

پاشش پلاسمایی و مشخصه‌یابی ساختاری پوشش مرکب $\text{NiAl-Cr}_2\text{O}_3\text{-MoS}_2$ مسعود بیگی^۱، سید رحمان حسینی^۲ و سعید رضا بخشی^۲^۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر^۲. استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

هدف از این تحقیق ایجاد پوشش مرکب $\text{NiAl-Cr}_2\text{O}_3\text{-MoS}_2$ به روش پاشش پلاسمایی روی فولادی از جنس CK45 و مشخصه‌یابی ساختاری پوشش است. برای این کار دوغاب پودر مواد اولیه توسط روش آسیاب کاری مکانیکی تر تهیه و در ادامه پودر آگلومره شده‌ی مرکب توسط روش خشک کردن پاششی ایجاد و سپس توسط روش پاشش پلاسمایی روی سطح اعمال شد. جریان مورد استفاده در روش پاشش پلاسمایی ۳۵۰ آمپر، ولتاژ ۳۵ کیلو ولت، نرخ شارش گاز آرگون حامل پودر ۷ لیتر بر دقیقه، نرخ تغذیه پودر در منطقه نازل ۱۱ گرم بر دقیقه و فاصله پاشش ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی رویشی نشان داد که ضخامت پوشش در حدود ۱۲۰ میکرومتر است. ریزساختار پوشش از لحاظ ظاهری و ترکیب شیمیایی دارای یکنواختی مطلوبی است. در بخش‌های مختلفی از پوشش تخلخل‌هایی با قطر تقریبی ۲۰ میکرون مشاهده می‌شود. نتایج پراش سنجی پرتوی ایکس نشان داده که در حین فرایند پاشش پلاسمایی مقادیری از جزء روانکار تجزیه شده و سبب ایجاد ترکیبات اکسیدی و سولفیدی روانکار جدیدی در ساختار پوشش شده است. همچنین انتقال پیک‌های عنصر کروم در الگوهای پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که مقادیر جزئی از عناصر مولیبدن و آلومینیم در جزء نیکل حل شده و تشکیل محلول داده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که پوشش ایجاد شده به روش پاشش پلاسمایی دارای یکنواختی ساختار مناسب است اما به علت دمای بالای فرایند مقادیری از ترکیبات موجود در پوشش تجزیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پوشش مرکب خودروانکار $\text{NiAl-Cr}_2\text{O}_3\text{-MoS}_2$ ، ریزساختار و پاشش پلاسمایی.

مقدمه

یکی از حادترین شرایطی که فضاپیماها و ماهواره‌ها همواره با آن روبرو بوده‌اند شرایط متغیر کاری از لحاظ دمایی، نوع کاربری تجهیزات، میزان خلاء موجود و مواردی از این قبیل بوده است. از آنجا که شرایط حاکم بر جو به گونه‌ای است که استفاده از روانکار مایع یا نیمه جامد میسر نیست، جهت جلوگیری از سایش قطعات باید از روانکارهای جامد استفاده کرد. روانکار جامد اصولاً به موادی گفته می‌شود که به علت دارا بودن ساختار لایه‌لایه‌ای می‌توانند در اثر اعمال تنش‌های برشی، میزان اصطکاک مابین دو سطح را کاهش دهند.

مهم‌ترین پوشش‌های خود روانکار جامد عبارت انداز: مواد جامد لایه‌لایه (همچون گرافیت، MoS_2 ، WS_2 و HBN) فلزات نرم (همچون نقره، سرب، طلا، قلع و ایندیم) اکسیدهای ترکیبی (همچون $CuO-Re_2O_7$ و $NiO-MoO_3$) اکسیدهای تک جزئی (همچون B_2O_3 ، ZnO_2 و Cr_2O_3) هالیدها و سولفیدهای فلزات قلیایی خاکی، پوشش‌های بر پایه‌ی کربن، پوشش‌های مرکب حجمی یا فیلم‌های ضخیم (بالای ۵۰ میکرومتر) و فیلم‌های نازک مرکب (پوشش‌های زیر ۵۰ میکرومتر همچون مواد نانوکامپوزیت‌های چندلایه از Ti ، MoS_2 و کربن شبه الماسی^۱) [۱-۳].

