



بهبود مقاومت سطحی گرافیت با اعمال پوشش های چندگانه و ارزیابی تریبولوژیکی آنها

مهدی احمدی^۱، سعید رضا بخشی^۲، احمد احمدی^۳

^۱ اصفهان، شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد (کارشناس ارشد مهندسی مواد)

^۲ اصفهان، شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد (استادیار)

چکیده

هدف از این پژوهش بهبود مقاومت سطحی گرافیت پر کاربرد در صنایع هوافضا است. در همین راستا در ابتدا پوشش اولیه ی SiC به روش سمانتاسیون فشرده و در ادامه پوشش ثانویه ی Mo-Si-B با دو روش پاشش حرارتی و دوغابی به صورت جداگانه روی آن اعمال شد و به وسیله آزمون های عمومی شامل زبری سنجی و ریز سختی سنجی به همراه آزمون تخصصی سایش مورد ارزیابی قرار گرفتند. مطابق نتایج با اعمال پوشش ها رفتار سطحی بهبود چشمگیری پیدا کرد به گونه ای که زبری سطح و ریزسختی گرافیت خام با اعمال پوشش های SiC به ترتیب در حدود ۱۴ و ۹ برابر، SiC/Mo-Si-B حاصل از پاشش پلاسما حدود ۳۷ و ۱۶ برابر و SiC/Mo-Si-B دوغابی در حدود ۱۶ و ۳ برابر افزایش یافت و نرخ سایش گرافیت خام در طی ۱۰۰۰m مسافت سایش با تشکیل پوشش SiC حدود ۷۰mg، پوشش پاششی ۱۸۰mg و پوشش دوغابی ۲۱۰mg کاهش پیدا کرد.

واژه های کلیدی: پوشش SiC/Mo-Si-B؛ زبری سنجی؛ ریزسختی سنجی؛ سایش.

^۱. ahmadi.metallurgist@gmail.com

مقدمه

امروزه قطعات و تجهیزات فراوانی در صنایع مختلف تحت شرایط محیطی خاص از جمله: دمای بالا، فشار و تنش زیاد، اتمسفر اکسنده و خورنده و محیط‌های سایشی کار می‌کنند، که می‌توان به سیستم‌هایی نظیر موتور هواپیما، توربین‌های گازی، تجهیزات راکتورهای هسته‌ای و لانس‌های فلزات مذاب اشاره کرد [۱]. سایش، هنگام حرکت نسبی قطعات در تماس با یکدیگر اتفاق می‌افتد و باعث آسیب‌دیدگی آنها در بسیاری از کاربردها شده و هزینه مرتبط با آن بسیار بالا است. نوع و شدت سایش تابع متغیرهای متعامل متعددی از جمله نیروی اعمالی، حرکت نسبی و دما می‌باشد. در برخی موارد، سایش ممکن است در دمای بالا خفیف‌تر از دمای پایین باشد و یک علت آن می‌تواند اثرات مفید اکسید باشد. البته چسبندگی ضعیف اکسید می‌تواند باعث سایش تشدید یافته شود [۲-۴]. خواص منحصر به فرد قطعات کربنی، کاربران را واداشته است تا برای ساخت قطعات و تجهیزات صنعتی که در شرایط بالا کاربرد دارند، از این نوع مواد استفاده کنند. البته نقطه ضعف این کامپوزیت‌ها که کاربرد آنها را به تنهایی غیر ممکن کرده است، اکسایش آنها در دماهای بالاتر از 500°C است که با افزایش دما سرعت این اکسایش نیز افزایش می‌یابد. جهت حفاظت از قطعات کربنی در برابر اکسایش از پوشش‌های مقاوم به اکسایش استفاده می‌شود، که ترکیب کاربید سیلیسیم به صورت گسترده برای پوشش‌دهی قطعات کربنی استفاده می‌شود [۵ و ۶].

در همه‌ی سیستم‌های دمای بالا، مقاومت در برابر شرایط مکانیکی و خوردندگی اعمال‌شده از طرف محیط کار، یک ضرورت تلقی می‌شود. کاربردهای گوناگون، ترکیب بسیار متفاوتی از این شرایط را دارند؛ رشته‌های تنگستنی لامپ روشنایی یکسر این طیف است که از تأثیرات محیطی توسط اتمسفر کنترل‌شده، محافظت‌شده و کارکرد آنها اساساً بدون تنش است. در انتهای دیگر طیف، پره‌های توربین یک موتور جت نظامی قرار می‌گیرد که تحت تنش گریز از مرکز شدید همراه با تنش‌های گرمایی ناشی از تغییرات سریع دما در خلال چرخه‌ی پرواز (در محیطی که در دمای بالا اکسنده بوده و در دماهای پایین تر ممکن است خورنده باشد) قرار می‌گیرند. در بالاترین قدرت، گاز احتراقی داغی که پره‌ها را احاطه کرده دمایی بالاتر از نقطه ذوب ماده‌ی پره‌ها دارد و برای جلوگیری از ذوب شدن پره‌ها نیاز به سرد کردن داخلی توسط هوا می‌باشد [۲].

