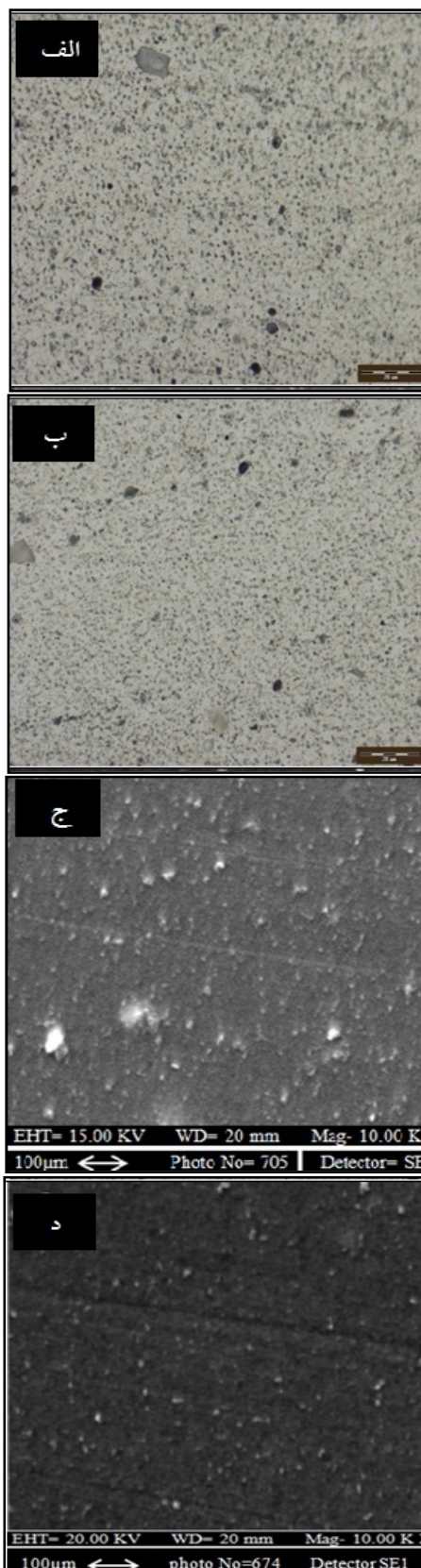
σ_i = تنش مخالف با حرکت نابجایی

σ_Y = تنش تسلیم

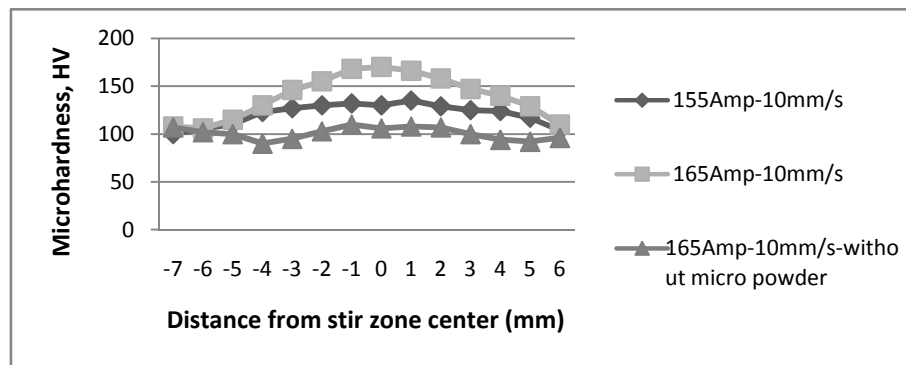
K = پارامتر قفل شونده و D = قطر متوسط دانه.

مکانیزم‌های افزایش سختی در اتصال‌های ایجاد شده در آلیاژهای با و بدون مکانیزم رسوب سخت می‌تواند تا حدودی متفاوت از یکدیگر باشد. بطوریکه کاهش اندازه دانه در آلیاژهای بدون مکانیزم رسوب سخت تنها عامل افزایش سختی می‌باشد، ولی در آلیاژهای رسوب سخت علاوه بر این مکانیزم افزایش سختی ناشی از سختی خود رسوبات را نیز می‌توان در نظر گرفت. رسوبات موجود می‌توانند در مرز دانه‌ها قرار گرفته و از رشد دانه‌ها در دمای بالا جلوگیری کنند و همچنین با انتقال نیرو از فلز پایه به این رسوبات (تا حدی همانند کامپوزیت) سختی را افزایش دهد.

