

# اثر تغییر جریان جوشکاری و درصد حجمی ذرات SiC بر سختی و مقاومت به سایش لایه کامپوزیتی ایجاد شده بر روی فولاد ASTM A106 با استفاده از فرآیند GTAW

حسین مظاهری<sup>\*</sup>، محمود فاضل نجف آبادی<sup>۱</sup>، علیرضا اعلائی<sup>۲</sup>

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

۲- استادیار دانشگاه پیام نور، بخش فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، اصفهان، ایران

۳- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران

\*Mazaheri2646@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۰۱، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۶/۳۰)

## چکیده

در این پژوهش ایجاد پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات کاربید سیلیسیوم بر سطح فولاد ASTM A106-Gr.B با به کارگیری فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز بررسی شد. بدین منظور ذرات کاربید سیلیسیوم با درصدهای حجمی متفاوت بر سطح فولاد مورد نظر پیش نشانی شد و با تغییر شدت جریان، فرآیند ذوب و اختلاط آنها با فلز پایه انجام گردید. مطالعه ریز ساختار پوشش ایجاد شده توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با آنالیز نقطه‌ای انجام گرفت. یافته‌های آزمون‌ها نشان داد که پوشش حاصله ساختار دندریتی حاوی تقویت کننده کاربید سیلیسیوم را دارا می‌باشد که می‌تواند باعث بهبود سختی و رفتار سایشی پوشش مذکور شود. سختی پوشش‌ها در آزمون‌های ریز سختی سنجی و رفتار سایشی پوشش‌ها توسط آزمون سایش به صورت رفت و برگشتی ارزیابی شد. نتایج آزمون ریز سختی سنجی نشان دهنده افزایش سختی پوشش ایجاد شده (حدود ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ ویکرز) نسبت به نمونه بدون پوشش (حدود ۲۰۰ ویکرز) بود. بررسی‌های رفتار سایشی پوشش‌ها بیانگر بهبود چشمگیر رفتار سایشی آنها در اثر افزودن تقویت کننده کاربید سیلیسیوم بود. مکانیزم عمده سایش در نمونه بدون پوشش سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی و در نمونه‌های پوشش داده شده مخلوطی از سایش ورقه‌ای، اکسایش سطحی و سایش چسبان تشخیص داده شد.

## واژه‌های کلیدی:

جوشکاری قوسی تنگستن - گاز، پوشش دهی سطحی، کامپوزیت فولاد/کاربید سیلیسیوم.

## ۱- مقدمه

مقاومت سایشی یا رفتار خستگی آنها را بهبود دهد [۱]. یکی از روش‌های سخت کاری سطحی<sup>۱</sup> استفاده از روش‌های معمول

عملیات سطحی بر روی فولادها می‌تواند مقاومت خوردگی،

نقص بوده و باعث افزایش قابل توجه سختی خواهد شد [۷].  
اسمان<sup>۵</sup> و همکاران ذرات کاربید سیلیسیوم را با روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز بر روی فولاد AISI 8620 پوشش دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد ساختار تازه شکل گرفته در سطح فولاد می‌تواند مقاومت به سایش و سختی سطح را بهبود بخشد [۸].

فولاد مقاوم به حرارت ASTM A106 Gr.B در صنایع نفت، پتروشیمی و شیمیایی به دلیل پایداری در شرایط سرویس‌دهی با دمای بالا، دارای کاربرد بسیار وسیعی است ولی سختی و مقاومت به سایش ضعیف، محدودیت‌هایی را برای این فولاد ایجاد کرده است [۹-۱۰]. در این پژوهش از روش جوشکاری GTAW به منظور تشکیل لایه‌ای کامپوزیتی حاوی ذرات SiC بر روی سطح فولاد ASTM A106 Gr.B استفاده گردید. در این راستا، تأثیر تغییر درصد حجمی SiC و تغییر شدت جریان جوشکاری بر ساختار، سختی و رفتار سایشی پوشش ایجاد شده مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش آزمون

در این پژوهش از فولاد کربنی ASTM A106 Gr.B (معادل با فولاد St 45.8 مطابق با استاندارد DIN) با ابعاد  $150 \times 45 \times 8$  میلی‌متر استفاده شد. در ابتدا قطعات تمیز شده و تا شماره ۳۲۰ سنباده زده شد تا آلودگی‌های سطحی آن بر طرف گردد. سپس آنالیز عنصری و بررسی ریز ساختار میکروسکوپی روی ماده اولیه انجام شد. برای ایجاد لایه سطحی از پودر SiC با ابعاد متوسط ذرات ۳ تا ۴ میکرومتر استفاده شد. ثابت سازی ذرات با آغشته نمودن آنها به اتانول و استفاده از شابلون حاوی حفره با ابعاد  $130 \times 12$  میلی‌متر انجام شد. برای ذوب سطحی فولاد، از روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز (GTAW) استفاده شد. گاز محافظ مصرفی آرگون با خلوص ۹۹/۹۹، قطر الکترود تنگستنی ۲/۴ میلی‌متر و شکل نوک الکترود مخروطی بود. عملیات ذوب سطحی بر روی گروه‌هایی از نمونه‌ها در شرایط مختلف مطابق با جدول (۱) انجام شد.

جوشکاری برای پوشش‌دهی روی سطح قطعات است. ویژگی منحصر به فرد این روش ضخامت زیاد پوشش، نرخ رسوب‌گذاری بالا، چسبندگی مناسب پوشش به زیر لایه و همچنین سهولت در ایجاد آن است. همین عوامل سبب گستردگی کاربرد آن برای پوشش‌دهی قطعات شده است [۲-۳].

یکی از روش‌های متداول بهبود رفتار سطحی، افزودن عناصر آلیاژی هم‌چون کرم، کربن، کبالت و مولیبدن یا ذرات سرامیکی نظیر WC، TiC، SiC و  $B_4C$  به مذاب ایجاد شده در سطح و تشکیل لایه‌ای با ضخامت قابل توجه بر روی سطح است [۴]. به عنوان مثال یوچی لین<sup>۲</sup> و همکارانش در پژوهشی به بررسی ریزساختار و عملکرد سایشی لایه SiC پوشش داده شده بر روی فولاد کشته شده SKD61 با روش GTAW پرداخته‌اند. آنها گزارش داده‌اند که ذرات SiC در طی فرآیند GTAW تجزیه شده و فازهای شبه پایدار مانند  $Fe_3C$  و  $Fe_8Si_2$  و هم‌چنین فاز پایدار گرافیت در سیستم سه تایی Fe-Si-C به وجود آمده‌اند. این محققین مدعی شده‌اند که همین رخدادها منجر به افزایش سختی و مقاومت به سایش لایه سطحی شده است [۵].