پوشش‌های روانکار جامد تک‌جزئی همچون گرافیت و MoS_2 علی‌رغم دارا بودن مزایای بسیار در زمینه‌ی روانکاری دارای معایبی همچون حفظ خاصیت روانکاری تنها در یک محدوده‌ی کم دمایی، شکننده بودن برخی از آن‌ها (خصوصاً در دمای اتاق) و عدم خودتطبیقی با محیط نیز هستند [۴]. بنابراین با گسترش استفاده از پوشش‌های روانکار جامد جهت دستیابی به خواص سایشی بالاتر پوشش‌های دو جزئی و چند جزئی (مرکب) توسعه یافتند. [۵].

برخی از ترکیبات فلزی خواص تریبولوژیکی خوبی را در دمای بالا از خود نشان می‌دهند. در بین این ترکیبات، ترکیب $NiAl$ برای کاربردهای دمای بالا یکی از بهترین انتخاب‌ها است چرا که دارای چگالی پایین، مقاومت به اکسیداسیون بالا، نقطه ذوب بالا و نیز رسانایی حرارتی و الکتریکی زیادی و نیز هزینه‌ی اولیه‌ی تولید پایین است [۶، ۷]. این ترکیبات در کنار تمامی حسن‌های خود دارای ضعف‌هایی همچون انعطاف پذیری پایین در دماهای کم و نیز استحکام و مقاومت به خزش پایین در دمای بالا نیز هستند.

مهم‌ترین انواع پوشش‌های سرامیک اکسیدی عبارتند از اکسید آلومینیم (Al_2O_3)، پوشش‌های مانع حرارتی (TBC^۲) پایه اکسید زیرکونیم و پوشش‌های اکسید کروم (Cr_2O_3). پوشش‌های آلومینایی عموماً مقاومت سایشی بسیار عالی، مقاومت خوردگی خوب و سختی بالایی دارند. پوشش‌های زیرکونیایی به دلیل هدایت حرارتی کم عموماً به عنوان پوشش‌های مانع حرارت استفاده می‌شوند [۸].

از خصوصیات پوشش‌های اکسید کروم (Cr_2O_3) می‌توان به مقاومت سایشی و سختی بسیار بالا، هدایت الکتریکی کم آن‌ها که منجر به کاهش نرخ خوردگی می‌شود، استحکام مکانیکی زیاد (در مقایسه با دیگر

^۱ . diamond like carbon- DLC

^۲ . thermal barrier coating

پوشش‌های سرامیکی)، مشخصات اپتیکی خوب، ضریب اصطکاک کم، پایداری شیمیایی بسیار خوب، خواص مغناطیسی مطلوب استحکام چسبندگی^۱ مطلوب به زیر لایه‌های فلزی [۹، ۱۰] و مقاومت اکسیداسیون زیاد در دمای بالا اشاره نمود. از کاربردهای آن می‌توان به صنایع مختلف از جمله موتورهای درون سوز دیزلی، صنایع هوافضا، صنایع الکترونیک، قطعات مقاوم به سایش، شکل‌دهی گرم، یاتاقان‌ها، محیط‌های در معرض خوردگی، صنایع کشتی‌سازی، صنایع تولید مواد غذایی، صنایع نساجی، غلتک‌های فولادی چاپ، پمپ‌های آب و قسمت‌های متحرک قطعات مختلف اشاره نمود. در کل می‌توان بیان نمود که عمده کاربرد پوشش‌های Cr_2O_3 در شرایطی است که مقاومت خوردگی به همراه مقاومت سایشی نیاز باشد [۱۱، ۱۲].

