

ارزیابی رفتار تریبولوژیکی پوشش نانوکامپوزیتی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-DLC-MoS}_2\text{-Au}$ ایجاد شده به روش PVD روی فولاد ۴۴۰C

محمد رضا برهانی و رضا مظفری نیا

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

مظاهر رمضانی و ایمان ابراهیمزاده

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله : ۹۰/۱۱/۱۱ - پذیرش مقاله : ۹۰/۱۲/۱۰)

چکیده

در این تحقیق، لایه‌نشانی پوشش نانوکامپوزیتی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-DLC-MoS}_2\text{-Au}$ به منظور بهبود رفتار سایشی فولاد ۴۴۰C (یکی از فلزات پرکاربرد در قطعات متحرک فضایی)، توسط فرآیند رسوب فیزیکی بخار و با استفاده از دو منبع پرتوالکترونی و حرارتی انجام شد. به منظور ارزیابی رفتار تریبولوژیکی پوشش بدست آمده، از آزمون‌های میکروسختی سنجی ویکرز، زبری سنجی و سایش به روش پین بر روی دیسک در محیط مرطوب و اتمسفر خشک (گاز نیتروژن) استفاده شد. نتایج آزمون‌های مذکور و بررسی انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنج تفکیک انرژی از سطح سایش پوشش، نشان دهنده تشکیل پوششی مطلوب با چسبندگی و چقرمگی مناسب بر روی زیرلایه، حصول میزان زبری و سختی به مراتب بهتر از الزامات مورد نیاز برای پوشش‌های فضایی و همچنین بهبود رفتار تریبولوژیکی سطح فولاد ۴۴۰C پس از اعمال پوشش فوق است.

کلمات کلیدی: پوشش نانوکامپوزیتی، قطعات متحرک فضایی، رسوب فیزیکی بخار، رفتار تریبولوژیکی.

Evaluation of tribological behaviors of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-DLC-MoS}_2\text{-Au}$ nanocomposite coating deposited by PVD technique on the 440C steel

M. R. Borhani and R. Mozafarinia

Department of Materials Engineering, MalekAshtar University of Technology

M. Ramazani and I. Ebrahim Zadeh

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 30 January 2012, accepted 28 February 2012)

Abstract

In the present study, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-DLC-MoS}_2\text{-Au}$ nanocomposite coating was deposited by physical vapor deposition (PVD) technique using two thermal sources including electron beam and resistant source on 440C steel as substrate to improve the wear behavior of this steel (one of the most widely used metals in the moving aerospace systems). To evaluation of tribological behavior of coating, Vickers micro hardness test, roughness test and analysis of wear in dry air (Nitrogen) and humid atmosphere by pin on disk test were performed. The results of surveys done by Energy Dispersive Spectroscopy and scanning electron microscope of abrasion of the coating, showed that the presence of all components of coating with suitable adhesion and toughness on substrate and also Roughness and hardness up much better than requirements for space coatings and improvement in tribological behavior of substrate by depositing the coating that was discussed above.

Keywords: Moving Aerospace Systems, Nanocomposite Coatings, Physical Vapor Deposition, Tribological Behavior.

E-mail of corresponding author: moh_brh65@yahoo.com

مقدمه

مکانیزم‌های متحرک فضایی به دلیل شرایط حاد مکانیکی، محیطی و ملاحظات پایداری مواد، پوشش‌های مقاوم به سایش با خواص تریبولوژیکی (اصطکاکی-سایشی) ویژه‌ای را نیاز دارند. از طرفی امکان استفاده از روانکارهای مایع در برخی از مکانیزم‌های مربوط به این سامانه‌ها (به دلیل تبخیر در خلاء و...) وجود ندارد، لذا نیاز است در این موارد از پوشش‌های مقاوم به سایش خودروانکاری که خود را با شرایط محیطی تطبیق می‌دهند، استفاده شود. پوشش‌های نانوکامپوزیتی این انعطاف‌پذیری را دارند که از روانکاری خوبی در بسیاری از محیط‌ها (مرطوب، خشک، دمای بالا و خلاً) برخوردار بوده و عین حال سختی بالایی داشته و به شدت موجب افزایش تافنس می‌شوند [۱].