نیاز به کار در دماهای بالا، تا آینده‌ی قابل پیش‌بینی یک نیاز مستمر باقی خواهد ماند. بسیاری از صنایع از افزایش دمای کار سود خواهند برد. در تولید برق کارایی نیروگاه‌هایی که با سوخت زغال‌سنگ پودر شده کار می‌کنند، در صورت افزایش دما و فشار بخار به ترتیب از 580°C و 290 بار به 625°C و 325 بار، می‌تواند بیشتر شود [۵ و ۶]. این کار با صرفه‌جویی چشم‌گیر در مصرف سوخت و مزایای زیست محیطی ناشی از آن همراه خواهد بود. نیازهای عملکردی هواپیماهای نظامی آتی مستلزم استفاده از موتورهای جتی خواهد بود که نسبت نیروی جلوبرنده به وزنشان از مقدار کنونی ۱۲ به ۲۰ افزایش یافته و هم‌زمان از مصرف سوخت نیز کاسته شود [۷ و ۸].

مواد و روش تحقیق

در پژوهش حاضر به منظور بهبود مقاومت سطحی گرافیت سه نوع پوشش مورد بررسی قرار گرفت. به منظور افزایش زبری و ضریب ترشوندگی سطح قطعات کربنی [۹ و ۱۰] پوشش اولیه ی SiC، به کمک روش سمانتاسیون فشرده روی گرافیت تشکیل شد و در ادامه برای تشکیل پوشش ثانویه از دو روش پاشش حرارتی و دوغابی استفاده گردید و پوشش Mo-Si-B روی زیرلایه ی SiC اعمال شد.

برای بررسی خواص سطحی از دو آزمون عمومی شامل ریزسختی سنجی و آزمون زبری سطحی و آزمون تخصصی سایش برای نمونه ی گرافیت خام، همراه با پوشش SiC، SiC/Mo-Si-B به هر دو روش پاشش پلاسمایی و دوغابی در دمای محیط انجام گرفت. آزمایش زبری سنجی توسط دستگاه میتوتویو^۱ اجرا شد و برای هر نمونه سه بار تکرار شد و میانگین آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت و برای مقایسه دقیق تر سختی، از روش ریزسختی استفاده شد. این روش با بار ۵۰g در مقیاس ویکرز با دستگاه زویک^۲ با مقدار خطای حدود ۰٫۰۵ درصد انجام گرفت. برای آزمون سایش از فرایند سایش رفت و برگشتی خشک، از نوع پین روی صفحه استفاده شد. آزمون بارپذیری به گونه ای انجام شد که بعد از هر ۵۰ متر، بار اعمالی افزایش داده شد و آزمون تا حدی پیش رفت که کاهش جرم شدیدی در نمونه‌ها پدیدار شود. برای ارزیابی سطح و محصولات سایش تعیین مکانیزم‌های سایش دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی تی‌ای اسکن مدل VEGA3 با فیلمانی از جنس LaB6 به کار گرفته شد. ضمن این که جهت آنالیز عنصری سطوح، آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی با استفاده از دستگاه اکسفورد^۳ مدل X-MAX50 نصب شده روی میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت.

نتایج و بحث

در شکل ۱ مورفولوژی و زبری سطح گرافیت و پوشش‌های اعمال شده روی آن مشاهده می‌شود. زبری سطح گرافیت به تنهایی جهت فرایند پاشش حرارتی مناسب نیست و همچنین از توزیع یکنواختی روی سطح برخوردار است. با اعمال ترکیب SiC به کمک روش سمانتاسیون فشرده مطابق جدول ۱، زبری سطح در حدود ۱۴ برابر شده و به شکل غیر یکنواخت تری (نسبت به زبری سطح گرافیت) توزیع شده است. این امر باعث افزایش چسبندگی ذرات پاشش داده شده به زیرلایه و افزایش چسبندگی پوشش پاشش حرارتی می‌شود. با توجه به این که این نوع پوشش‌ها تشکیل شده از اسپلت‌هایی است که به صورت مذاب، نیمه مذاب و جامد روی زیرلایه و یکدیگر رسوب کرده‌اند؛ به همین دلیل سطح با زبری بالا، از ویژگی‌های پوشش‌های تولید شده به روش پاشش حرارتی می‌باشد [۱۱]. هم‌چنین این افزایش زبری به واسطه تشکیل لایه ی SiC، افزایش ضریب ترشوندگی گرافیت را در پی دارد و عامل جذب پوشش‌های بعدی می‌شود [۱۲]. پوشش دوغابی به واسطه فرایند برس زنی در تمام سطح نمونه، تقریباً رفتار زبری یکنواختی را ایجاد می‌کند و به نوعی باعث تکرار الگوی زبری می‌شود.