دی‌سولفید مولیبدن به عنوان یک روانکار جامد شناخته شده است. علی‌رغم داشتن یک ساختار کریستالی چند لایه، یک ساختار ورقه‌ای ماکروسکوپی در دی‌سولفید مولیبدن وجود دارد. ضخامت این لایه‌ها در حدود یک میکرومتر است. لایه‌های دی‌سولفید مولیبدن کاملاً انعطاف‌پذیر بوده و می‌توانند بدون هیچ تخریبی روی هم بلغزند. همچنین ثابت شده است که تداوم سایش، موجب حرکت لایه‌های دی‌سولفید مولیبدن روی زیرلایه می‌شود. خاصیت روانکاری این ماده، نتیجه‌ی حرکت آزادانه‌ی لایه‌های تشکیل‌دهنده ساختار آن است. سازوکار شکست پوشش نازک دی‌سولفید مولیبدن پوسته‌پوسته شدن پوشش در نواحی مختلف گزارش شده است. گاز اکسیژن موجب تشدید فرایند پوسته‌پوسته شدن شده لذا طول عمر دی‌سولفید مولیبدن در حلال بیشتر از ۱۰ برابر طول عمر این پوشش در هوای آزاد است. حتی مقادیر کم اکسیژن، طول عمر پوشش را به صورت واضحی کاهش می‌دهد. به همین دلیل دی‌سولفید مولیبدن به عنوان یک روانکار بسیار عالی در تجهیزات فضایی مطرح می‌شود [۱، ۳ و ۱۳].

مواد و روش تحقیق

جهت آماده‌سازی پودر اولیه مورد نظر از روش آسیاب‌کاری تر استفاده شد. در این روش پس از مخلوط کردن پودرهای اولیه (با ترکیب ۶۰ درصد وزنی NiAl، ۲۵ درصد وزنی Cr_2O_3 و ۳۵ درصد وزنی MoS_2) به ازاء هر ۱۰۰ گرم پودر ۵۰۰ میلی‌لیتر آب در محفظه‌ی آسیاب‌کاری ریخته و محلول به مدت ۱۵ ساعت آسیاب‌کاری شد. پس از آن چسب PVA^۲ به محلول افزوده و مجدداً محلول به مدت ۲ ساعت آسیاب‌کاری شد. پس از انجام فرایند خشک‌کردن پاششی^۳ پودر مرکب مورد نظر ایجاد شد. دستگاه خشک‌کن پاششی مورد استفاده در این تحقیق از نوع تریق از بالا بود. در این دستگاه محلول با سرعت یکنواخت به صورت قطره قطره از ناحیه فوقانی به داخل دستگاه ریخته شده و پس از برخورد با دیسک در حال چرخش و بر اثر حرارت موجود به صورت ذرات پودر از ناحیه تحتانی دستگاه خارج می‌شود. فرایند خشک‌کردن پاششی در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت چرخش دیسک ۶۰۰۰ دور بر دقیقه و دبی ورودی محلول به دستگاه ۲/۵ سی‌سی بر دقیقه

^۱ . adhesion strength

^۲ . polyvinyl alcohol

^۳ . spray drying

انجام شد. پیش از انجام فرایند پاشش پلاسمایی، سطح زیرلایه توسط فرایند سندبلاست^۱ آماده‌سازی شد. در این فرایند سطح مؤثر زیرلایه زیاد شده و به علت وجود زبری در سطح اتصال مکانیکی میان پوشش و زیرلایه افزایش می‌یابد. پس از آماده‌سازی زیر لایه فرایند پاشش حرارتی توسط دستگاه پاشش پلاسمایی اتمسفری (APS^۲) انجام گرفت. عوامل پاشش پلاسمایی برای انجام این پژوهش شامل جریان ۳۵۰ آمپر، ولتاژ ۳۵ کیلو آمپر، نرخ شارش گاز آرگون حامل پودر ۷ لیتر بر دقیقه، نرخ تغذیه پودر در منطقه نازل ۱۱ گرم بر دقیقه و فاصله پاشش ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. بررسی‌های ساختاری سطح مقطع نمونه‌های پوشش‌دهی شده توسط دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی مدل XL۳۰ ساخت شرکت philips از کشور هلند با منبع تأمین الکترون کاتد گرم^۳ توسط رشته تنگستنی، انجام شد. پس از قرار دادن نمونه در دستگاه، در شرایط خلأ با آشکارسازی الکترون‌های ثانویه^۴، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگنمایی مورد نظر تهیه شد. به منظور شناسایی فازها، پراش سنجی پرتو ایکس با استفاده از دستگاه پرتو ایکس مدل MPD-X Pert ساخت شرکت فیلیپس مجهز به گونیومتر^۵ مدل C۵۰ با زاویه کاری ۵ تا ۱۴۰ درجه با هدف^۶ مسی و فیلتر نیکلی با طول موج ۱/۵۴۲ آنگستروم، ولتاژ ۴۰ کیلوولت، جریان ۳۰ میلی‌آمپر، اندازه گام ۰/۰۵ درجه، زمان هر گام ۲ ثانیه یا میانگین ۲۰ دقیقه جاروب هر نمونه در محدوده دامنه (۲θ) ۳۰ تا ۹۰ درجه روی نمونه‌های پوشش‌دهی شده انجام شد. فازشناسی الگوهای پراش سنجی پرتو ایکس توسط نرم افزار Pert HighScore انجام شد.

