



## بررسی ریزساختار و رفتار تریبولوژیکی لایه‌ی کامپوزیتی ایجاد شده حاوی ذرات کاربید سیلیسیوم روی فولاد ASTM A106 به روش جوشکاری GTAW

حسین مظاهری<sup>۱\*</sup>، محمود فاضل نجف‌آبادی<sup>۲</sup>، علیرضا اعلائی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، اصفهان

۳- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد

\* نجف‌آباد، صندوق پستی ۸۵۱۴۱۴۳۱۳۱، [Mazaheri2646@smt.iaun.ac.ir](mailto:Mazaheri2646@smt.iaun.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این پژوهش ایجاد پوشش کامپوزیتی حاوی ذرات کاربید سیلیسیوم بر سطح فولاد ASTM A106-Gr.B با به‌کارگیری فرآیند جوشکاری قوسی تنگستن-گاز بررسی شده است. بدین منظور ذرات کاربید سیلیسیوم با درصدهای حجمی متفاوت بر سطح فولاد مورد نظر پیش‌نشانی شده و با تغییر شدت جریان، فرآیند ذوب و اختلاط آن‌ها با فلز پایه انجام شد. 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 تقویت‌کننده‌ی 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 به‌صورت رفت و برگشتی ارزیابی شد. نتایج آزمون ریز سختی سنجی نشان دهنده‌ی 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 تقویت‌کننده‌ی کاربید سیلیسیوم بود. مکانیزم عمده‌ی سایش در نمونه‌ی بدون پوشش سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی و در نمونه‌های پوشش داده شده مخلوطی از سایش چسبان، اکسایش سطحی و سایش ورقه‌ای تشخیص داده شد.

دریافت: آبان ۹۳

پذیرش: بهمن ۹۳

### کلیدواژگان:

جوشکاری قوسی تنگستن-گاز،  
 پوشش‌دهی سطحی،  
 کامپوزیت فولاد-کاربید سیلیسیوم

## Study of microstructure and tribological behavior of the composite layer produced of silicon carbide particles on a steel ASTM A106 GTAW welding method

Hossein Mazaheri<sup>\*1</sup>, Mahmoud fazel Najafabadi<sup>2</sup>, Alireza Alaei<sup>1</sup>

1- Department of Material Engineering, Najafabad Branch of Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Payame Noor University, Esfahan, Iran

\*P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, [Mazaheri2646@smt.iaun.ac.ir](mailto:Mazaheri2646@smt.iaun.ac.ir)

### Keywords

Gas tungsten arc welding  
 Coating surface  
 Steel-silicon carbide  
 composite

### Abstract

In this study, formation of composite coating containing silicon carbide amplifiers on ASTM A106-Gr B steel surface using the gas tungsten arc welding process is investigated. Therefore silicon carbide particles with different volume percentages on the steel surface were placed and by changing the current density, melting and mixing process was done with the base metal. The study coating microstructure by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) was conducted alongside the spot analysis. The result showed that the dendritic structure of the resulting coating contains silicon carbide is capable of reinforcing that could be improved hardness and wear behavior of the coatings. Hard coatings by a micro-hardness measurement and with slab vickers and wear behavior of the coatings was evaluated by testing the wear-trip basis. Microhardness test results showed increased hardness was created (about 650 to 1150 Vickers) compared to uncoated samples (about 200 Vickers) is. Reviews wear behavior of coatings represent significant improvements in wear behavior of is added silicon carbide reinforcement. The main wear mechanism of uncoated samples delamination wear and surface oxidation and the samples were coated with a mixture of delamination wear, surface oxidation and adhesive wear were detected.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Mazaheri, H. fazel Najafabadi, M. and Alaei, A., "Study of Microstructure and Tribological Behavior of the Composite Layer Produced of Silicon Carbide Particles on a Steel ASTM A106 GTAW Welding Method" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 65-72, 2015.

۱- مقدمه

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 لایه‌ی 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.

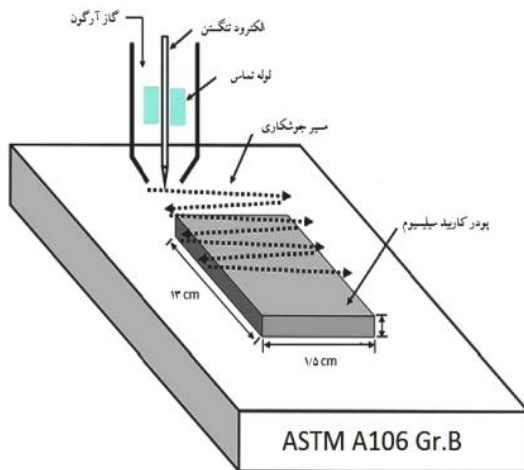
۲- مواد و روش آزمون

در این پژوهش از فولاد کربنی ASTM A106 Gr.B (معادل با فولاد St 45.8 مطابق با استاندارد DIN) با ابعاد ۸×۴۵×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد. در ابتدا قطعات تمیز شده و تا سنباده شماره ۳۲۰ سنباده زده شد تا آلودگی‌های سطحی آن بر طرف شود. سپس آنالیز عنصری بر 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 ۱۲×۱۳۰ 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. تصویر نمادین از روش مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ پارمترهای فرآیند روبه‌سازی به روش GTAW با نرخ دمش ۸ لیتر بر دقیقه

