

# بهبود سختی و مقاومت به سایش فولاد ASTM A-106 با استفاده از ذرات SiC به روش جوش کاری GTAW

حسین مظاهری<sup>۱\*</sup>، محمود فاضل نجف‌آبادی<sup>۲</sup> و علیرضا اعلایی<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی مواد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، ایران

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

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۲۷

## 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 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 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 نشان‌دهنده 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.

**کلمات کلیدی:** جوش کاری قوسی تنگستن-گاز، پوشش‌دهی سطحی، کامپوزیت فولاد / کاربید سیلیسیوم

## مقدمه

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

عملیات سطحی روی فولادها می‌تواند مقاومت خوردگی، مقاومت سایشی یا رفتار خستگی آنها را بهبود دهد [۱]. یکی از روش‌های سخت کاری سطحی<sup>۱</sup> استفاده از روش‌های معمول جوش کاری

1. Hard Facing

دادند که ساختار تازه‌شکل‌گرفته 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 شرایط سرویس‌دهی با دمای بالا، کاربردی بسیار وسیع دارد ولی سختی و مقاومت به سایش ضعیف آن محدودیت‌هایی را در کاربرد این فولاد ایجاد کرده‌اند [۹-۱۰]. در این پژوهش از روش جوش کاری GTAW برای تشکیل لایه‌های کامپوزیتی حاوی ذرات SiC روی سطح فولاد ASTM A106 Gr.B استفاده و تاثیر تغییر درصد حجمی SiC و تغییر شدت جریان جوش کاری بر ساختار، سختی و رفتار سایشی پوشش ایجادشده بررسی و مطالعه شد.

### مواد و روش آزمون

در این پژوهش از فولاد کربنی ASTM A106 Gr.B (معادل فولاد St ۴۵/۸ مطابق با استاندارد DIN) با ابعاد  $۸ \times ۴۵ \times ۱۵۰$  میلی‌متر استفاده شد. ابتدا قطعات تمیز و تا سنباده شماره ۳۲۰ سنباده زده شدند تا آلودگی‌های سطحی‌شان برطرف شوند. سپس آنالیز عنصری و بررسی ریزساختار میکروسکوپی روی ماده اولیه انجام شد. برای ایجاد لایه سطحی از پودر SiC با ابعاد متوسط ذرات ۳ تا ۴ میکرومتر استفاده شد. ذرات با آغشته شدن به اتانول و استفاده از شابلون حاوی حفره با ابعاد  $۱۲ \times ۱۳۰$  میلی‌متر ثابت شدند. برای ذوب سطحی فولاد، از روش جوش کاری 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 روی گروه‌هایی از نمونه‌ها در شرایط مختلف، مطابق با جدول ۱، انجام شد. شماتیک این روش در شکل ۱ نشان داده شده است.

پس از ایجاد لایه با جوش کاری GTAW سطح نمونه‌ها کاملاً ناهموار شد.

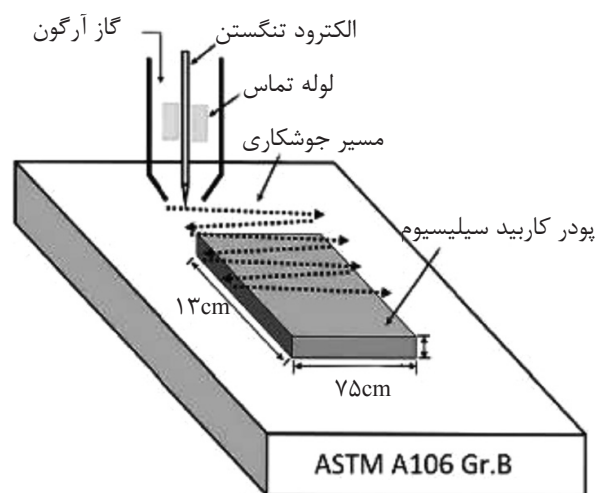
یکی از روش‌های متداول بهبود رفتار سطحی، افزودن عناصر آلیاژی همچون کروم، کربن، کبالت و مولیبدن یا ذرات سرامیکی مانند SiC، TiC، WC و  $B_4C$  به مذاب ایجادشده در سطح و تشکیل لایه‌ای با ضخامت قابل توجه روی سطح است [۴]. مثلاً یو-چی‌لین و همکارانش در پژوهشی به بررسی ریزساختار و عمل‌کرد سایشی لایه SiC پوشش‌داده‌شده روی فولاد کشته‌شده SKD61 با روش GTAW پرداخته و گزارش کرده‌اند که ذرات SiC طی فرآیند GTAW تجزیه شده و فازهای شبه‌پایدار مانند  $Fe_3C$  و  $Fe_8Si_2$  و همچنین فاز پایدار گرافیت در سیستم سه‌تایی Fe-Si-C به وجود آمده‌اند. این محققان مدعی شده‌اند که همین رخدادها به افزایش سختی و مقاومت به سایش لایه سطحی منجر شده‌اند [۵]. سانر و همکارانش در تحقیقی دیگر سطح فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۰۴ را با پودر SiC به روش جوش کاری قوسی تنگستن-گاز پوشش دادند. آنها نشان دادند که می‌توان با ترکیب ثابت پودر اولیه، و فقط با کاهش حرارت ورودی و افزایش مقدار پودر استفاده‌شده، ناحیه ذوب در زیرلایه را به حداقل رساند و رقت را به حداقل کاهش داد. با این کار ساختار هیپووتکتیک سطحی به ساختار هایپرئوتکتیک تبدیل خواهد شد. به نظر آنها بیشینه سختی به دست آمده به حضور کاربیدهای  $M_7C_3$  پراکنده در سطح فولاد مربوط است [۶].