نتایج و بحث

در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپی الکترونی پودر اولیه ایجاد شده در بزرگنمایی‌های مختلف نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پودر ایجاد شده دارای ریخت کروی و یکنواخت است. در شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش در سه بزرگنمایی مختلف به تصویر کشیده شده است. در این تصویر هم تخلخل‌های موجود در پوشش به خوبی مشاهده می‌شوند. بزرگ‌ترین قطر تقریبی این تخلخل‌ها در حدود ۲۰ میکرومتر است ولی حتی با وجود این حفرات هم پیوستگی پوشش به خوبی حفظ شده و عدم یکنواختی چشمگیری در ساختار پوشش مشاهده نمی‌شود. در این تصاویر نیز حالت لایه‌لایه‌ای پوشش به خوبی قابل مشاهده است.

به منظور تعیین نحوه توزیع عناصر موجود در پوشش و زیرلایه نقشه توزیع عناصر به همراه تصویر میکروسکوپی پوشش تهیه شده و در شکل ۳ قابل مشاهده است. در شکل ۳-الف تصویری از سطح مقطع و زیرلایه پوشش آورده شده و سپس در شکل ۳-ب نقشه توزیع عناصر از همان شکل آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده

^۱ . sand blast

^۲ . air plasma spray

^۳ . hot cathode

^۴ . secondary electron (SE)

^۵ . goniometer

^۶ . target

می شود غلظت عنصر آهن در زمینه بیشتر از سایر عناصر است و به رنگ خاکستری تیره مشاهده می شود. در پوشش نیز عناصر نیکل و کروم بیشترین غلظت در بین سایر عناصر را دارا هستند. در ساختار پوشش توزیع عناصر به صورت یکنواخت است و قسمتی را نمی توان یافت که تجمع شدید یک عنصر وجود داشته باشد و قسمتی دیگر فقیر از آن عنصر مشخص باشد. توزیع یکنواخت عناصر در پوشش سبب یکنواختی خواص پوشش از جمله خواص سایشی و مکانیکی در تمامی نقاط پوشش می شود.

در شکل ۴ نمودارهای بدست آمده از آزمون پراش سنجی پرتو ایکس پودر قبل از پاشش و بعد از پاشش بررسی شده است. در شکل ۴-الف طیف بدست آمده از پودر قبل از انجام فرایند پاشش پلاسمایی است. پیک‌ها در این الگو بسیار واضح و تیز هستند. تنها اجزائی که در این الگو مشاهده می شوند سه جز Ni ، Cr_2O_3 و MoS_2 هستند، پیک جزء آلومینیم به علت درصد وزنی پایین مشاهده نشده است. در شکل ۴-ب طیف پوشش ایجاد شده به تصویر کشیده شده است. در این الگو پیک‌های اجزاء Ni ، Cr_2O_3 ، CrMoO_4 و Ni_3S_2 تشخیص داده شده‌اند.