¹. Mitutoyo

². Zwick

³. Oxford

جدول ۲ نتایج ریزسختی سنجی است و اثبات می‌کند که پوشش پاشش حرارتی از سختی بالایی نسبت به پوشش SiC و گرافیت برخوردار است. این امر به دلیل ماهیت سرامیکی پوشش‌ها و همچنین وجود ترکیبات بین فلزی در ساختار پوشش MoSi₂ و MoB می‌باشد. لازم به ذکر است این آزمایش برای روش دوغابی نیز انجام گرفت، اما از آنجایی که این پوشش از نوع پوشش‌های حرارتی نیست و در عین حال فشردگی بالایی نیز ندارد، استحکام پیوستگی بالایی نداشته و در برابر فرورونده مقاومت چندانی از خود نشان نداد.

مطابق شکل ۲، به منظور بررسی و مقایسه رفتار سایشی، منحنی‌های تغییرات کاهش وزن بر حسب نیرو و آزمون بارپذیری و کاهش وزن بر حسب مسافت سایش ترسیم شدند. نمونه‌ی گرافیتی خام از ابتدای آزمون روندی صعودی در کاهش وزن را آغاز کرده است و به تدریج شیب کاهش وزن افزایش یافته و در هیچ کجای مسیر این نرخ ثابت و پایدار نشده است و در مسافت ۴۰۰-۵۰۰ متر، کاهش وزن بیش از ۵۰۰mg رسیده است. با بررسی دقیق‌تر می‌توان دریافت که وجود پوشش‌ها روی گرافیت خام، رفتار سایشی آن را تا حد زیادی بهبود بخشیده است. با اعمال ترکیب SiC روی گرافیت، رفتار سایشی آن بسیار بهبود یافته است. به‌خوبی مشاهده می‌گردد که روند نمودار به‌گونه‌ای است که پس از کاهش وزن جزئی که در مسافت‌های ابتدایی سایش اتفاق افتاده است، در ادامه‌ی آزمون، نمودار سایشی دارای شیب ناچیزی است و نهایتاً نمودار به‌صورت یک خط افقی درآمده و نرخ کاهش وزن پایدار و ثابت شده است. نمونه‌ی پوشش داده شده به روش پاششی نشان می‌دهد که در مسافت‌های اولیه (۵۰ متر)، منحنی سایش دارای یک ناحیه اولیه غیریکنواخت می‌باشد، به‌گونه‌ای که نرخ کاهش وزن در این نمونه از سایر نمونه‌ها بیشتر است اما پس از عبور از این ناحیه، منحنی سایش به‌صورت یکنواخت شده و نرخ کاهش وزن با شیب ناچیزی افزایش پیدا کرده است. این امر به دلیل عدم تماس تعادلی بین سطوح سایش می‌باشد که ناشی از زبری نسبتاً بالای پوشش‌های پاشش حرارتی است [۱۳]. در واقع پوشش پاشش حرارتی شده به دلیل دارا بودن ساختار لایه‌ای شکل، که در اثر رسوب ذرات پودر مورد نظر روی زیرلایه به وجود می‌آید، از استحکام پیوستگی بالایی مانند پوشش SiC برخوردار نمی‌باشد. در پوشش دوغابی، رفتار سایش تا حدودی شبیه نمونه‌ی پاششی می‌باشد با این تفاوت که نرخ کاهش وزن در ابتدای مسیر کمتر از آن است اما در ادامه مسیر و در حدود ۶۰۰ متر هر دو نمودار پاششی و دوغابی به نقطه‌ای مشترک رسیده‌اند و پس از آن نمونه دوغابی کاهش وزن بیشتری را تجربه می‌کند. این رفتار بیان‌گر این موضوع است که هنوز ذرات سایشی سخت در آن وجود دارند و باعث افزایش نرخ کاهش وزن می‌گردند. دلیل این رفتار را می‌توان به نرم‌تر بودن پوشش دوغابی و کمتر بودن استحکام پیوستگی نسبت به پوشش پاششی دانست و با در نظر گرفتن جدول ۱ می‌توان گفت، کمتر بودن نرخ سایش پوشش دوغابی نسبت به پوشش پاششی در مسافت‌های اولیه مربوط به زبری سطح است که در مورد پوشش دوغابی زبری بسیار کمتر می‌باشد. برای تعیین دقیق‌تر نوع مکانیزم سایش و عناصر موجود در سطح سایش پوشش SiC، مطابق شکل ۳ یک نقشه به همراه آنالیز طیف سنج تفکیک انرژی از سطح سایش تهیه شد. با دقت در تصویر تهیه شده می‌توان وجود حفرات و ترک‌ها را روی سطح سایش پوشش مشاهده کرد. این فرایند در اثر اعمال نیرو (از طرف پین به سطح پوشش) و فعل و انفعالات زیر