سانر<sup>۳</sup> و همکاران در تحقیقی دیگر سطح فولاد زنگ نزن AISI 304 را با پودر SiC به روش جوشکاری قوسی تنگستن-گاز پوشش دادند. آنها نشان دادند که می‌توان با ترکیب ثابت پودر اولیه و فقط با کاهش حرارت ورودی و افزایش میزان استفاده شده، ناحیه ذوب در زیر لایه را به حداقل رسانده و میزان رقت را به حداقل کاهش داد. با این کار ساختار هیپووتکتیک سطحی به ساختار هایپرووتکتیک تبدیل خواهد شد. آنها پیشنهاد کردند که بیشینه سختی به دست آمده به حضور کاربیدهای  $M_7C_3$  پراکنده در سطح فولاد مربوط باشد [۶].

در همین رابطه یانگ<sup>۴</sup> و همکاران ذرات SiC را بر روی آلیاژ Ti6Al4V با فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز و با استفاده از سیم توپودری پوشش دادند. آنها مدعی هستند که به این شیوه یک پیوند متالورژیکی خوب بین پوشش و زیر لایه را می‌توان به دست آورد که پوشش یکنواخت، متراکم و تقریباً عاری از

جدول (۱): پارمترهای فرآیند رویه سازی به روش GTAW با نرخ دمش ۸ لیتر بر دقیقه آرگون و قطبیت DCEN

شماره نمونه	درصد حجمی ذرات	شدت جریان (A)	سرعت (mm/min)	حرارت ورودی (kJ/mm)
۱	۰	۰	۰	۰
۲	۴	۹۰	۳۲/۱۶	۲۰/۱۴
۳	۸	۹۰	۱۸/۲۸	۳۵/۴۴
۴	۱۲	۹۰	۱۶/۹۹	۳۸/۱۴
۵	۸	۱۱۰	۲۸/۴۴	۲۷/۸۴
۶	۸	۱۳۰	۲۹/۰۹	۳۲/۱۷



شکل (۱): تصویر نمادین از شیوه مورد استفاده در ایجاد پوشش

فرو رونده ویکرز با بار اعمالی ۱۰۰ گرم در مدت زمان اعمال ۵ ثانیه به دست آمد. بررسی های سایشی نیز توسط دستگاه سایش رفت و برگشتی، با استفاده از پین هایی از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ و با بار ۱۵۰ N انجام شد. جرم از دست داده شده در فواصل ۵۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰ متر توسط ترازوی GIBERTINIE 42 S-B با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه گیری شد.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از مجموعه آزمون های انجام شده در ادامه مورد تحلیل قرار گرفته است.

تصویر نمادین از روش مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است. پس از ایجاد لایه با جوشکاری GTAW سطح نمونه ها به صورت کاملاً ناهموار درآمد. ضخامت پوشش در این حالت بین ۳ الی ۴ میلی متر بود. برای انجام عملیات بعدی همه نمونه ها تحت عمل سنگ زنی توسط سنگ مغناطیسی قرار گرفتند و ضخامت پوشش با انجام این مرحله به ۲ الی ۳ میلی متر کاهش پیدا کرد. بررسی ریز ساختاری پوشش به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با آنالیز نقطه ای انجام شد. برای اچ کردن نمونه ها از محلول نایتال ۴ درصد (۹۶ میلی لیتر الکل + ۴ میلی لیتر اسید نیتریک یک مولار) استفاده شد. پروفیل سختی از سطح به طرف فلز پایه و در مقطع عرضی پوشش توسط ریز سختی سنجی و با

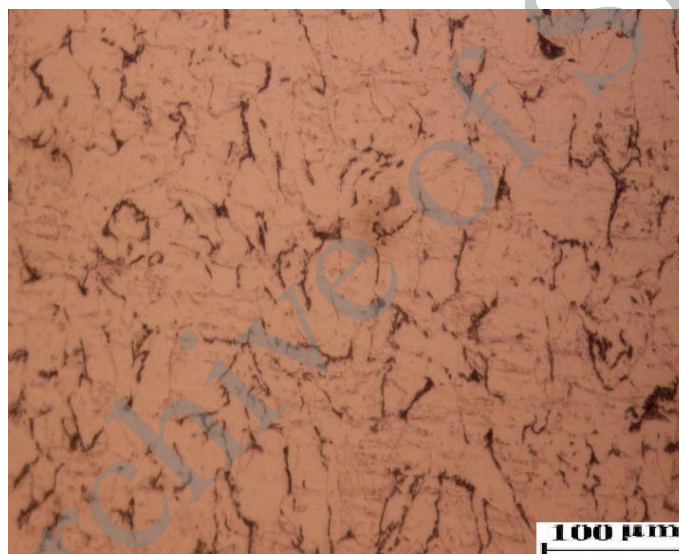
## ۳-۱- بررسی‌های ریز ساختاری

شکل‌های (۲) و (۳) ریز ساختار فلز پایه و ذرات کاربید سیلیسیوم مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. دیده می‌شود، نمونه‌های اولیه از ساختاری فریت - پرلیتی با دانه‌های هم محور در محدوده ابعادی ۱۰ تا ۷۰ میکرون برخوردار بوده است. ابعاد ذکر شده برای ذرات کاربیدی تقویت کننده نیز با

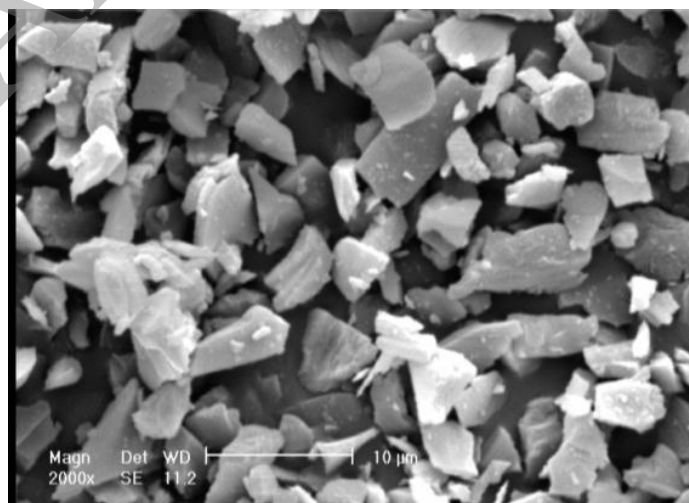
توجه به تصویر ۳ تأیید گردید. همچنین در جدول (۲) ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده ارائه گردیده است. ملاحظه می‌گردد که ترکیب شیمیایی به خوبی با ساختار میکروسکوپی مشاهده شده در تصویر شکل (۲) تطابق دارد.