پوشش نانوکامپوزیتی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-DLC-MoS}_2\text{-Au}$ از جمله پوشش‌های خودروانکار (تطبیقی) است که برای بهبود رفتار سایشی قطعات سیستم‌های متحرک فضایی مانند ماهواره‌ها و فضاییماها به کار می‌رود. این پوشش دارای زمینه سخت آلومینا و افزودنی‌هایی از جنس روانکار جامد، شامل MoS_2 و کربن شبه الماس (DLC) و عنصر طلا (به عنوان پیوند دهنده) است. در واقع سطح این نوع از پوشش در شرایط محیطی و سایشی مختلف دچار تغییرات ساختاری و شیمیایی شده و مقاومت سایشی آن (بدلیل تطبیق پذیری با شرایط محیطی جدید) حفظ می‌شود [۱-۳].

مکانیزم عملکرد این نوع از پوشش‌ها به این صورت است که در هنگام آغاز لغزش، فرآیند سایش، اجزای سطح را در معرض محیط قرار می‌دهد و گرمای ناشی از اصطکاک و تنش باعث تغییرات در ریزساختار و شیمی سطح می‌شود. در دماهای محیط و در حالت مرطوب، یک لایه انتقالی شبه گرافیتی بوسیله یک استتاله $\text{SP}^3 \rightarrow \text{SP}^2$ در DLC ایجاد می‌شود که در نهایت منجر به تشکیل گرافیت کریستالی خواهد شد. این لایه ضریب اصطکاک پایینی را (یعنی در

حدود ۰/۱ الی ۰/۲۵) ایجاد می‌کند و به طور چشمگیری سایش را کاهش خواهد داد [۳]. هنگامی که محیط از حالت مرطوب به حالت خشک (N_2 یا هوا) یا خلاً تغییر می‌کند و دما همچنان پایین باقی می‌ماند، با استتاله MoS_2 آمورف به کریستالی یک لایه انتقالی از دی‌کالکوژن‌ها روی سطح قطعات تشکیل شده و در نتیجه منجر به کاهش قابل توجه میزان سایش پوشش نانوکامپوزیتی می‌شود [۳،۴].

در بررسی‌های انجام شده توسط بیکر، ترکیب‌های مختلفی از پوشش تطبیقی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-DLC-MoS}_2\text{-Au}$ مورد بررسی قرار گرفته است. این پوشش‌ها به روش رسوب‌دهی با لیزر پالسی به کمک مگنترون (MSPLD) بر روی زیرلایه‌هایی از جنس فولاد زنگ‌نزن 440°C رسوب‌دهی شدند. نمونه‌ها در محیط‌های هوای مرطوب، نیتروژن (محیط خشک) و دمای بالا مورد آزمایشات مختلف از جمله آزمون سایش قرار گرفتند و در نهایت بررسی‌ها و ارزیابی‌های برگرفته شده از آزمایش‌ها نشان داد پوششی که دارای ترکیب $(\text{Al}_2\text{O}_3)0.47(\text{Au})0.15(\text{MoS}_2)0.24(\text{c})0.12$ بوده عملکرد بهینه‌ای از خود نشان داده است [۴].

در این تحقیق، زیرلایه‌ای از جنس فولاد زنگ نزن 440°C (یکی از فلزات پرکاربرد در صنایع فضایی)، ابتدا توسط لایه‌واسط Ti-TiC به روش پراکنشی و سپس با لایه‌ای از پوشش نانوکامپوزیتی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-DLC-MoS}_2\text{-Au}$ به روش رسوب فیزیکی بخار و با استفاده از دو نمونه هدف طلا و نمونه هدف کامپوزیتی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C-MoS}_2$ پوشش‌دهی شد. به منظور ارزیابی رفتار تریبولوژیکی پوشش بدست آمده از آزمون‌های سختی‌سنجی، زبری‌سنجی، سایش در محیط مرطوب و اتمسفر خشک و دندان‌گذاری ویکرز استفاده شد. در انتها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنج تفکیک انرژی، سطح سایش پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

در ابتدا پودرهای آلومینا، دی سولفید مولیبدن، گرافیت و ورقه نازکی از طلا به منظور آماده سازی نمونه هدف کامپوزیتی $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C-MoS}_2$ و طلا تهیه شدند. برای ساخت این نمونه هدفها از روش متالورژی پودر بهره گرفته شد. زیرلایه مورد استفاده در این تحقیق نیز فولاد 440C انتخاب گردید. به منظور دستیابی به پوششی با خواص تریبولوژیکی مناسب و همخوانی سختی زیرلایه با پوشش، عملیات حرارتی مناسب بر روی فولاد 440C انجام شد. در طی این عملیات، مطابق با مشخصات فولاد 440C در استاندارد A QQ-S-763 [۵] (برای کنترل سختی و ساختار) ابتدا فولاد مزبور در یک کوره الکتریکی در دمای 1065°C و به مدت یک ساعت آستینته شده و سپس در روغن سرد شد. پس از آن عملیات بازپخت با نگهداری فولاد در دمای 370°C به مدت یک ساعت انجام شد. در انتها آزمون سختی سنجی بر روی نمونه فوق انجام شد.

