

# سخت کاری سطحی فولاد ASTM A106 با ایجاد لایه کامپوزیتی حاوی ذرات سرامیکی SiC با استفاده از فرایند جوشکاری TIG

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

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، گروه مواد، نجف‌آباد اصفهان

<sup>۲</sup> بخش فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور اصفهان

**چکیده:** در این پژوهش ایجاد پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات سرامیکی 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 پیش‌نشانی 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 دندرتی حاوی تقویت‌کننده 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 تقویت‌کننده 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.

کلمات کلیدی: جوشکاری قوسی تنگستن - گاز، پوشش‌دهی سطحی، کامپوزیت فولاد/کاربید سیلیسیوم

## ۱- مقدمه

عملیات سطحی بر روی فولادها می‌تواند مقاومت خوردگی، مقاومت سایشی یا رفتار خستگی آن‌ها را بهبود دهد [۱]. یکی از روش‌های سخت کاری سطحی استفاده از روش‌های معمول 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 گسترده‌گی 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 SiC، TiC، WC و B<sub>4</sub>C به مذاب ایجاد شده در سطح و تشکیل لایه‌ای با ضخامت قابل توجه بر روی سطح است [۴]. به عنوان مثال یوچی لین<sup>۱</sup> و همکارانش در پژوهشی به بررسی ریزساختار و عملکرد سایشی لایه SiC پوشش داده شده بر روی فولاد کشته شده‌ی SKD61 با روش GTAW پرداخته‌اند. آنها گزارش داده‌اند که ذرات SiC در طی فرآیند GTAW تجزیه شده و فازهای شبه پایدار مانند Fe<sub>3</sub>C و Fe<sub>8</sub>Si<sub>2</sub> 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>۲</sup> و همکاران در تحقیقی دیگر سطح فولاد زنگ نزن AISI 304 را با پودر SiC به‌روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز

<sup>۱</sup> Yo-Chi Lin

پوشش دادند. آن‌ها نشان دادند که می‌توان با ترکیب ثابت پودر اولیه و فقط با کاهش حرارت ورودی و افزایش میزان پودر استفاده شده، ناحیه ذوب در زیر لایه را به حداقل رسانده و میزان رقت را به حداقل کاهش داد. با این کار ساختار هیپوئوتکتیک سطحی به ساختار هایپرئوتکتیک 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]. 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 [۷]. 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- فعالیت‌های تجربی

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  $12 \times 13$  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 الکتروود تنگستنی ۲/۴ میلی‌متر و شکل نوک الکتروود مخروطی بود. عملیات ذوب سطحی بر روی گروه‌هایی از نمونه‌ها در شرایط مختلف مطابق با جدول (۱) انجام شد.

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

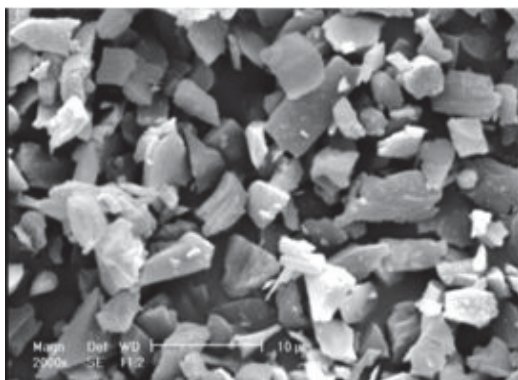
بررسی ریز ساختاری پوشش به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با آنالیز نقطه‌ای انجام شد. برای اچ کردن نمونه‌ها از محلول نایتال ۴ درصد (۹۶ میلی‌لیتر الکل + ۴ میلی‌لیتر اسید نیتریک یک مولار) استفاده شد. پروفیل سختی از سطح به طرف فلز پایه و در مقطع عرضی پوشش توسط ریز سختی سنجی و با فرو رونده ویکرز با بار اعمالی ۱۰۰ گرم در مدت زمان اعمال ۵ ثانیه به دست آمد. بررسی‌های سایشی نیز توسط دستگاه سایش رفت و برگشتی، با استفاده از پین‌هایی از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ و با بار ۱۵۰ N انجام شد. جرم از دست داده شده در فواصل ۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰ متر توسط ترازوی GIBERTINIE 42 S-B با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد.