جدول (۲): ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A106 Gr.B ASTM AA A106 A106-Gr.B

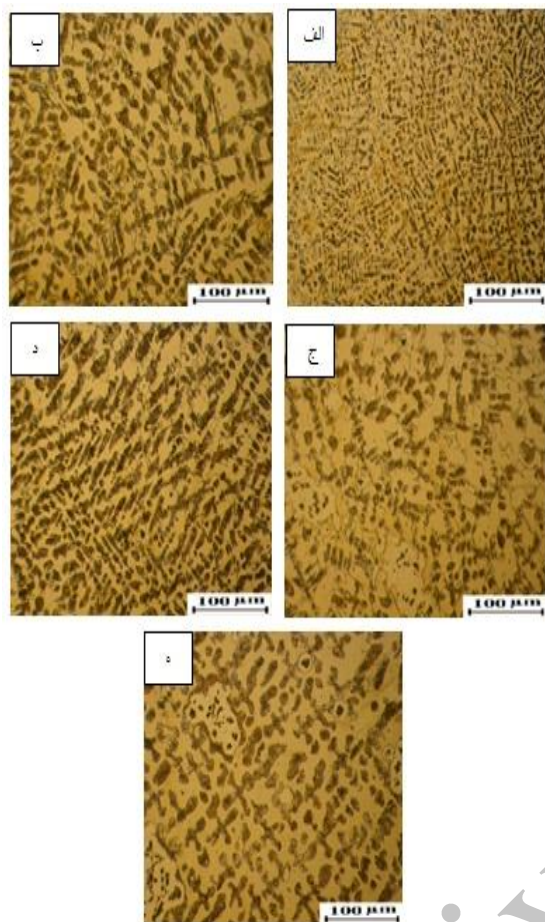
عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Fe
درصد	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۴۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۹۸	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۳۱	۰/۱۱	بقیه



شکل (۲): ریز ساختار فولاد ASTM A106-Gr.B مورد استفاده



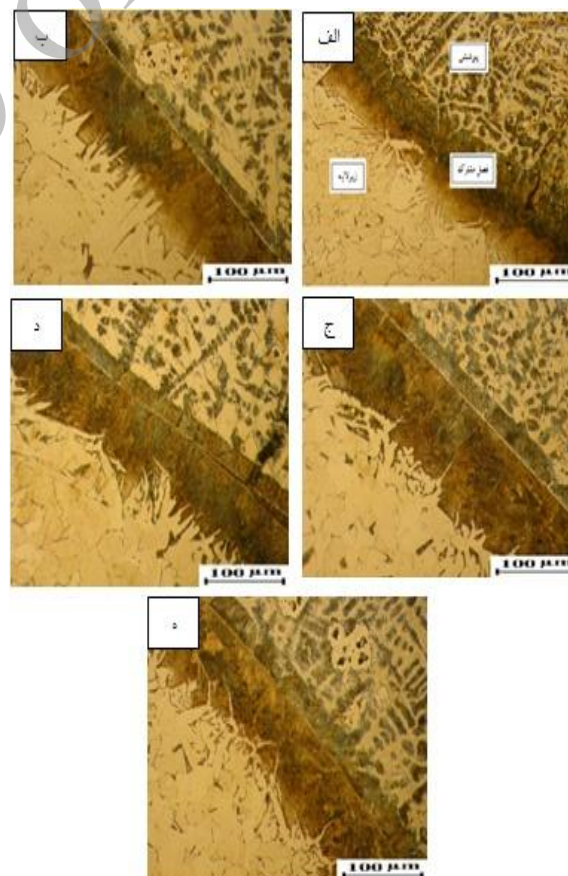
شکل (۳): تصویر میکروسکوپی الکترونی از ذرات پودر SiC مورد استفاده در پوشش سازی



شکل (۵): ریزساختار پوشش سطحی نمونه‌های مختلف: (الف): نمونه ۲، (ب): نمونه ۳، (ج): نمونه ۴، (د): نمونه ۵، (ه): نمونه ۶

بنابر این قدرت سرد کردن بالایی که زیر لایه از آن برخوردار است، می‌تواند عامل ایجاد چنین ساختار انجمادی باشد. از سوی دیگر، تفاوت زیاد بین نقطه ذوب آهن و فازهای تشکیل شده در اثر تجزیه کاربید سیلیسیوم می‌تواند دلیل دیگری در حصول چنین ساختار دندریتی است، آن‌گونه که سایر محققین نیز به آن اشاره داشته‌اند [۱۲]. بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد، ذرات کاربید سیلیسیوم وارد شده به لایه سطحی در میان شاخه‌های دندریتی قرار گرفته‌اند. تصویر ارائه شده در شکل (۶) حضور مقدار قابل توجه از ذرات کاربید سیلیسیوم در ساختار پوشش را به وضوح نشان می‌دهد. هم‌چنین دیده می‌شود، این ذرات که قبل از استفاده، سطحی کاملاً مسطح داشته‌اند (شکل ۳) پس از طی فرآیند و قرارگیری در لایه سطحی دارای سطحی غیر یکنواخت

