

## Research Paper

# Effect of MoS<sub>2</sub> Addition on High Temperature Wear Behavior of NiCrBSi Coating Produced by Thermal Spraying

Mohammad Razazi Boroujeni<sup>1\*</sup>, Hind Khalaf Shayea Al Fadhli<sup>2</sup>, Farhad Azimifar<sup>3</sup>

1. Assistant prof. of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Lenjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan ,Iran

2. MSc student of Materials Engineering, Department of Materials Engineering and Metallurgy, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3. Assistant prof., Department of Biomedical Engineering, Islamic Azad University, Isfahan branch, Isfahan, Iran.

Received: 2023/12/06

Revised: 2024/02/19

Accepted: 2024/03/09

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2024.32822.2020](https://doi.org/10.30495/jnm.2024.32822.2020)

### Keywords:

Thermal spray, molybdenum sulfide, wear, wear mechanism, 304 stainless steel.

### Abstract

**Introduction:** The thermal spraying method with the aim of increasing the working life of steel parts is one of the most important solutions in surface engineering to solve the problem of wear.

**Methods** In this research, NiCrBSi and NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> coatings were applied on 304 stainless steel by thermal spraying, and then the wear behavior was evaluated at ambient temperature and 500 degrees. Phase investigations were done by X-ray diffraction test. The chemical composition of the coatings was checked with the help of energy dispersive spectrometer analysis. Porosity was investigated with the help of optical microscope and scanning electron microscope images. The hardness of the samples was measured using a microhardness test. In order to check the adhesion and tribological behavior of the coatings, VDI3198 and ASTM-G99 pin-on-disk tests were used, respectively, and finally, the wear mechanism was evaluated using SEM images and EDS analysis of the wear surfaces of the samples.

**Findings:** Phase analysis (XRD) and chemical composition (EDS) showed that the coating has an amorphous and crystalline phase and the most important phases of the coating are nickel-gamma, carbide and boride. Porosity measurement results with the help of image analysis software showed higher porosity of NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> coating. The results of hardness measurement from the cross-section of the samples indicated an increase in the hardness of the substrate in the presence of coatings, and the addition of MoS<sub>2</sub> particles decreased the hardness of the NiCrBSi coating. The coating with MoS<sub>2</sub> has better adhesive behavior due to its crystalline structure and better plastic deformation ability. The tribological results indicated the superiority of the NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> coating due to the appropriate ability of plastic deformation as well as the intrinsic lubrication property (based on the crystal structure) in this test. It was found that at ambient temperature, the samples mainly had lamellar wear mechanism, and at high temperature, oxidation wear as a secondary mechanism helped to destroy the surface.

**Conclusion:** The addition of MoS<sub>2</sub> to NiCrBSi coating caused more porosity, more roughness, less hardness and better wear behavior of the coating. The addition of MoS<sub>2</sub> to the coating improved the wear resistance of the coating at high temperature.

**Citation:** Mohammad Razazi Boroujeni, Hind Khalaf Shayea Al Fadhli, Farhad Azimifar, Effect of MoS<sub>2</sub> Addition on High Temperature Wear Behavior of NiCrBSi Coating Produced by Thermal Spraying. Quarterly Journal of New Materials. 2023; 14 (52): 61-72.

\*Corresponding author: Mohammad Razazi Boroujeni

**Address:** Department of Materials Engineering, Lenjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan ,Iran

**Tell:** +989137216011

**Email:** [mohamad.razazi@yahoo.com](mailto:mohamad.razazi@yahoo.com)

## Extended Abstract

### Introduction

NiCrBSi coatings produced by thermal spraying are always one of the choices of engineering parts in various industries due to their good corrosion resistance and excellent tribological behavior. But efforts are always made to increase the wear behavior of these coatings by optimizing coating parameters, chemical composition and adding composite particles. The last case, i.e. adding reinforcement particles with greater hardness or better wear and corrosion resistance or lower friction coefficient (use of lubricant particles) has been able to improve the surface performance of these coatings. On the other hand, among solid lubricants, molybdenum sulfide has always been prominent as a very suitable lubricant due to its crystalline structure. The purpose of this research is that for the first time this lubricant is added to the initial powder of nickel base alloy with NiCrBSi composition and then it is applied on the stainless steel substrate using the thermal spraying process of this composite layer. Then, the characterization and evaluation of the high temperature tribological behavior of the coatings will be discussed, which researchers have not yet addressed this issue.