شماره نمونه	درصد حجمی ذرات	شدت جریان (A)	آرگون و قطبیت DCEN	
			سرعت (mm/min)	مقدار حرارت ورودی (kJ/mm)
۱	-	-	-	-
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

نمونه ۱: نمونه بدون پوشش  
سرعت جوشکاری (۴۸×۰/۴۸×ولتاژ×شدت جریان) = حرارت ورودی



شکل ۱ تصویر نمادین از شیوه مورد استفاده در ایجاد پوشش

عملیات سطحی بر روی فولادها می‌تواند مقاومت خوردگی، مقاومت سایشی یا رفتار خستگی آن‌ها را بهبود دهد [۱۱]. یکی از روش‌های سخت کاری سطحی<sup>۱</sup> 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 گسترده‌ی 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 B4C به مذاب ایجاد شده در سطح و تشکیل لایه‌ای با ضخامت قابل توجه بر روی سطح است [۴]. به عنوان مثال یوچی لین 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>2</sub>Si<sub>3</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].

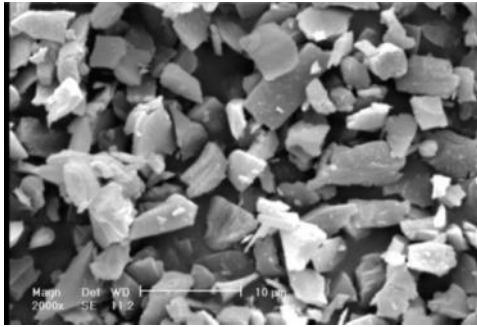
سانر و همکاران در تحقیقی دیگر سطح فولاد زنگ نزن AISI 304 را با پودر SiC به روش جوشکاری قوسی تنگستن - گاز پوشش دادند. آن‌ها نشان دادند که می‌توان با ترکیب ثابت پودر اولیه و فقط با کاهش حرارت ورودی و افزایش میزان پودر استفاده شده، ناحیه ذوب در زیر لایه را به حداقل رسانده و میزان رقت را به حداقل کاهش داد. 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<sub>7</sub>C<sub>3</sub> پراکنده در سطح فولاد مربوط باشد [۶].

در همین رابطه یانگ 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 نقص بوده و باعث افزایش قابل توجه سختی خواهد شد [۷].

اسمان 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].

در کامپوزیت‌های زمینه فلزی، زمینه از یک فلز انعطاف پذیر تشکیل می‌شود. مواد تقویت کننده ممکن است به شکل ذرات، رشته‌های پیوسته و ناپیوسته و یا ویسکرها باشند که ۱۰ الی ۶۰٪ حجمی کامپوزیت را تشکیل می‌دهد. رشته‌های پیوسته شامل کربن، کاربید سیلیسیوم، بور، آلومینا و فلزات دیرگداز است و رشته‌های ناپیوسته از ذرات همین مواد تشکیل می‌شوند. یک سیستم کامپوزیتی زمینه فلزی عمدتاً به سادگی و با استفاده از یک زمینه تشکیل شده از یک آلیاژ فلزی ساخته می‌شود که بوسیله یک تقویت کننده سرامیکی محافظت می‌شود که سختی و مقاومت به سایش را افزایش خواهد داد. فولاد مقاوم به حرارت ASTM A106 Gr.B در صنایع نفت، پتروشیمی و شیمیایی به دلیل پایداری در شرایط سرویس‌دهی با دمای بالا،

1. Hrad facing



شکل ۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی از ذرات پودر SiC مورد استفاده در پوشش‌سازی

جدول ۲ ترکیب شیمیایی فولاد ASTM A106 Gr.B			
عنصر	C	Si	Mn
درصد	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۴۸
عنصر	P	S	Ni
درصد	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۱۰
عنصر	Al	Cu	Fe
درصد	۰/۰۳۱	۰/۱۱	بقیه