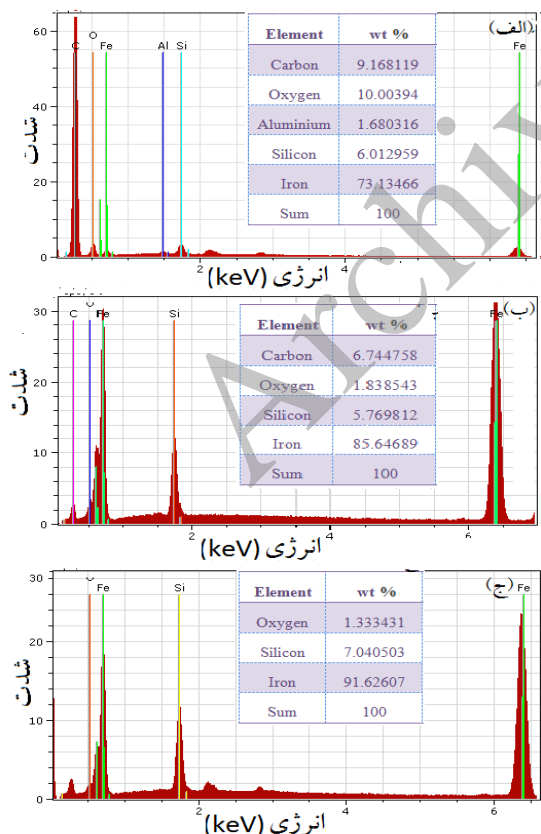
شکل (۴) سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده را در بزرگنمایی پایین نشان می‌دهد. تصاویر نشان داده شده در این شکل مشخص می‌کند که در تمامی نمونه‌ها، سطح و فصل مشترک زیر لایه و پوشش خالی از ترک و حفره است. به عبارت دیگر با استفاده از این روش لایه کامپوزیتی متراکم، با کیفیت و با نفوذ کامل لایه پیش‌نشانی شده به زیر لایه فولادی به دست آمده است. نتایج گزارش شده از مطالعات سایر محققین نیز همین نتیجه را در پی داشته است [۱۱]. هم‌چنین شکل (۵) تصاویر میکروسکوپی از ریز ساختار پوشش در بزرگنمایی بالاتر را نشان می‌دهد. بررسی این تصاویر مشخص می‌کند که پوشش ایجاد شده ساختار دندریتی دارد. به نظر می‌رسد بوجود آمدن این ساختار در نتیجه انجماد سریع مذاب سطحی در طی فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز باشد. زیرا حجم مذاب ایجاد شده در برابر کل فلز جامد مرتبط با آن چندان زیاد نیست.



شکل (۴): سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده در بزرگنمایی کم: (الف): نمونه ۲، (ب): نمونه ۳، (ج): نمونه ۴، (د): نمونه ۵، (ه): نمونه ۶

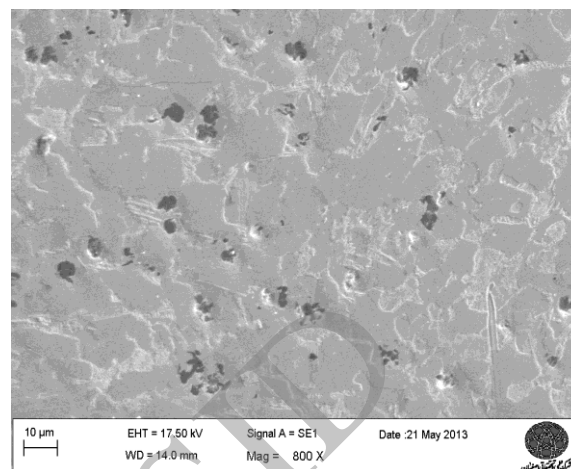


و ورود کربن به مذاب دانست. از سوی دیگر، در اطراف ذرات کاربید سیلیسیوم ناحیه‌ای از فریت مشاهده می‌شود که حین اچ شیمیایی بیش از فریت زمینه خورده شده است. این به معنی فعال و ناپایدارتر بودن اتم‌ها در این ناحیه است. این پدیده می‌تواند به انحلال ذرات کاربید سیلیسیوم در آهن اطراف و تشکیل فریتی حاوی سیلیسیوم و کربن بالاتر از حد حلالیت تعادلی کربن در یک شعاع مشخص در اطراف ذرات باشد. نتایج آنالیز EDS از این ناحیه که در شکل (۸) ارائه شده است، نشان می‌دهد که این مناطق از کربن و سیلیسیوم غنی هستند. این امر توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۱۲]. انحلال سریع سطحی ذرات حین فرآیند، موجب ناصافی سطح ذرات کاربید سیلیسیوم شده و پیوندهای میکرو مکانیکی این ذرات با زمینه را تقویت نموده است. در حقیقت این پدیده نقش مهمی در ایجاد یک کامپوزیت سطحی و عدم جدایش ذرات حین فرآیند علیرغم تفاوت در چگالی این دو ماده داشته است.



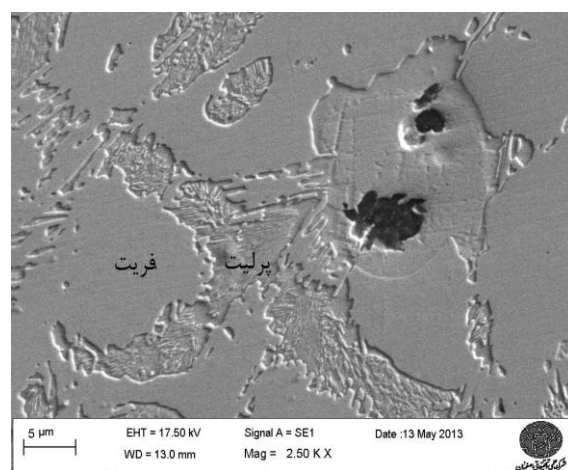
شکل (۸): نتایج آنالیز EDS بخش‌هایی از پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲: (الف): ذرات کاربید، (ب): فریت اطراف ذرات (ج): سمانتیت اطراف ذرات

و ناصاف شده‌اند. این امر در تصویر ارائه شده در شکل (۶) به خوبی مشاهده می‌شود.



شکل (۶): ریز ساختار پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲

هم‌چنین در برخی از ذرات کاهش محسوس ابعادی مشاهده می‌گردد. ناصافی سطح ذرات و کاهش ابعاد می‌تواند به دلیل انحلال بخشی از کاربید سیلیسیوم در آهن باشد. شکل (۷) ریز ساختار بخشی از پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲ را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد.