پس از اعمال عملیات حرارتی ذکر شده بر روی نمونه ها، عملیات سنگ زنی و سنباده زنی تا سنباده ۱۲۰۰ بر روی آنها انجام شده و جهت عملیات لایه نشانی آماده گردیدند. با هدف افزایش چسبندگی پوشش نانوکامپوزیتی به سطح زیرلایه، یک لایه میانی از پوشش گرادایانی Ti-TiC به روش پراکنشی به ضخامت ۱۰۰ نانومتر بر روی سطح فولاد مذکور اعمال شده و سپس عملیات لایه نشانی پوشش نانوکامپوزیتی به روش رسوب فیزیکی بخار و با تبخیر دو نمونه هدف کامپوزیتی و طلا به ترتیب با استفاده از منبع تبخیر پرتوالکترونی و مقاومتی انجام شد.

پس از اتمام عملیات لایه نشانی، مقطعی از زیرلایه پوشش دهی شده، برش و جهت انجام آزمون های مختلف آماده سازی شد. آزمون میکروسختی سنجی پوشش نیز با روش ویکرز و با استفاده از بار ۵۰ گرم انجام شد. به منظور ارزیابی کیفی چسبندگی پوشش با استفاده از میکروسختی ویکرزسنج، اثر دندان گذار ویکرز با اعمال نیروی ۱۰ نیوتن بر روی نمونه گذاشته شد. با کمک دستگاه زبری سنج نیز میزان زبری پوشش بدست آمده اندازه گیری شد. در انتها به

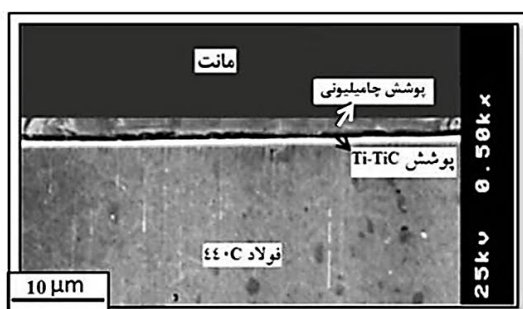
منظور ارزیابی مقاومت سایشی و رفتار اصطکاکی پوشش، از دستگاه سایش پین بر روی دیسک استفاده شد. لازم به ذکر است که در تمامی ارزیابی های سایشی انجام شده در این تحقیق، از نمونه های پین شکل (به قطر پنج میلی متر) از جنس فولاد AISI 52100 با سختی ۸۰۰ ویکرز و زبری سطح 0.4 میکرومتر استفاده شد.

در انتها با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنج تفکیک انرژی (EDS) تصاویر و آنالیزی از سطح پوشش، قبل و بعد از انجام آزمون سایش در محیط های خشک و مرطوب تهیه و نتایج با هم مقایسه شدند.

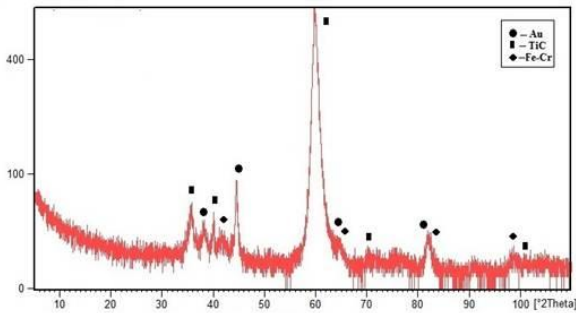
نتایج و بحث

پس از انجام عملیات حرارتی بر روی زیرلایه، میزان سختی آن از 25RC به 62RC افزایش یافت. این مقدار سختی به جهت لایه نشانی پوشش تطبیقی مناسب است.