## ۳- نتایج و بحث

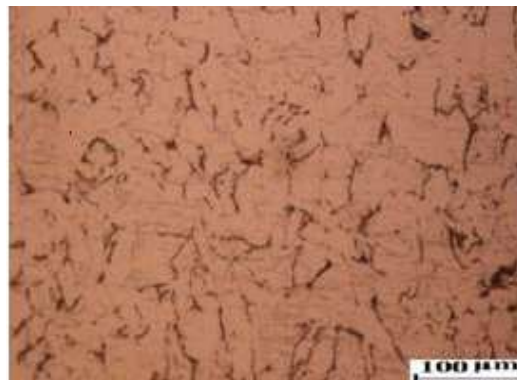
### ۳-۱- بررسی‌های ریز ساختاری

شکل‌های (۱) و (۲) 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 برخوردار بوده است. 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 (۱) تطابق دارد.



شکل ۲- تصویر SEM ذرات پودر SiC مورد استفاده

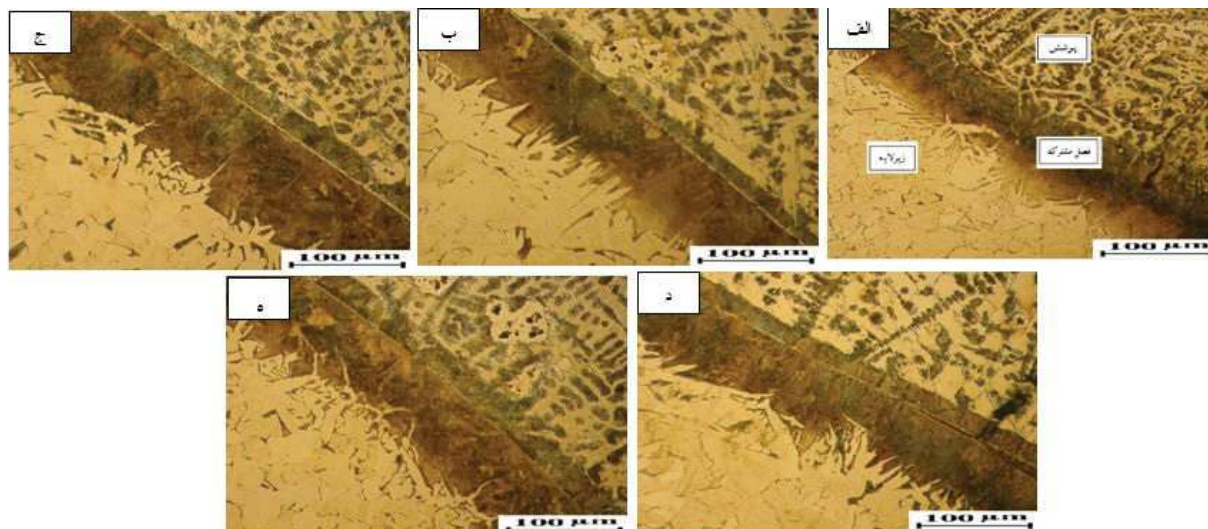


شکل ۱- ریز ساختار فولاد ASTM A106-Gr.B

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A106 Gr.B

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	Sn	Fe
درصد	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۴۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۹۸	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۳۱	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	بقیه