با توجه به تحقیقات اخیر [۱۴] ثابت شده که استفاده از روانکارهای همچون MoS_2 ، WS_2 ، CaF_2 و مواردی از این قبیل در پوشش‌ها و اعمال آن‌ها به روش پاشش پلاسمایی اگر امری غیر ممکن نباشد، کاری بسیار سخت است، چرا که در دمای بالای فرایند پاشش پلاسمایی به سادگی تجزیه خواهند شد (واکنش‌های تجزیه شدن این جزء در روابط ۱ و ۲ قابل مشاهده هستند) [۱۵]. بنابراین جهت پاشش، این روانکارهای جامد بایستی همراه با اجزاء فلزی یا سرامیکی دیگر ترکیب شوند و پس از آسیاب کاری مکانیکی توسط روش خشک کردن پاششی پودر مورد نظر تهیه گردد. نتایج پراش پرتوی ایکس نشان می دهد که بخش عمده‌ای از جزء MoS_2 تجزیه شده است و سبب ایجاد دو ترکیب CrMoO_4 و Ni_3S_2 شده است.



(در دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد)



(در دمای بیشتر از ۷۹۵ درجه سانتی گراد)

موضوع قابل توجه در خصوص الگوهای نشان داده شده در شکل ۴ این است که پیک‌هایی عنصر نیکل موجود در هر دو الگو، دارای زوایای یکسانی نیستند و پیک‌ها پس از فرایند پاشش اندکی به سمت چپ انتقال پیدا کرده‌اند. به عنوان مثال پیک‌های Ni از زاویه $44/43$ به $44/33$ ، از $51/76$ به $51/70$ و از $76/28$ به $76/22$ انتقال یافته است.

همان گونه که در روابط ۱ و ۲ مشخص است در دماهای بالا مقادیری از جزء مولیبدن در ساختار پوشش آزاد می شود. با توجه به نمودار تعادلی نیکل - مولیبدن که در شکل ۵ قابل مشاهده است، در دماهای بالا عنصر

مولیدن می‌تواند به مقدار محدود در عنصر نیکل حل شود و تشکیل محلول جامد دهد. در منابع ذکر شده [۱۶] که افزودن عناصری همچون Mo، Al، Ti و B به زمینه‌ی پوشش‌ها سبب ایجاد محلول جامد شده و باعث استحکام‌دهی زمینه خواهند شد. با توجه به انتقال پیک‌های نیکل در پراش پرتوی ایکس می‌توان ادعا کرد در حین فرایند پاشش پلاسمایی عناصر مولیدن و آلومینیوم در ساختار نیکل حل شده و محلول جامد ایجاد کرده اند. حضور زمینه‌ی Ni-Mo-Al سبب مقاومت به خزش و همچنین پایداری بیشتر پوشش می‌شود [۱۷].

نتیجه‌گیری

(۱) پودر ایجاد شده از ماده مرکب $\text{NiAl-Cr}_2\text{O}_3\text{-MoS}_2$ به روش‌های آسیاب کاری مکانیکی تر، خشک کردن پاششی و سپس پاشش پلاسمایی، یکنواختی مناسبی از لحاظ ترکیب شیمیایی و ظاهر دارد.

(۲) نحوه‌ی ترکیب اجزاء و ایجاد پودر مرکب در حین فرایندهای آسیاب کاری و خشک کردن پاششی بسیار با اهمیت است، چرا که جزء MoS_2 به دلیل دارا بودن دمای تجزیه پایین‌تر نسبت به سایر اجزاء در حین فرایند پاشش پلاسمایی احتمال دارد تجزیه شود.

(۳) نتایج حاصل از الگوهای پراش پرتوی ایکس نشان می‌دهد که درصد بالایی از جزء MoS_2 در حین فرایند پاشش پلاسمایی تجزیه شده و تشکیل ترکیباتی همچون CrMoO_4 و Ni_3S_2 (که خود نقش روانکارهای دمای بالا را ایفا می‌کنند) شده است.

(۴) انتقال پیک‌های عنصر نیکل در پراش پرتوی ایکس و همچنین با توجه به دیاگرام تعادلی نیکل مولیدن می‌توان نتیجه گرفت، مولیدن آزاد شده در حین تجزیه شدن جزء MoS_2 به همراه آلومینیوم در ساختار نیکل حل شده و ترکیب بین‌نشینی Ni-Mo-Al را ایجاد می‌کند که سبب مقاومت به خزش و همچنین پایداری بیشتر پوشش می‌شود.