سطح به وجود می‌آید. در اثر رشد و به هم پیوستن حفره‌ها در طول آزمون سایش، در نهایت تکه‌ای بزرگ از جسم مورد نظر جدا می‌شود که نشان‌دهنده‌ی مکانیزم سایش ورقه‌ای است. با در نظر گرفتن ذرات سایشی پوشش SiC، به‌خوبی ذرات پولکی شکل که اثبات‌کننده‌ی سایش ورقه‌ای است مشخص می‌شود و با توجه به حضور عنصر آهن در آنالیز طیف سنجی تفکیک انرژی دلیلی بر وجود مکانیزم سایش چسبان می‌باشد؛ در عین حال وجود اکسیژن حاکی از اکسایش سطوح سایش به دلیل بالا بودن دمای موضعی در اثر لغزش و همچنین وجود مکانیزم سایش اکسایشی روی سطوح سایش، می‌باشد. در شکل ۴ که سطح سایش پوشش پاشش حرارتی به همراه نقشه‌ی تهیه شده از آن است، حفرات و ریزترک‌ها بیشتر شده‌اند و با در نظر گرفتن ذرات پولکی و حضور عناصر اکسیژن و آهن به ترتیب مکانیزم‌های سایش ورقه‌ای، چسبان و اکسایشی مشخص می‌شود. شکل ۴ سطح سایش پوشش دوغابی است به همراه نقشه‌ی تهیه شده از آن که نشان می‌دهد حفرات نسبت به دو پوشش قبل عمیق‌تر و از نظر تعداد بیشتر هستند و به علت کمتر بودن استحکام پیوستگی در این پوشش نسبت به دو پوشش قبل، ذرات بیشتر و درشت‌تر هستند و با در نظر گرفتن حضور آهن و اکسیژن می‌توان از سایش چسبان و اکسایشی نام برد.