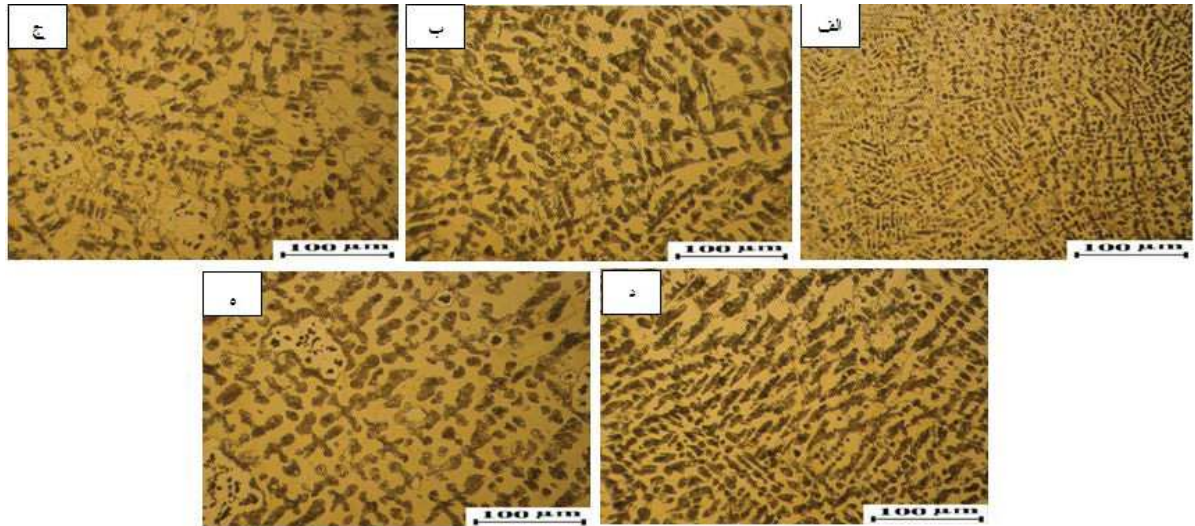
شکل (۳) سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده را در بزرگنمایی پایین نشان می‌دهد. تصاویر نشان داده شده در این شکل مشخص می‌کند که در تمامی نمونه‌ها، سطح و فصل مشترک زیر لایه و پوشش خالی از ترک و حفره است. به عبارت دیگر با استفاده از این روش لایه کامپوزیتی متراکم، با کیفیت و با نفوذ کامل لایه پیش نشانی شده به زیر لایه فولادی به دست آمده است [۸].



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

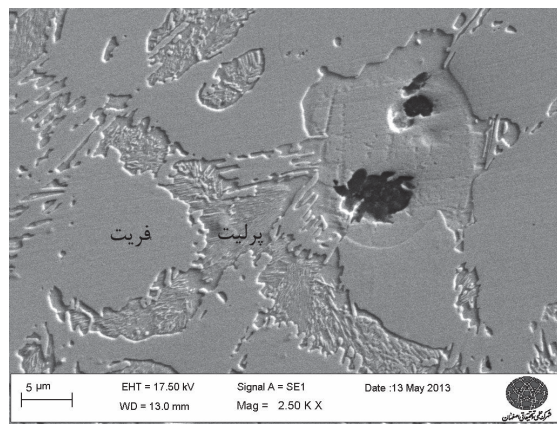
همچنین شکل (۴) تصاویر میکروسکوپی از ریز ساختار پوشش در بزرگنمایی بالاتر را نشان می‌دهد. بررسی این تصاویر مشخص می‌کند که پوشش ایجاد شده ساختار دندردیتی دارد. به نظر می‌رسد بوجود آمدن این ساختار در نتیجه انجماد سریع مذاب سطحی در طی فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن - گاز باشد. زیرا حجم مذاب ایجاد شده در برابر کل فلز جامد مرتبط با آن چندان زیاد نیست. بنابر این قدرت سرد کردن بالایی که زیر لایه از آن برخوردار است، می‌تواند عامل ایجاد چنین ساختار انجمادی باشد [۹].