تشکر و قدردانی

از پرسنل آزمایشگاه‌های پودر و تریبولوژی دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان و همچنین آقای مهندس مظاهر رضانی و سایر دوستان که در انجام این پژوهش اینجانب را یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌کنم.

مراجع

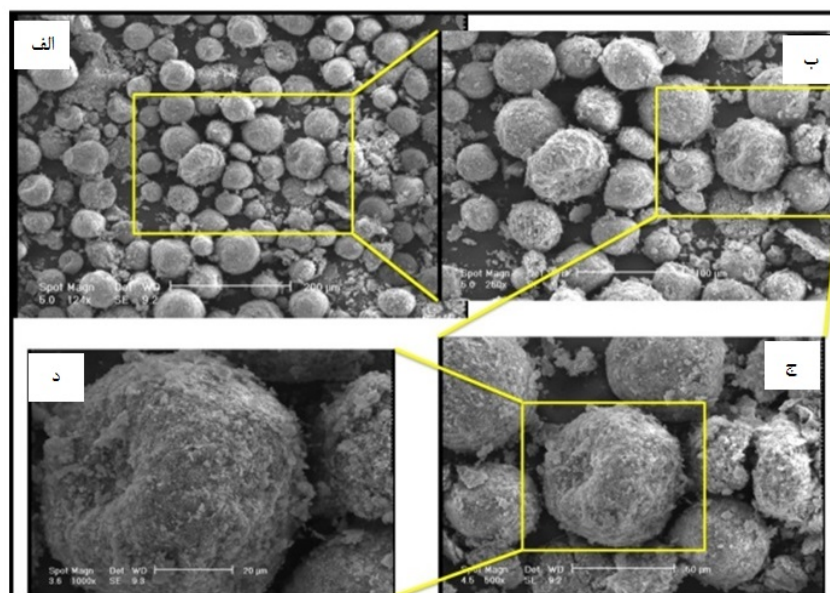
[۱] A. Erdemir, "Solid lubricants and self-lubricating films", Modern tribology handbook, CRC Press LLC, ۲۰۰۱.

- [۲] E. Sliney, "Wide temperature spectrum self-lubricating coatings prepared by plasma spraying", *Thin solid films*, ۶۴, ۱۹۷۹, ۲۱۱-۲۱۷.
- [۳] F. J. García de Blas, A. Román, C. De Miguel, F. Longo and R. Muelas, A. Agüero, "Vacuum tribological behaviour of self lubricant quasicrystalline composite coatings", *National Institute of Aerospace Technology (INTA)*, ۲۰۰۴.
- [۴] S. Gupta and M.W. Barsoumb, "On the tribology of the MAX phases and their composites during dry sliding: A review", *wear*, ۲۷۱, ۲۰۱۱, ۱۸۷۸- ۱۸۹۴.
- [۵] C. DellaCorte, "Tribological evaluation of PS۳۰۰: a new Chrome oxide based solid lubricant coating sliding against AI۲۰۳ from ۲۵ to ۶۵۰ °C, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY", *Conservation and Renewable Energy Office of Vehicle and Engine R&D*, ۱۹۹۶.
- [۶] B. Miracle and R. Darolia, "NiAl and its Alloys, structural applications of intermetallic compounds", *Structural Applications of Intermetallic Compounds*, ۲۰۰۰, ۵۵-۷۴.
- [۷] S. Zhu, Q. Wu, J. Yang and W. Liu, "NiAl Matrix high-temperature self-lubricating composite", *Tribol Lett*, ۴۱, ۲۰۱۱, ۵۳۵-۵۴۰.
- [۸] J.R. Davis, "Surface Engineering of Carbon and Alloy Steels", ASM metal handbook, Surface Engineering , Vol ۵, ۱۸۷۸-۱۸۹۸, ۲۰۰۱.
- [۹] B.S. Mann and B. Prakash, "High temperature friction and wear characteristics of various coating materials for steam valve spindle application", *Wear*, ۲۴۰, ۲۰۰۰, ۲۲۳-۲۳۰.
- [۱۰] X. Pang, K. Gao, F. Luo, Y. Emirov, A. Levin and .A. Volinsky, "Investigation of microstructure and mechanical properties of multi-layer Cr/Cr₂O₃ coatings", *Thin Solid Films*, ۵۱۷, ۲۰۰۹, ۱۹۲۲-۱۹۲۷.
- [۱۱] R.B. Heimann, "Plasma spray coating principles and applications, Second Edition", Wiley-Vch-Verlag, Survey of Surface Coating Techniques:, ۲۰۰۸, ۱-۱۶.
- [۱۲] H. Cheng, "Introduction to lubrication", ASM metal handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, Vol. ۱۸, ۱۲۳-۳۱۹, ۲۰۰۱.
- [۱۳] ی حاج کریم خرازی، "تریبولوژی علم سایش و فرسایش"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۵.
- [۱۴] P. Fauchais, G. Montavon, and G. Bertrand, "From powders to thermally sprayed coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, ۱۹, ۲۰۰۹, ۵۶-۸۰.