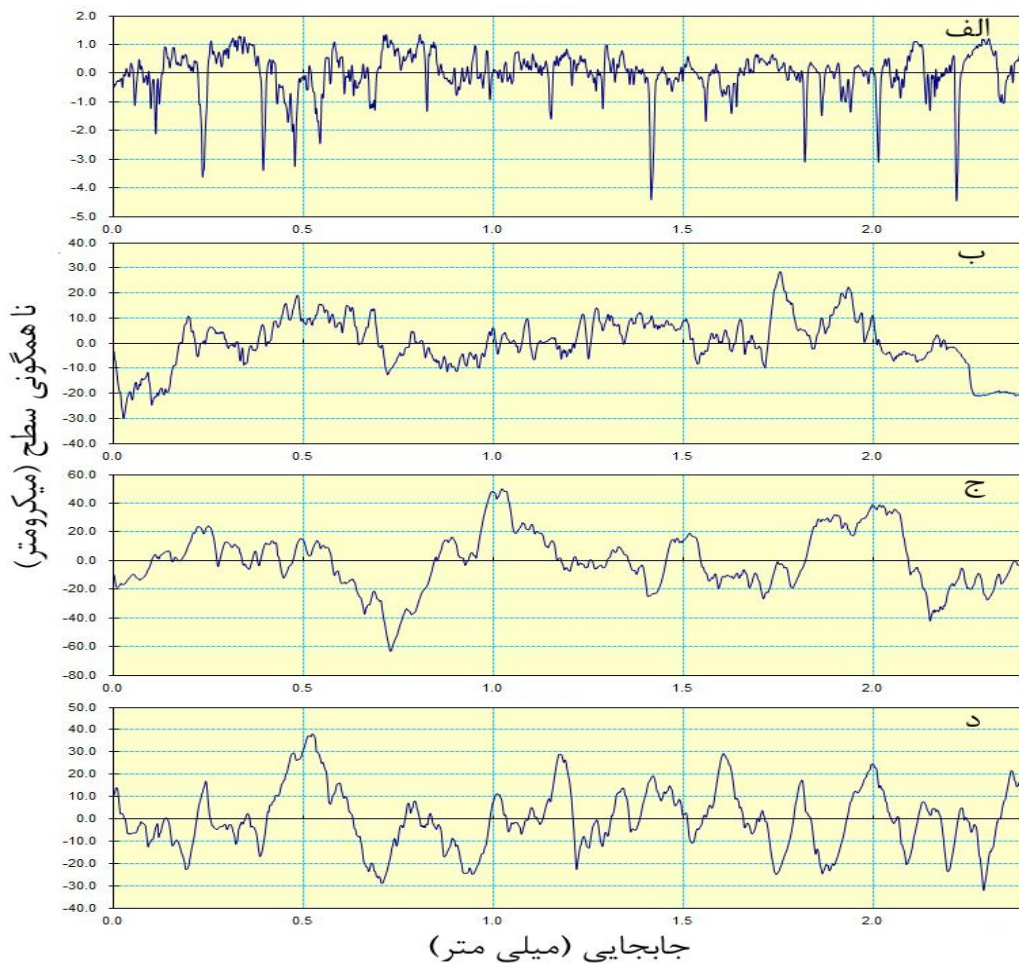
نتیجه‌گیری

- ۱) افزایش زبری سطح گرافیت با اعمال پوشش SiC در حدود ۱۴ برابر، پوشش پاشش حرارتی ۳۷ برابر و پوشش دوغابی ۱۶ برابر.
- ۲) افزایش ریزسختی گرافیت با اعمال پوشش SiC، پوشش پاشش حرارتی و پوشش دوغابی، به ترتیب در حدود ۹، ۱۶ و ۳ برابر.
- ۳) کاهش نرخ سایش گرافیت خام در طی ۱۰۰۰m مسافت سایش با تشکیل پوشش SiC حدود ۷۰mg، پوشش پاششی ۱۸۰mg و پوشش دوغابی ۲۱۰mg.

مراجع

۱. م. اسماعیلی، "دوره آموزشی ساخت کامپوزیت‌ها، فایبرگلاس‌ها و کامپوزیت‌های کربنی"، انجمن سازندگان مواد مرکب، تهران، ۱۳۸۱.
۲. م. مدرس، "ایجاد پوشش SiC/MoSi₂ بر روی قطعات کربنی به روش‌های سمانتاسیون فشرده و پاشش حرارتی پلاسمایی و ارزیابی خواص اکسایشی و تریبولوژیکی آن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴.
۳. جی. دبلو. میتیام، ام. اچ. وان. دوورده، "مواد مهندسی دمای بالا"، م. ناصریان ریایی، ع. حائریان اردکانی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۵.

۴. و. حیدری ، "پوشش دهی لایه نازک سرامیکی نیتريد کربن بر روی زیرلایه‌های هادی مانند گرافیت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۲.
۵. ح. جعفری، "بررسی اثر پوشش‌های چند لایه ایجاد شده توسط نانو پودرها بر خواص مقاومت به اکسایش قطعات FGM بر پایه C/SiC"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۰.
6. Q. Zhu, X. Qiu and C. Ma, "Oxidation resistant SiC coating for graphite materials Carbon", Vol 37, Issue 9, 1999, Pages 1475-1484.
7. R.Blum, Material for advanced power engineering, Kluwer academic publication, Netherland, 2008.
8. S.Newsam, High temperature materials for industry, Elsevier applied science, New York, 2000.
9. C. Sun, H.J. Li, Q.G. Fu, "ZrSiO₄ Oxidation protective coating for SiC-coated carbon/carbon composites prepared by supersonic plasma spraying", Springer, JTTEE5 22, (2012),525–530.
10. H. Wu, H.J. Li, Q.G. Fu, "Microstructures and ablation resistance of ZrC coating for SiC-coated carbon/carbon composites prepared by supersonic plasma spraying", Springer, JTTEE5 20, (2011), 1286–1291.
11. X. Liang and E. J. Lavernia, "Solidification and microstructure evolution during spray atomization and deposition of Ni3Al", Materials Science and Engineering, A161 (1993) 221-235.
12. H. J. Feng, Z. X. Rong, L. H. Jun, X. X. Boa, H. Mina, "Mullite-Al₂O₃ -SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites", Carbon 41 (2003).
13. B.Wielage, S. Steinhauser, "Characterization of the wear behavior of thermal sprayed coatings", journal of thermal spray technology 8(4), (1999) 553-558.