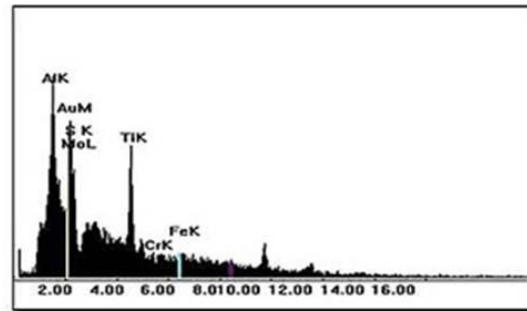
شکل های ۱ و ۲ به ترتیب تصویری از سطح مقطع پوشش نانوکامپوزیتی بدست آمده و آنالیز EDS از این سطح مقطع را نشان می دهند. بر اساس این نتایج، فرآیند پوشش دهی به طور مطلوبی انجام شده و عناصر اصلی پوشش چامیلیونی یعنی Al ، Mo ، Au و S با مقادیر مناسب در ترکیب وجود دارند. شکل ۳ نیز نتایج آنالیز XRD از سطح پوشش را نشان می دهد. در این آنالیز تنها فاز نانوکریستالی طلا با پیک های پهن، فاز TiC که به عنوان لایه واسط قبل از لایه نشانی پوشش نانوکامپوزیتی پوشش دهی شده و فازهای موجود در ریزساختار زیرلایه مشاهده می شوند. سایر اجزای پوشش به علت آمورف بودن در آنالیز XRD قابل مشاهده نیست.



شکل ۱- تصویر SEM از مقطع پوشش نانوکامپوزیتی



شکل ۳- نتایج آنالیز XRD نمونه پوشش نانوکامپوزیتی



شکل ۲- نتایج آنالیز EDS نمونه پوشش نانوکامپوزیتی

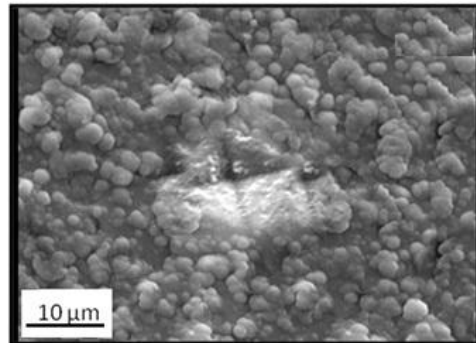
۰/۴ میکرون اشاره کرد. همانطور که ذکر شد سختی به دست آمده از زیرلایه در حدود ۶۲RC و به عبارتی ۷۱۰ ویکرز است. علاوه بر این، در کنترل کیفی این پوشش باید سختی پوشش در حد زیرلایه و یا کمی بالاتر از آن باشد، لذا ترکیباتی از پوشش که سختی در حد زیرلایه را تأمین می‌کنند، مورد قبول می‌باشند. با توجه به نتایج میکروسختی نمونه پوشش داده شده که در جدول ۱ نشان داده شده است، مشخص می‌شود که حداقل ریزسختی لازم برای پوشش با توجه به پارامترهای موجود بدست آمده است. حضور فازهای آمورفی همچون آلومینا و کربن‌شبه الماس باعث افزایش سختی پوشش شده‌اند.

جدول ۱. نتایج میکروسختی سنج ویکرز در نمونه پوشش داده شده

نام نمونه	سختی پوشش
سختی ویکرز ۱	۷۱۰
سختی ویکرز ۲	۷۵۷
سختی ویکرز ۳	۷۱۴
میانگین	۷۲۷

همچنین با توجه به ارقام بدست آمده در جدول ۲ و به خصوص مقدار Ra یا همان زبری میانگین، مشاهده می‌شود که میزان زبری سطح حاصل شده، از حداکثر مقدار مجاز کمتر است. البته لازم به ذکر است که میزان زبری در پوشش‌های اعمالی به روش رسوب فیزیکی بخار اهمیت چندانی ندارد؛ چرا که در همان مراحل ابتدایی سایش، این زبری از بین خواهد رفت [۷].

شکل ۴ اثر دندان‌گذاری ویکرز بر روی پوشش را نشان می‌دهد. با توجه به عدم حضور هرگونه ترک و یا کندگی در اطراف این اثر می‌توان به چقرمگی مناسب پوشش و چسبندگی خوب آن به صورت کیفی پی برد. علت این امر را می‌توان به سبب حضور وسیع مرزدانه‌ها و ممانعت از حرکت نابجایی‌ها و همچنین حضور مرز فاز آمورف و انرژی پایین سطح آنها و در نتیجه لغزش آسان مرزدانه‌ها دانست. یکی دیگر از عوامل مؤثر در افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه حضور لایه واسط Ti-TiC بوده است [۲].