نتایج گزارش شده از مطالعات سایر محققین نیز همین نتیجه را در پی داشته است [۱۱]. شکل ۵ تصویر نمادین از نحوه انجماد حوضچه جوش حین انجماد را نشان می‌دهد. آنگونه که در این تصویر مشاهده می‌شود، ساختار انجمادی حوضچه جوش تابعی از نرخ سرد شدن مذاب و تفاوت دمایی بین المان مذاب تحت بررسی و مرز حوضچه می‌باشد [۱۲]. در نمونه‌های تحت بررسی در این پژوهش، حجم مذاب ایجاد شده در سطح در برابر کل فلز جامد بسیار کم است. لذا محتمل است که در رژیم انجمادی حاصل از این شرایط، سرعت سرد شدن بالای مذاب و در نتیجه آن، رشد دندریتی فاز جامد در جهت عکس انتقال حرارت انجام شود. از سوی دیگر با توجه دمای مذاب در حوضچه (بالای ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد) ذرات کاربید سیلیسیوم قابلیت انحلال در فولاد مذاب را دارند اما فرصت کافی برای این امر وجود ندارد. لذا تنها انحلال جزئی آنها با مکانیزم ذوب ترکیبی پیپ و ساواژ [۱۲] در اینجا محتمل است. بر اساس این مکانیزم با انحلال جزئی ذرات، ترکیب مذاب در فصل مشترک ذرات و فلز تغییر کرده و از سیلیسیوم و کربن غنی خواهد شد. لذا دو رخداد مهم محتمل خواهد بود. نخست آنکه این تغییر در ترکیب موجب افزایش هم‌سیمایی بین ذرات و زمینه شده و اتصال ذرات با زمینه تقویت شود. و دوم آنکه آهن غنی از سیلیسیوم و کربن به صورت فریت غنی از این عناصر به صورت دندریتی رشد کرده و ذرات کاربیدی را در بر بگیرد. بدین صورت پیش‌بینی می‌شود، پس از اتمام فرآیند ایجاد پوشش، ذرات کاربیدی اولیه که دارای شکل هندسی بوده‌اند، با مورفولوژی غیر مسطح و قرار گرفته در میان فاز فریت مشاهده گردند. هم‌چنین شکل ۶ 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. بنابر این قدرت سرد کردن بالایی که زیر لایه از آن برخوردار است، می‌تواند عامل ایجاد چنین ساختار انجمادی باشد.

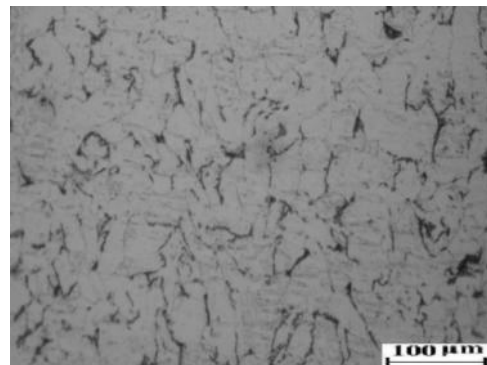
پس از ایجاد لایه با جوشکاری GTAW سطح نمونه‌ها به صورت کاملاً ناهموار درآمد. ضخامت پوشش در این حالت بین ۳ الی ۴ میلی‌متر بود. برای انجام عملیات بعدی همه نمونه‌ها تحت عمل سنگ‌زنی توسط سنگ مغناطیسی قرار گرفتند و ضخامت پوشش با انجام این مرحله به ۲ الی ۳ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. پس از تهیه نمونه‌های متالوگرافی از مقاطع عرضی پوشش ایجاد شده و قرارگیری در مانت، به منظور بررسی ریز ساختار پوشش، فصل مشترک و زیرلایه، نمونه‌های مانت شده توسط سنباده‌های ۶۰ الی ۲۵۰۰ سنباده‌کاری شد و سپس پولیش گردیدند. پس از آن نمونه‌ها توسط محلول نایتال ۴ درصد (۹۶ میلی‌لیتر الکل + ۴ میلی‌لیتر اسید نیتریک یک مولار) اچ گردید. جهت مطالعات میکروسکوپی، از دستگاه میکروسکوپ نوری Philips OLYMPUS مدل BH-2 و دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips مدل 30 XL 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 مطابق با استاندارد ASTM G 133-95 انجام شد. جرم از دست داده شده در فواصل ۵۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰ متر توسط ترازوی GIBERTINIE 42 S-B با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد.

### ۳- نتایج و بحث

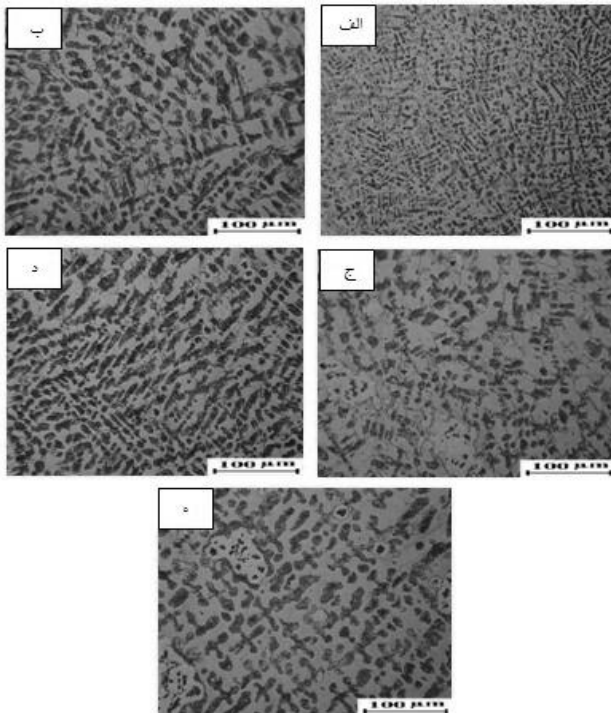
#### ۳-۱- بررسی‌های ریز ساختاری

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 هم‌محور 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 می‌شود که ترکیب شیمیایی به خوبی با ساختار میکروسکوپی مشاهده شده در تصویر شکل ۲ تطابق دارد.