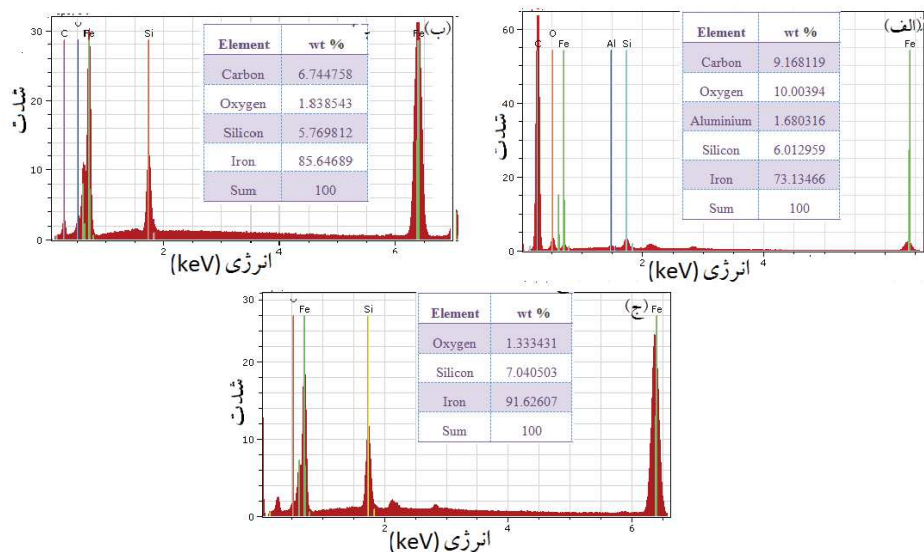
شکل ۴- ریزساختار پوشش سطحی نمونه‌های مختلف (الف) نمونه ۲، (ب) نمونه ۳، (ج) نمونه ۴، (د) نمونه ۵، (ه) نمونه ۶.

شکل (۵) ریز ساختار بخشی از پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲ را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد. 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



شکل ۵- ریزساختار پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲

از ذرات کاربید سیلیسیوم 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 (۶) ارائه شده است، نشان می‌دهد که این مناطق از کربن و سیلیسیوم غنی هستند [۱۰].

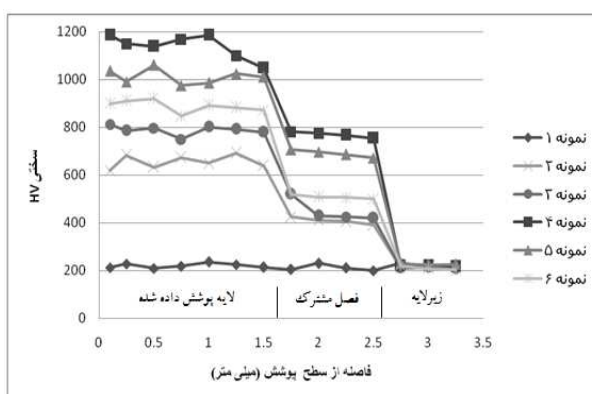


شکل ۶- نتایج آنالیز EDS بخش‌هایی از پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲: (الف) ذرات کاربید، (ب) فریت اطراف ذرات (ج) سمانتیت اطراف ذرات.



### ۳-۲- نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی

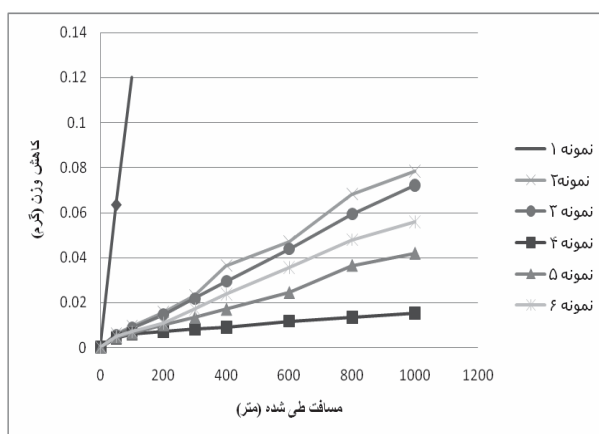
نتایج حاصل از ریز سختی پوشش‌های ایجاد شده در طی این پژوهش در شکل (۷) ارائه شده است. همان گونه که دیده می‌شود، پوشش‌های کامپوزیتی تشکیل شده بر سطح به دلیل حضور فاز تقویت کننده کاربید سیلیسیوم، ورود کربن اضافی به سطح و در نتیجه افزایش میزات پرلیت و نیز دانه‌های ریز ایجاد شده تحت شرایط انجمادی سریع جوشکاری، از سختی بالایی (در محدوده HV ۱۲۰۰-۶۵۰) برخوردار هستند. این شرایط می‌تواند مقاومت بالا در برابر سایش را در پی داشته باشد. 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 [۱۱].



شکل ۷- پروفیل سختی سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش داده شده.

### ۳-۳- رفتار تریبولوژیکی

شکل (۸) نمودار کاهش وزن برحسب مسافت طی شده برای نمونه‌های آزمون سایش را نشان می‌دهد.