### Findings and Discussion

In this research, NiCrBSi and NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> coatings were applied on 304 stainless steel by thermal spraying, and then the wear behavior was evaluated at ambient temperature and 500 degrees. Phase investigations were done by X-ray diffraction test. The chemical composition of the coatings was checked with the help of energy dispersive spectrometer analysis. Porosity was investigated with the help of optical microscope and scanning electron microscope images. The hardness of the samples was measured using a microhardness test. In order to check the adhesion and tribological behavior of the coatings, VDI3198 and ASTM-G99 pin-on-disk tests were used, respectively, and finally, the wear mechanism

was evaluated using SEM images and EDS analysis of the wear surfaces of the samples. Phase analysis (XRD) and chemical composition (EDS) showed that the coating has an amorphous and crystalline phase and the most important phases of the coating are nickel-gamma, carbide and boride. Porosity measurement results with the help of image analysis software showed higher porosity of NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> coating. The results of hardness measurement from the cross-section of the samples indicated an increase in the hardness of the substrate in the presence of coatings, and the addition of MoS<sub>2</sub> particles decreased the hardness of the NiCrBSi coating. The coating with MoS<sub>2</sub> has better adhesive behavior due to its crystalline structure and better plastic deformation ability. The tribological results indicated the superiority of the NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> coating due to the appropriate ability of plastic deformation as well as the intrinsic lubrication property (based on the crystal structure) in this test. It was found that at ambient temperature, the samples mainly had lamellar wear mechanism, and at high temperature, oxidation wear as a secondary mechanism helped to destroy the surface.

### Conclusion

The addition of MoS<sub>2</sub> to NiCrBSi coating caused more porosity, more roughness, less hardness and better wear behavior of the coating. The addition of MoS<sub>2</sub> to the coating improved the wear resistance of the coating at high temperature.

### Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

### Funding

No funding.

### Authors' contributions

Design experiments and perform

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## تأثیر افزودن سولفید مولیبدن بر رفتار سایش دما بالای پوشش NiCrBSi تولید شده به روش پاشش حرارتی

محمد رزازی بروجنی<sup>\*۱</sup>، هند خلف شایع الفضلی<sup>۲</sup>، فرهاد عظیمی فر<sup>۳</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

## چکیده

**مقدمه:** روش پاشش حرارتی با هدف افزایش عمر کاری قطعات فولادی از مهم‌ترین راه‌حل‌هایی است که در مهندسی سطح برای حل مشکل سایش مطرح می‌باشد.

**روش:** در این پژوهش پوشش NiCrBSi و NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> به روش پاشش حرارتی بر روی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ اعمال شد و سپس رفتار سایشی در دمای محیط و دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌های فازی توسط آزمون پراش پرتو ایکس انجام شد. ترکیب شیمیایی پوشش‌ها به کمک آزمون آنالیز طیف سنجی انرژی بررسی شد. بررسی تخلخل به کمک تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی انجام شد. سختی سنجی نمونه‌ها با استفاده از آزمون میکروسختی سنجی انجام شد. به منظور بررسی چسبندگی و رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها به ترتیب از آزمون‌های VDI3198 و پین بر دیسک ASTM-G99 استفاده شد. و در نهایت ارزیابی مکانیزم سایشی با استفاده از تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطوح سایش نمونه‌ها صورت گرفت.

**یافته‌ها:** بررسی‌های فازی (به کمک آزمون XRD) و ترکیب شیمیایی (به کمک آزمون EDS) نشان داد که پوشش دارای فاز آمورف و کریستالی می‌باشد و مهم‌ترین فازهای تشکیل‌دهنده پوشش نیکل-گاما، کاربید و بوراید می‌باشد. نتایج تخلخل سنجی به کمک نرم افزار آنالیز تصویر بیانگر تخلخل بیشتر پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> بود. نتایج سختی سنجی از مقطع نمونه‌ها حاکی از افزایش سختی زیرلایه در حضور پوشش‌ها بود و افزودن ذرات MoS<sub>2</sub> باعث کاهش سختی پوشش NiCrBSi شد. پوشش دارای MoS<sub>2</sub> با توجه به ساختار کریستالی و قابلیت تغییر شکل پلاستیک بهتر، رفتار چسبندگی بهتری دارد. نتایج تریبولوژیکی حاکی از برتر بودن پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> با توجه به قابلیت مناسب تغییر شکل پلاستیک و همچنین خاصیت روانکاری ذاتی (بر اساس ساختار کریستالی) در این آزمون بود. مشخص شد که در دمای محیط نمونه‌ها عمدتاً دارای مکانیزم سایش ورقه‌ای بودند و در دمای بالا سایش اکسیداسیونی به عنوان مکانیزم ثانویه به تخریب سطح کمک می‌کرد.