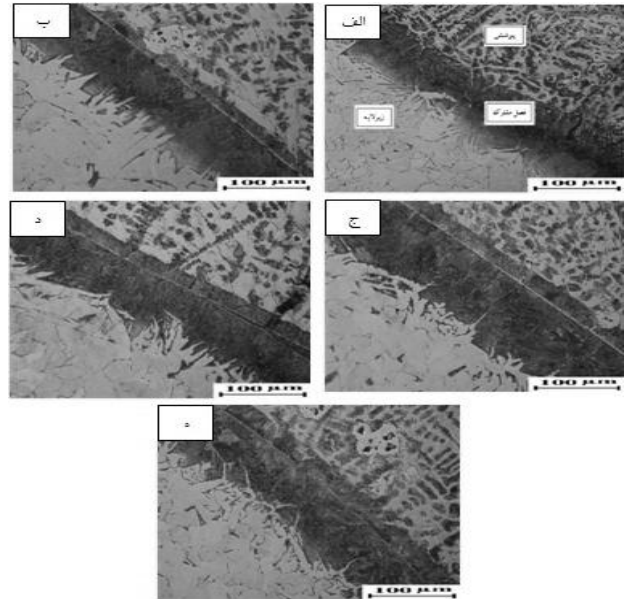
شکل ۴ سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده را در بزرگنمایی پایین نشان می‌دهد. تصاویر نشان داده شده در این شکل مشخص می‌کند که در تمامی نمونه‌ها، سطح و فصل مشترک زیر لایه و پوشش خالی از ترک و حفره است. به عبارت دیگر با استفاده از این روش لایه کامپوزیتی متراکم، با کیفیت و با نفوذ کامل لایه پیش‌نشانی شده به زیر لایه فولادی به دست آمده است.



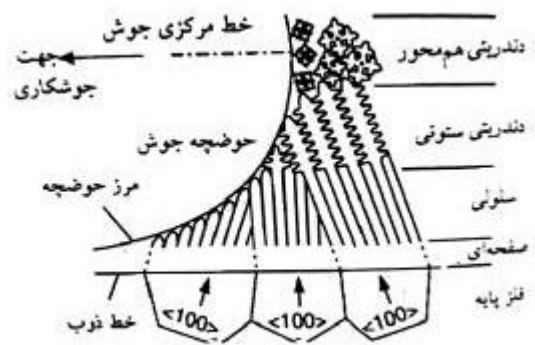
شکل ۲ ریز ساختار فولاد ASTM A106-Gr.B مورد استفاده با استفاده از محلول نایتال ۴ درصد



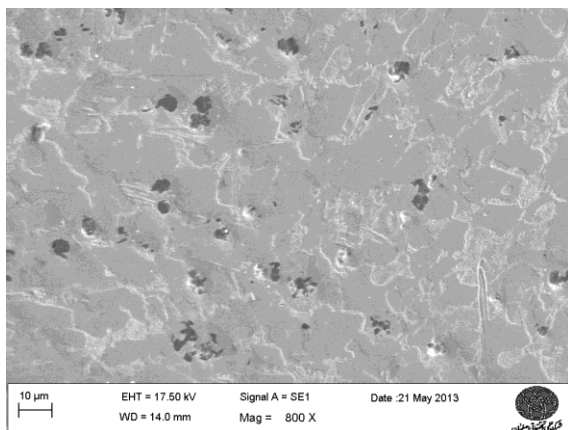
شکل ۶ ریزساختار پوشش سطحی نمونه‌های مختلف (الف) نمونه ۲، (ب) نمونه ۳، (ج) نمونه ۴، (د) نمونه ۵، (ه) نمونه ۶



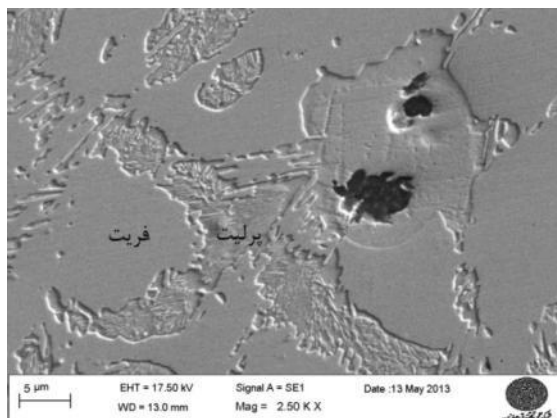
شکل ۴ سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده در بزرگنمایی کم، (الف) نمونه ۲، (ب) نمونه ۳، (ج) نمونه ۴، (د) نمونه ۵، (ه) نمونه ۶



شکل ۵ تصویر نمادین از تغییرات حالت انجماد در سرتاسر منطقه ذوب [۱۲]