در همین زمینه یانگ و همکارانش ذرات SiC را روی آلیاژ Ti6Al4V با فرآیند جوش کاری قوسی تنگستن-گاز و با استفاده از سیم توپودری پوشش دادند. آنها مدعی هستند که به این شیوه می‌توان یک پیوند متالورژیکی خوب را بین پوشش و زیرلایه به دست آورد که در نتیجه آن پوشش یک‌نواخت، متراکم و تقریباً عاری از نقص خواهد بود و باعث افزایش قابل توجه سختی خواهد شد [۷]. عثمان و همکارانش ذرات کاربید سیلیسیوم را با روش جوش کاری قوسی تنگستن-گاز روی فولاد AISI ۸۶۲۰ پوشش دادند. نتایج این مطالعه نشان

جدول ۱ پارمترهای فرآیند رویه‌سازی به روش GTAW.

شماره نمونه	درصد حجمی SiC	شدت جریان (A)	نوع گاز محافظ	نرخ دمش گاز محافظ (L/min)	نوع قطبیت	سرعت (mm/min)	حرارت ورودی (kJ/mm)
۱	۴	۹۰	آرگون	۸	DCEN	۳۲/۱۶	۲۰/۱۴
۲	۸	۹۰	آرگون	۸	DCEN	۱۸/۲۸	۳۵/۴۴
۳	۱۲	۹۰	آرگون	۸	DCEN	۱۶/۹۹	۳۸/۱۴
۴	۸	۱۱۰	آرگون	۸	DCEN	۲۸/۴۴	۲۷/۸۴
۵	۸	۱۳۰	آرگون	۸	DCEN	۲۹/۰۹	۳۲/۱۷

سرعت جوش کاری (۰/۴۸ × ولتاژ × شدت جریان) = حرارت ورودی



شکل ۱ شماتیک شیوه استفاده‌شده در ایجاد پوشش.

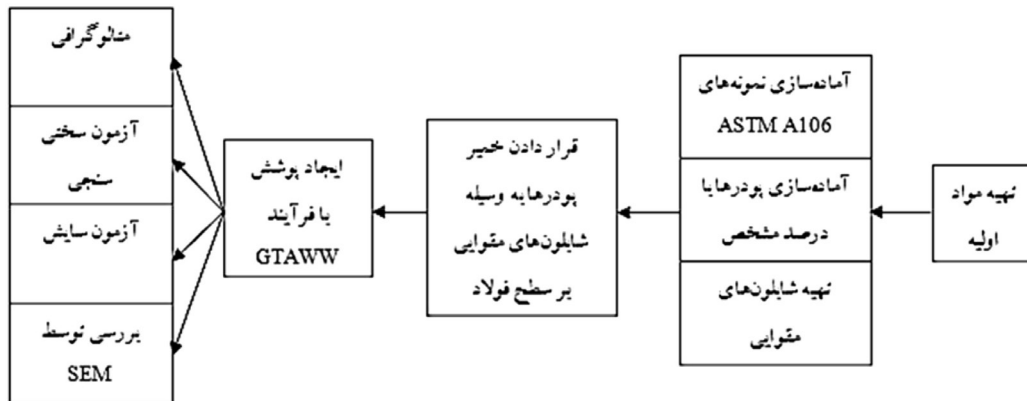
سایش رفت‌وبرگشتی، با استفاده از پین‌هایی از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ و با بار ۱۵۰ N، انجام شدند. جرم از دست‌رفته در فواصل ۵۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰ و ۲۰۰ متر با ترازوی GIBERTINIE 42 S-B با دقت ۰/۰۰۰۱ gr اندازه‌گیری شد. در شکل ۲ فلوجارت رویه اجرایی این پژوهش ارائه شده است.

### نتایج و بحث

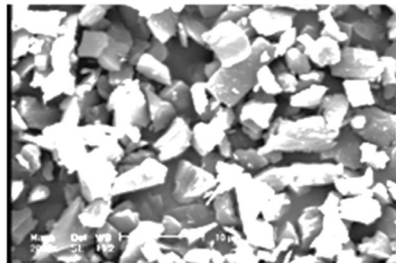
#### بررسی‌های ریزساختاری

شکل‌های ۳ و ۴ ریزساختار فلز پایه و ذرات کاربید سیلیسیوم استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهند.

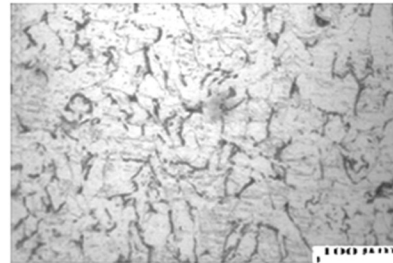
ضخامت پوشش در این حالت ۳ تا ۴ میلی‌متر بود. برای انجام عملیات بعدی همه نمونه‌ها با سنگ مغناطیسی سنگ زده شدند و ضخامت پوشش به ۲ تا ۳ میلی‌متر کاهش یافت. بررسی ریزساختاری پوشش به‌دست‌آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با آنالیز نقطه‌ای انجام شد. برای اچ کردن نمونه‌ها از محلول نایتال ۴/(۹۶ mm الکل + ۴ mm اسیدنیتریک یک مولار) استفاده شد. پروفیل سختی از سطح به طرف فلز پایه و در مقطع عرضی پوشش با ریزسختی‌سنجی و فرورونده ویکرز با بار اعمالی ۱۰۰ gr به مدت ۵ ثانیه به دست آمد. بررسی‌های سایشی نیز با دستگاه



شکل ۲ رویه اجرایی انجام تحقیق و مراحل آن.



شکل ۴ تصویر SEM از ذرات پودر SiC استفاده شده.