شکل ۴- تصویر SEM از محل انجام تست سختی با اعمال نیروی ۱۰N

آنچه حایز اهمیت است، ضرورت تأمین یکسری الزامات توسط پوشش به دست آمده از نظر ریزساختار و خواص مکانیکی و به ویژه خواص سایشی مطابق با استانداردهای آژانس فضایی (ESA ECSS-Q-70) [۶] است. از جمله این الزامات می‌توان به دارا بودن ضریب اصطکاکی کمتر از ۰/۳ در محیط خشک، ضریب اصطکاک ۰/۲۵ در محیط مرطوب، حداقل سختی ۵۰۰ ویکرز و همچنین حداکثر زبری

جدول ۲. نتایج آزمون زبری سنجی بر روی نمونه پوشش داده شده.

نوع زبری سنجی	میزان زبری
$R_a(\mu m)$	۰/۳۳
$R_z(\mu m)$	۰/۰۹
$R_q(\mu m)$	۰/۴۱

جدول ۲. شرایط انتخابی به منظور انجام آزمایش سایش در هوا.

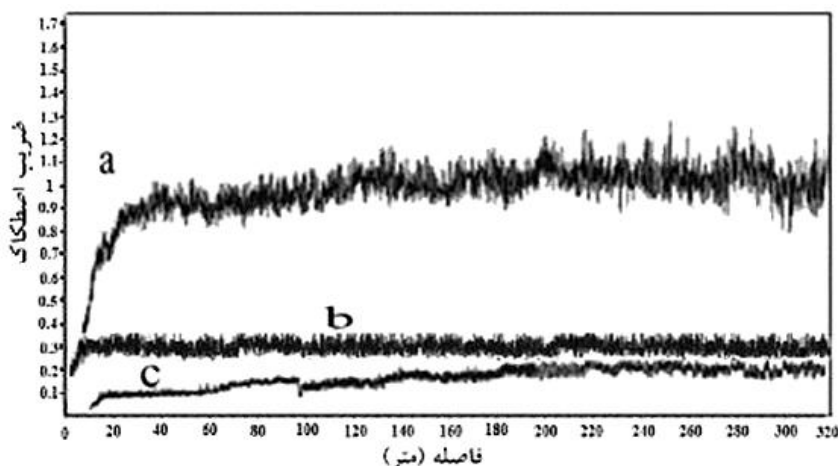
بار اعمالی	۱۰۰ گرم
سرعت دوران دیسک	۰/۲ متر بر ثانیه
مسافت آزمون (کل مسافت لغزش)	۳۵۰ متر
دمای آزمون	$25^{\circ}C$
اتمسفر محیط (سایش در محیط مرطوب)	هوای آزمایشگاه
اتمسفر محیط (سایش در محیط خشک)	گاز نیتروژن

به منظور ارزیابی مقاومت به سایش و رفتار اصطکاکی پوشش، از آزمون سایش با روش پین بر روی دیسک استفاده شد. در جدول ۳ به شرایط انتخابی برای انجام این آزمون اشاره شده است.

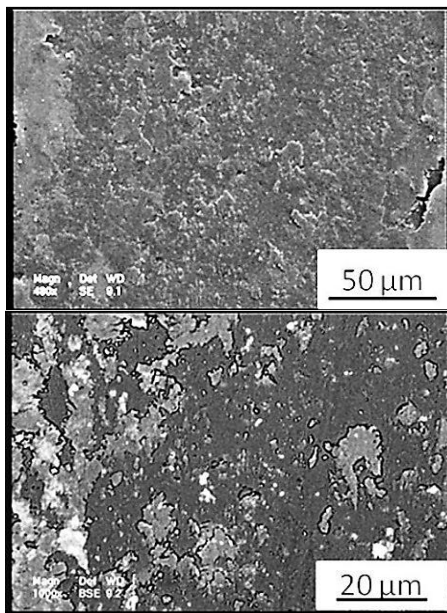
شکل ۵ نمودارهای ضریب اصطکاک (a) فولاد $440^{\circ}C$ ، پوشش نانوکامپوزیتی در اتمسفر کنترل شده (نیتروژن) و (b) پوشش نانوکامپوزیتی در هوای مرطوب را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، ضریب اصطکاک فولاد $440^{\circ}C$ تقریباً ۰/۹ می‌باشد و ضریب اصطکاک پوشش نانوکامپوزیتی در هوای مرطوب ۰/۲ و در اتمسفر خشک ۰/۳ بدست آمد. بنابراین با اعمال پوشش، ضریب اصطکاک پوشش تا حد قابل قبولی کاهش یافته است. علت کاهش قابل ملاحظه ضریب اصطکاک در هوای مرطوب را می‌توان ناشی از غالب بودن کربن شبه الماس در تعیین ضریب اصطکاک پوشش ناشی از استحاله فازی کربن شبه الماس موجود در پوشش و تبدیل آن به گرافیت کریستالی در اثر حضور رطوبت دانست [۸]. گرافیت کریستالی با دارا بودن هیبرید SP^2 ضریب اصطکاک بسیار مطلوبی (تا کمتر از ۰/۰۱) را برای سطح قطعات فراهم