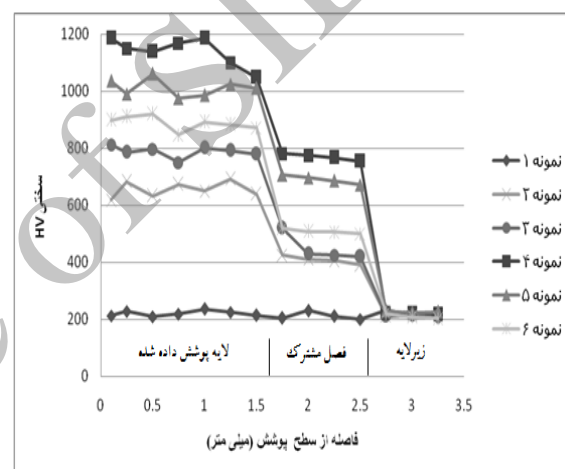


شکل (۷): ریزساختار پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲

در این تصویر دانه‌های فریت، کولونی‌های پرلیت و ذرات کاربید سیلیسیوم به خوبی قابل تشخیص هستند. دیده می‌شود، علیرغم مقدار کربن کم فولاد مورد استفاده، مقدار پرلیت تشکیل شده در پوشش بیش از مقدار مورد انتظار است. حضور این پدیده را می‌توان به انحلال بخشی از ذرات کاربید سیلیسیوم

## ۳-۲- نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی

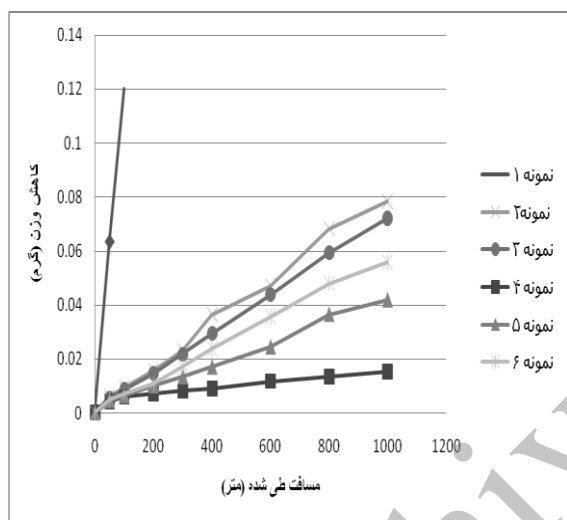
نتایج حاصل از ریز سختی پوشش‌های ایجاد شده در طی این پژوهش در شکل (۹) ارائه شده است. همان گونه که دیده می‌شود، پوشش‌های کامپوزیتی تشکیل شده بر سطح به دلیل حضور فاز تقویت کننده کاربید سیلیسیم، ورود کربن اضافی به سطح و در نتیجه افزایش میزات پرلیت و نیز دانه‌های ریز ایجاد شده تحت شرایط انجمادی سریع جوشکاری، از سختی بالایی (در محدوده HV ۶۵۰-۱۲۰۰) برخوردار هستند. این شرایط می‌تواند مقاومت بالا در برابر سایش را در پی داشته باشد.



شکل (۹): پروفیل سختی سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش داده شده

## ۳-۳- رفتار تریبولوژیکی

بررسی رفتار سایشی نمونه‌های پوشش‌دهی شده نتایج جالبی را به همراه داشت. شکل (۱۰) نمودار کاهش وزن برحسب مسافت طی شده برای نمونه‌های آزمون سایش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مسافت طی شده میزان جرم از دست داده شده نمونه ۱ به شکل پیوسته و بدون نشان دادن رفتار کند شونده، افزایش می‌یابد. این نتایج با توجه به رفتار سایشی ضعیف فولاد ASTM A106-Gr.B که توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۱۵] دور از انتظار نمی‌باشد.

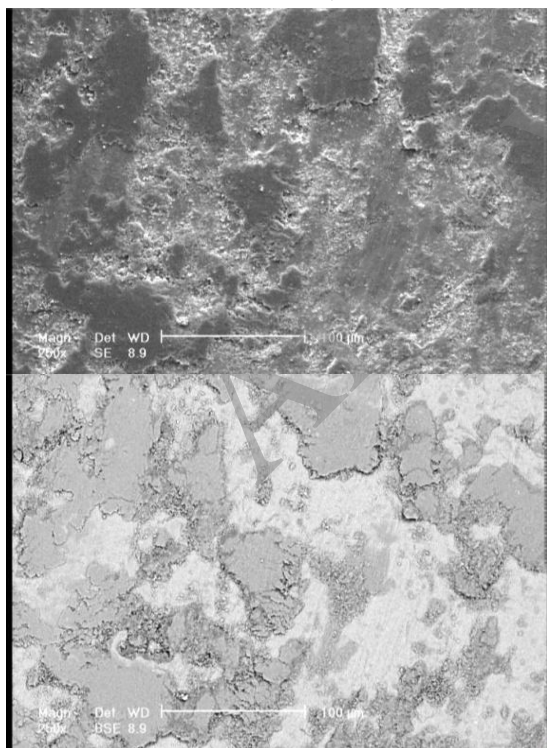


شکل (۱۰): نمودار کاهش وزن برحسب مسافت طی شده برای نمونه‌های قرار گرفته تحت آزمون سایش

این در حالی است که در سایر نمونه‌ها و با افزایش سختی، میزان مقاومت در برابر سایش افزایش یافته است. آن گونه که نمودارهای کاهش وزن بر حسب مسافت سایش نشان می‌دهند، آنچه در میزان مقاومت به سایش نمونه‌ها اهمیت داشته است، مقدار مطلق سختی بوده است. به گونه‌ای که نمونه‌های شماره ۳، ۵ و ۶ علیرغم برخورداری از مقدار یکسان از ذرات تقویت کننده کاربیدی در پوشش، مقاومت در برابر سایش متفاوتی را از خود نشان داده‌اند. اما دیده می‌شود با افزایش میزان ذرات سخت کاربیدی و افزایش قابل ملاحظه در سهم این ذرات از سختی کلی پوشش، میزان مقاومت به سایش به مقدار زیاد تقویت شده است. فاصله نتایج حاصل، خصوصاً در مسافت‌های

نمودارهای مربوط به پروفیل سختی پوشش‌ها نشان می‌دهد، با افزایش ذرات تقویت کننده، سختی لایه‌های ایجاد شده در سطح و در فصل مشترک افزایش می‌یابد. همچنین در خصوص نمونه‌های ۳، ۵ و ۶ که دارای مقدار یکسان از ذرات تقویت کننده بوده و با شدت جریان‌های متفاوت جوشکاری تحت عملیات سطحی قرار گرفته‌اند (طبق جدول ۱)، می‌توان گفت کاهش حرارت ورودی منجر به کاهش رقت آهن از زیر لایه و ریزتر شدن ساختار شده است. این عوامل باعث افزایش سختی نمونه ۵ نسبت به نمونه ۶ و ۳ و نیز افزایش سختی نمونه ۶ نسبت به نمونه ۳ گردیده است. در این رابطه محققین دیگر [۱۴] نیز نتایج مشابهی را ارائه نموده‌اند.