همانطوریکه در شکل ۳ دیده می‌شود نتایج میکروسختی سنجی بدست آمده با مشاهدات ریزساختاری قابل تفسیر می‌باشد. ساختار نانو ساختاری نمونه ۱۶۵ آمپر باعث ایجاد بالاترین سختی و نمونه بدون پودر جوشکاری شده دارای گراف سختی در محدود آلیاژ پایه دارد و فقط در ناحیه متاثر



شکل ۲: تصاویر OM (الف و ب) و SEM (ج و د) از نمونه‌های ایجاد شده با سرعت جابجایی جوشکاری ۱۰ mm/s، (الف و ج) ۱۵۵ آمپر، (ب و د) ۱۶۵ آمپر.



شکل ۳: نتایج میکروسختی از مقاطع نمونه‌های جوشکاری شده.

سایر نمونه‌ها بیشتر است. به عبارتی مقاومت به سایش به ترتیب آلیاژ Al6061 اولیه، نمونه جوشکاری شده بدون پودر و آمپر ۱۶۵، نمونه ۱۵۵ آمپر با پودر تا نمونه ۱۶۵ آمپر با پودر به تدریج افزایش می‌یابد. اختلاف در کاهش وزن بین‌ها در نمونه‌های ۱۶۵ آمپر بدون پودر و ۱۵۵ آمپر با پودر خیلی قابل ملاحظه نمی‌باشد.

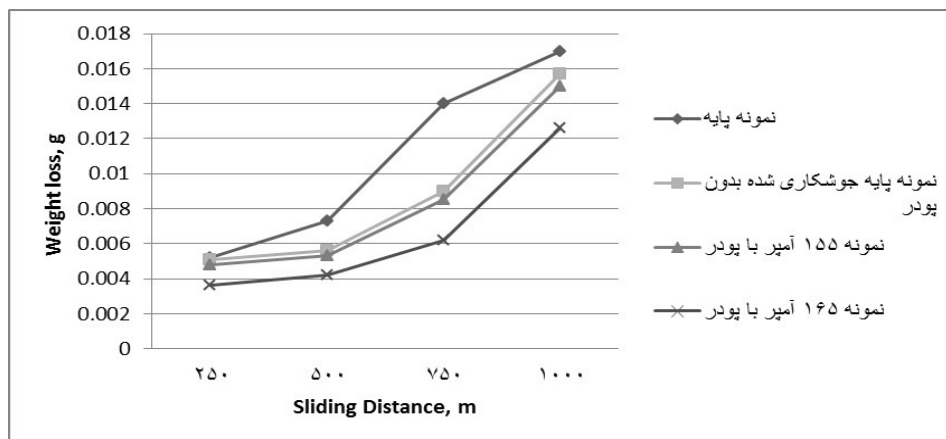
در یک نیروی ثابت نرخ سایش نمونه جوشکاری شده بدون پودر کمتر از نرخ سایش آلیاژ پایه است. با افزوده شدن ذرات تقویت کننده به آلیاژ و انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری، از طریق بهبود الگوی توزیع ذرات نرخ سایش کاهش می‌یابد. در واقع لایه‌ای که ساختار دانه ریز به همراه توزیع مناسب ذرات دانه ریز در آن وجود دارد، بالاترین مقاومت به سایش در آن مشاهده می‌شود. همانند نتایج سختی عوامل مشخصی نیز بر این اختلاف نتایج دخالت دارند. از جمله این عوامل می‌توان به حضور نانوپودرهای کامپوزیت کننده، حرارت ورودی حاصل از آمپر و خطای دستگاه و انسانی در انجام جوشکاری و انجام تست اشاره نمود [۱۴]. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با اعمال جوشکاری بر نمونه اولیه و اضافه کردن ذرات تقویت کننده و همچنین انتخاب آمپر بهینه ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مقاومت به سایش افزایش می‌یابد.

در یک نیروی ثابت نرخ سایش نمونه جوشکاری شده بدون

از حرارت (HAZ) افت سختی نسبی مشاهده می‌شود. اگر چه نمونه ۱۵۵ آمپر حرارت لازم جهت توزیع نانوپودرها را بصورت کامل ایجاد نکرد اما این نمونه دارای محدود سختی بیشتری از نمونه بدون پودر دارد. بالاترین سختی بدست آمده در نمونه ۱۶۵ آمپر بیشتر از ۱/۵ برابر سختی آلیاژ پایه می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل شده در تحقیق ذکر شده توسط Aruri و همکارانش [۱۱] می‌توان بیان نمود که علاوه بر ویژگی‌های متفاوت میکروپودرهای استفاده شده، حال جامد بودن فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، توزیع مناسب ذرات را با مشکل مواجه کرده و سختی در صورتی که پارامترهای جوشکاری قوسی تنگستن-گاز مناسب انتخاب گردد، رشد بیشتری خواهد داشت. همچنین با توجه به نتایج ذکر شده در تحقیق Gan و همکارانش [۱۲] تغییرات شدید سختی در مقطع عرضی نمونه، نمی‌توان مقایسه مطمئنی با نتایج حاصل در این تحقیق انجام داد.

