

## نقش کاربید بور بر رفتار سایشی روکش کامپوزیتی زمینه استلایت ۶ ایجاد

## شده به روش GTAW

ساسان محمدی، بهنام لطفی و زهره صادقیان

گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز

( دریافت مقاله: ۹۵/۰۴/۲۰ - پذیرش مقاله: ۹۵/۰۸/۱۰ )

## چکیده

هدف از این پژوهش ایجاد روکش کامپوزیتی با زمینه آلیاژ پایه کبالت استلایت ۶ بر فولاد ساده کربنی و بررسی نقش ذرات تقویت کننده کاربید بور بر ریزساختار، سختی و رفتار سایشی روکش حاصل بوده است. به این منظور ابتدا خمیر پیش نشستی از پودر کاربید بور با نسبت‌های وزنی مختلف بر سطح زیرلایه فولادی ایجاد و سپس توسط فرآیند جوشکاری GTAW با فیلر استلایت ۶ ذوب سطحی گردید. پس از روکش کاری جهت مطالعه ریز ساختاری از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) مجهز به میکرو آنالیز شیمیایی (EDS) و فازشناسی از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) کمک گرفته شد. همچنین جهت ارزیابی سختی و رفتار سایشی به ترتیب از ریزسختی سنچ ویکرز و آزمون پین روی دیسک استفاده شد. نتایج نشان داد که ریزساختار روکش‌ها بیشتر شامل فاز زمینه غنی از کبالت  $\gamma$ ، کاربیدهای یوتکتیکی غنی از کروم  $Cr_7C_3$  و  $Cr_{23}C_6$ ، مربوط به آلیاژ زمینه استلایت ۶ و فازهای ثانویه مانند  $CoB_2$ ،  $CrB_2$ ،  $WC$  و  $W_2B$  ناشی از واکنش C و B حاصل از تجزیه  $B_4C$  با عناصر دیگر موجود در روکش است. با افزایش مقدار  $B_4C$  در روکش دندریت‌ها ریزتر شده و میزان فازهای بین دندریتی افزایش یافت، همچنین روکش‌های کامپوزیتی سختی بالاتری نسبت به روکش خالص استلایت ۶ نشان دادند. مکانیزم سایش روکش‌های کامپوزیتی  $Stellite6/B_4C$  از نوع سایش ورقه ای بود و روکش کامپوزیتی  $Stellite6-B_4C$  20% کمترین کاهش وزن را از خود نشان داد.

واژه های کلیدی: استلایت ۶،  $B_4C$ ، روکش کامپوزیتی، جوشکاری قوسی تنگستن-گاز، رفتار سایشی.

## The effect of $B_4C$ on wear behavior of stellite6 matrix composite clad layer fabricated by GTAW

S. Mohammadi, B. Lotfi and Z. sadeghian

Department of Materials Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

(Received 10 July 2016, accepted 31 October 2016)

**Abstract**

A composite clad layer of stellite6 matrix was fabricated on plain steel and the effect of  $B_4C$  reinforcing particles on microstructure characteristics, hardness and wear behavior was investigated. For this purpose  $B_4C$  powder with different weight percentages were pasted on substrates and subsequently melted by GTAW using stellite6 filler. Microstructural investigations of clad layers were conducted by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) equipped with energy dispersive spectrometry (EDS). X-ray diffractometry (XRD) was used for structural evaluation of clad layers. Hardness and wear behavior were studied by microhardness testing and pin on disk wear test, respectively. The results showed that the clad layer mostly contain  $\gamma$  cobalt-rich matrix, eutectic carbides such as  $Cr_7C_3$  and  $Cr_{23}C_6$  relating to the matrix and secondary phases such as  $CoB_2$ ,  $CrB_2$ ,  $WC$  and  $W_2B$  resulted from the reaction of B and C with other elements after decomposition of  $B_4C$ . By the addition of  $B_4C$  content in the clad layer a finer dendritic structure with more interdendritic phases was obtained. Moreover, composite clad layers exhibited higher hardness compared to stellite6 clad layer. Wear mechanism of stellite6/ $B_4C$  composite clad layers was delamination and the stellite-20 wt.%  $B_4C$  showed the least wear rate.

**Keywords:** Stellite6,  $B_4C$ , Composite Clad layer, GTAW, Wear behavior.**E-mail of corresponding author:** behnaml@yahoo.com.

## مقدمه

سخت کاری سطحی یک تکنولوژی مهندسی شده به منظور بهبود خواص سطحی بدون تغییر در خواص اجزای قطعات تحت روکش کاری است [۳-۱]. روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز به دلیل داشتن قابلیت بکارگیری جهت روکش کاری و اصلاح سطح در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این روش بوسیله ذوب کردن پودرها یا سیم‌های آلیاژی که ترکیب شیمیایی مناسب برای جایگزین شدن در سطح ماده را دارند خواص سطحی بهبود می‌یابد [۶-۴]. مزایای این روش عبارتند از: قیمت پایین، عملکرد راحت، پیوند متالورژیکی خوب بین لایه روکش و زیرلایه، تخلخل و ترکیبات اکسیدی کمتر نسبت به سایر فرآیندها به دلیل وجود گاز محافظ آرگون [۹-۷]. از این روش برای ایجاد روکش‌های کامپوزیتی نیز استفاده شده مانند تحقیقی که بر روی مقاومت سایشی روکش کامپوزیتی Stellite 6/WC توسط مددی و همکاران انجام شد [۹] و یا بررسی خواص سایشی روکش کامپوزیتی Fe-Cr-W-C/WC که توسط حاجی هاشمی و همکاران انجام شد [۳]. یکی از متداول‌ترین آلیاژهای مورد استفاده در روکش کاری جهت بهبود خواص سایشی و خوردگی، آلیاژهای پایه کبالت است [۱۰ و ۱۱]. آلیاژ استلایت ۶ یکی از این آلیاژهاست که به خاطر حضور عناصری نظیر کروم مقاومت خوردگی و اکسیداسیون بالایی دارد و تشکیل کاربیدهای  $M_2C_6$  و  $M_7C_3$  ( $M=Cr$ ) موجب افزایش استحکام و سختی آن می‌شود. از طرفی حضور عناصری نظیر تنگستن و مولیبدن از طریق رسوب سختی با تشکیل کاربیدهای  $M_6C$  و  $MC$  و ترکیبات بین فلزی  $Co_3(Mo,W)$  باعث بهبود سختی و استحکام می‌شوند [۱۳-۱۱]. در بسیاری از کاربردها ایجاد مقاومت سایشی توسط مکانیزم‌های استحکام بخشی محلول جامد و تشکیل کاربیدهای فلزی کافی نبوده و برای رسیدن به خواص سایشی بهتر معمولاً ذرات کاربیدی نظیر  $SiC$ ،  $TiC$ ،  $WC$ ،  $TaC$  و همچنین ذرات اکسیدی نظیر  $Al_2O_3$  و  $Y_2O_3$  به

آلیاژ استلایت اضافه می‌گردد در این میان کاربرد بور ( $B_4C$ ) بدلیل خصوصیات نظیر سختی  $3/3-27/4$  GPa، مدول الاستیک  $450-290$  GPa، نقطه ذوب  $2450^\circ C$  و مقاومت به اکسیداسیون تا  $600^\circ C$  در هوا را می‌توان به عنوان ذره تقویت کننده مناسب انتخاب نمود.

در پژوهشی که در رابطه با افزودن ذرات تقویت کننده به روکش پایه استلایت صورت گرفته، گزارش شده است که بخش زیادی از فاز تقویت کننده در حین فرآیند جوشکاری ذوب و حل شده و سختی و مقاومت سایشی روکش‌های تولید شده افزایش یافته است [۱۶-۱۴]. در تحقیقاتی که در زمینه افزودن کاربید سیلیسیم به یک آلیاژ پایه کبالت و آلیاژ استلایت صورت گرفته مشاهده شده که افزودن ذرات  $SiC$  سبب بهبود خواص روکش شده است [۱۷ و ۱۸]. در این تحقیق هدف بررسی روکش‌های کامپوزیتی استلایت ۶-کاربید بور نشانده شده بر سطح فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری قوس تنگستن-گاز با استفاده از فلز پر کننده آلیاژ استلایت ۶ و ارزیابی ریز ساختاری و رفتار سایشی روکش‌های حاصل بوده است.