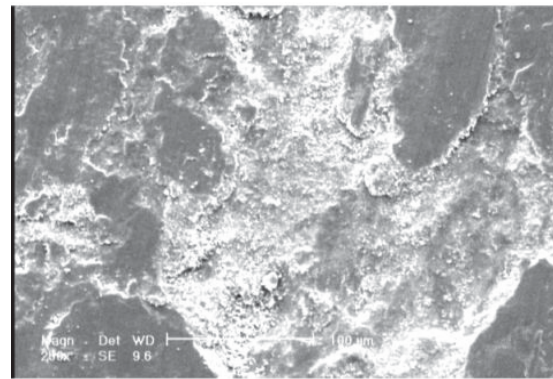
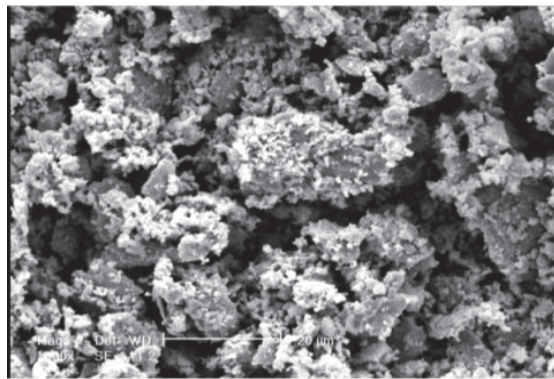


شکل ۸- نمودار کاهش وزن برحسب مسافت طی شده برای نمونه‌های قرار گرفته تحت آزمون سایش.

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 دور از انتظار نمی‌باشد [۱۲]. 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 کاربردی 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 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.

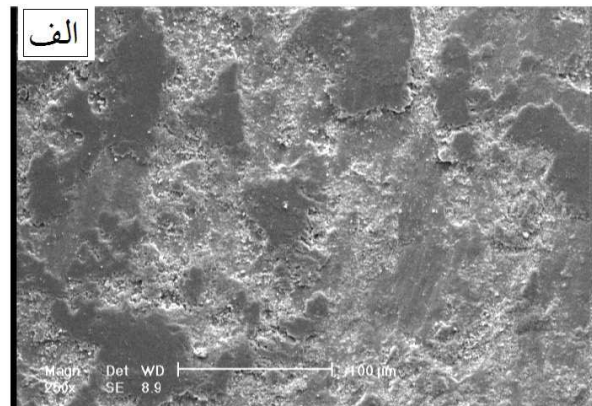
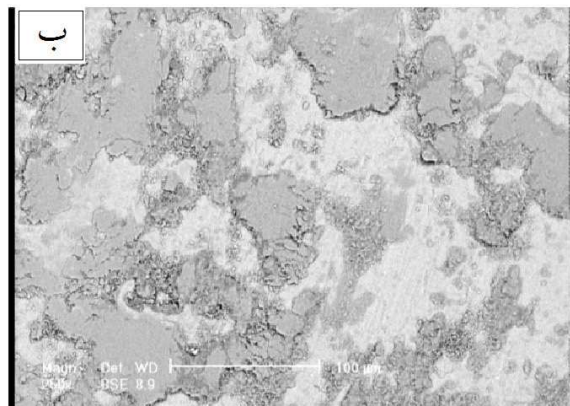
شکل (۹) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از سطح سایش نمونه شماره ۱ را پس از انجام آزمون سایش نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که بخشی از سطح به شکل لایه‌ای از آن جدا شده و بخشی دیگر به صورت ورقه‌هایی بر روی سطح تشکیل شده و در آستانه جدا شدن بوده‌اند. این امر می‌تواند بر رخداد مکانیزم سایش ورقه‌ای دلالت داشته باشد. همچنین در بخش‌هایی از این سطح سایش، آثار اکسایش سطحی و ایجاد ذرات بسیار ریز اکسیدی مشاهده می‌شود. شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات سایشی حاصل از آزمون انجام شده بر این نمونه را نشان می‌دهد. تصویر ارائه شده در شکل (۱۰) 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.