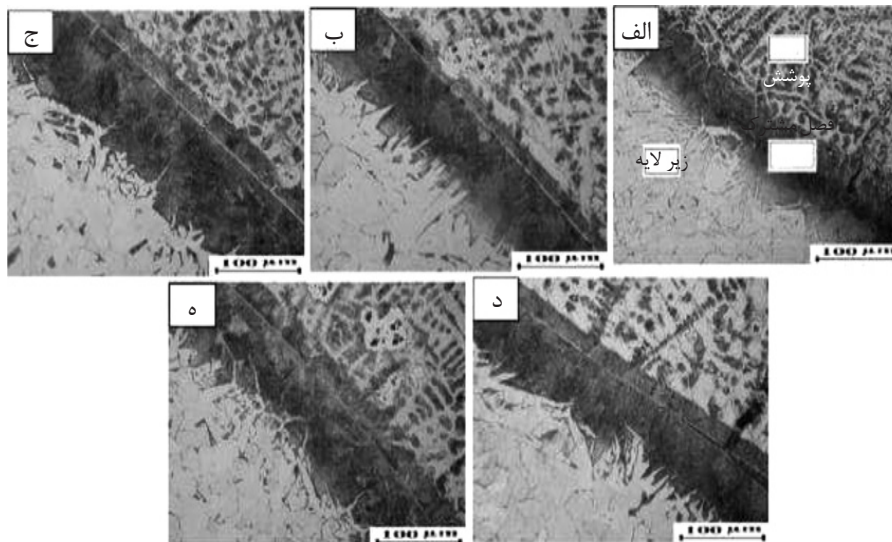
شکل ۳ ریزساختار فولاد ASTM A106-Gr.B.

دیده می شود که ساختاری نمونه های اولیه فریت-پرلیت با دانه های هم محور در محدوده ابعادی ۱۰ تا ۷۰ میکرون است. این ابعاد برای ذرات کاربیدی تقویت کننده نیز با توجه به تصویر ۳ تایید شد. در جدول ۲ نیز ترکیب شیمیایی فولاد استفاده شده ارائه شده که به خوبی با ساختار میکروسکوپی مشاهده شده در تصویر شکل ۲ تطابق دارد. شکل ۵ سطح مقطع نمونه های پوشش داده شده را در بزرگنمایی پایین نشان می دهد. تصاویر این شکل مشخص می کنند که در تمام نمونه ها، سطح و فصل مشترک زیرلایه 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 زیرلایه فولادی، به دست آمده است. نتایج مطالعات دیگر محققان نیز همین موضوع را نشان می دهند [۱۱]. در شکل ۶ نیز تصاویر میکروسکوپی ریزساختار پوشش با بزرگنمایی بالاتر آمده اند که نشان می دهند پوشش ایجاد شده ساختار دندریتی دارد. به نظر می رسد این ساختار در نتیجه انجماد سریع مذاب سطحی طی فرآیند جوش کاری قوسی تنگستن-گاز به وجود آمده باشد، زیرا حجم مذاب ایجاد شده در برابر کل فلز جامد مرتبط با آن چندان زیاد نیست؛ بنابراین قدرت سرد کردن بالای زیرلایه می تواند عامل ایجاد چنین ساختار انجمادی باشد. تفاوت زیاد نقطه ذوب آهن و فازهای تشکیل شده در اثر تجزیه کاربید سیلیسیوم نیز می تواند دلیل دیگر حصول چنین ساختار دندریتی باشد که دیگر محققان نیز به آن اشاره داشته اند [۱۲]. بررسی های دقیق تر نشان دادند که ذرات کاربید سیلیسیوم وارد شده به لایه سطحی در میان شاخه های دندریتی قرار گرفته اند. شکل ۷ حضور مقدار قابل توجه ذرات کاربید سیلیسیوم را در ساختار پوشش به وضوح نشان می دهد. همچنین دیده می شود که این ذرات که قبل از استفاده سطحی کاملاً مسطح داشته اند (شکل ۴)، پس از طی فرآیند و قرارگیری در لایه سطحی، سطحی غیریک نواخت و ناصاف پیدا کرده اند (شکل ۷). همچنین در برخی از ذرات کاهش محسوس ابعادی مشاهده می شود. ناصافی سطح ذرات و کاهش ابعاد می تواند به دلیل انحلال بخشی از کاربید سیلیسیوم در آهن باشد.

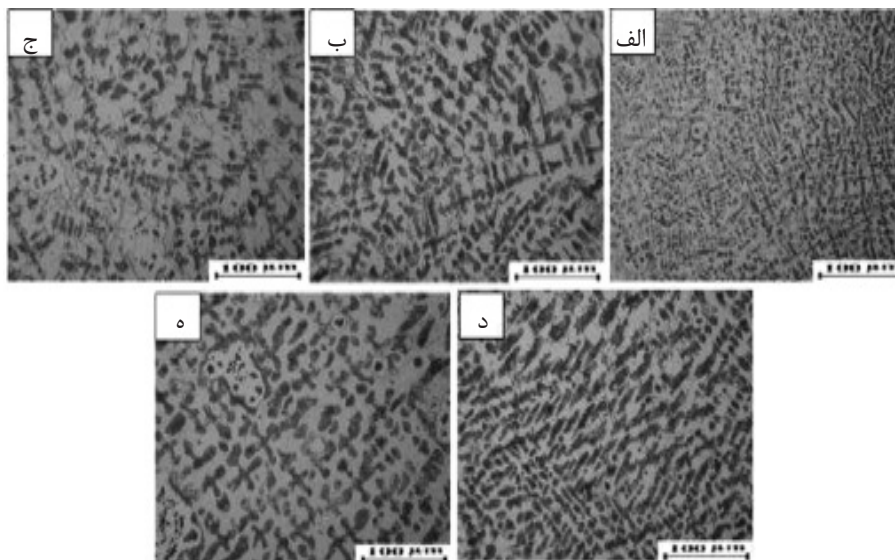
دیده می شود که ساختاری نمونه های اولیه فریت-پرلیت با دانه های هم محور در محدوده ابعادی ۱۰ تا ۷۰ میکرون است. این ابعاد برای ذرات کاربیدی تقویت کننده نیز با توجه به تصویر ۳ تایید شد. در جدول ۲ نیز ترکیب شیمیایی فولاد استفاده شده ارائه شده که به خوبی با ساختار میکروسکوپی مشاهده شده در تصویر شکل ۲ تطابق دارد. شکل ۵ سطح مقطع نمونه های پوشش داده شده را در بزرگنمایی پایین نشان می دهد. تصاویر این شکل مشخص می کنند که در تمام نمونه ها، سطح و فصل مشترک زیرلایه 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 زیرلایه فولادی، به دست آمده است. نتایج مطالعات دیگر محققان نیز همین موضوع را نشان می دهند [۱۱]. در شکل ۶ نیز تصاویر میکروسکوپی ریزساختار پوشش با بزرگنمایی بالاتر آمده اند که نشان می دهند پوشش ایجاد شده ساختار دندریتی دارد. به نظر می رسد این ساختار در نتیجه انجماد سریع مذاب سطحی طی فرآیند جوش کاری

جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A106 Gr.B

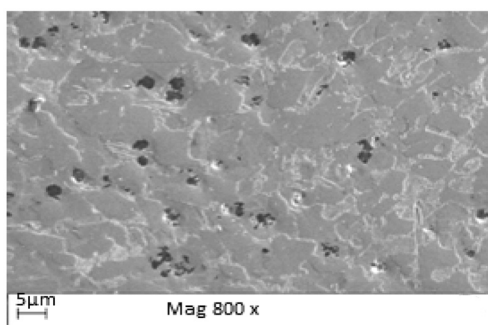
عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	Sn	Fe
درصد	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۴۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۹۸	۰/۰۳	۰/۱۰	۰/۰۳۱	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	بقیه



شکل ۵ سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده با بزرگ‌نمایی ۱۰۰: (الف) نمونه ۲؛ (ب) نمونه ۳؛ (ج) نمونه ۴؛ (د) نمونه ۵ و (ه) نمونه ۶.



شکل ۶ ریزساختار پوشش سطحی نمونه‌های مختلف با بزرگ‌نمایی ۲۰۰: (الف) نمونه ۲؛ (ب) نمونه ۳؛ (ج) نمونه ۴؛ (د) نمونه ۵ و (ه) نمونه ۶.



شکل ۷ ریزساختار پوشش ایجاد شده روی نمونه ۲.



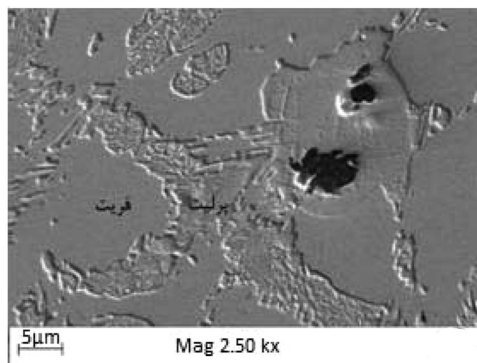
### نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی

نتایج حاصل از ریزسختی پوشش‌های ایجادشده طی این پژوهش در شکل ۱۰ ارائه شده‌اند. 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 مقدار پرلیت و نیز دانه‌های ریز ایجادشده در شرایط انجمادی سریع جوش کاری، سختی بالایی (HV ۱۲۰۰-۶۵۰) دارند. این شرایط می‌توانند مقاومت بالا در برابر سایش را در پی داشته باشند. نمودارهای مربوط به پروفیل سختی پوشش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش ذرات تقویت کننده، سختی لایه‌های ایجادشده در سطح و در فصل مشترک افزایش می‌یابد. همچنین درباره نمونه‌های ۳، ۵ و ۶ که مقداری یکسان ذرات تقویت کننده دارند و با شدت جریان‌های متفاوت جوش کاری تحت عملیات سطحی قرار گرفته‌اند (جدول ۱) می‌توان گفت که کاهش حرارت ورودی به کاهش رقت آهن از زیرلایه و ریزتر شدن ساختار منجر شده است. این عوامل باعث افزایش سختی نمونه ۵ نسبت به نمونه ۶ و ۳ و نمونه ۶ نسبت به نمونه ۳ شده‌اند. محققان دیگر نیز نتایجی مشابه را ارائه کرده‌اند [۱۴].

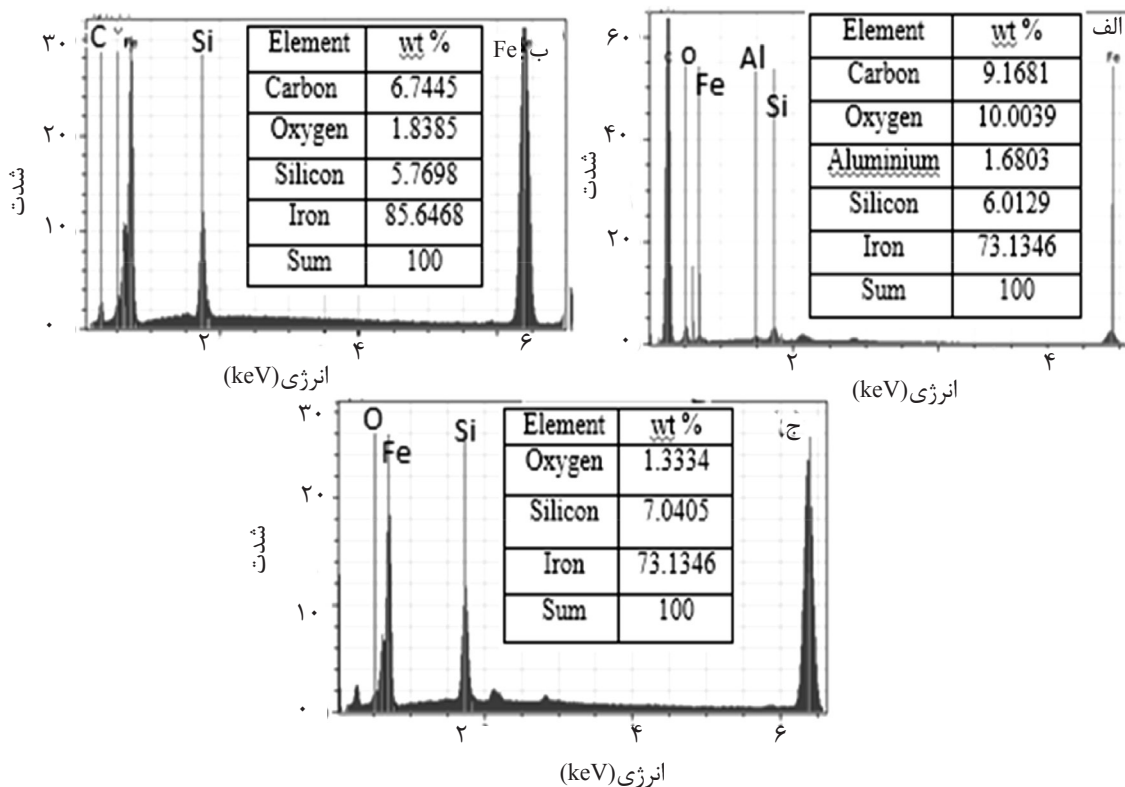
### رفتار تریبولوژیکی

بررسی رفتار سایشی نمونه‌های پوشش داده شده نتایجی جالب را به همراه داشت. شکل ۱۱ نمودار کاهش وزن برحسب مسافت طی شده را برای نمونه‌های آزمون سایش نشان می‌دهد.