## مواد و روش تحقیق

زیرلایه مورد استفاده در این تحقیق از جنس فولاد ساده کربنی با استاندارد AISI 1020 با ابعاد  $mm^3$   $20 \times 30 \times 10$  بود همچنین فیلر آلیاژی استلایت ۶ مورد استفاده جهت انجام عملیات روکش کاری، محصول شرکت Deloro بوده، آنالیز شیمیایی زیرلایه و فیلر استلایت ۶ در جدول ۱ آمده است. همچنین پودر کاربرد بور با خلوص ۹۹٫۵٪ و اندازه ذرات میانگین ۳۵ میکرون مورد استفاده قرار گرفت. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ذرات پودر کاربرد بور مورد استفاده در شکل ۱ ارائه شده است.

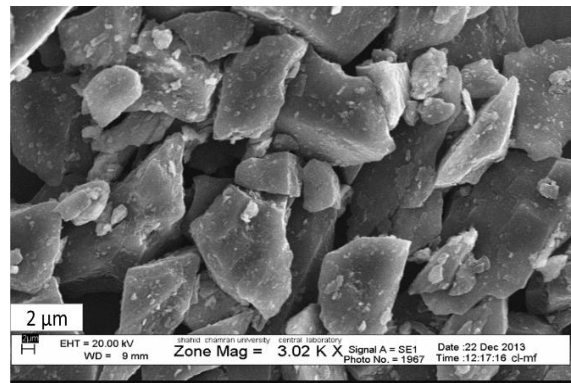
جدول ۱. آنالیز شیمیایی فولاد ساده کربنی و فیلر استلایت ۶.

فولاد ساده کربنی							
	C	Mn	Si	S	P	Fe	
-	-	۰/۱۹۲	۰/۵۳۰	۰/۱۳۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	بقیه
فیلر استلایت ۶							
C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Fe	Co
۱/۳۱	۱/۲۵	۰/۶	۲۹/۵۵	۰/۱	۴/۲۳	۲/۵	بقیه

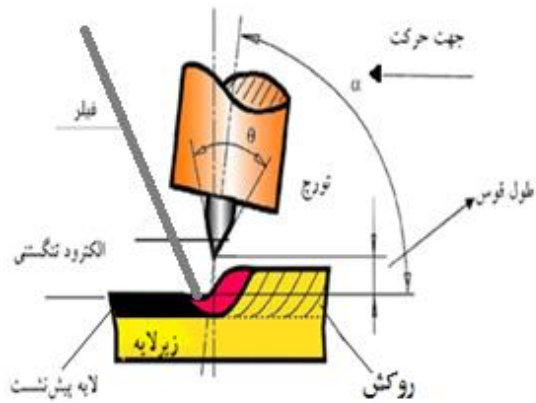
مطالعه ریز ساختاری از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) و همچنین جهت فازشناسی از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد و پروفیل سختی با استفاده از ریز سختی سنج ویکرز تهیه گردید.

جدول ۲. پارامترهای فرآیند جوشکاری سطحی به روش TIG.

پارامتر	مقدار
ولتاژ (V)	۱۵
جریان (A)	۹۵
زاویه تورچ (درجه)	۱۵
فشار گاز (L/min)	۱۲
سرعت (mm/s)	۱/۶۶
قطر الکترود تنگستن (mm)	۲/۴
قطر سیم جوش استلایت ۶ (mm)	۱/۶



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی ذرات کاربرد بور.



شکل ۲. شماتیک فرآیند جوشکاری سطحی به روش TIG.

به منظور تعیین مقاومت سایشی روکش‌های اعمال شده از آزمون پین روی دیسک تحت شرایط خشک در دمای اتاق استفاده شد. جنس دیسک مطابق با استاندارد G.99 ASTM از فولاد کربنی کربوره با سختی HRC ۶۰ قطر

نمونه‌ها قبل از روکش‌کاری سنگ زنی شده و با استون شست و شو شدند. جهت اعمال روکش ابتدا یک نمونه با فیلر استلایت ۶ تحت شرایط مشخص ارائه شده در جدول ۲ جوشکاری شد و وزن روکش حاصل محاسبه گردید. سپس پودر کاربرد بور به صورت خمیر پیش نشست با ضخامت مناسب جهت تامین درصد‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد کاربرد بور بر روی سطح زیرلایه اعمال شد. این خمیر از مخلوط پودر کاربرد بور و محلول آبی ۲۰ درصد چسب سیلیکات سدیم تهیه شد و به کمک کاردک بر روی سطح زیرلایه قبل از عملیات جوشکاری نشانده شد. سپس نمونه‌ها در هوا خشک شده و به مدت یک ساعت در کوره با دمای ۱۰۰ °C قرار گرفتند تا رطوبت آنها خارج شود. سپس با استفاده از فیلر استلایت ۶ توسط فرآیند GTAW ذوب سطحی انجام شد. شکل ۲ شماتیک انجام فرآیند را نشان می‌دهد. سطح مقطع نمونه‌های روکش کاری شده پس از آماده سازی سطحی اچ شد و جهت

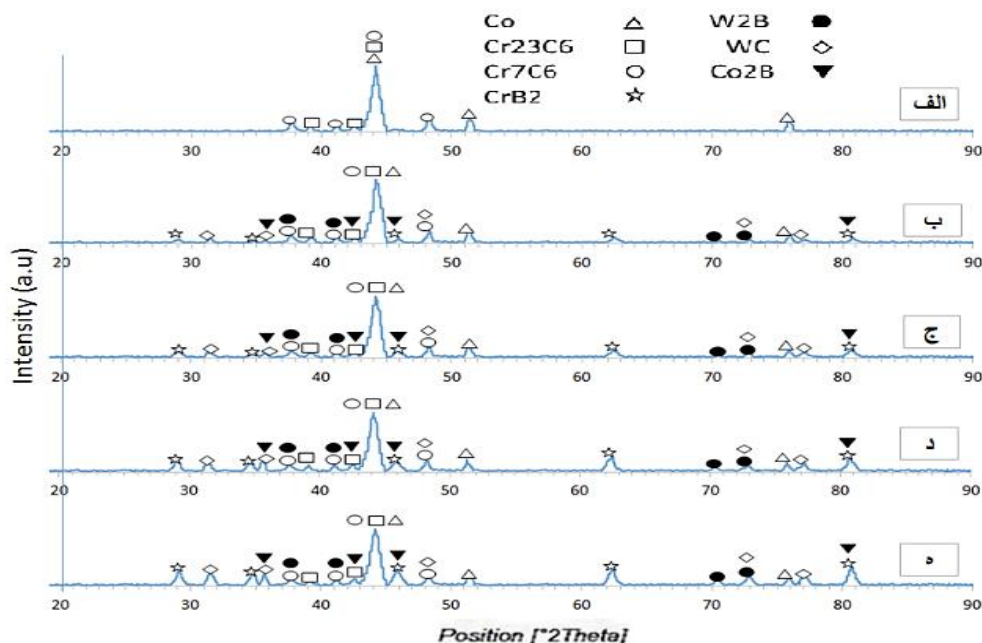
۶، فازهای جدیدی مانند  $W_2B$ ,  $WC$ ,  $CrB_2$ ,  $Co_2B$  را نشان می‌دهد که ناشی از تجزیه شدن کاربرد بور و ترکیب شدن عنصر بور و کربن با دیگر عناصر موجود در روکش است.