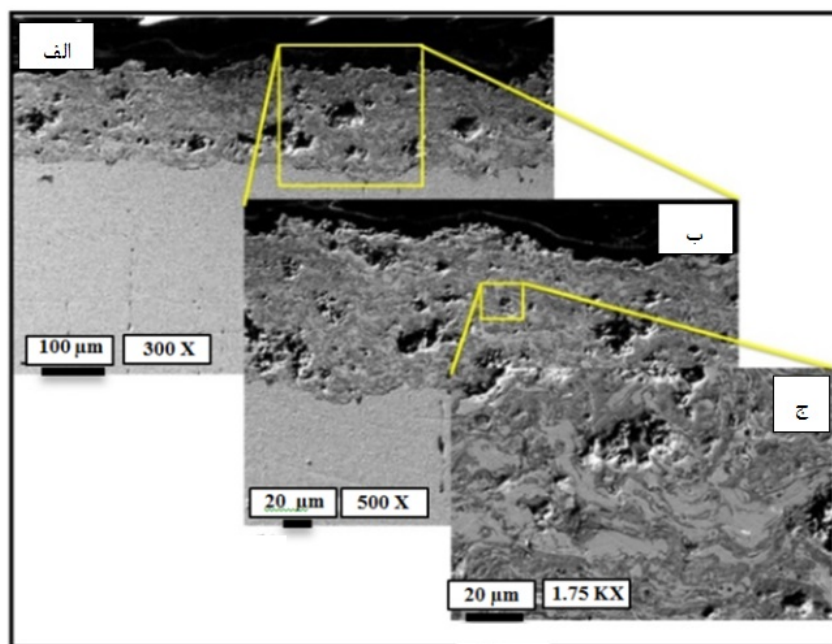
[۱۵] A. Shankara, P. Meneses, K. Simha, and S.V. Kailas, "Study of solid lubricant with MoS₂ coating in the presence of additives using reciprocating ball-on-flat scratch tester". *Sadhana*, ۳۳ (۳), ۲۰۰۸, ۲۰۷-۲۲۰.

[۱۶] C. Huang, L. Du, and W. Zhang, "Effects of solid lubricant content on the microstructure and properties of NiCr/Cr_γC_γ-BaF_γ. CaF_γ composite coatings", *Journal of Alloys and Compounds*, ۴۷۹, ۲۰۰۹, ۷۷۷.

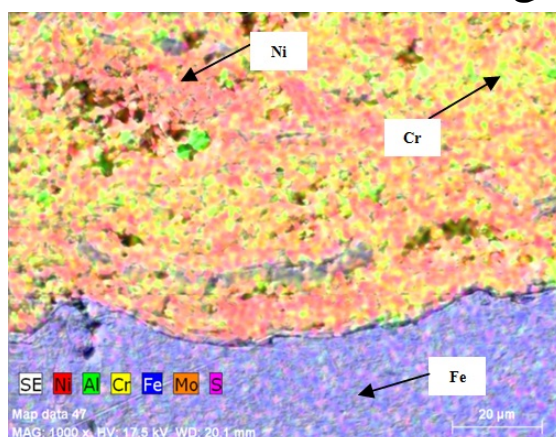
[۱۷] Q. Bi, S. Zhu, and W. Liu, "High temperature self-lubricant materials", *tribology in Engineering*, ۷, ۲۰۱۳, ۱۰۹-۱۳۴.