شکل ۱: مورفولوژی سطح الف) گرافیت، ب) پوشش SiC، ج) پوشش پاششی و د) پوشش دوغابی

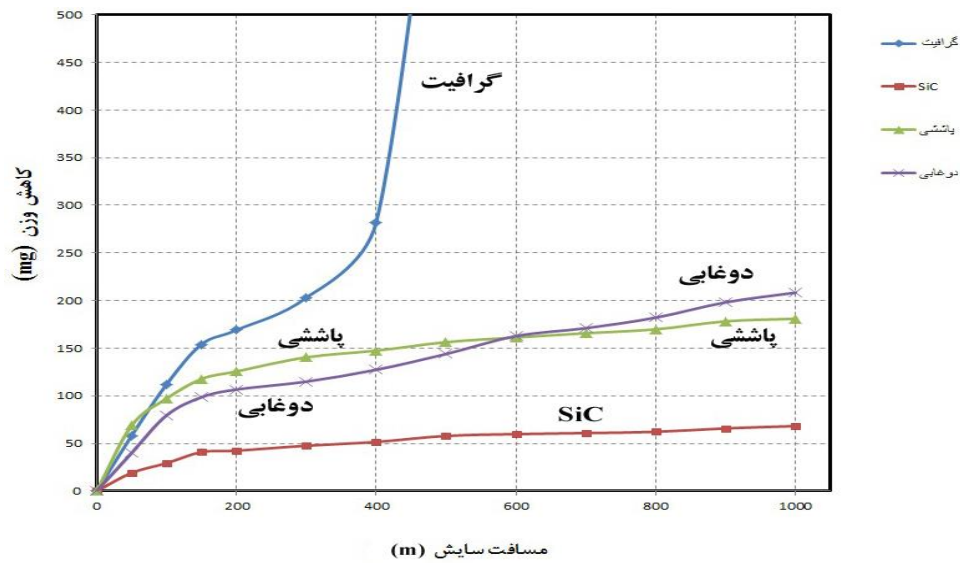
جدول ۱: نتایج زبری سنجی نمونه‌ی خام و پوشش‌های اعمال شده.

نمونه مورد آزمایش	زبری سطح (μm)
گرافیت	0.53 ± 0.2
پوشش SiC	7.74 ± 0.2
پوشش پاششی Mo-Si-B	20.80 ± 4.5
پوشش دوغابی Mo-Si-B	9.23 ± 1.72

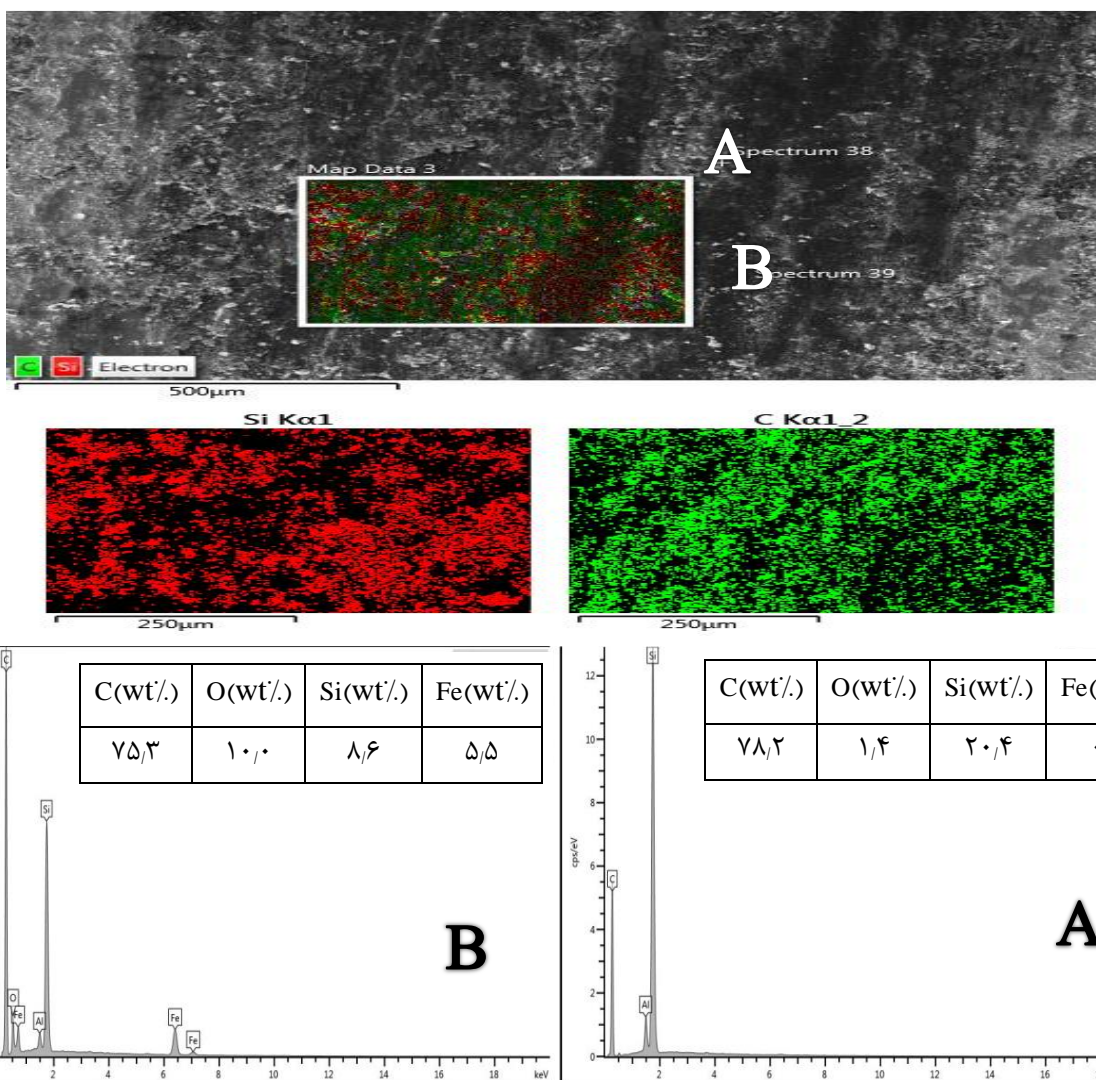
جدول ۲: ریز سختی و یکرز گرفته شده از زیرلایه گرافیتی و سطح مقطع پوشش‌ها تحت بار ۵۰ g.