**نتیجه‌گیری:** افزودن MoS<sub>2</sub> به پوشش NiCrBSi موجب تخلخل بیشتر، زبری بیشتر، سختی کمتر و رفتار چسبندگی و سایشی برتر پوشش گردید. همچنین افزودن MoS<sub>2</sub> به پوشش موجب بهبود مقاومت سایشی پوشش در دمای بالا گردید.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

10.30495/jnm.2024.32822.2020

## واژه‌های کلیدی:

پاشش حرارتی، سولفید مولیبدن، سایش، مکانیزم سایش، فولاد زنگ نزن ۳۰۴.

\* نویسنده مسئول: محمد رزازی بروجنی

نشانی: دانشکده مهندسی مواد، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

تلفن: ۰۹۱۳۲۲۱۶۰۱۱

پست الکترونیکی: mohamad.razazi@yahoo.com

## مقدمه

روانکاری با تغییر میزان درگیری سطوح درگیر می‌تواند هزینه تعمیر یا تعویض قطعات تحت سایش را بطور قابل توجهی کاهش دهد. در بین روانکارها، استفاده از روانکار جامد به دلیل پایداری بالاتر در برابر دما و فشارهای بالا، واکنش پذیری کم، عدم نیاز به تجهیزات مخصوص روانکاری مایع و پایداری ترمودینامیکی مناسب در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه بوده‌اند. این مواد جامد با دو مدل روانکاری یعنی تغییر فرم پلاستیک و تشکیل فیلم‌های انتقالی یا لایه تریبولوژیکی در حین سایش از تحلیل رفتن سطح و یا به طور دقیق کاهش جرم سطح درگیر جلوگیری می‌کنند. پوشش‌های NiCrBSi تولید شده به روش پاشش حرارتی با توجه به مقاومت خوردگی خوب و رفتار تریبولوژیکی عالی همیشه یکی از انتخاب‌های قطعات مهندسی در صنایع مختلف می‌باشند. اما همیشه برای افزایش هر چه بیشتر رفتار سایشی این پوشش‌ها از طریق بهینه‌سازی پارامترهای پوشش‌دهی، ترکیب شیمیایی و افزودن ذرات کامپوزیتی تلاش‌هایی صورت می‌گیرد. مورد آخر یعنی افزودن ذرات تقویت کننده با سختی بیشتر یا مقاومت سایشی و خوردگی بهتر یا ضریب اصطکاک کمتر (استفاده از ذرات روانکار) توانسته است عملکرد سطحی این پوشش‌ها را بهبود بخشد. از طرفی در بین روانکارهای جامد، سولفید مولیبدن به عنوان یک روانکار بسیار مناسب با توجه به شده است رفتار سایشی سولفید مولیبدن به عنوان یک روانکار جامد تحت تأثیر عوامل مختلف فیزیکی و شیمیایی قرار دارد. میزان رطوبت موجود در لایه می‌تواند بر سایش سولفید مولیبدن اثرگذار باشد [۱].

اولین گزارش مربوط به اثر رطوبت بر رفتار اصطکاکی و سایشی سولفید مولیبدن توسط پترسون و همکاران ارائه گردید. نتایج این گروه نشان داد که رطوبت بیشتر از کیفیت رفتار اصطکاکی سولفید مولیبدن کاسته است [۱].

جانسون و همکاران در آزمایشاتی اثر لغزش و همچنین بار اعمالی را بر ضریب اصطکاک سولفید مولیبدن ایجاد شده بر روی زیرلایه‌های مختلف بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که ضریب اصطکاک با افزایش سرعت لغزش و افزایش بار اعمالی کاهش می‌یابد. البته این کاهش در صورت وجود رطوبت ایجاد می‌شود و در حالتی که میزان رطوبت صفر باشد نوع زیرلایه، سرعت و بار اعمالی تأثیری بر ضریب اصطکاک ندارند [۲].

سالمون و همکاران در پژوهشی نشان دادند که عمر سایشی سولفید مولیبدن در زیرلایه‌ای با زبری  $0.3$  الی  $0.4$  میکرومتر حدود  $13$  ساعت و برای زیرلایه‌هایی با زبری  $0.01$  تا  $0.04$  میکرومتر کمتر از چند دقیقه است. آن‌ها علت این پدیده را این گونه بیان کردند که زبری‌های موجود در سطح همانند محلی برای ذخیره روانکار عمل کرده و مانع از خارج شدن روانکار می‌شود [۳].