شکل ۱۰- تصویر SEM از ذرات حاصل از سایش نمونه ۱

شکل ۹- تصویر SEM از سطح سایش نمونه ۱

معمولاً نمی‌توان به نشانه یا مشخصه تصویری خاصی برای مکانیزم سایش اکسیداسیون در تصاویر SE<sup>۱</sup>، اشاره نمود اما در تصاویر BSE<sup>۲</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 [۱۳] نیز قبلاً گزارش شده است. شکل (۱۱) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه شماره ۲ پس از انجام آزمون سایش را نشان می‌دهد.



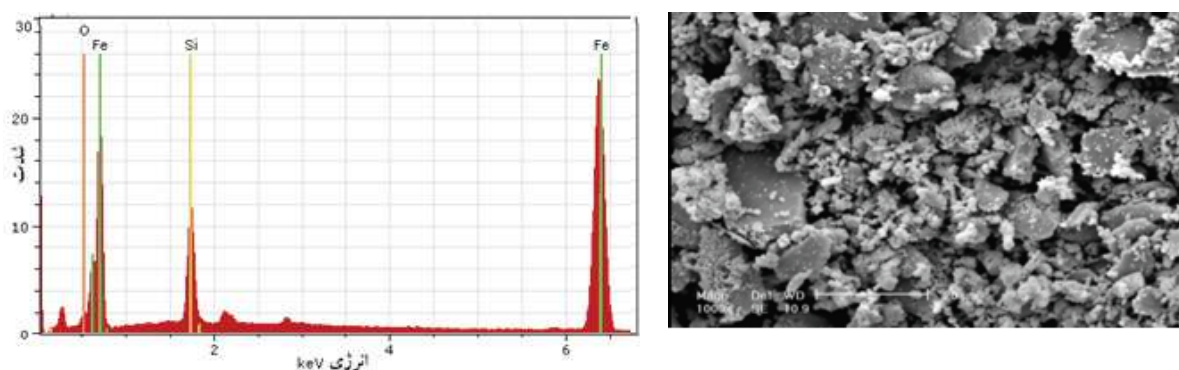
شکل ۱۱- تصویر SEM از سطح سایش نمونه شماره ۲.

الف) تصویر به دست آمده از الکترون‌های ثانویه (SE)، ب) همان تصویر با استفاده از الکترون‌های پس پراکنده شده (BSE).

<sup>۱</sup> Secondary electrons

<sup>۲</sup> Back scattered electrons

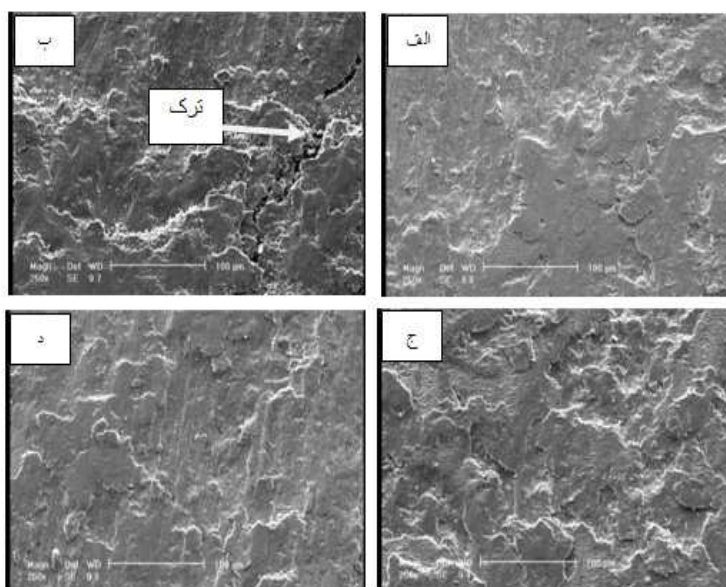
دقت در تصویر (۱۱) آثار خراشیدگی و کندگی بر روی سطح را به وضوح نشان نمی‌دهد. این امر می‌تواند دلیلی بر آن باشد که با ورود مقدار کم از ذرات کاربرد سیلیسیوم (۴ درصد)، علیرغم افزایش در سختی سطح و وجود ذرات سخت در پوشش، سایش خراشان مکانیزم غالب سایش این نمونه نبوده است. دیده می‌شود، همچنان جدا شدن ورقه‌های سطحی و اکسایش عامل سایش در این نمونه بوده است. خصوصاً آن که 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 (۱۲) تصویر به دست آمده از ذرات سایشی مربوط به همین نمونه‌ها نشان داده شده است. 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 (۱۳) ارائه شده است. 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.