می‌کند. البته حضور فاز آلومینا نیز در هر محیطی که پوشش حضور داشته باشد به کاهش ضریب اصطکاک آن در زمان سایش کمک می‌کند [۷]. لازم به ذکر است که پارامترهایی همچون دمای سطح تماس و مورفولوژی سطح تماس و همچنین نوع و میزان ذرات بیند و سطح تماس می‌تواند موجب تغییر ضریب اصطکاک شود. بنابراین با توجه به پایدار نبودن متغیرها، ضریب اصطکاک هم در محدوده مشخصی تغییر می‌کند [۱].

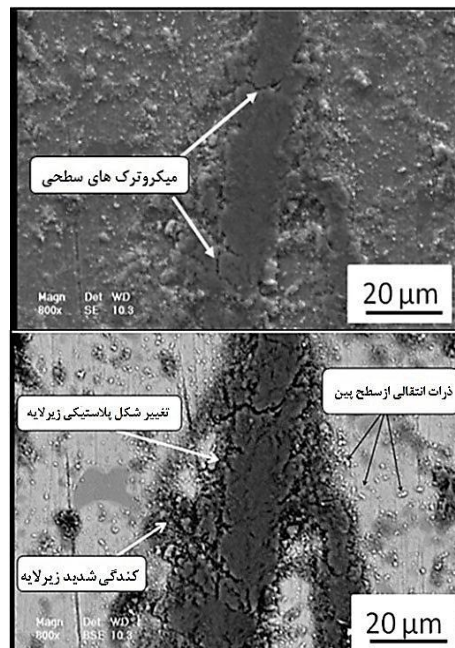
علت اصلی کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک پوشش تا حدود ۰/۳ در محیط خشک نیز فرآیند استحاله دی‌سولفید مولیبدن از ساختار آمورف به کریستالی و تشکیل یک لایه انتقالی از دی‌کالکوزن‌ها بر روی سطح قطعات است [۷]. شکل ۶ نیز تصاویر SEM از سطوح سایش (a) فولاد $440^{\circ}C$ ، (b) پوشش نانوکامپوزیتی در هوای مرطوب و (c) پوشش نانوکامپوزیتی در اتمسفر کنترل شده (نیتروژن) را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تصاویر SEM از سایش (a) فولاد $440^{\circ}C$ (b) پوشش نانوکامپوزیتی در محیط نیتروژن و (c) پوشش در هوا



(c) سطح سایش پوشش نانوکامپوزیتی در اتمسفر نیتروژن

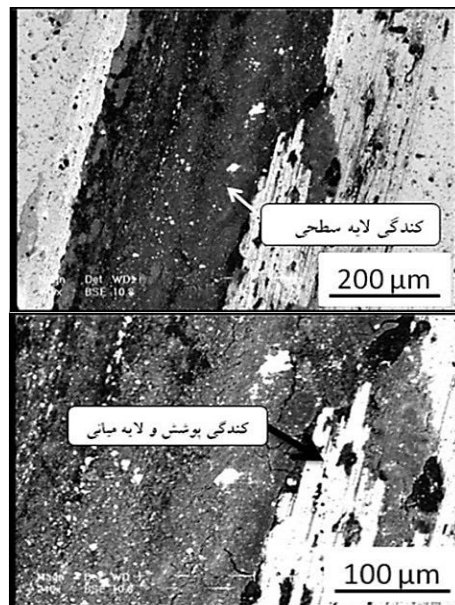


(a) سطح سایش فولاد 440°C

شکل ۶- تصاویر SEM (الکترون برکشتی و الکترون ثانویه) از سطوح سایش (a) فولاد 440°C ، (b) پوشش نانوکامپوزیتی در هوای مرطوب و (c) پوشش نانوکامپوزیتی در اتمسفر کنترل شده (محیط نیتروژن)

بالای فولاد 440°C در مقابل پین باعث بالا بودن ضریب اصطکاک آن شده است. با اعمال پوشش نانوکامپوزیتی همانطور که در شکل ۶-b و ۶-c مشاهده می شود مکانیزم سایش به علت لغزش سطح سخت و زبر پین در مقابل سطح نرم پوشش و جابجایی اجزای آن به وسیله ذرات سخت انتقال یافته از سطح پین، از حالت چسبان به سایش خراشان تغییر یافته است [۹].