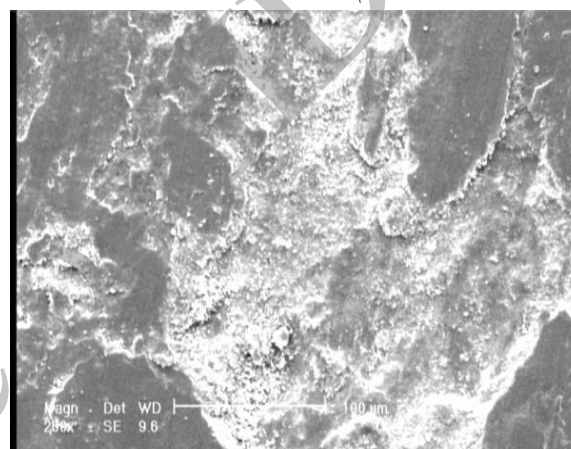
تصویر ارائه شده در شکل (۱۲) حضور هم‌زمان ذرات سایشی ورقه‌ای شکل به همراه ذرات بسیار ریز اکسیدی را نشان می‌دهد. این امر تأیید کننده مکانیزم‌های سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی به شکل هم‌زمان برای این نمونه می‌باشد. معمولاً نمی‌توان به نشانه یا مشخصه تصویری خاصی برای مکانیزم سایش اکسیداسیون در تصاویر SE<sup>+</sup>، اشاره نمود اما در تصاویر BSE<sup>+</sup>، رخداد مکانیزم اکسیداسیون به صورت حضور فاز سیاهرنگی در لبه‌ها قابل مشاهده است که در صورت درست بودن احتمال مکانیزم اکسیداسیون، انجام آنالیز نیز حضور عناصر یکی از سطوح، به علاوه مقادیر قابل توجهی اکسیژن را تأیید می‌نماید. چنین پدیده‌ای در تحقیقات سایر محققان [۱۶] نیز قبلاً گزارش شده است. در ادامه نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده بر نمونه‌های پوشش داده شده تحلیل خواهد شد. شکل (۱۳) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه شماره ۲ پس از انجام آزمون سایش را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه شماره ۲، تصویر بالا تصویر بدست آمده از الکترون‌های ثانویه (SE) و تصویر پایین همان تصویر با استفاده از الکترون‌های پس پراکنده شده

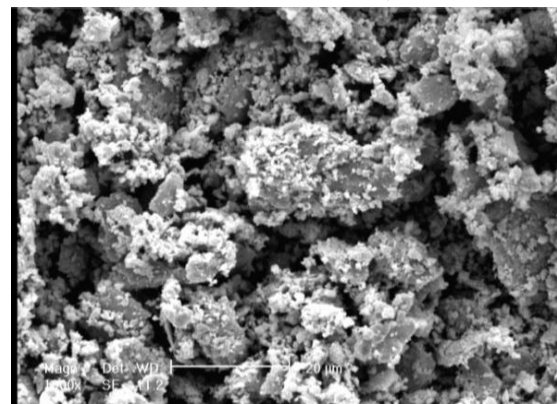
(BSE)

بالا تأیید کننده این مطلب است که حضور مقدار قابل ملاحظه‌ای از ذرات سخت در لایه سطحی و ایجاد شرایط بهینه فرآیند می‌تواند موجب افزایش متناسب سختی و مقاومت سایشی گردد. شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از سطح سایش نمونه شماره ۱ را پس از انجام آزمون سایش نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که بخشی از سطح به شکل لایه‌ای از آن جدا شده و بخشی دیگر به صورت ورقه‌هایی بر روی سطح تشکیل شده و در آستانه جدا شدن بوده‌اند. این امر می‌تواند بر رخداد مکانیزم سایش ورقه‌ای دلالت داشته باشد.



شکل (۱۱): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه ۱

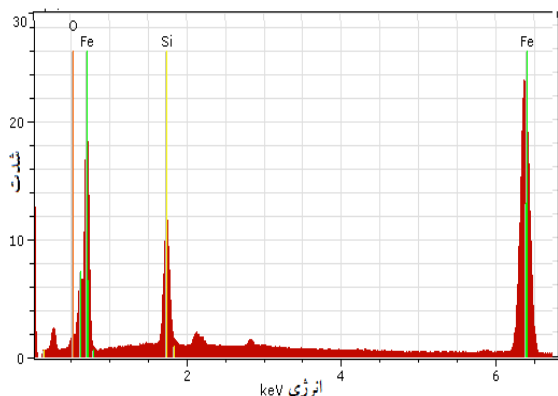
هم‌چنین در بخش‌هایی از این سطح سایش، آثار اکسایش سطحی و ایجاد ذرات بسیار ریز اکسیدی مشاهده می‌شود. شکل (۱۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات سایشی حاصل از آزمون انجام شده بر این نمونه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات حاصل از سایش

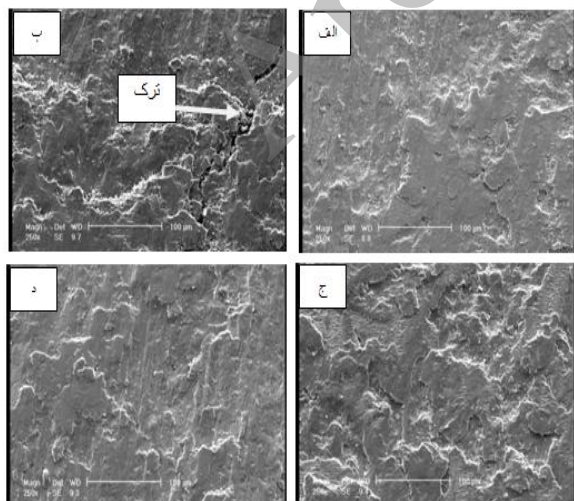
نمونه ۱





شکل (۱۵): نتیجه آنالیز EDS ذرات ریز موجود در ذرات سایشی حاصل از آزمون سایش بر نمونه شماره ۲