شکل ۱۳- آنالیز EDS ذرات سایشی نمونه شماره ۲

شکل ۱۲- تصویر SEM ذرات سایش نمونه ۲

شکل (۱۴) تصاویر میکروسکوپی الکترونی حاصل از سطح سایش نمونه‌های گروه ۳، ۴، ۵ و ۶ را نشان می‌دهد.

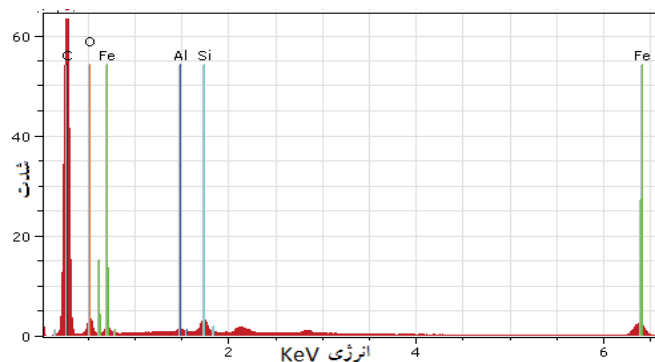


شکل ۱۴- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ها (الف) نمونه ۳، (ب) نمونه ۴، (ج) نمونه ۵، (د) نمونه ۶

تصاویر "ب" و "ج" به نمونه‌های با سختی بالا مربوط است. آن گونه که در این تصاویر قابل مشاهده است، در سطح سایش آثار کنده شدن لایه‌های سطحی توأم 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 آن که در میان ذرات سطحی حاصل از سایش این نمونه‌ها ذرات کاربرد سیلیسیوم مشاهده شدند. در شکل (۱۵) 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. از سوی دیگر دقت در تصاویر "الف" و "د" شکل (۱۴) 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 باشد [۱۴]. 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.



شکل ۱۵- نتیجه آنالیز EDS ذرات کاربردی موجود در ذرات سایشی حاصل از آزمون سایش بر نمونه شماره ۴.

#### ۴- نتیجه‌گیری

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

- با استفاده از این شیوه، دستیابی به پوشش و فصل مشترک زیر لایه و پوشش خالی از ترک و حفره قابل دستیابی بود.
- پوشش ایجاد شده دارای ساختاری دندریتی و ریز دانه همراه با تقویت کننده‌های کاربید سیلیسیوم در نواحی بین دندریتی بود.
- دامنه سختی پوشش ایجاد شده بر حسب شرایط ایجاد، در محدوده ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ ویکرز قرار داشت.
- افزایش میزان تقویت کننده کاربید سیلیسیوم و کاهش حرارت ورودی منجر به افزایش سختی پوشش شد.
- مکانیزم 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.

#### مراجع

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

- [6] ASTM A-106. Standard specification for seamless carbon steel pipe for high temperature service. USA: ASTM International, 2011.
- [7] Lippold J, Kotecki D, Welding metalurgy and weld ability of stanless stells, John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [8] Buytoz S, Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel, Surface & Coatings Technology, 200, 2006, 3734-3742.
- [9] Buchely M F, Gutierrez J C, The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, Wear, 259, 2005, 52-61.
- [10] Majumdar J, Studies on compositionally graded silicon carbide dispersed composite surface on mild steel developed by laser surface cladding, 203, 2008, 505-512.
- [11] Yang R, Liu Z, Study of in-situ synthesis TiCp/Ti composite coating on alloy Ti6Al4V by TIG cladding, 36, 2012, 349-354.
- [12] Lin Y C, Elucidating the microstiucture and wear behavior of tungsten carbide, Journal of Materials Processing Technology, 210, 2010, 219-225.
- [13] Amini K, Akhbarizadeh A, 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, 45, 2013, 316-322.