شکل ۷ از ریز ساختار پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲



شکل ۸ ریزساختار پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲

از سوی دیگر، تفاوت زیاد بین نقطه ذوب آهن و فازهای تشکیل شده در اثر تجزیه کاربید سیلیسیوم می‌تواند دلیل دیگری در حصول ساختار دندریتی باشد، آن‌گونه که سایر محققین نیز به آن اشاره داشته‌اند [۱۳]. بررسی‌های دقیق‌تر نشان داد، بر اساس پیش‌بینی، ذرات کاربید سیلیسیوم وارد شده به لایه سطحی در میان شاخه‌های دندریتی قرار گرفته‌اند. تصویر ارائه شده در شکل ۷ 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 و ناصاف شده‌اند. این امر در تصویر ارائه شده در شکل ۷ به خوبی مشاهده می‌شود. این نکته نیز پیش‌بینی مربوط به مکانیزم انحلال ذرات و ذوب ترکیبی پیم و ساواژ را به خوبی تایید می‌نماید.

هم‌چنین در برخی از ذرات کاهش محسوس ابعادی مشاهده می‌شود. ناصافی سطح ذرات و کاهش ابعاد می‌تواند به دلیل انحلال بخشی از کاربید سیلیسیوم در آهن باشد. شکل ۸ ریز ساختار بخشی از پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲ را در بزرگنمایی بالاتر نشان می‌دهد.

۲-۲- نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی

نتایج حاصل از ریز سختی پوشش‌های ایجاد شده در طی این پژوهش در شکل ۱۰ 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 ۱۲۰۰-۶۵۰ HV) برخوردار هستند. این شرایط می‌تواند مقاومت بالا در برابر سایش را در پی داشته باشد [۱۵].



شکل ۱۰ پروفیل سختی سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش داده شده

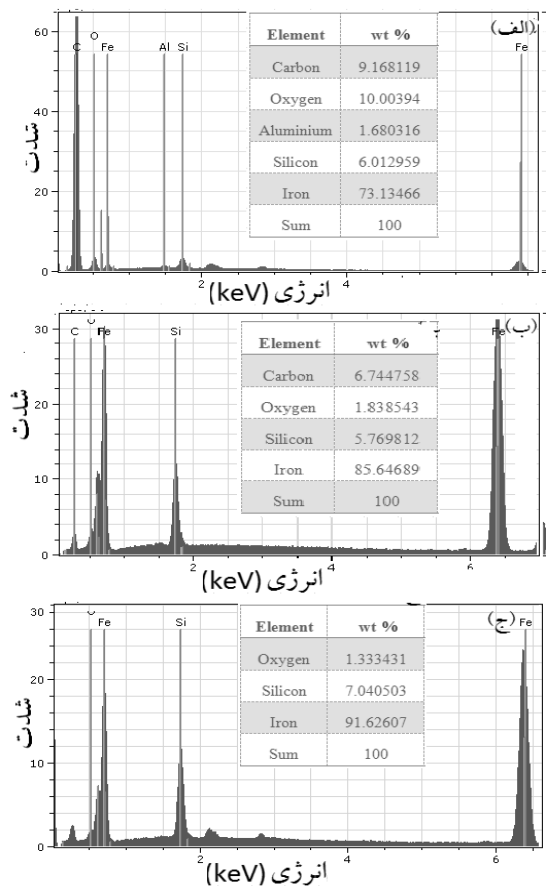
نمودارهای مربوط به پروفیل سختی پوشش‌ها نشان می‌دهد، با افزایش ذرات تقویت کننده، سختی لایه‌های ایجاد شده در سطح و در فصل مشترک افزایش می‌یابد. همچنین در خصوص نمونه‌های ۳، ۵ و ۶ که دارای مقدار یکسان از ذرات تقویت کننده بوده و با شدت جریان‌های متفاوت جوشکاری تحت عملیات سطحی قرار گرفته‌اند (طبق جدول ۱)، 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 [۱۶] نیز نتایج مشابهی را ارائه نموده‌اند.

۲-۳- رفتار تریبولوژیکی

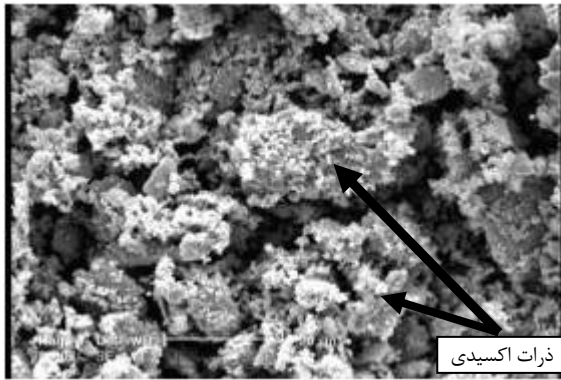
بررسی رفتار سایشی نمونه‌های پوشش‌دهی شده نتایج جالبی را به همراه داشت. شکل ۱۱ نمودار کاهش وزن برحسب مسافت طی شده برای نمونه‌های آزمون سایش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مسافت طی شده میزان جرم از دست داده شده نمونه ۱ به شکل پیوسته و بدون نشان دادن رفتار کند شونده، افزایش می‌یابد. این نتایج با توجه به رفتار سایشی ضعیف فولاد ASTM A106-Gr.B که توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۱۷] دور از انتظار نمی‌باشد.