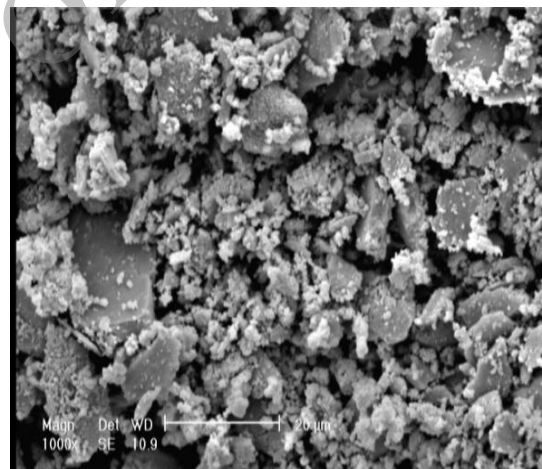
نتیجه آنالیز عنصری این ذرات سایشی نشان می‌دهد آنها از ترکیب اکسیژن و آهن تشکیل شده‌اند. که خود تأیید کننده رخداد هم‌زمان مکانیزم‌های سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی می‌باشد. در این رابطه، بررسی‌های ریز ساختاری این نمونه‌ها و کیفیت سطحی حاصل برای ذرات کاربید سیلیسیوم در حین فرآیند، که قبلاً به آن پرداخته شد، تأیید می‌نماید که ذرات کاربیدی به شکل قابل ملاحظه‌ای با زمینه در پیوند بوده‌اند. این امر به گونه‌ای بوده است که خروج آنها از سطح سخت و تأثیر گذاری مؤثر بر مکانیزم سایش رخ نداده است. در ادامه سطوح سایش مربوط به سایر نمونه‌ها بررسی گردید. شکل (۱۶) تصاویر میکروسکوپی الکترونی حاصل از سطح سایش نمونه‌های گروه ۳، ۴، ۵ و ۶ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ها:

(الف): نمونه ۳، (ب): نمونه ۴، (ج): نمونه ۵، (د): نمونه ۶

دقت در تصویر (۱۳) آثار خراشیدگی و کندگی بر روی سطح را به وضوح نشان نمی‌دهد. این امر می‌تواند دلیلی بر آن باشد که با ورود مقدار کم از ذرات کاربید سیلیسیوم (۴ درصد)، علیرغم افزایش در سختی سطح و وجود ذرات سخت در پوشش، سایش خراشان مکانیزم غالب سایش این نمونه نبوده است. به طوریکه مشاهده می‌شود، هم‌چنان جدا شدن ورقه‌های سطحی و اکسایش عامل سایش در این نمونه بوده است. خصوصاً آن‌که تصویر به دست آمده از الکترون‌های پس پراکنده شده به وضوح حضور مناطق با چگالی کمتر از فولاد را مشخص نموده است. این امر می‌تواند دلیلی بر وجود اکسیدهای سطحی در مناطق مورد بررسی باشد. هم‌چنین در شکل (۱۴) تصویر به دست آمده از ذرات سایشی مربوط به همین نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل (۱۴): تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات حاصل از سایش نمونه ۲

بررسی این تصویر حاکی از آن است که هم‌چنان ذرات اکسیدی و ورقه‌های فلزی، تشکیل دهندگان محصولات سایش هستند. برای اطمینان بیشتر ذرات ریز حاصل از سایش با استفاده از سیستم EDS میکروسکوپ الکترونی روبشی آنالیز گردیده و نتیجه آن در شکل (۱۵) ارائه شده است.

باشد. در همین رابطه سایر محققان نیز وجود این مکانیزم را تأیید کرده‌اند [۱۷]. آنچه در این مورد اهمیت دارد آن است که علیرغم وجود ذرات سخت سرامیکی درون زمینه‌ای نسبتاً نرم از فولاد کم کربن، مکانیزم سایش خراشان مکانیزم غالب سایش نبوده است. در این رابطه می‌توان، میزان نسبتاً پایین ذرات سخت وارد شده به زمینه و اتصال مناسب بین زمینه و ذرات را عامل این پدیده قلمداد نمود. از سوی دیگر وجود زمینه‌ای نرم حاوی مقدار فریت نسبتاً بالا می‌تواند عامل چسبندگی موضعی سطح نمونه‌ها به سطوح در تماس و رخداد سایش چسبان باشد.

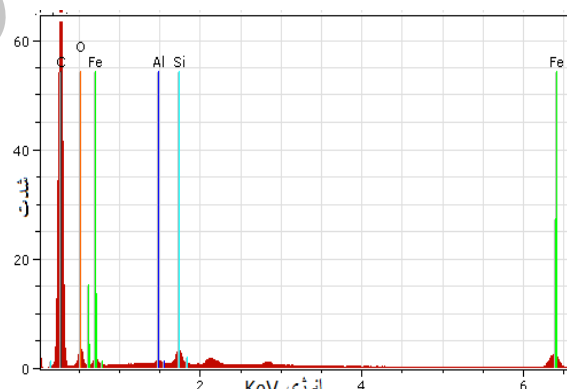
با عنایت به آنچه تا کنون ذکر گردید، می‌توان نتیجه گرفت، تغییر در پارامترهای فرآیند هم‌چون میزان جریان مورد استفاده و سرعت پیشروی می‌تواند کنترل‌کننده حرارت ورودی باشد. نتایج نشان داد تغییر در حرارت ورودی مستقیماً بر میزان انحلال ذرات در حوضچه مذاب، نحوه اختلاط آنها با زمینه و در نتیجه میزان چسبندگی آنها به زمینه موثر است. از سوی دیگر میزان ذرات وارد شده به زمینه و کیفیت و مکانیزم اتصال زمینه به ذرات که تحت کنترل انحلال سطحی ذرات در زمینه است، کنترل‌کننده خواص مکانیکی و تریبولژیکی از جمله رفتار سایشی خواهد بود.

#### ۴- نتیجه گیری

اهم نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- ۱- با استفاده از این شیوه، دستیابی به پوشش و فصل مشترک زیر لایه و پوشش خالی از ترک و حفره قابل دستیابی بود.
- ۲- پوشش ایجاد شده دارای ساختاری دندردیتی و ریز دانه همراه با تقویت‌کننده‌های کاربید سیلیسیوم در نواحی بین دندردیتی بود.
- ۳- دامنه سختی پوشش ایجاد شده بر حسب شرایط ایجاد، در محدوده ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ ویکرز قرار داشت.
- ۴- افزایش میزان تقویت‌کننده کاربید سیلیسیوم و کاهش حرارت ورودی منجر به افزایش سختی پوشش شد.
- ۵- رفتار سایشی پوشش‌ها با افزایش میزان تقویت‌کننده و کاهش حرارت ورودی بهبود یافت.