در سال ۲۰۲۲ در مطالعه ای ذرات سولفید مولیبدن به پوشش سد حرارتی آلومینا-زیرکونیا پایدار شده با ایتریا (AZ) افزوده شد. نتایج نشان داد که حضور ذرات روانکار در پودرهای ابتدایی مصرفی ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد. از طرفی این خاصیت باعث می‌گردد که

کاهش وزن و نرخ سایش کمتری در پوشش AZM نسبت به پوشش AZ مشاهده گردد [۴].

هی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به نحوه اثرگذاری مقادیر مختلف سولفید مولیبدن بر روی خواص نهایی پوشش کامپوزیتی نیکل-فسفر-سولفید مولیبدن پرداختند. حضور ذرات سولفید مولیبدن باعث افزایش سختی پوشش الکتروسل معمولی شده است، از طرفی حضور ذرات سولفید مولیبدن کاهش قابل توجهی در ضریب اصطکاک داشته است [۵].

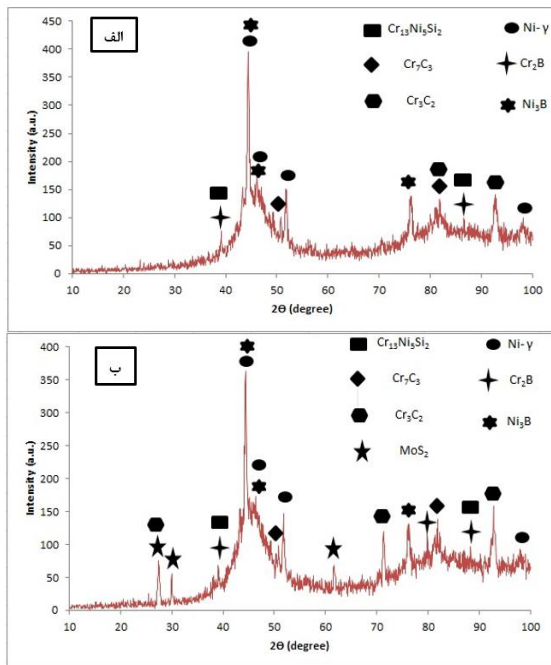
در نتیجه این تحقیقات مشاهده می‌شود تاکنون محققان زیادی رفتار سایشی و روانکاری سولفید مولیبدن را بررسی کرده اند اما تاکنون به رفتار سایش دما بالای این ماده روانکار پرداخته نشده است. لذا هدف از پژوهش حاضر این است که برای اولین بار ماده روانکار سولفید مولیبدن به پودر اولیه آلیاژ پایه نیکل با ترکیب NiCrBSi اضافه گردیده و سپس با استفاده از فرایند پاشش حرارتی روی زیرلایه فولاد زنگ نزن این لایه کامپوزیتی اعمال شود. و در ادامه به مشخصه‌یابی و ارزیابی رفتار تریبولوژیکی دما بالای پوشش‌ها پرداخته شود.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش فولاد زنگ نزن  $304$  با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱ (این نتایج به وسیله آنالیز کوانتومتر انجام شد) به عنوان زیرلایه انتخاب شد. نمونه‌های دیسکی شکل به قطر  $5$  سانتی‌متر و ضخامت  $2$  سانتی‌متر تهیه شد. سپس به کمک فرایند ماسه پاشی سطح آن‌ها زبر گردید. قبل از پوشش‌دهی نیز در محلول استون در محیط آلتراسونیک به مدت  $5$  دقیقه در دمای محیط قرار گرفتند تا کیفی و چربی‌های ایجاد شده در مراحل قبل از بین برود. در نهایت پس از شستشو با آب مقطر و خشک کردن آماده پوشش‌دهی شدند.

پودر NiCrBSi با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۲ و با اندازه ذره  $20$  الی  $50$  میکرون و پودر سولفید مولیبدن با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۳ و با اندازه ذره زیر  $25$  میکرون تهیه شدند. قبل از اعمال پوشش مخلوطی از NiCrBSi-15%MoS<sub>2</sub> (نسبت برحسب درصد وزنی است) تهیه شد به نحوی که قبل از پوشش‌دهی فاز جدیدی بین مخلوط ایجاد نگردد. مخلوط سازی پودرها به کمک مخلوط کن بدون گلوله به مدت  $90$  دقیقه انجام شد. سپس فرایند پاشش بوسیله دستگاه جی پی ساخت کشور بلژیک مطابق شرایط و پارامترهای موجود در جدول ۴ انجام شد. برای نگهداری زیرلایه از فیکسچر مخصوص استفاده شد تا در حین پوشش‌دهی نمونه‌ها حرکتی نداشته باشند و کیفیت پوشش تحت تأثیر قرار نگیرد. برای ارزیابی فازهای موجود در پوشش از دستگاه پراش اشعه ایکس و به منظور آنالیز میکروساختار و تخلخل از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی و نرم افزار آنالیز تصویر Image J استفاده شد. زبری و میکروسختی پوشش‌ها به ترتیب با زبری سنج میتی توپو و میکروسختی سنج کوپا انجام شد. رفتار چسبندگی پوشش‌ها توسط آزمون VDI3198 بررسی شد. رفتار تریبولوژیکی مواد شامل اصطکاک و سایش می‌باشد که برای بررسی این مشخصات سطحی از آزمون سایش پین بر دیسک مطابق استاندارد ASTM-G99 انجام شد. این آزمون در دمای محیط و در دمای  $500$  درجه سانتی‌گراد انجام شد. بقیه شرایط از جمله سرعت پین  $0.2$  متر بر