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، آن چه 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.

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 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. سیلیسیوم از عناصر پایدار کننده فریت است که منطقه پایداری فاز فریت را افزایش می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود این امر صحت پیش بینی اولیه در این خصوص را تایید می‌نماید. نتایج آنالیز EDS از این ناحیه که در شکل ۹ ارائه شده است، نشان می‌دهد که این مناطق از کربن و سیلیسیوم غنی هستند. این امر توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۱۴]. 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.

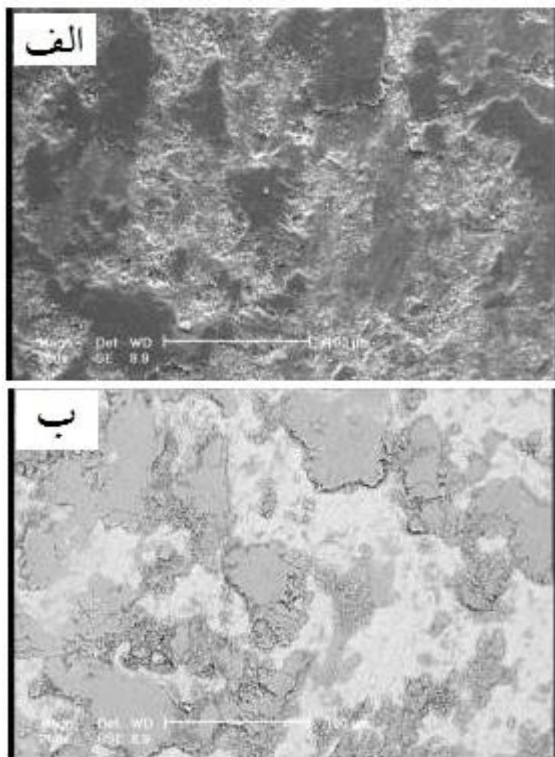


شکل ۹ نتایج آنالیز EDS بخش‌هایی از پوشش ایجاد شده بر روی نمونه ۲: ذرات کاربید، (ب) فریت اطراف ذرات (ج) سمانتیت اطراف ذرات

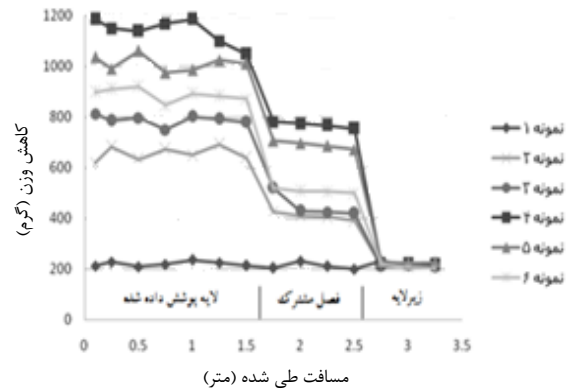


شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات حاصل از سایش نمونه ۱

چنین پدیده‌ای در تحقیقات سایر محققان [۱۸] نیز قبلاً گزارش شده است. در ادامه نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده بر نمونه‌های پوشش داده شده تحلیل خواهد شد. شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه شماره ۲ پس از انجام آزمون سایش را نشان می‌دهد. دقت در تصویر ۱۴ 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. یکی دیگر از عمومی‌ترین مکانیزم‌های سایش، مکانیزم چسبان است که در آن موادی بر روی سطوح در حال سایش، می‌چسبند. به طور مثال، بخشی از پین، ساییده شده و بر روی دیسک، فشرده شده و به آن می‌چسبند. مکانیزم چسبان، ندرتاً به تنهایی اتفاق می‌افتد، مگر در مواردی که یک سطح بسیار سخت، در برابر یک سطح با مقاومت سایشی بسیار پایین، قرار گیرد.



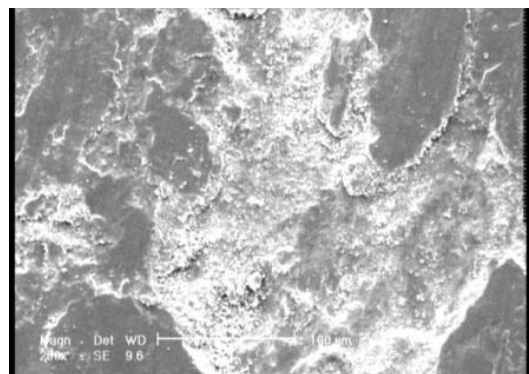
شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه شماره ۲، (الف) تصویر بدست آمده از الکترون‌های ثانویه، (ب) همان تصویر با استفاده از الکترون‌های پس پراکنده شده



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

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 شود.