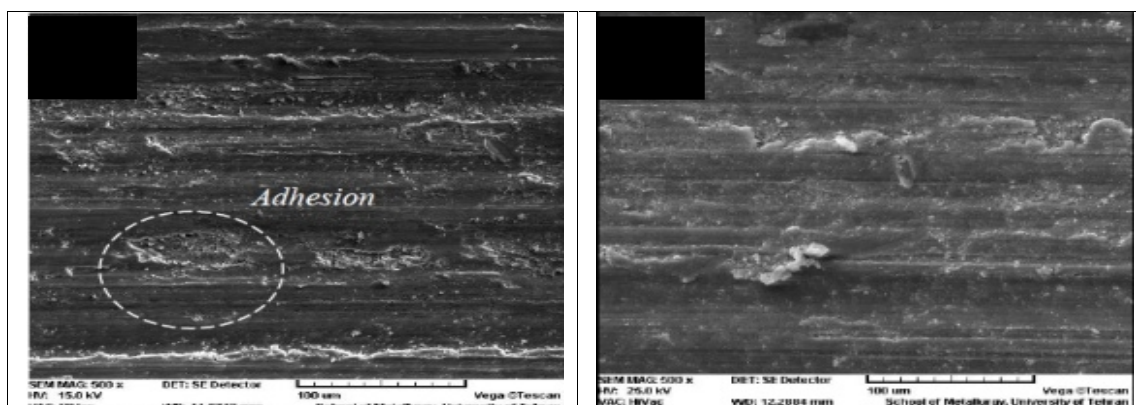
به منظور قابلیت مقایسه نتایج کلیه تست‌های سایش بین بر روی دیسک با بار ثابت اعمالی بین ۱۵ نیوتن انجام شد و به منظور یکسان بودن زبری سطح نمونه‌های مورد تست، کلیه نمونه‌ها با سنباده مشخص آماده‌سازی اولیه شد. همانطور که مشاهده می‌شود (شکل ۴) میزان وزن کاهش یافته بین کامپوزیت‌سازی شده تحت آمپر ۱۶۵ با پودر از دیگر بین‌ها کمتر و در بین تهیه شده از آلیاژ اولیه میزان کاهش وزن از



شکل ۴: نمودار وزن کاسته شده بین بر حسب فاصله لغزش برای لایه سطحی نمونه‌های ایجاد شده.

جدول ۱: نتایج تغییرات ضریب اصطکاک متوسط برای نمونه ایجاد شده.

نمونه	نمونه ۱۶۵ آمپر با پودر	نمونه ۱۵۵ آمپر با پودر	نمونه جوشکاری شده بدون پودر	نمونه پایه
ضریب اصطکاک	۰/۲	۰/۳۸	۰/۵۱	۰/۵۸



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پین ساییده شده (الف) نمونه اولیه (Al6061، ب) نمونه کامپوزیت‌سازی شده با آمپر ۱۶۵.

کامپوزیت کننده، حرارت ورودی حاصل از آمپر و خطای دستگاه و انسانی در انجام جوشکاری و انجام تست اشاره نمود [۱۴]. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با اعمال جوشکاری بر نمونه اولیه و اضافه کردن ذرات تقویت کننده و همچنین انتخاب آمپر بهینه ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مقاومت به سایش افزایش می‌یابد. به منظور بررسی مناسب‌تر سطح سایش از تصاویر SEM (شکل ۵) استفاده گردید. در تصویر (الف) که مربوط

پودر کمتر از نرخ سایش آلیاژ پایه است. با افزوده شدن ذرات تقویت کننده به آلیاژ و انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری، از طریق بهبود الگوی توزیع ذرات نرخ سایش کاهش می‌یابد. در واقع لایه‌ای که ساختار دانه ریز به همراه توزیع مناسب ذرات دانه ریز در آن وجود دارد، بالاترین مقاومت به سایش در آن مشاهده می‌شود. همانند نتایج سختی عوامل مشخصی نیز بر این اختلاف نتایج دخالت دارند. از جمله این عوامل می‌توان به حضور نانوپودرهای