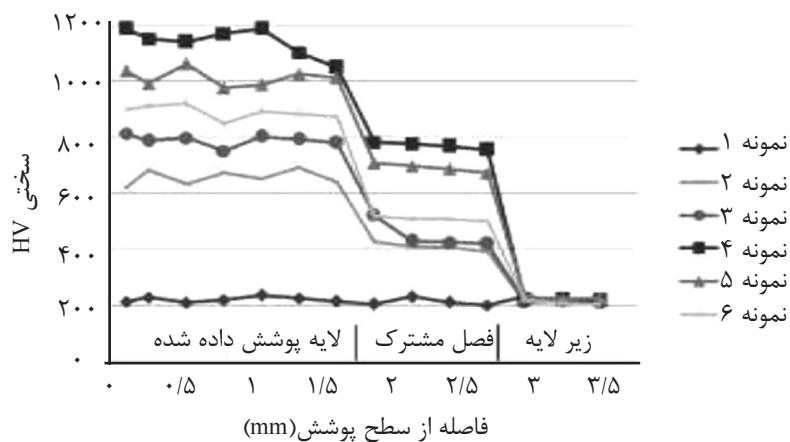
شکل ۸ ریزساختار بخشی از پوشش ایجاد شده روی نمونه ۲ را در بزرگ‌نمایی بالاتر نشان می‌دهد. در این تصویر دانه‌های فریت، کولونی‌های پرلیت و ذرات کاربید سیلیسیوم به خوبی قابل تشخیص هستند. دیده می‌شود که علی‌رغم مقدار کم کربن فولاد استفاده شده، مقدار پرلیت تشکیل شده در پوشش بیش از مقدار موردانتظار است. حضور این پدیده را می‌توان به انحلال بخشی از ذرات کاربید سیلیسیوم و ورود کربن به مذاب مربوط دانست. از سوی دیگر، در اطراف ذرات کاربید سیلیسیوم ناحیه‌ای از فریت مشاهده می‌شود که حین اچ شیمیایی بیش از فریت زمینه خورده شده که این به معنی فعال و ناپایدارتر بودن اتم‌ها در این ناحیه است. این پدیده می‌تواند به دلیل 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 (شکل ۹) نشان می‌دهند که این مناطق از کربن و سیلیسیوم غنی هستند و دیگر محققان نیز این موضوع را گزارش کرده‌اند [۱۳]. انحلال سریع سطحی ذرات حین فرآیند موجب ناصافی سطح ذرات کاربید سیلیسیوم شده و پیوندهای میکرومکانیکی این ذرات با زمینه را تقویت کرده است. در حقیقت این پدیده نقشی مهم در ایجاد یک کامپوزیت سطحی و عدم جدایش ذرات حین فرآیند، علی‌رغم تفاوت چگالی این دو ماده، داشته است.



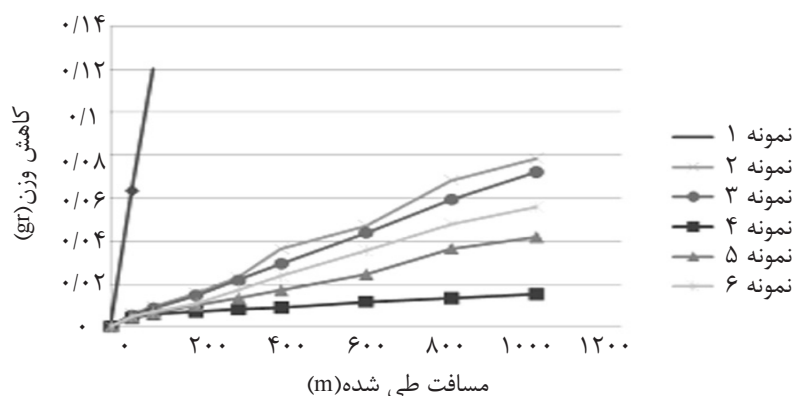
شکل ۸ ریزساختار پوشش ایجادشده روی نمونه ۲.



شکل ۹ نتایج آنالیز EDS بخش‌هایی از پوشش ایجادشده روی نمونه ۲: الف) ذرات کاربید؛ ب) فریت اطراف ذرات و ج) سمانتیت اطراف ذرات.



شکل ۱۰ پروفیل سختی سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش داده‌شده.



شکل ۱۱ نمودار کاهش وزن برحسب مسافت طی شده برای نمونه‌های تحت آزمون سایش.

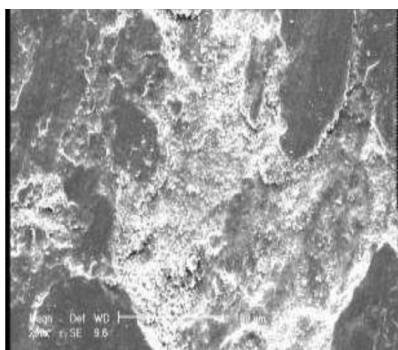
می‌دهد. این امر سازوکارهای هم‌زمان سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی را در این نمونه نشان می‌دهد. معمولاً نمی‌توان به نشانه یا مشخصه تصویری خاصی برای سازوکار سایش اکسیداسیون در تصاویر SE<sup>۱</sup> اشاره کرد، اما در تصاویر BSE<sup>۲</sup>، سازوکار اکسیداسیون را می‌توان به‌صورت حضور فازی سیاه‌رنگ در لبه‌ها دید که در صورت درست بودن احتمال سازوکار اکسیداسیون، آنالیز نمونه نیز حضور بعضی عناصر یکی از سطوح را به‌علاوه مقادیری قابل‌توجه از اکسیژن تایید می‌کند. دیگر محققان نیز چنین پدیده‌ای را گزارش کرده‌اند [۱۶].