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 شود. شکل ۱۲ 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. در سایش ورقه‌ای سطح ماده به صورت لایه لایه‌ای تصور می‌شود که بر اثر فرآیند سایش در تریبوسیستم همانند جداسازی پوسته پوسته‌ای پیاز از سطح جدا می‌شود. بر طبق طئوری ورقه‌ای شدن، تغییر شکل پلاستیکی برشی، جوانه‌زنی ترک و اشاعه آن در عمق کوتاهی از سطح پدید آمده که نهایتاً به جدا سازی ورقه‌ای ذرات سایش می‌انجامد. هم‌چنین در بخش‌هایی از این سطح سایش، آثار اکسایش سطحی و ایجاد ذرات بسیار ریز اکسیدی مشاهده می‌شود. شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات سایشی حاصل از آزمون انجام شده بر این نمونه را نشان می‌دهد. تصویر ارائه شده در شکل ۱۳ حضور هم‌زمان ذرات سایشی ورقه‌ای شکل به همراه ذرات بسیار ریز اکسیدی را نشان می‌دهد. وجود خرده‌های سایشی ریز دلالت بر سایش اکسیداسیونی دارد. این امر تأیید کننده مکانیزم‌های سایش ورقه‌ای و اکسایش سطحی به شکل هم‌زمان برای این نمونه می‌باشد.



شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه ۱

اکسیژن و آهن تشکیل شده‌اند. که خود تأیید کنندهٔ رخداد هم‌زمان مکانیزم‌های سایش چسبان و اکسایش سطحی می‌باشد. در این رابطه، بررسی‌های ریز ساختاری این نمونه‌ها و کیفیت سطحی حاصل برای ذرات کاربرد 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.

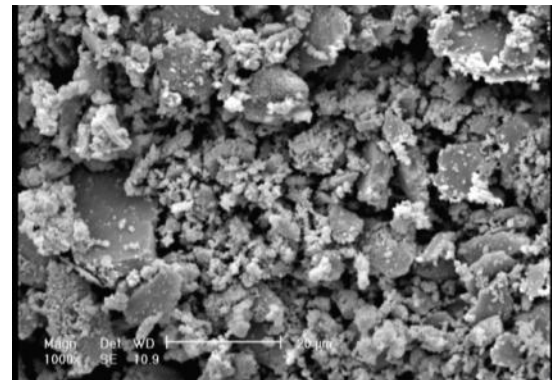
در ادامه سطوح سایش مربوط به سایر نمونه‌ها بررسی گردید. شکل ۱۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی حاصل از سطح سایش نمونه‌های گروه ۳، ۴، ۵ و ۶ را نشان می‌دهد.

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 توام با ترک خوردگی در سطح وجود دارد. سطحی که در معرض سایش چسبان قرار گرفته است دارای سطحی با ظاهر لایه‌ای و دارای حفره است. تغییر رنگ سطح از دیگر نشانه‌های وقوع این نوع سایش است. با توجه به مسیر سایش دیده می‌شود که در سطح سایش، مناطقی ایجاد شده که تغییر شکل پلاستیکی در آن رخ داده و در نتیجه این تغییر شکل پلاستیکی، ایجاد اتصالات موضعی در نواحی تماس و از هم گسیختگی این اتصالات در ادامه لغزش است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت مکانیزم غالب در سایش، مکانیزم سایش چسبان بوده و احتمالاً سایش ورقه‌ای و خراشان نیز رخ داده است. البته وجود این ریز ترک‌ها می‌تواند نتیجهٔ 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 دهندهٔ 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.

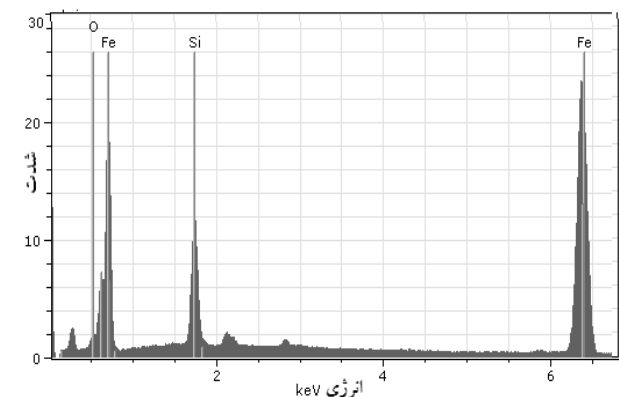
از سوی دیگر دقت در تصاویر "الف" و "د" شکل ۱۷ نشان می‌دهد، در سطح سایش علاوه بر وجود آثار رخداد مکانیزم‌های سایش چسبان و اکسایش سطحی، شیارهای ناشی از خراش سطحی نیز وجود دارد. اما میزان این خراش‌ها چندان زیاد نیست. لذا به نظر می‌رسد مکانیزم غالب سایش در تمامی نمونه‌ها چسبان بوده و اکسایش سطحی و سایش ورقه‌ای نیز رخ داده است