با افزایش مقدار کاربرد بور در روکش، این رفتار حفظ شده و شدت خطوط پراش مربوط به این ترکیبات مذکور بیشتر شده است که حاکی از مقدار بیشتر این ترکیبات در روکش است [۹]. به علاوه، نتایج حاصل از طیف‌سنجی انرژی (EDS) از فاز زمینه و مناطق بین‌دندریتی (نقاط علامتگذاری شده در تصاویر شکل ۴ که A بیانگر مناطق بین دندریتی و B مربوط به دندریت‌ها است) جدول ۲ نیز تغییر در ترکیب شیمیایی اجزای ریزساختاری این روکش‌ها با افزودن کاربرد بور و افزایش آن را نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج و آنچه در پژوهش‌های دیگر مشاهده شده در این نوع روکش‌ها کاربرد بور تجزیه شده و عنصر بور و کربن حاصل با عناصر دیگر موجود در ماده روکش واکنش داده است [۱۳ و ۱۶].

۱۰۰ mm و ضخامت ۱۰ mm انتخاب شد. پین‌های روکش‌کاری شده، در دمای محیط، تحت بار ۶۰ نیوتن، سرعت چرخش ۵۰ rpm که معادل سرعت خطی m/s ۰/۲۱ تا مسافت لغزشی ۸۰۰ m قرار گرفتند. نمونه‌های سایشی پین شکل دارای قطر ۴ mm و طول ۱۰ mm بوده و توسط برش سیم از نمونه‌های روکش‌کاری شده استخراج گردید.

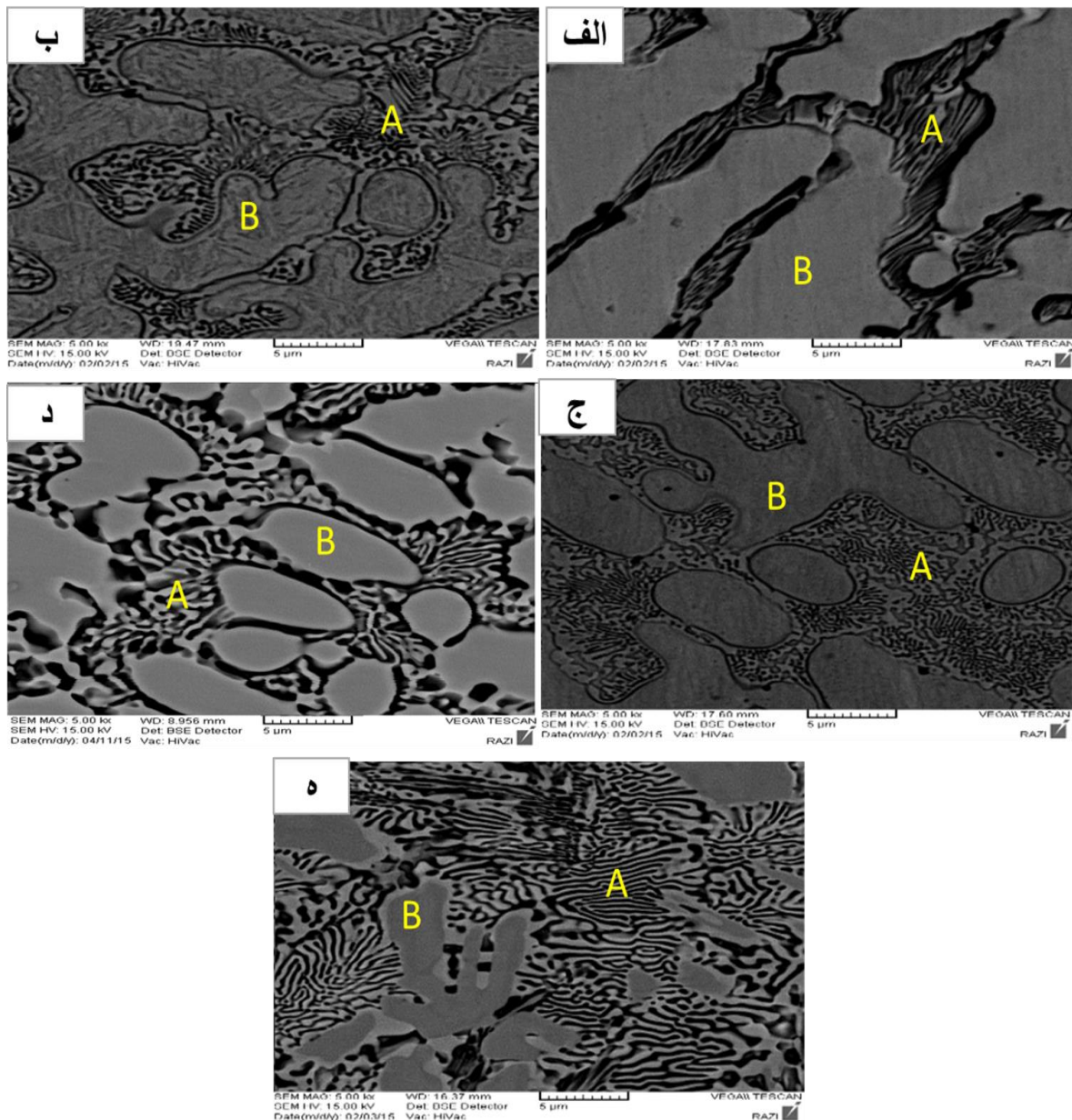
### نتایج و بحث

شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های مختلف و شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع عرضی و در فاصله  $1700 \mu m$  از فصل مشترک روکش و زیرلایه در حالت اچ شده را نشان می‌دهند. نتایج الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) به دست آمده علاوه بر فاز زمینه محلول جامد کبالت و کاربردهای یونکتیکی  $Cr_7C_3$  و  $Cr_{23}C_6$  مربوط به آلیاژ زمینه استلایت



شکل ۳. نتایج XRD (الف) روکش استلایت ۶ خالص و روکش‌های کامپوزیتی استلایت ۶ به همراه درصدهای وزنی مختلف کاربرد بور (ب)

۵٪ (ج) ۱۰٪ (د) ۱۵٪ (ه) ۲۰٪



شکل ۴. تصاویر SEM در شرایط آچ شده الف) روکش استلایت ۶ و روکش‌های کامپوزیتی استلایت ۶ حاوی مقادیر مختلف کاربرد بور ب) ۵ wt% (ج) ۱۰ wt%، د) ۱۵ wt% و ۲۰ wt%

ریزساختار و تشکیل فازهای جدید با افزودن ذرات تقویت کننده به روکش استلایت گزارش شده است [۱۷، ۱۹-۲۲]. شکل ۵ تغییرات ریزسختی از زیرلایه به سمت روکش به دست آمده از سطح مقطع روکش‌های مختلف را نشان می‌دهد. اولین نکته قابل مشاهده افزایش قابل توجه سختی در اثر افزودن ذرات تقویت کننده کاربرد بور به

ریزتر شدن ساختار این نوع روکش‌ها نسبت به روکش استلایت ۶ خالص را می‌توان به دلیل حضور فازهای ثانویه ایجاد شده و نقش ممانعت کنندگی آن‌ها از رشد دندریت‌های زمینه مربوط دانست. در تحقیقات انجام شده قبلی نیز کاهش اندازه ریزساختار همراه با تغییر در ترکیب

جدول ۲. داده‌های عددی میکرو آنالیز طیف سنج انرژی (EDS) از دندریت‌ها و مناطق بین دندریتی در شکل ۴.

نمونه ها	مناطق	Co	Cr	W	C	Fe
استلایت ۶	دندریت	۵۰/۵۷	۲۰/۳۲	۲/۲۸	۰/۷۳	۲۵/۳۱
	بین دندریت	۱۸/۷۵	۵۵/۲۶	۵/۰۳	۲/۱۱	۱۸/۸۵
استلایت ۶+۵%B <sub>4</sub> C	دندریت	۳۲/۴۳	۱۱/۱۸	۰/۰۴	۱/۳۵	۵۴/۱۵
	بین دندریت	۲۷/۷۵	۱۹/۱۲	۶/۵۲	۰/۹۷	۴۵/۱۸
استلایت ۶+۱۰%B <sub>4</sub> C	دندریت	۳۷/۷۴	۱۱/۱۱	۵/۰۷	۰/۳۱	۴۵/۱۵
	بین دندریت	۳۱/۳۳	۲۰/۴۲	۷/۱۶	۱/۱۳	۳۹/۹۶
استلایت ۶+۱۵%B <sub>4</sub> C	دندریت	۴۷/۹۸	۳۵/۳۱	۴/۳۹	۱/۵	۳۵/۳۱
	بین دندریت	۴۰/۱۲	۳۴/۹۷	۸/۴۷	۱/۸۶	۳۴/۹۷
استلایت ۶+۲۰%B <sub>4</sub> C	دندریت	۵۴/۸۵	۱۴/۷۱	۶/۴	۰/۸	۲۱/۸۴
	بین دندریت	۴۳/۵۸	۲۵/۳	۸/۳۵	۱/۶	۲۰/۶

زیرلایه شده است. در این صورت شرایط برای کاهش سختی فاز زمینه و کاهش درصد کاربیدهای کروم یوتکتیکی در این نواحی فراهم می‌شود. مجموعه این عوامل باعث می‌گردد که سختی روکش در نزدیکی فصل مشترک کمتر از سطح روکش باشد [۸ و ۲۳].