در ادامه نتایج حاصل از آزمون‌های انجام‌شده بر نمونه‌های پوشش‌داده‌شده تحلیل خواهند شد. شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه شماره ۲ را پس از انجام آزمون سایش نشان می‌دهد. در تصویر ۱۴ آثار خراشیدگی و کندگی روی سطح واضح نیستند که می‌تواند دلیل آن باشد که با ورود مقدار کمی از ذرات کاربید سیلیسیوم (۴ درصد)، علی‌رغم افزایش سختی سطح و وجود ذرات سخت در پوشش، سایش خراشان سازوکار سایش غالب این نمونه نبوده است. دیده می‌شود که هم‌چنان جدا شدن ورقه‌های سطحی و اکسایش عامل سایش در این نمونه بوده‌اند. خصوصاً آن که تصویر به‌دست‌آمده از الکترون‌های پس‌پراکنده‌شده به‌وضوح حضور مناطقی با چگالی کم‌تر از فولاد را مشخص کرده است. این امر می‌تواند دلیلی بر وجود اکسیدهای سطحی در مناطق بررسی‌شده باشد. در شکل ۱۵ ذرات سایشی مربوط به همین نمونه‌ها نشان داده شده‌اند. این تصویر حاکی از آن است که هم‌چنان ذرات اکسیدی و ورقه‌های فلزی تشکیل‌دهندگان محصولات سایش هستند. برای اطمینان بیش‌تر، ذرات ریز حاصل از سایش با استفاده از سیستم EDS میکروسکوپ الکترونی روبشی آنالیز شدند (شکل ۱۶).

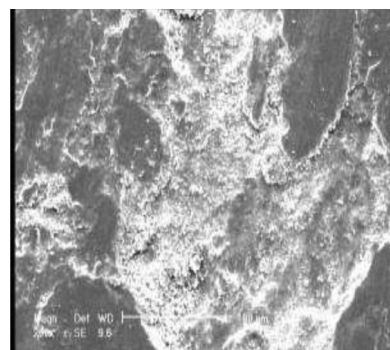
مشاهده می‌شود که با افزایش مسافت طی‌شده مقدار جرم ازدست‌رفته نمونه ۱ به‌شکل پیوسته و بدون نشان دادن رفتار کندشونده افزایش می‌یابد. این نتایج با توجه به رفتار سایشی ضعیف فولاد کرده‌اند [۱۵] دور از انتظار نیست. این در حالی است که در دیگر نمونه‌ها و با افزایش سختی، مقاومت در برابر سایش افزایش یافته است. آن گونه که نمودارهای کاهش وزن برحسب مسافت سایش نشان می‌دهند، آن چه در مقدار مقاومت در برابر سایش نمونه‌ها اهمیت داشته مقدار مطلق سختی بوده است، به‌گونه‌ای که نمونه‌های شماره ۳، ۵ و ۶، علی‌رغم برخورداری از مقداری یکسان از ذرات تقویت‌کننده کاربیدی در پوشش، مقاومت در برابر سایش متفاوتی را نشان داده‌اند. اما دیده می‌شود که با افزایش مقدار ذرات سخت کاربیدی و افزایش قابل‌ملاحظه سهم این ذرات از سختی کلی پوشش، مقاومت در برابر سایش بسیار تقویت شده است. فاصله نتایج حاصل، خصوصاً در مسافت‌های بالا، این مطلب را تایید می‌کند که حضور مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از ذرات سخت در لایه سطحی و ایجاد شرایط بهینه فرآیند می‌تواند موجب افزایش متناسب سختی و مقاومت سایشی شود. شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاصل از سطح سایش نمونه شماره ۱ را پس از انجام آزمون سایش نشان می‌دهد. به‌نظر می‌رسد که بخشی از سطح به شکل لایه‌ای از آن جدا شده و بخشی دیگر به‌صورت ورقه‌هایی روی سطح تشکیل شده که در آستانه جدا شدن بوده‌اند. این امر می‌تواند سازوکار سایش ورقه‌ای را نشان دهد. همچنین در بخش‌هایی از این سطح سایش، آثار اکسایش سطحی و ایجاد ذرات بسیار ریز اکسیدی مشاهده می‌شوند. شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات سایشی حاصل از آزمون انجام‌شده بر این نمونه و شکل ۱۲ حضور هم‌زمان ذرات سایشی ورقه‌ای به‌همراه ذرات بسیار ریز اکسیدی را نشان

1. Secondary Electrons  
2. Back Scatter Electrons

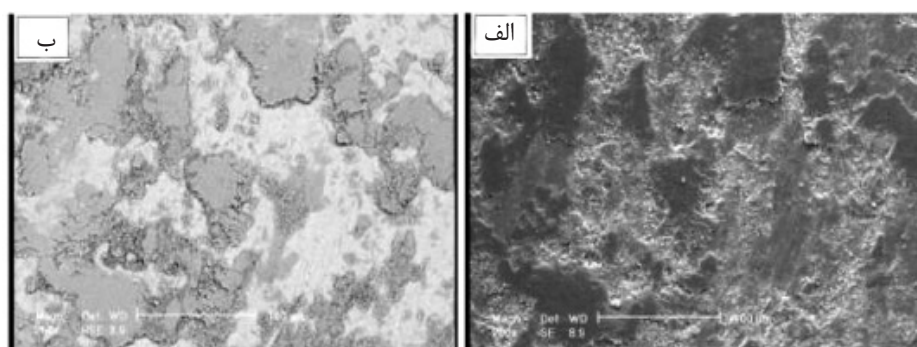




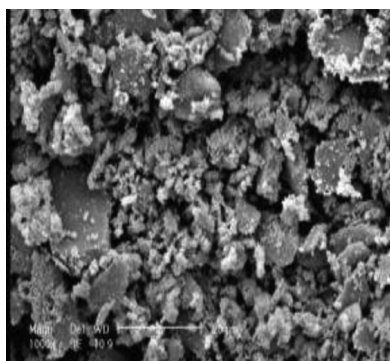
شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات حاصل از سایش نمونه ۱.