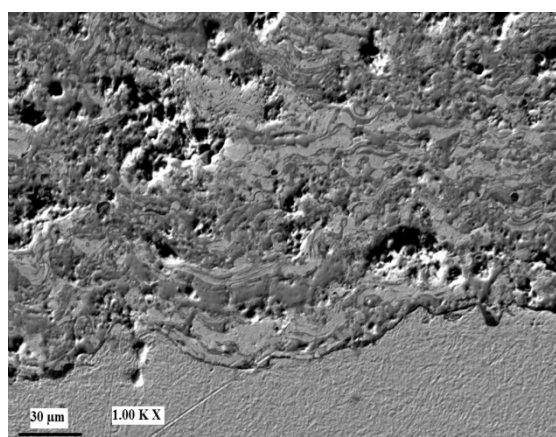
شکل ۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پودر آسیاب کاری مکانیکی شده به روش تر. الف) بزرگنمایی ۱۲۴ برابر، ب) ۲۵۰ برابر، ج) ۵۰۰ برابر و د) ۱۰۰۰ برابر.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپی روبشی از سطح مقطع پوشش. الف) بزرگنمایی ۳۰۰ برابر، ب) ۵۰۰ برابر و ج) ۱۷۵۰ برابر.

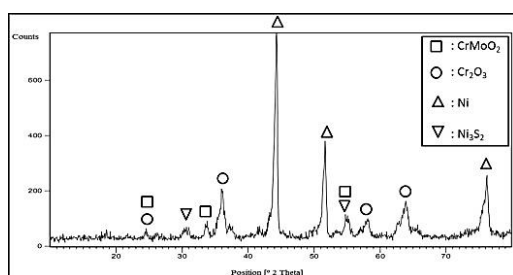


(ب)

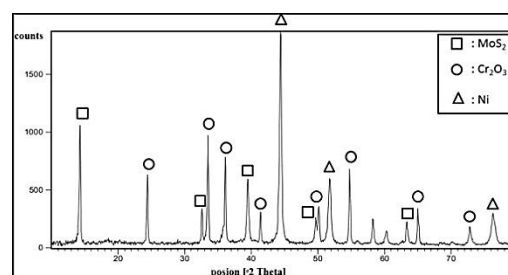


(الف)

شکل ۳- نحوه توزیع عناصر در سطح مقطع پوشش و زیر لایه، الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، ب) نقشه توزیع عناصر در همان مقطع تصویر الف.

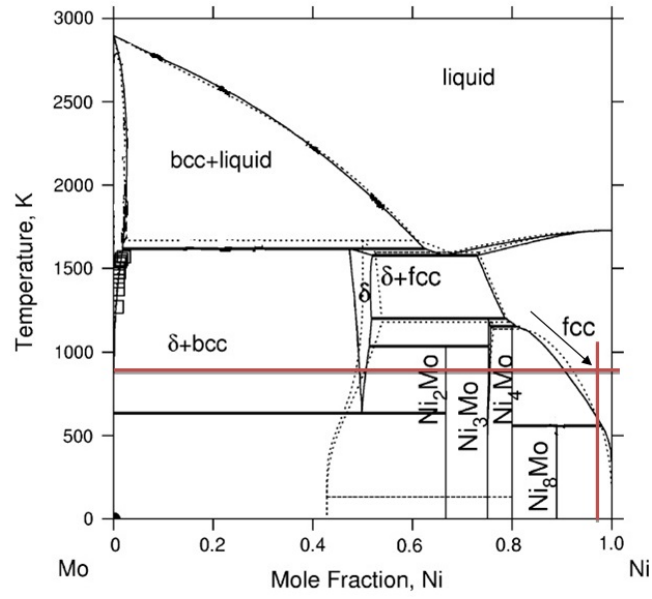


(ب)



(الف)

شکل ۴- الگوی پراش پرتوی ایکس، (a) پودر قبل از پاشش، (b) پوشش اعمال شده.



شکل ۵- نمودار تعادلی نیکل- مولیبدن [۲۰].