شکل ۷ نمودار کاهش وزن پس از سایش نمونه‌های روکش استلایت ۶ خالص و استلایت ۶ کامپوزیتی حاوی مقادیر مختلف کاربید بور پس از طی مسافت ۸۰۰ متر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با کامپوزیتی نمودن روکش استلایت ۶ با ذرات تقویت کننده کاربید بور میزان جرم از دست رفته پس از ۸۰۰ متر مسافت لغزش در مقایسه با روکش استلایت ۶ خالص از خود نشان می‌دهد. همچنین در نمونه های کامپوزیتی با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده کاربید بور این میزان کاهش وزن کمتر شده به طوری که نمونه کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد وزنی کاربید بور کمترین میزان کاهش وزن را نشان داد. در تحقیقات مشابه انجام شده نیز که به صورت جداگانه به تاثیر افزودن ذرات WC, SiC, Mo بر روکش آلیاژ پایه کبالت پرداخته شده بود نیز روند مشابهی گزارش شده است که با افزایش درصد این ذرات در روکش آلیاژ پایه کبالت میزان کاهش جرم این روکش‌های کامپوزیتی نسبت به روکش آلیاژ پایه کبالت خالص کمتر شده است. محققان دلایل آن را به اصلاح ریز ساختار، افزایش مقدار ترکیبات غنی از کروم،

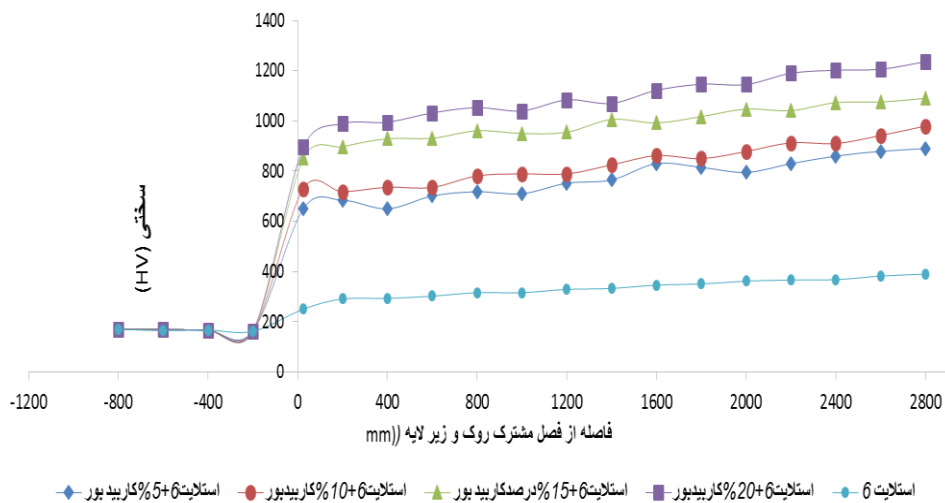
روکش‌های زمینه استلایت ۶ است بطوری که بیشترین سختی در روکش حاوی ۲۰ درصد کاربید بور بدست آمد. این افزایش سختی را می‌توان به حضور فازهای ثانویه ایجاد شده در ریزساختار روکش‌های کامپوزیتی و همچنین نقش استحکام بخشی این فازها در زمینه روکش کامپوزیتی مرتبط دانست. ضمن این که اندازه کوچک تر دندریت‌های زمینه در روکش‌های کامپوزیتی نسبت به روکش استلایت ۶ خالص به دلیل حضور فازهای ثانویه ایجاد شده و نقش ممانعت کنندگی آن‌ها از رشد دندریت‌های زمینه نیز سهم عمده‌ای در این افزایش سختی داشته است [۱۹-۱۴].

کاهش تدریجی سختی از روکش به طرف فصل مشترک روکش و زیرلایه را می‌توان به اثر پدیده رقت (حضور آهن زیرلایه در روکش) نسبت داد به طوری که با فاصله گرفتن از فصل مشترک روکش و زیرلایه به سمت سطح روکش میزان نفوذ آهن کاهش می‌یابد [۸ و ۲۳]. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع روکش حاوی ۲۰ درصد وزنی کاربید بور به همراه تغییرات آنالیز عنصری خطی از فصل مشترک روکش و زیرلایه به سمت سطح روکش را نشان می‌دهد. شکل ۶-ب اثر پدیده رقت در روکش و کاهش عمق نفوذ آهن از فصل مشترک به سمت سطح روکش را تأیید می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود نفوذ آهن در روکش منجر به کاهش درصد عناصر کبالت و کروم در نزدیکی فصل مشترک روکش و

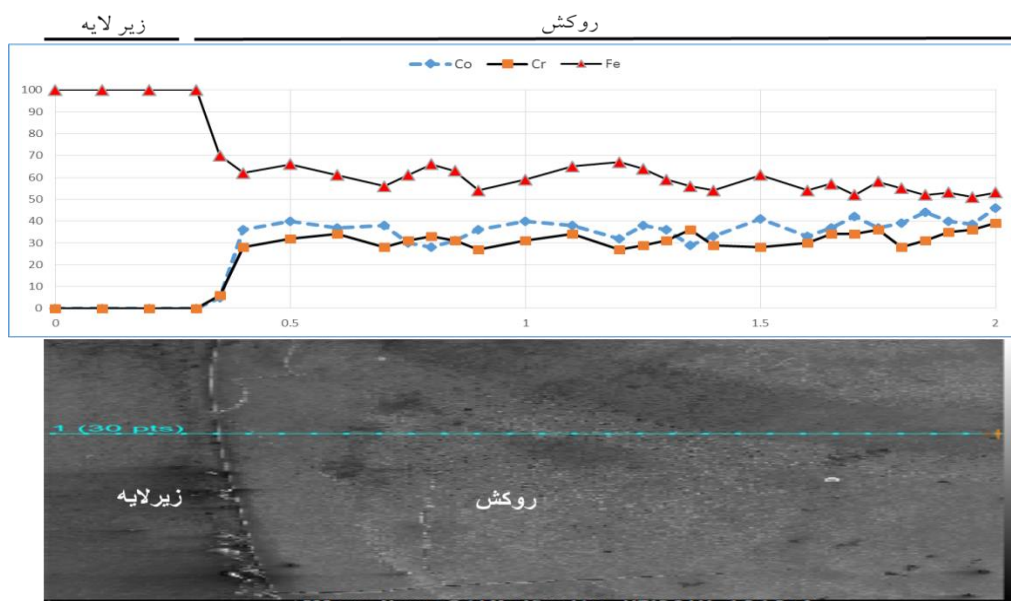


ساختار (کاهش اندازه دندریت‌ها و تغییر از رشد دندریتی سلولی به هم محور)، حضور بیشتر فازهای بین دندریتی در ریزساختار روکش‌ها و افزایش سختی روکش‌های کامپوزیتی شده است.