شکل های ۷ و ۸ به ترتیب آنالیز EDS از سطح سایش پوشش را در هوای مرطوب و اتمسفر خشک نشان می دهند. با توجه به شکل ۷، مشاهده می شود که سطح پوشش اصلی در آزمون سایش تحت اتمسفر خشک، تا به نزدیکی لایه واسط تقریباً از بین رفته است و بیشتر عناصر مشخص شده در آنالیز EDS، لایه میانی Ti-TiC و ترکیبات موجود در زیر لایه می باشند. در حالیکه با توجه به شکل ۷ میزان عناصر باقیمانده موجود در سطح سایش یافته در محیط مرطوب به مقدار قابل توجهی بالاتر از حالت سایش در محیط خشک است. علت این موضوع را می توان در کاهش ضریب اصطکاک در محیط مرطوب و به تبع کاهش نرخ سایش پوشش دانست. با توجه

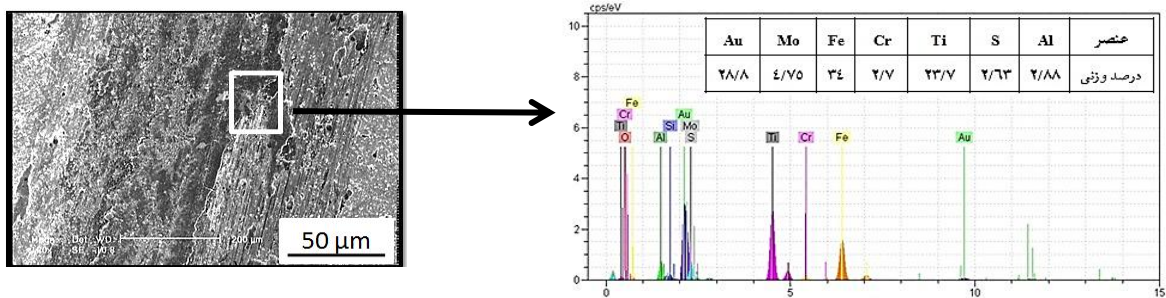


(b) سطح سایش پوشش نانوکامپوزیتی در هوای مرطوب

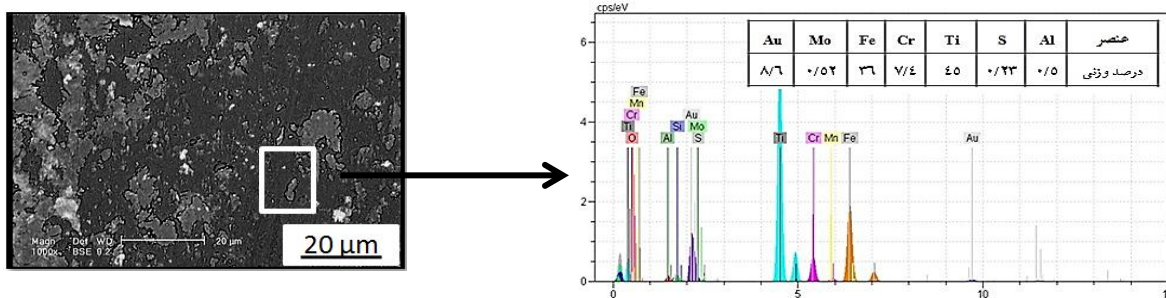
با مقایسه تصاویر الکترون برگشتی و الکترون ثانویه مربوط به هر سه نمونه (بدون پوشش و با پوشش در اتمسفر خشک و مرطوب) مشخص می شود که مکانیزم سایش نمونه بدون پوشش، چسبان است (شکل ۶-a). در این تصویر حضور ذرات انتقالی از نوک پین بر روی سطح فولاد و همچنین وجود سایش به وضوح قابل مشاهده است. سایش چسبان بسیار

لازم به ذکر است که حضور عنصر طلا در پوشش به عنوان یک پیوند دهنده یا یک جزو ریزساختاری، جدا از ایفای نقش در جهت کاهش استحکام برشی و افزایش مقاومت به سایش پوشش در دماهای بالا، باعث افزایش خواص روانکاری MoS_2 و کربن شبه الماس در محیط‌های خشک و مرطوب شده و در بهبود عملکرد آنها نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند [۱۰].