در این شرایط، عموماً مشخصه واضحی در تصاویر SE<sup>۱</sup> به تنهایی، قابل جستجو نیست و شاید، فقط آثاری از فشرده شدن و لهیدگی، بر روی سطح، قابل مشاهده باشد. در تصویر ۱۴-ب (BSE<sup>۲</sup>) حضور دو فاز، مشهود است که احتمال رخداد مکانیزم سایش چسبان وجود دارد. به دلیل ایجاد سطوح تمیز در حین سایش، خصوصاً در نمونه‌های فلزی، امکان واکنش‌دهی سطوح مذکور با اتمسفر و مواد در تماس، به شدت افزایش می‌یابد. عمومی‌ترین واکنشی که در شرایط مذکور رخ می‌دهد، اکسیداسیون است. معمولاً نمی‌توان به نشانه یا مشخصه تصویری خاصی برای مکانیزم سایش اکسیداسیون در تصاویر SE، اشاره نمود اما در تصاویر BSE، 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. هم‌چنین در شکل ۱۵ تصویر به دست آمده از ذرات سایشی مربوط به همین نمونه 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 نتیجهٔ آن در شکل ۱۶ ارائه شده است.



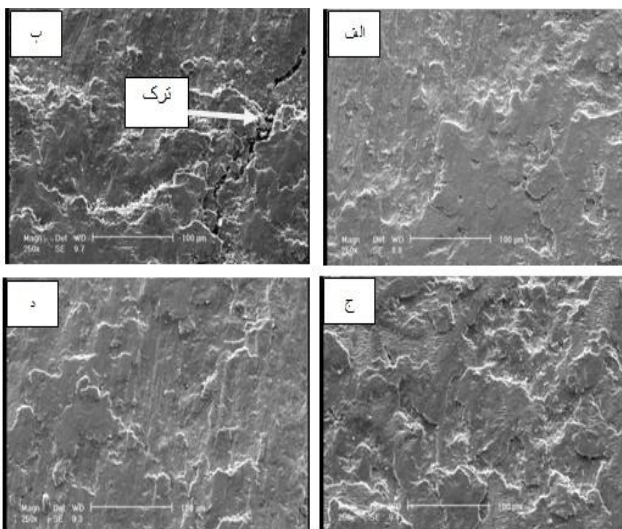
شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات حاصل از سایش نمونه ۲



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

نتیجهٔ آنالیز عنصری این ذرات سایشی نشان می‌دهد آن‌ها از ترکیب

1. Secondary electrons
2. Back scattered electrons



شکل ۱۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش نمونه‌ها الف) نمونه

۳، ب) نمونه ۴، ج) نمونه ۵، د) نمونه ۶

- 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 Ulutan, 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", John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [12] Buytoz, S., "Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel" *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, pp. 3734-3742, 2006.
- [13] Sindo, K., *Welding Metallurgy*, 1987.
- [14] Buchely, M. F. and Gutierrez, J. C., "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys", *Wear*, Vol. 259, pp. 52-61, 2005.
- [15] Kia Jamali, N., "Increasing the wear resistance of the surface layer by Friction Stir Process (FSP) on aluminum alloy" In Persian, Fifth Joint Conference of Iranian Metallurgical Engineers Society, 2012.
- [16] Majumdar, J., "Studies on compositionally graded silicon carbide dispersed composite surface on mild steel developed by laser surface cladding", Vol. 203, pp. 505-512, 2008.
- [17] Yang, R. and Liu, Z., "Study of in-situ synthesis TiCp/Ti composite coating on alloy Ti6Al4V by TIG cladding", Vol. 36, pp. 349-354, 2012.
- [18] Lin, Y. C., "Elucidating the microstructure and wear behavior of tungsten carbide", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 219-225, 2010.
- [19] 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.

در همین رابطه سایر محققان نیز وجود این مکانیزم را تأیید کرده‌اند [۱۹]. آنچه در این مورد اهمیت دارد آن است که علیرغم وجود ذرات سخت سرامیکی درون زمینه‌ی 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 زمینه‌ی 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 تریبولوژیکی از جمله رفتار سایشی خواهد بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

اهم نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت زیر خلاصه می‌شود.

- ۱) با استفاده از این شیوه، پوشش و فصل مشترک زیر لایه و پوشش خالی از ترک و حفره قابل دستیابی بود.
- ۲) پوشش ایجاد شده دارای ساختاری دندریتی و ریز دانه همراه با تقویت‌کننده‌های کاربید سیلیسیوم در نواحی بین دندریتی 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.
- ۶) مکانیزم سایش در نمونه بدون پوشش از نوع ورقه‌ای و اکسایش سطحی و در نمونه‌های پوشش داده شده ترکیبی از مکانیزم‌های چسبان، اکسایش سطحی و سایش ورقه‌ای 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 به‌خصوص آقایان مهندس عربیان و مهندس مویدی، به‌سبب همکاری‌هایشان، تشکر نمایند.

#### ۶- مراجع

- [1] Buytoz, S. and Yildirim, M., "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. Ashrafizadeh, 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 haviors 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