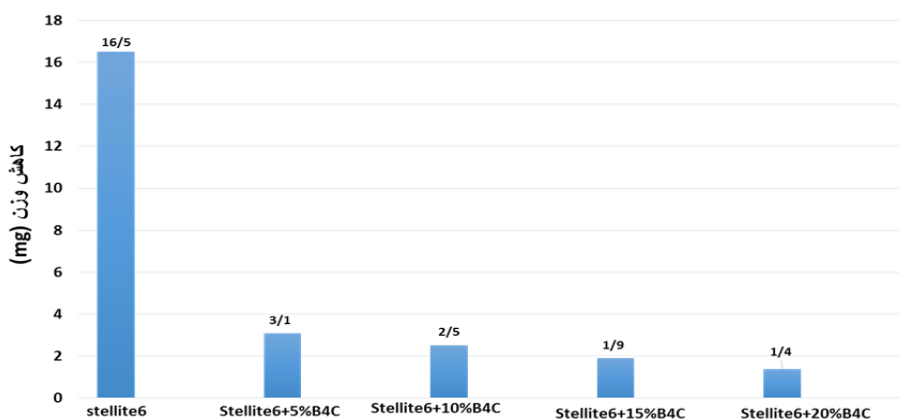
افزایش فازهای ثانویه و در نتیجه سختی بالاتر روکش‌های کامپوزیتی آلیاژهای پایه کبالت نسبت به روکش‌های آلیاژ پایه کبالت خالص دانسته اند [۱۷ و ۱۳ و ۹]. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده میشود که افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده کاربرد بور موجب اصلاح ریز



شکل ۵. نمودار تغییرات ریزسختی از سطح به عمق به دست آمده از مقطع عرضی روکش‌های مختلف.



شکل ۶. الف) تغییرات آنالیز عنصری خطی از فصل مشترک روکش و زیر لایه به سمت سطح روکش (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع روکش حاوی ۲۰ درصد وزنی کاربرد بور.



شکل ۷. کاهش وزن نمونه‌های روکش شده پس از طی مسافت ۸۰۰ متر.

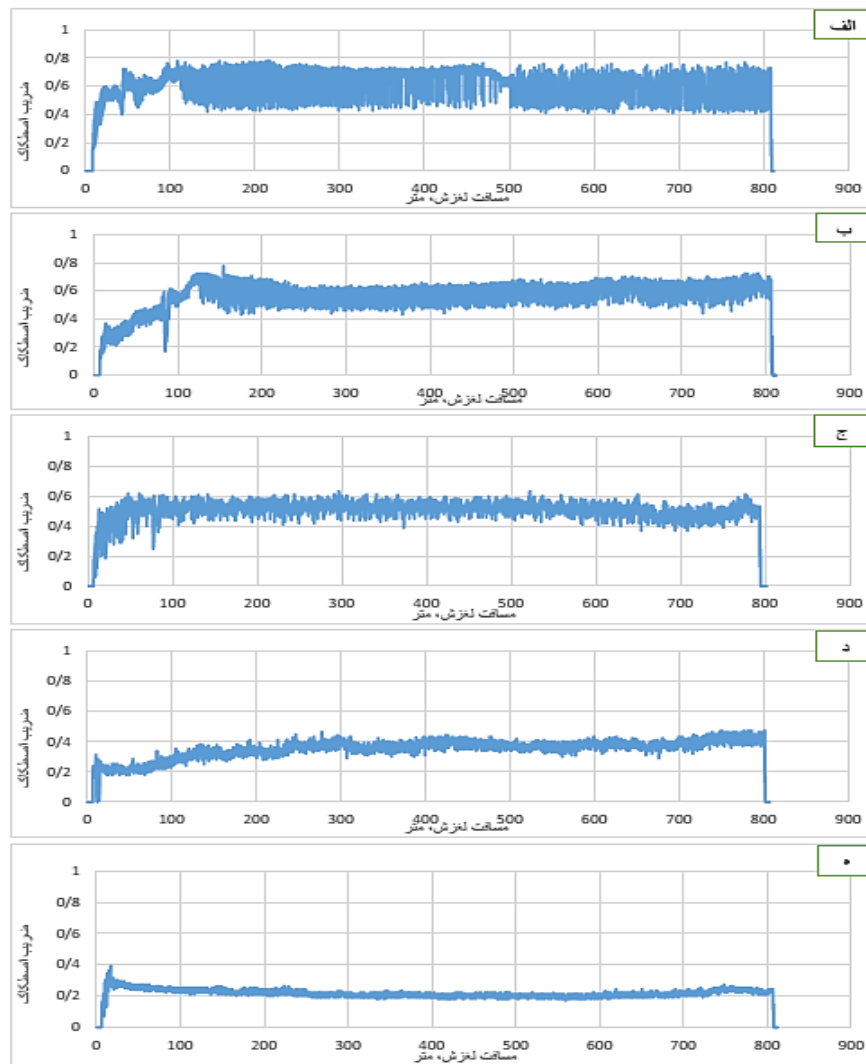
از ترک و حفرات در برخی نمونه‌ها مشهود است. همچنین بررسی سطح ساییده شده نمونه های روکش شده با درصدهای مختلف ذرات تقویت کننده کاربرد بور نشان می‌دهد که برآمدگی‌های کوچکی روی سطوح ساییده شده وجود دارند که شاید منشأ ذرات سایشی بوده یا ممکن است نتیجه‌ای از به دام افتادن ذرات سایشی تشکیل شده قبلی باشند [۵ و ۲۴].

ارزیابی ذرات سایشی جمع‌آوری شده اطلاعات به دست آمده از سطوح ساییده شده را کامل تر خواهد نمود. براساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی بدست آمده از محصولات پودری سایش که در شکل ۱۰ ارائه شده است دیده می شود که پودرها بیشتر درشت هستند. ضمن اینکه میکروترک ها و حفراتی نیز در پودرها به چشم می‌خورند. علاوه بر این هنگامی که ذرات سایشی ورقه‌ای شکل جدا شده اند، برخی از آن‌ها مقداری انحنا دارند در حالی که آن‌هایی که بلندتر و طولانی‌تر اند دارای مرفولوژی دنداندار هستند. چنین مشاهداتی در بررسی رفتار سایش لغزشی خشک روکش‌های استلایت حاصل از فرآیند لیزر بر زیر لایه‌های فولاد زنگ نزن و همچنین روکش استلایت ۶ حاصل از فرآیند GTAW بر روی چدن داکتیل به کمک آزمون پین روی صفحه و روکش استلایت ۶ بر روی فولاد 17-4PH تحت آزمون پین روی دیسک نیز گزارش شده است [۴ و ۵ و ۲۶-۲۴].

داده‌های به دست آمده از ضریب اصطکاک بین سطح روکش‌های مختلف و دیسک ساییده نیز در شکل ۸ ارائه شده است. با مقایسه مقادیر ضریب اصطکاک ارائه شده در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزودن ذرات کاربرد بور تا میزان ۲۰ درصد وزنی به آلیاژ استلایت ۶ میزان دامنه نوسانات ضریب اصطکاک کاسته شده و همچنین تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش به مقادیر کمتر متمایل شده است. دلیل این موضوع را می توان به افزایش مقادیر سختی روکش‌ها با افزایش مقدار فاز تقویت کننده در روکش‌های کامپوزیتی نسبت داد به طوری که با افزایش درصد وزنی کاربرد بور در روکش‌ها به دلیل روند افزایشی سختی، سطح روکش در برابر تغییر شکل پلاستیکی مقاومت بیشتری از خود نشان داده که می‌تواند منجر به کاهش سطح تماس واقعی نسبت به سطح تماس ظاهری گردد، لذا درگیری‌های بین نا همواری های سطحی در فصل مشترک بین نمونه های پین شکل و دیسک ساییده کمتر شده و نوسانات ضریب اصطکاک کاهش یافته است [۸].