نمونه	سختی	انحراف معیار
گرافیت	۷۷,۹۳	± 5.2
پوشش SiC	۷۲۸,۸	± 4.6
پوشش پاششی Mo-Si-B	۱۲۸۲	± 9.0
پوشش دوغابی Mo-Si-B	۲۳۲	± 3.0

بهبود مقاومت سطحی گرافیت با اعمال پوشش های چندگانه ...

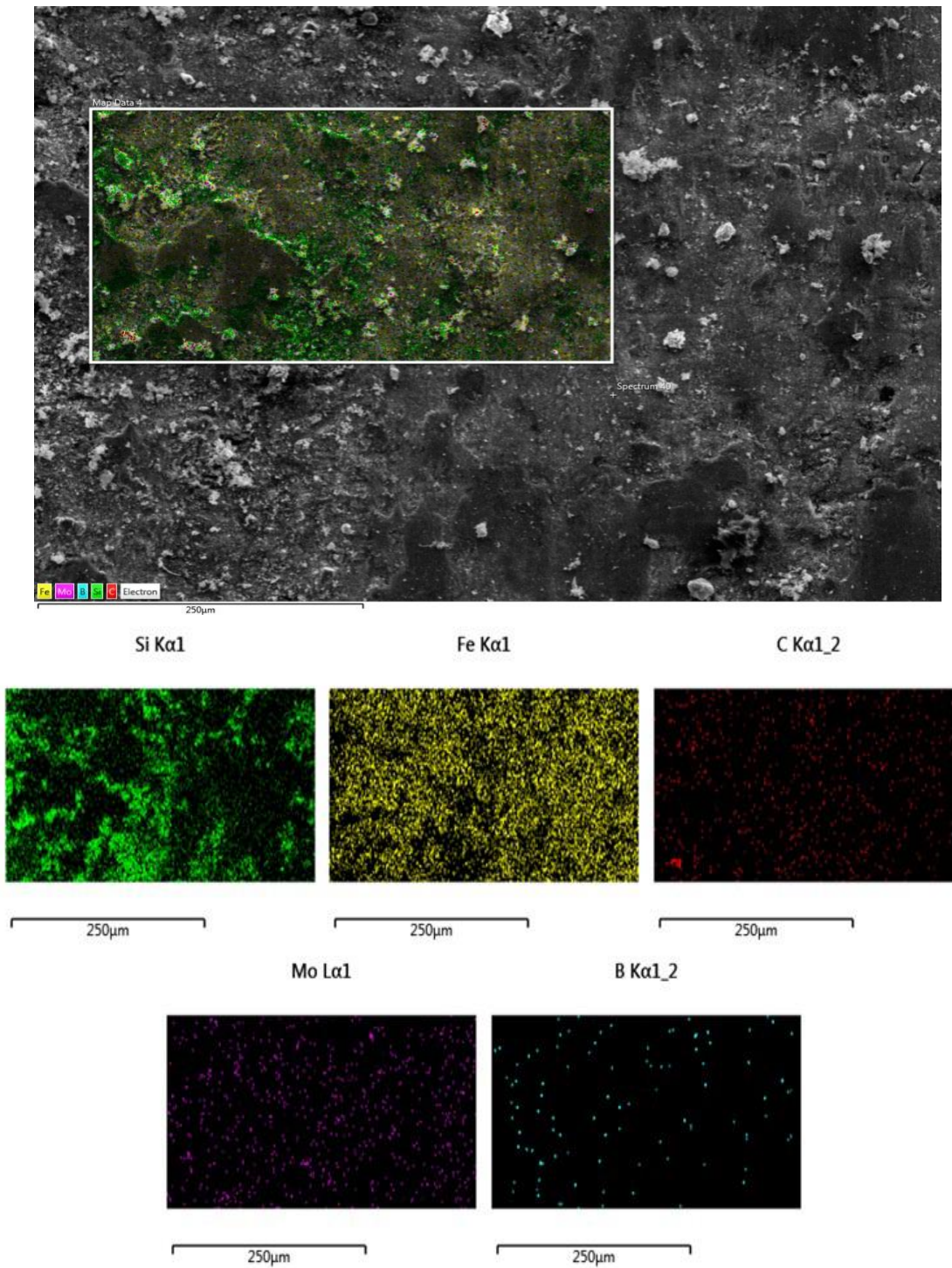


شکل ۲: منحنی های کاهش وزن بر حسب مسافت برای گرافیت بدون پوشش و پوشش داده شده.