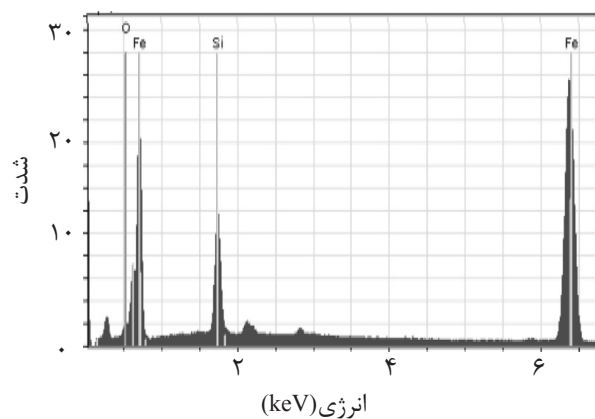
شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه ۱.



شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه ۲: الف) تصویر به دست آمده از الکترون‌های ثانویه (SE) و ب) همان تصویر با استفاده از الکترون‌های پس‌پراکنده شده (BSE).



شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات حاصل از سایش نمونه ۲.



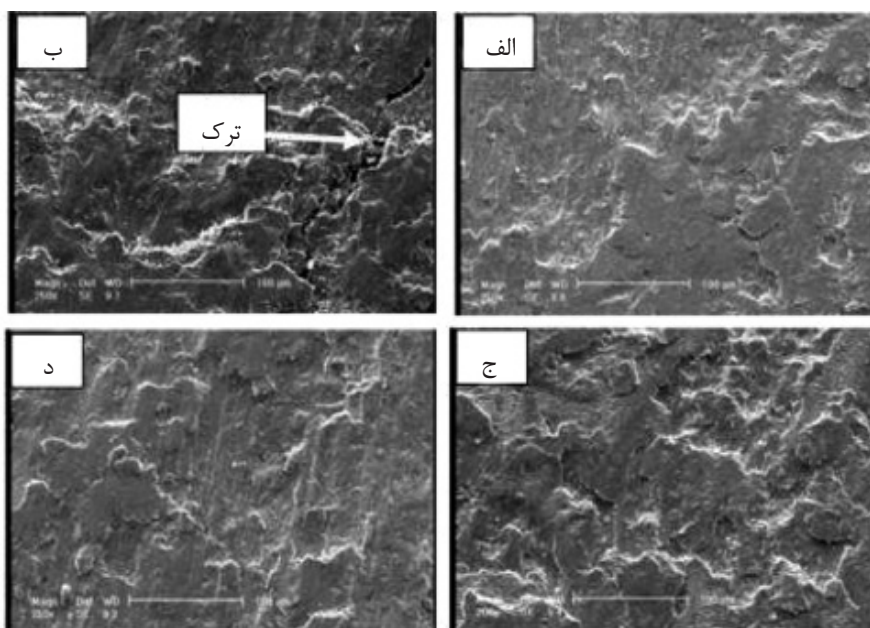
شکل ۱۶ نتیجه آنالیز EDS ذرات ریز موجود در ذرات سایشی حاصل از آزمون سایش نمونه ۲.

چندان زیاد نیست؛ لذا به نظر می‌رسد که سازوکار غالب سایش در تمام نمونه‌ها ترکیبی از سایش ورقه‌ای، اکسایش سطحی و سایش چسبان باشد که دیگر محققان نیز وجود این سازوکار را تایید کرده‌اند [۱۷]. آن چه در این جا اهمیت دارد آن است که علی‌رغم وجود ذرات سخت سرامیکی درون زمینه‌ای نسبتاً نرم از فولاد کم‌کربن، سازوکار سایش خراشان غالب نبوده است که می‌توان مقدار نسبتاً پایین ذرات سخت وارد شده به زمینه و اتصال مناسب زمینه و ذرات را عامل این پدیده دانست. 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.

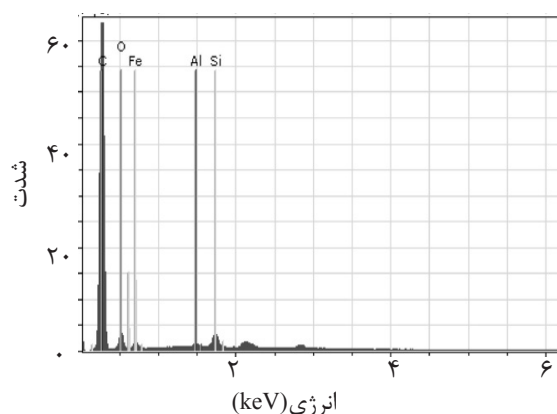
با عنایت به آن چه تاکنون گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر مشخصه‌های فرآیند هم‌چون مقدار جریان استفاده‌شده و سرعت پیش‌روی می‌تواند حرارت ورودی را کنترل کند. به‌دلیل سختی بالای فاز SiC، سختی نمونه‌های حاوی تقویت‌کننده SiC بیش از سختی نمونه بدون تقویت‌کننده بوده است. همان گونه که مشخص است سختی لایه‌های سطحی ایجاد شده متفاوت است که می‌توان آن را به اختلاف گرمای ورودی و تاثیر آن بر سرعت انجماد و در نتیجه ایجاد ساختارهای متفاوت و هم‌چنین مقدار فاز تقویت‌کننده نسبت داد. سختی نمونه‌ها با افزایش مقدار تقویت‌کننده و کاهش حرارت ورودی افزایش یافته است. نتایج نشان دادند که تغییر حرارت ورودی مستقیماً بر مقدار انحلال ذرات در حوضچه مذاب، نحوه اختلاط آنها با زمینه و در نتیجه مقدار چسبندگی آنها به زمینه تاثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، مقدار ذرات وارد شده به زمینه و کیفیت و سازوکار اتصال زمینه به ذرات، که تحت کنترل انحلال سطحی ذرات در زمینه است، خواص مکانیکی و تریبولوژیکی، از جمله رفتار سایشی، را کنترل خواهند کرد.