تصاویر "ب" و "ج" به نمونه‌های با سختی بالا مربوط است. آن‌گونه که در این تصاویر قابل مشاهده است، در سطح سایش آثار کنده شدن لایه‌های سطحی توام با ترک خوردگی در سطح وجود دارد. این بدان معنی است که هم‌چنان مکانیزم سایش ورقه‌ای احتمالاً به همراه سایش چسبان و خراشان رخ داده است. خصوصاً آن‌که در میان ذرات سطحی حاصل از سایش این نمونه‌ها ذرات کاربید سیلیسیوم مشاهده شدند. در شکل (۱۷) نتیجه آنالیز عنصری ذرات سایشی حاصل از این نمونه‌ها نشان داده شده است. البته وجود این ریز ترک‌ها می‌تواند نتیجه کار سختی سطحی نیز باشد. این ترک‌ها در صورتی که در مراحل اولیه سایش مشاهده شوند، می‌توانند در مراحل بعدی با کاهش شدید جرم همراه شوند. مشاهده ترک‌ها پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر البته می‌تواند نشان دهنده مقاومت بالای پوشش باشد. زیرا تنها به این دلیل است که پس از تحمل مسافت بالای سایشی، این پدیده (ایجاد ترک‌های ناشی از کارسختی) در مراحل اولیه خود قرار دارد.



شکل (۱۷): نتیجه آنالیز EDS ذرات کاربیدی موجود در ذرات سایشی حاصل از آزمون سایش بر نمونه شماره ۴

از سوی دیگر دقت در تصاویر "الف" و "د" شکل (۱۶) نشان می‌دهد، در سطح سایش علاوه بر وجود آثار رخداد مکانیزم‌های سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی، شیارهای ناشی از خراش سطحی نیز وجود دارد، اما میزان این خراش‌ها چندان زیاد نیست. لذا به نظر می‌رسد مکانیزم غالب سایش در تمامی نمونه‌ها ترکیبی از سایش ورقه‌ای، اکسایش سطحی و سایش چسبان

powder”, Surface & Coatings Technology, Vol. 205, pp. 5400-5405, 2011.

- [8] O. Nuri Celik & M. Ulutun, “Effects of graphite content on the microstructure and wear properties of an AISI 8620 steel surface modified by tungsten inert gas (TIG)”, Surface & Coatings Technology, Vol. 206, pp. 1423- 1429, 2011.
- [9] ASTM A-106. Standard specification for seamless carbon steel pipe for high temperature service. USA: ASTM International, 2011.
- [10] S. S. M. Tavares & J. M. Pardal, “Failure of ASTM A-106 Gr.B tube by creep and erosive wear”, Engineering Failure Analyses, Vol. 26, pp. 337-343, 2012.
- [11] J. Lippold & D. Kotecki, “Welding metallurgy and weld ability of stainless steels”, John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [12] S. Buytoz, “Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel”, Surface & Coatings Technology, Vol. 200, pp. 3734-3742, 2006.
- [13] M. F. Buchely & J. C. Gutierrez, “The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys”, Wear, Vol. 259, pp. 52-61, 2005.
- [14] J. Majumdar, “Studies on compositionally graded silicon carbide dispersed composite surface on mild steel developed by laser surface cladding”, Vol. 203, pp. 505-512, 2008.
- [15] R. Yang & Z. Liu, “Study of in-situ synthesis TiCp/Ti composite coating on alloy Ti6Al4V by TIG cladding”, Vol. 36, pp. 349-354, 2012.
- [16] Y. C. Lin, “Elucidating the microstructure and wear behavior of tungsten carbide”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, pp. 219-225, 2010.
- [17] K. Amini & A. Akhbarizadeh, “Investigating the effect of the quench environment on the final microstructure and wear behavior of 1.2080 tool steel after deepcryogenic heat treatment”, Materials and design, Vol. 45, pp. 316-322, 2013.

#### ۷- پی نوشت

- [1] Hard facing  
[2] Yu-Chi Lin

۶- مکانیسم سایش در نمونه بدون پوشش از نوع ورقه‌ای و اکسایش سطحی و در نمونه‌های پوشش داده شده ترکیبی از مکانیزم‌های ورقه‌ای، اکسایش سطحی و سایش چسبان بود.

#### ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری مسئولین آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی مواد دانشگاه آزاد نجف‌آباد و دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان به خصوص آقایان مهندس عربیان و مهندس مویدی، به سبب همکاری‌هایشان، تشکر نمایند.

#### ۶- مراجع

- [1] S. Buytoz, M. M. Yildirim & H. Eren, “Microstructural and microhardness characteristics of gas tungsten arc synthesized Fe-Cr-C coating on AISI 4340”, Materials Letters, Vol. 59, pp. 607-614, 2005.
- [2] V. Udhayabanu & K. R. Ravi, “Synthesis of in-situ NiAl-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite by reactive milling and subsequent heat treatment”, Intermetallics, Vol. 18, pp. 353-358, 2010.
- [3] F. Madadi, F. Ashrafizadeh & M. Shamanian, “Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM”, Journal of Alloy and Compounds, Vol. 510, pp. 71-77, 2012.
- [4] Y. C. Chen, “Reinforcements affect mechanical properties and wear haviors of WC clad layer by gas tungsten arc welding”, Materials and Design, Vol. 45, pp. 6-14, 2013.
- [5] Y. C. Lin & H. M. Chen, “Analysis of microstructure and wear performance of SiC clad layer on SKD61 die steel after gas tungsten arc welding”, Materials and Design, Vol. 47, pp. 828-835, 2013.
- [6] S. Buytoz & M. Ulutan, “In situ synthesis of SiC reinforced MMC surface on AISI 304 stainless steel by TIG surface alloying”, Surface & Coatings Technology, Vol. 200, pp. 3698-3704, 2006.
- [7] Y. C. Lin, “Microstructure and tribological performance of Ti-6Al-4V cladding with SiC

[6] Secondary electrons

[7] Back scattered electrons

[3] Soner

[4] Yong

[5] Osman

Archive of SID