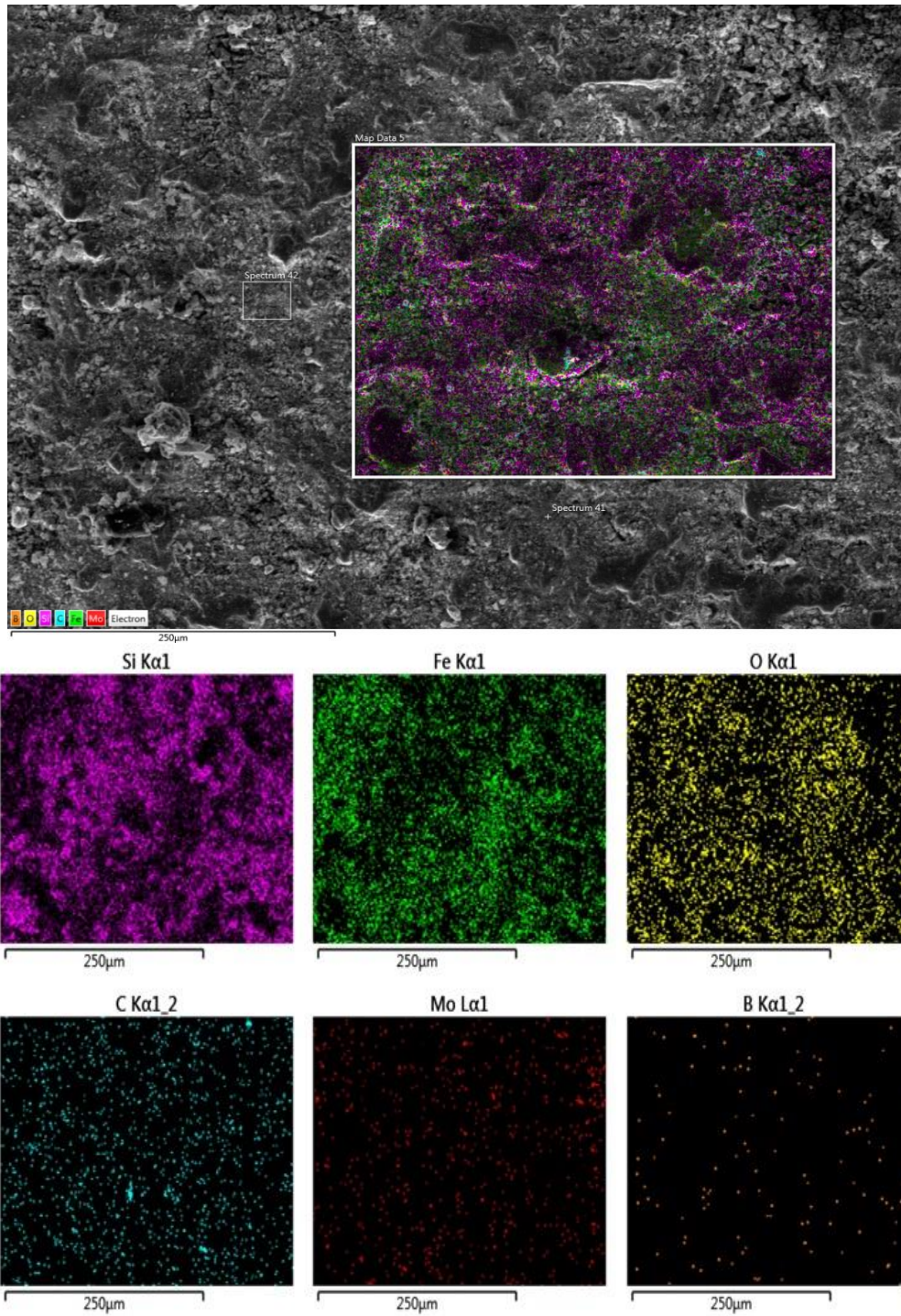
شکل ۲: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی به همراه نقشه تهیه شده و آنالیز طیف سنج تفکیک انرژی از مسیر سایش پوشش SiC.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح



شکل ۳: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی به همراه نقشه تهیه شده از سطح سایش نمونه‌ی با پوشش پاشش حرارتی.

بهبود مقاومت سطحی گرافیت با اعمال پوشش های چندگانه ...



شکل ۴: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی به همراه نقشه تهیه شده از سطح سایش نمونه‌ی با پوشش دوغابی.