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطوح سایشی به وجود آمده در روی سطح نمونه‌های پین شکل را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل ۹ می‌توان مشاهده نمود تشکیل لبه و ورقه‌ها و نیز تغییر شکل پلاستیکی لایه‌های سطحی آشکار است و آثاری





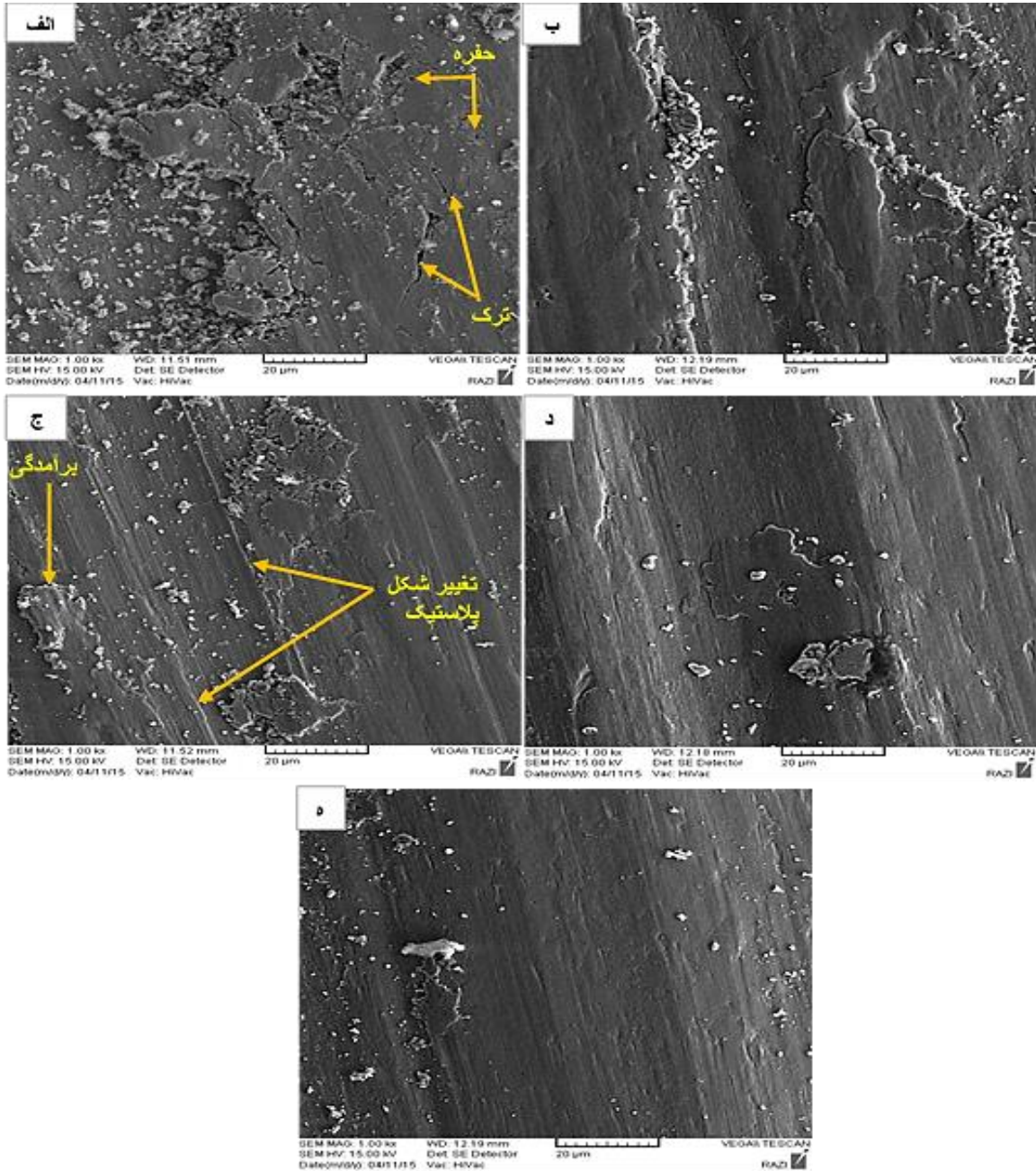
شکل ۸. داده‌های به دست آمده از ضریب اصطکاک بین سطح دیسک ساینده و روکش‌های الف) استلایت ۶ خالص ب) استلایت ۶+۵ درصد وزنی کاربرد بور ج) استلایت ۶+۱۰ درصد وزنی کاربرد بور د) استلایت ۶+۱۵ درصد وزنی کاربرد بور ه) استلایت ۶+۲۰ درصد وزنی کاربرد بور.

نسبت به سایر نمونه‌ها نسبت داد. به طوری که به خاطر سختی کمتر میزان تغییر شکل پلاستیکی در مناطق زیرسطحی بیشتر شده که این امر می‌تواند موجب به هم پیوستن راحت‌تر ترک‌های زیرسطحی و در نتیجه شرایط ایجاد ذرات سایشی طولی را فراهم آورد. اما در نمونه‌های روکش کامپوزیتی حاوی درصد‌های وزنی مختلف فاز تقویت کننده کاربرد بور (شکل ۹ ب تا ه) به ترتیب با افزایش درصد وزنی کاربرد بور آثار تخریب سطح ناشی از سایش کمتر گردیده است که دلیل آنرا می‌توان به کاهش

با توجه به شکل ۹-الف ملاحظه می‌شود که در روکش استلایت ۶ خالص آثار تخریب ایجاد شده و شیارهای سایشی ایجاد شده در سطح سایش در این نمونه نسبت به روکش‌های کامپوزیتی عمیق تر بنظر می‌رسد که بدان معنی است که ذرات سایشی از عمق بیشتری از سطح جدا شده و دارای ضخامت بیشتری نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی است. لذا انتظار می‌رود جرم از دست رفته در اثر سایش این روکش نیز بالاتر باشد. با توجه به مطالب ذکر شده در بالا، می‌توان دلیل چنین رفتاری را به سختی کمتر این نمونه

از شکل ۱۰-الف مشاهده می‌شود که ذرات سایشی به صورت پولکی شکل بوده که انتظار می‌رود به علت اتصال ترک‌ها ضمن تغییر شکل پلاستیکی حاصل شده باشند. حضور چنین ذرات سایشی نشان دهنده این است که ورقه ای شدن مکانیزم غالب سایشی در نمونه روکش

تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در سطوح تماس روکش‌های کامپوزیتی با افزایش سختی ناشی از افزایش مقدار کاربرد بور مرتبط دانست به طوری که روکش کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد وزنی کاربرد بور بیشترین سختی و کمترین آثار تخریب سطحی را نشان می‌دهد. [۲۵ و ۲۶].