شد که بیش از ۱/۵ برابر سختی آلیاژ پایه می‌باشد. در بررسی رفتار سایشی لایه‌های سطحی ایجاد شده، مشاهده شد که با افزودن پودر و سرعت پیشروی ۱۰ mm/s و آمپر ۱۶۵، مقاومت سایشی نسبت به زیر لایه (Al6061) افزایش و نرخ سایش در طول لغزش ۱۰۰۰ متر، به حدود ۰/۰۱۳ گرم کاهش پیدا نمود. در مجموع می‌توان با توجه به نتایج بیان نمود که ایجاد لایه سطحی کامپوزیتی خواص مکانیکی نمونه‌ها را به مقدار قابل توجهی افزایش داد که کارآمدی این روش را با توجه به هزینه مناسب آن نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] J. Grandfield, D.G. Eskin, "Light Alloy: Direct-Chill Casting of Light Alloys: Science and Technology", Wiley, New York, 2013.
- [2] H. William-Minnick, M.A. Prosser, "Gas Tungsten Arc Welding Handbook", Goodheart-Willcox Company, 2012.
- [3] S. Mridha, A.N. Idriss, T.N. Baker, *Advance Material Research*, **445**, 2012, 655.
- [4] X.H. Wang, S.L. Song, Z.D. Zou, S.Y. Qu, *Materials Science and Engineering: A*, **441**, 2006, 60.
- [5] X.H. Wang, Z. Zengda, S. Sili, *Wear*, **260**, 2006, 705.
- [6] S. Mridha, A.N. Idriss, M.A. Maleque, A. Souad, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, **7**, 2012, 48.
- [7] S. Buytoz, M. Ulutan, M. Mustafa-Yildirim, *Applied Surface Science*, **252**, 2005 1313.
- [8] W. Xinhong, Z. Zengda, S. Sili, *Wear*, **260**, 2006, 705.
- [9] S.W. Wang, Y.C. Lin, Y.Y. Tsai, *Journal of Materials Processing Technology*, **140**, 2003, 682.
- [10] J.H. Chen, P.N. Chen, P.H. Hua, M.C. Chen, Y.Y. Chang, W. Wu, *Materials Transactions*, **50**, 2009, 689.
- [11] D. Aruri, K. Adepu, K. Bazavadaa, *Journal of materials research technology*, **4**, 2013, 362.
- [12] Y.X. Gan, D. Solomon, *Materials*, **12**, 2010, 329.
- [13] J. Wanberg, "Composite Materials-Fabrication", Wolfgang Publications, Incorporated, 2012.
- [14] G.B. Veeresh-Kumar, N. Selvaraj, M.S. Bhagyashekar, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, **9**, 2013, 43.
- [15] M.A. Maleque, A.A. Adebisi, Proceedings of Regional Tribology Conference, 2011.

به فلز اولیه (آلیاژ Al6061) می‌باشد شدیدترین سایش‌ها نسبت به نمونه‌های دیگر دیده شد. شیارها و خراش‌های بی‌شمار که اکثراً موازی با جهت لغزش می‌باشد، در تمام سطح بین‌ها دیده می‌شود. این نشانه‌ها، مشخصات مکانیزم سایش خراشان می‌باشد که دیسک فولادی سخت یا تکه‌های جدا و کنده شده ما بین دو سطح پین و دیسک (با حذف تکه‌های زبری) باعث ایجاد شیار و گودی بر روی سطح پین می‌باشند. کندگی خط چین شده در شکل ۵-الف حاکی از مکانیزم سایش چسبنده نیز در این منطقه می‌باشد [۱۵]. در واقع ترکیب این دو مکانیزم، شدیدترین سطح سایشی را در بین تمام نمونه‌ها رقم زده است. حال آنکه نمونه کامپوزیت شده سطح پین صاف و یکنواخت و بدون کندگی را نشان می‌دهد. تست سایش صورت گرفته در تحقیق Aruri و همکارانش، به سبب اعلام نتایج در طول لغزش‌های متفاوت با تحقیق حاضر و همچنین تغییرات ناگهانی در میزان نرخ سایش نمونه اولیه، نتایج قابل مقایسه نمی‌باشد. ولی با توجه به نتایج نرخ سایش در نمونه با بهینه پارامتر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به یک چهارم نمونه اولیه کاهش یافت. همچنین نتایج تست سایش در تحقیق Gan و همکارانش نیز کاهش یک چهارم نرخ سایش نمونه کامپوزیت‌سازی شده نسبت به نمونه اولیه را نشان داد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ماکزیمم میزان سختی در نمونه نانو کامپوزیت‌سازی با آمپر ۱۶۵ حدود ۱۶۰ HV اندازه‌گیری