به شکل ۸ کاهش میزان گوگرد و مولیبدن نیز نشان دهنده ایفای نقش مطلوب دی سولفید مولیبدن در این محیط است [۷]. همچنین با توجه به مقایسه این آنالیزها با آنالیز اصلی پوشش که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در همان مراحل اولیه سایش در هر دو محیط (مرطوب و خشک) درصد بالایی از عنصر طلا در پوشش به علت نرم بودن این فاز از بین می‌رود.



شکل ۷- نتایج آنالیز EDS از سطح سایش پوشش در هوای مرطوب



شکل ۸- نتایج آنالیز EDS از سطح سایش پوشش در اتمسفر خشک

۳- آزمون سایش در محیط خشک و مرطوب بر روی زیرلایه و همچنین پوشش اعمال شده بر روی آن انجام شد و نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک زیرلایه در حالت قبل از اعمال پوشش در حدود ۰/۹ بوده و بعد از اعمال آن به ۰/۲ در هوای مرطوب و ۰/۳ در هوای خشک کاهش یافته است.

۴- در بررسی‌های میکروسکوپی سطح سایش زیرلایه و پوشش مشخص شد که مکانیزم سایش فولاد ۴۴۰C بدون پوشش، چسبان بوده و با اعمال پوشش چامیلیونی این مکانیزم به سایش خراشان (البته با نرخ سایش بسیار کمتر) تغییر می‌یابد.

نتیجه گیری

۱- تولید پوشش تطبیقی با ترکیب مناسب و با چسبندگی و پیوستگی مطلوب بر روی زیرلایه‌ای از جنس فولاد ۴۴۰C ، به وسیله دو منبع تبخیر حرارتی و پرتوالکترونی انجام شد.

۲- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون زبری سنجی و سختی سنجی پوشش، شرایطی به مراتب بهتر از الزامات و شرایط کلی مندرج در استاندارد آژانس هوایی اروپا برای پوشش‌های تریبولوژیکی (حداکثر زبری ۰/۴ میکرون و حداقل سختی ۵۰۰ ویکرز) حاصل شد، بنحوی که زبری میانگین پوشش در حدود ۰/۳ و سختی آن در حدود ۷۲۰ ویکرز به دست آمد.

منابع

1. E. W. Roberts, *A space tribology handbook*, AEA Technology, 2nd edition, 114, (1997) 131-147.
2. C. C. Baker, R. R. Chromik, K. J. Wahl, J. J. Hu and A. A. Voevodin, *Preparation of chameleon coatings for space and ambient environments*, *Thin Solid Films*, 515(2005)6737–6743.
3. A. A. Voevodin, J. S. Zabinski and C. Muratore, *Recent Advances in Hard, Tough, and Low Friction Nanocomposite Coatings*, *Tsinghua Science and Technology*, 106(2005)665-679.
4. A. Matthews and D. G. Teer, *Evaluation of coating wear resistance for bulk metal forming*, *Thin Solid Films*, 72(1980)No.541.
5. H. Chanddler. *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*, ASM Handbook, 2nd Edition, (1995).
6. ECSS Secretariat ESA-ESTEC, Space productassurance ECSS-Q-ST-70-04C, Requirements & Standards Division, (2008) 93-112.
7. C. Muratore and A. A. Voevodin, *Chameleon Coatings: Adaptive Surfaces to Reduce Friction and Wear in Extreme Environments*, *Annual Review of Materials Research*, (2009)297–324.
8. K. N. Lee, *Diamond-like carbon coatings applied to hard disks*, *Surface & Coatings Technology*, (2000) 133-134.
9. C. M. Cotell, J. A. Sprague, and F. A. Smidt, *ASM Handbook*, Surface Engineering, Vol.5, (1997).
10. A. A. Voevodin and J. S. Zabinski, *Smart Nanocomposite Coating with Chameleon Surface Adaption in Tribological Application*, *anostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings*, Kluwer Academic Publishers, (2004)1–8.