نتیجه آنالیز عنصری این ذرات سایشی نشان می‌دهد که آنها از ترکیب اکسیژن و آهن تشکیل شده‌اند که خود تاییدکننده رخداد هم‌زمان سازوکارهای سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی است. بررسی‌های ریزساختاری این نمونه‌ها و کیفیت سطحی حاصل برای ذرات کاربید سیلیسیوم در حین فرآیند، که قبلاً به آن پرداخته شد، تایید می‌کنند که ذرات کاربیدی به‌شکلی قابل‌ملاحظه با زمینه در پیوند بوده‌اند، به‌گونه‌ای که از سطح سخت خارج نشده و تاثیری موثر بر سازوکار سایش نداشته‌اند.

در ادامه سطوح سایش مربوط به دیگر نمونه‌ها بررسی شدند. شکل ۱۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی حاصل از سطح سایش نمونه‌های گروه‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ را نشان می‌دهد. تصاویر (ب) و (ج) به نمونه‌های با سختی بالا مربوط‌اند و نشان می‌دهند که در سطح سایش آثار کنده شدن لایه‌های سطحی توام با ترک‌خوردگی در سطح وجود دارند؛ یعنی احتمالاً سازوکار سایش ورقه‌ای هم‌چنان به‌همراه سایش چسبان و خراشان رخ داده است، خصوصاً آن که در میان ذرات سطحی حاصل از سایش این نمونه‌ها ذرات کاربید سیلیسیوم مشاهده شده‌اند. در شکل ۱۸ نتیجه آنالیز عنصری ذرات سایشی حاصل از این نمونه‌ها نشان داده شده است. البته وجود این ریزترک‌ها می‌تواند نتیجه کارسختی سطحی نیز باشد. این ترک‌ها، اگر در مراحل اولیه سایش مشاهده شوند، می‌توانند در مراحل بعدی با کاهش شدید جرم همراه شوند. البته مشاهده ترک‌ها پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر می‌تواند مقاومت بالای پوشش را نشان دهد، 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 ۱۷ نشان می‌دهد که در سطح سایش، علاوه بر وجود آثار رخداد سازوکارهای سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی، شیارهای ناشی از خراش سطحی نیز وجود دارند، اما تعداد آنها



شکل ۱۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ها: الف) نمونه ۳؛ ب) نمونه ۴؛ ج) نمونه ۵ و د) نمونه ۶.



شکل ۱۸ نتیجه آنالیز EDS ذرات کاربیدی موجود در ذرات سایشی حاصل از آزمون سایش نمونه ۴.

### نتیجه گیری

خلاصه مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیراند:

- ۱- با استفاده از این شیوه، دستیابی به پوشش و فصل مشترک زیرلایه و پوشش خالی از ترک و حفره ممکن شد؛
- ۲- پوشش ایجادشده دارای ساختاری دندریتی و ریزدانه همراه با تقویت‌کننده‌های کاربید سیلیسیوم در نواحی بین دندریتی بود؛
- ۳- دامنه سختی پوشش ایجادشده برحسب شرایط

ایجاد در محدوده ۶۵۰ تا ۱۲۰۰ ویکرز بود؛  
 ۴- افزایش مقدار تقویت‌کننده کاربید سیلیسیوم و کاهش حرارت ورودی به افزایش سختی پوشش منجر شد؛  
 ۵- رفتار سایشی پوشش‌ها با افزایش مقدار تقویت‌کننده و کاهش حرارت ورودی بهبود یافت؛  
 ۶- سازوکار سایش در نمونه بدون پوشش از نوع ورقه‌ای و اکسایش سطحی و در نمونه‌های پوشش‌داده‌شده ترکیبی از سازوکارهای ورقه‌ای، اکسایش سطحی و سایش چسبان بود.

## مراجع

- [1]. Buytoz S. M. Yildirim M. and Eren H. "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]. Udhayabanu V. and 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, Vol. 18, pp. 353-358, 2010.
- [3]. Madadi F. and Shamanian M. "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]. Chen Y. C. "Reinforcements affect mechanical properties and wear behaviors of WC clad layer by gas tungsten Arc welding," Materials and Design, Vol. 45, pp. 6-14, 2013.
- [5]. Lin Y. C. and 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, Vol. 47, pp. 828-835, 2013.
- [6]. Buytoz S. and Ulutan M. "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]. Lin Y. C. "Microstructure and tribological performance of Ti-6Al-4V cladding with SiC powder," Surface & Coatings Technology, Vol. 205, pp. 5400-5405, 2011.
- [8]. Nuri Celik O. and Ulutun M. "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]. Tavares S. S. M. and Pardal J. M. "Failure of ASTM A-106 Gr.B tube by creep and erosive wear," Engineering Failure Analyses, Vol. 26, pp. 337-343, 2012.
- [11]. Lippold J. and Kotecki D., "Welding metallurgy and weld ability of stainless steels," New York, John Wiley & Sons, 2007.
- [12]. Buytoz, S. "Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel," Surface & Coatings Technology, Vol. 200, pp. 3734-3742, 2006.
- [13]. Buchely M. F. and Gutierrez J. C. "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys," Wear, Vol. 259, pp. 52-61, 2005.
- [14]. Majumdar J. "Studies on compositionally graded silicon carbide dispersed composite surface on mild steel developed by laser surface cladding," Surface & Coatings Technology, Vol. 203, pp. 505-512, 2008.
- [15]. Yang R. and Liu Z. "Study of in-situ synthesis TiCp/Ti composite coating on alloy Ti6Al4V by TIG cladding," Materials and Design, Vol. 36, pp. 349-354, 2012.
- [16]. Lin Y. C. "Elucidating the microstructure and wear behavior of tungsten carbide," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, pp. 219-225, 2010.
- [17]. Amini K. and 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, Vol. 45, pp. 316-322, 2013.