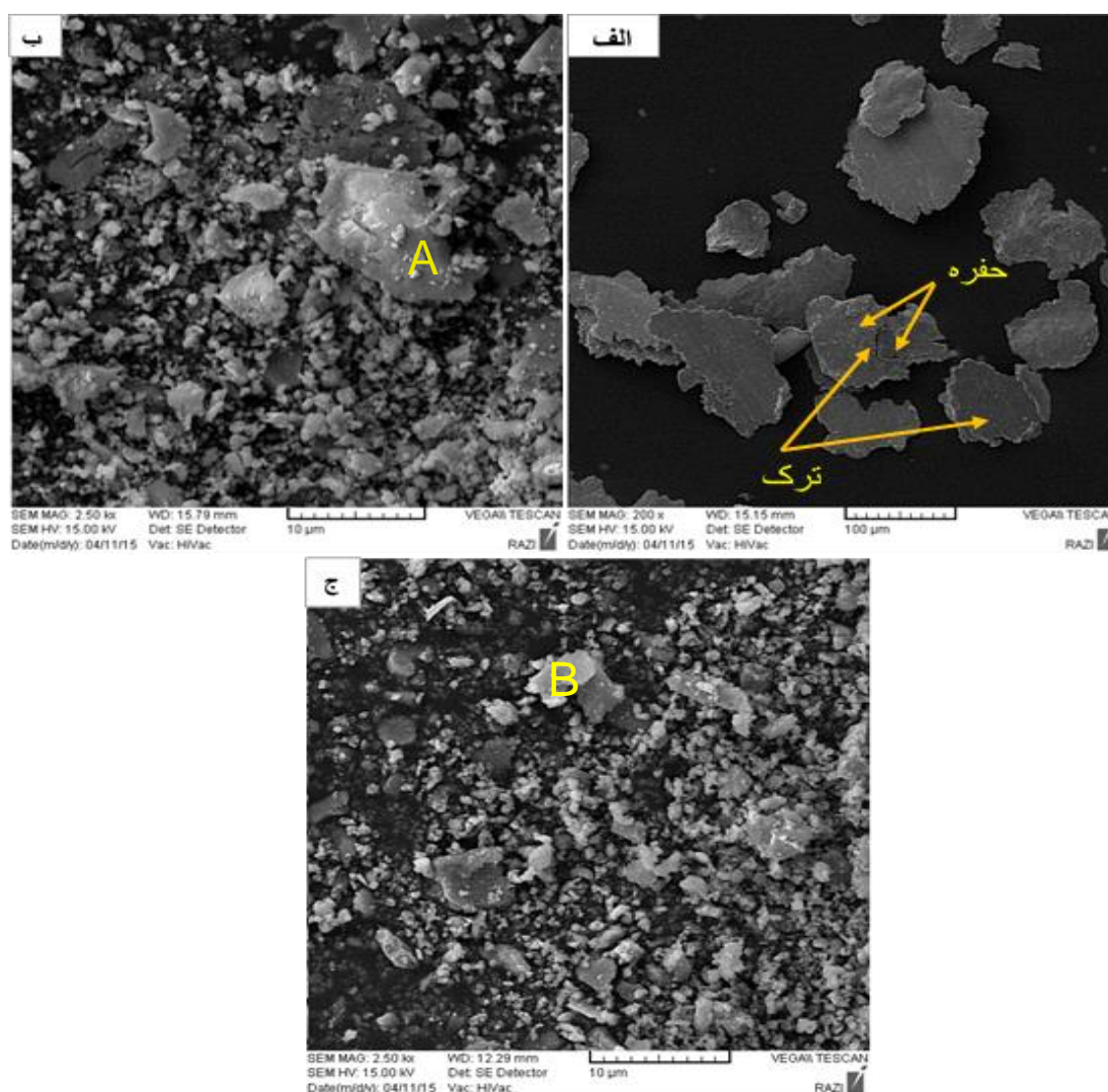


شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطوح سایش برای روکش استلایت ۶ خالص (الف) و روکش‌های کامپوزیتی

استلایت ۶ حاوی درصد‌های وزنی مختلف کاربرد بور (ب، ۵، ج، ۱۰، د، ۱۵ و ۲۰)

وجود ذرات سایشی با مشخصات ذکر شده در تحقیقات دیگری نیز که بر روی مقامت سایشی روکش استلایت ۶ انجام شده گزارش شده است. محققین با توجه به مشاهدات خود که مطابق با مشخصات ذکر شده در بالا است مکانیزم غالب سایشی را ورقه ای شدن پیشنهاد کرده اند [۲۵ و ۲۴ و ۸ و ۵].

شده با استلایت خالص است. به طوری که برخی از آنها انحنای داشته و برخی که طویل هستند دارای لبه های کنگره ای هستند [۲۶ و ۵]. این مسأله به خاطر تنش های باقیمانده در ذرات ورقه ای است. ضمن این که ممکن است میکروتورک هایی نیز در سطح پودرهای حاصل از سایش مشاهده شود که از مشخصه های اصلی ذرات سایشی به دست آمده تحت مکانیزم سایش ورقه ای محسوب می شوند [۲۶ و ۵].



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی ذرات سایشی به دست آمده از روکش های الف) استلایت خالص و روکش های حاوی درصد های وزنی مختلف کاربرد بور (ب) ۱۰ (ج) ۲۰٪

اتفاق را به حرارت بالای ایجاد شده در فصل مشترک بین پین و دیسک در طول آزمون سایش نسبت داد [۴ و ۵ و ۸ و ۲۶].

مقاومت سایشی روکش‌های کامپوزیتی با درصد های مختلف ذرات تقویت کننده به حجم کاربیدها و فازهای ثانویه تشکیل شده در ریزساختار بستگی دارد. ریز ساختار روکش‌های کامپوزیتی (شکل ۴) افزایش حجم کاربیدهای بین دندریتی و فازهای ثانویه ایجاد شده در اثر افزودن ذرات تقویت کننده کاربید بور به روکش را نشان می دهد که در یک زمینه نرم فلزی توزیع شده اند. ذرات کاربید و فازهای ثانویه مقاومت سایشی را فراهم آورده در حالی که زمینه نرم غنی از کبالت به عنوان یک پیوند دهنده برای فازهای نسبتاً ترد کاربیدی و ثانویه ایفای نقش می کند [۱۳]. در پژوهشی که بر روی روکش کاری لیزر روکش‌های کامپوزیتی آلیاژ پایه کبالت/SiC بر فولاد ساده کربنی انجام گرفته است با وجود تجزیه کامل SiC محققین مقاومت سایشی روکش‌های کامپوزیتی را بالاتر از روکش‌های آلیاژ پایه کبالت خالص گزارش کرده اند. برای این پدیده دو دلیل ذکر شده است: اول: وجود فاز اولیه محلول جامد (γ-Co) فوق اشباع شده‌ای از C و Si جدا شده از SiC که می تواند موجب استحکام بخشی به روکش‌ها شود. دوم: C و Si تجزیه شده با عناصر W، Cr و Co برای تشکیل ذرات ترکیبی کوچک و ساختن یوتکتیک واکنش می دهند، که این مسأله نیز می تواند موجب افزایش استحکام روکش‌ها و بهبود مقاومت سایشی آنها شود [۱۹].

مجموع دلایل ذکر شده بیانگر این امر است که مقاومت سایشی روکش‌های کامپوزیتی حاوی مقادیر مختلف کاربید بور نسبت به روکش استلایت خالص بهبود چشم گیری یافته است همچنین با افزایش میزان ذرات تقویت کننده کاربید بور این روند بهبود ادامه دارد.

شکل (۱۰-ب و ج) به ترتیب مربوط به ذرات سایشی به دست آمده از روکش حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی کاربید بور است هر چند که به نظر میرسد برخی ذرات بین دو سطح لغزش به دام افتاده و به صورت کروی شکل نورد شده و یا به قطعات کوچکتر شکسته شده اند. علت خرد شدن ذرات سایشی را می توان به دلیل سختی بالاتر روکش‌های کامپوزیتی استلایت حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی کاربید بور در مقایسه با روکش استلایت خالص بیان نمود اما شکل کلی ذرات که به صورت ورقه های پوسته پوسته شده هستند نشانگر این موضوع است که ورقه‌های شدن مکانیزم غالب سایشی در نمونه های روکش شده است. [۵]

جدول ۳ نتایج آنالیز طیف سنجی انرژی (EDS) به دست آمده از مناطق علامت گذاری در شکل ۱۰ را نشان می دهد. با توجه به جدول ۳ مقادیر عنصر آهن در ذرات سایشی حاصل از آزمون سایش روکش‌های کامپوزیتی حاوی مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی کاربید بور به ترتیب ۴۷/۷۶ درصد و ۴۹/۲۲ درصد است همچنین با توجه به جدول ۲ مقادیر عنصر آهن در روکش‌های کامپوزیتی حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد کاربید بور به ترتیب ۳۹/۹۶ و ۲۰/۶ درصد است. همانطور که مشاهده می شود مقدار عنصر آهن موجود در ذرات سایشی روکش‌های کامپوزیتی بیشتر از مقدار عنصر آهن در خود روکش‌های کامپوزیتی است. بنابراین بنظر می رسد انتظار می رود نمونه‌های روکش‌های کامپوزیتی پین شکل، دیسک ساینده را نیز تا حدی تحت سایش قرار داده‌اند که این موضوع را می توان به دلیل کارسختی ذرات سایشی ایجاد شده در حین فرآیند سایش و سختی بسیار بالای ذرات سایشی عنوان نمود. ضمن این که حضور عنصر اکسیژن در نتایج طیف سنجی انرژی بیانگر اکسیداسیون ذرات سایشی در حین آزمون سایش است که می توان این

جدول ۳. داده‌های عددی مربوط به آنالیز طیف‌سنجی انرژی ذرات سایشی روکش‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی کاربرد بور.

B		A		نقطه علامت گذاری شده ↓ عنصر
at.%	wt.%	at.%	wt.%	
۴۸/۷۶	۲۰/۱۲	۴۸/۶۷	۱۹/۸۲	O
۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۵۰	۰/۳۵	Si
۴/۸۸	۶/۴۵	۴/۸۲	۶/۳۸	Cr
۳۴/۳۵	۴۹/۲۲	۳۳/۶۱	۴۷/۷۶	Fe
۱۰/۳۲	۱۶/۲	۱۰/۳۰	۱۵/۴۵	Co
۰/۹۱	۴/۶	۰/۸۵	۴/۰۰	W
۰/۶۶	۳/۱۵	۱/۲۴	۶/۲۴	Au
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مجموع مقدار عناصر

### نتیجه گیری

که این امر ناشی از افزایش سختی و در نتیجه کاهش تغییر شکل پلاستیکی در نواحی نزدیک به سطح این روکش بوده که منجر به افزایش مقاومت آن در برابر ایجاد و رشد ترک در این مناطق می‌گردد. مکانیزم سایش در تمامی روکش‌ها از نوع سایش ورقه‌ای تشخیص داده شد.

### مراجع

1. R.Singh, D. Kumar, S.K. Mishra and S.K. Tiwari, *Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance*, Surface and Coatings Technology, 251(2014)87-97.
2. M. Hagihashemi, M. Shamanian and GH. Azimi, *Physical, Mechanical, and Dry Sliding Wear Properties of Fe-Cr-W-C Hardfacing Alloys Under Different Tungsten Addition*, Metallurgical and Materials Transactions B, 46(2015)919-927.
3. S. Buytoz, M. Ulutan and M. Yildirim, *Dry sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings*, Applied Surface Science, 252(2005)1313-1323.

(۱) روکش‌های کامپوزیتی حاصل شامل فازهای Co و کاربردهای بین دندریتی  $Cr_7C_3$  و  $Cr_{23}C_6$  مربوط به آلیاژ زمینه استلایت ۶ و فازهای ثانویه  $CoB_2$ ,  $CrB_2$ ,  $WC$  و  $W_2B$  است. ذرات  $B_4C$  تحت فرآیند روکش کاری حل شده و موجب تغییر در ترکیب شیمیایی و ریزساختار آلیاژ زمینه روکش شده و تشکیل فازهای ثانویه حاصل واکنش بین C و B حاصل از تجزیه  $B_4C$  با عناصر موجود در روکش استلایت ۶ می‌گردد.

(۲) بیشترین سختی در روکش حاوی ۲۰٪ وزنی بدست آمد که دلیل آنرا می‌توان ریزتر شدن دندریت‌ها به علت حضور فازهای ثانویه در ریزساختار روکشها و نقش بازدارندگی آنها از رشد دندریتهای زمینه و افزایش میزان فازهای بین دندریتی با سختی بیشتر در مقایسه با زمینه Co نسبت داد.

(۳) روکش کامپوزیتی استلایت ۶ به همراه ۲۰٪ وزنی کاربرد بور بالاترین مقاومت سایشی را از خود نشان داد

3. A. Gholipour, M. Shamanian and F. Ashrafizadeh, *Microstructure and wear behavior of stellite 6 cladding on 17-4 PH stainless steel*, *Journal of Alloys and Compounds*, 509( 2011)4905-4909.
4. R. Arabi Jeshvaghani, M. Shamanian and M. Jaberzadeh, *Enhancement of wear resistance of ductile iron surface alloyed by stellite 6*, *Materials and Design*, 32(2011)2028-2033.
5. L. Yu-Chi and Ch. Yong-Chwang, *Reinforcements affect mechanical properties and wear behaviors of WC cladlayer by gas tungsten arc welding*, *Materials and Design*, 45(2013)6-14.
6. Y.C. Lin, K.Y. Chang, *Elucidating the microstructure and wear behavior of tungsten carbide multi-pass cladding on AISI 1050 steel*, *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2010) 219-225.
7. R. Arabi Jeshvaghani, M. Jaberzadeh, H. Zohdi and M. Shamanian, *Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617*, *Materials and Design*, 54(2014)491-497.
8. F. Madadi, M. Shamanian and F. Ashrafizadeh, *Effect of pulse current on microstructure and wear resistance of Stellite6/tungsten carbide claddings produced by tungsten inert gas process*, *Surface and Coatings Technology*, 205(2011)4320-4328.
9. R. B. Waterhouse and D. E. Taylor, *Fertting debris and the delamination theory of wear*, *Wear*, 29(1974)337-344.
10. A. Farnia , F. Malek Ghaini , J.C. Rao , V. Ocelík and J.Th.M. De Hosson, *Effect of Ta on the microstructure and hardness of Stellite 6 coating deposited by lowpower pulse laser treatments*, *Surface and Coatings Technology*, 213(2012)278-284.
11. W.C. Lin and C. Chen, *Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding*, *Surface and Coatings Technology*, 200(2006)4557-4563.
12. Sh. Jong-Choul, Doh. Jung-Man, Y. Jin-Kook, L. Dok-Yol and K. Jae-Soo, *Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistanceof cobalt-base Stellite hardfacing alloys*, *Surface and Coatings Technology*, 166(2003)117-126.
13. G.H. Xu and M. Kutsuna, *Characteristics of multilayer laser cladding using powder mixture of Co based alloy and Vanadium carbide*, *Materials Science and Technology*, 24(2008)73-84.
14. M. Zhong, W. Liu, K. Yao, J. Claude goussain, C.Mayer and A. Becker, *Microstructural evolution in high power laser cladding of Stellite 6+WC layers*, *Surface and Coatings Technology*, 157(2002)128-137.
15. K.A. Chiang and Y.C. Chen, *Microstructural characterization and microscopy analysis of laser cladding Stellite12 and tungsten carbide*, *Journal of Materials Processing Technology*, 182(2007)297-302.
16. M.Xi Li, Yi.Zhu He and G. Xiong Sun, *Laser cladding Co-based alloy/SiC composite coatings on IF steel*, *Materials and Design*, 25(2004)355-358.
17. G. Abbas and D.R.F. West, *Laser surface cladding of stellite and stellite-SiC composite deposits for enhanced hardness and wear*, *Wear*, 143(1991)353-363.
18. L. Mingxi, H. Yizhu and Y. Xiaomin, *Effect of nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on microstructure of laser cladding cobalt-based alloy coatings*, *Surface Science*, 252(2006)2882-2887.
19. K.L. Wang, Q.B. Zhang, M.L. Sun, X.G. Wei and Y.M. Zhu, *Microstructure and corrosion resistance of laser clad coatings with rare earth elements*, *Corrosion Science*, 43(2001)255-267.
20. M.Li, Sh.Zhanga, H.Li, Y.Hea, J.Hong Yoonb and T.Yul Chob, *Effect of nano-CeO<sub>2</sub> on cobalt-based alloy laser coatings*, *Journal of materials processing technology*, 202(2008)107-111.
21. M. Zhong, K. Yao and W. Liu, *High-power laser cladding Stellite 6+WC*



- with various volume rates*, Journal of laser application, (2001)247-251.
22. G. Xu, M. Kutsuna, Zh. Liu and K. Yamada, *Comparison between diode laser and TIG cladding of Co-based alloys on the SUS403 stainless steel*, Surface and Coatings Technology, 201(2006)1138-1144.
23. A. Frenk and W. Kurz, *Microstructural effects on the sliding wear resistance of a cobalt based alloy*, Wear, 174(1994)81-91.
24. R. Arabi Jeshvaghani, E. Harati and M. Shamanian, *Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding*, Materials and Design, 32(2011)1531-1536.
25. N. P. SUH, *The delamination theory of wear*, Wear, 25(1973)111-124.
1. 24. A. Frenk and W. Kurz, *Microstructural effects on the sliding wear resistance of a cobalt based alloy*, Wear, 174(1994)81-91.
26. R. Arabi Jeshvaghani, E. Harati, M. Shamanian, *Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding*, Materials and Design, 32(2011)1531-1536.
27. N. P. SUH, *The Delamination Theory Of Wear*, Wear, 25(1973)111-124.