که با توجه به سرعت بالای حرکت ذرات در فرایند پاشش، ذرات ذوب شده فرصت کافی برای انحلال کریستالی شدن ندارند و با نرخ بالایی منجمد می‌گردد [۶]. علاوه بر نرخ سرمایش، گرادیان حرارتی با توجه به دمای بالای فرایند و زیرلایه نیز عامل دیگری در این موضوع می‌تواند باشد. پیک اصلی موجود در هر دو پوشش مربوط به فاز نیکل-گاما می‌باشد که به عنوان زمینه در پوشش NiCrBSi شناخته می‌شود. به طور کلی مقدار عناصر موجود در ترکیب شیمیایی اهمیت بالایی در فازهای نهایی خواهد داشت [۷]. پودر مورد استفاده دارای مقادیر زیادی نیکل می‌باشد که به همین دلیل در پوشش حاصل فاز نیکل بطور جداگانه تشکیل شده است. این فاز که دارای ساختار کریستالی FCC است از اهمیت زیادی روی رفتار سایشی برخوردار است. فازهای دیگر همچون کاربیدها، بورایدها و سیلیکات‌ها با توجه به بقیه عناصر و سینتیک واکنش‌ها شکل گرفته‌اند.



شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به پوشش NiCrBSi (الف) و NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> (ب)

تفاوت اصلی پوشش دارای سولفید مولیبدن حضور این ترکیب به صورت ساختار کریستالی MoS<sub>2</sub> در پوشش مربوطه می‌باشد. تغییر فازها مشابه پوشش NiCrBSi است و تنها تا حدودی مقدار هر فاز تغییر یافته است. بنابراین ترکیب دیگری با این ماده روانکار در حین پاشش روی پوشش ایجاد نشده است و به نظر می‌رسد بتوان این ذرات را به صورت ذوب نشده یا نیمه ذوب شده تا حد زیادی در ساختار مورفولوژیکی مشاهده نمود.

### بررسی مورفولوژی، تخلخل و زبری

تصاویر تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ نوری از سطح مقطع پوشش‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. ضخامت پوشش‌های NiCrBSi و NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> به ترتیب ۱۷۵ و ۱۸۶ میکرومتر بود که به کمک

ثانیه، محیط خشک بدون روانکار و مسافت سایش ۱۰۰۰ متر برای هر دو آزمون یکسان در نظر گرفته شد تا بتوان مقایسه صحیحی انجام داد. نحوه تخریب و مکانیزم‌های سایشی زیرلایه و پوشش‌ها در هر دو دمای آزمون نیز به کمک تصاویر SEM و آنالیز EDS از سطوح سایشی مورد تحلیل قرار گرفت.

### جدول ۱- ترکیب شیمیایی زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۰۴

عنصر	درصد وزنی
Fe	بقیه
Cr	۱۹/۱۲
Ni	۸/۹۹
Mn	۱/۹۶
Si	۰/۷۵
N	۰/۱۰
P	۰/۰۴
C	۰/۰۶

### جدول ۲- ترکیب شیمیایی پودر NiCrBSi مورد استفاده.

عنصر	Ni	Cr	B	Si	Fe	C
درصد وزنی	بقیه	۱۷/۳۰	۴/۰۲	۴/۶۶	۵/۱۱	۰/۴۹

### جدول ۳- ترکیب شیمیایی پودر MoS2 مورد استفاده

عنصر	Mo	S	Ni	Fe	Cu
درصد وزنی	بقیه	۳۸/۸۵	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۸

### جدول ۴- شرایط پوشش‌دهی به روش پاشش حرارتی

پارامتر	مقدار
نرخ تغذیه پودر (گرم بر دقیقه)	۵۰
نرخ تغذیه اکسیژن (لیتر بر دقیقه)	۰/۶
نسبت اکسیژن به سوخت	۴
فاصله پاشش (سانتی‌متر)	۲۵
نرخ تغذیه سوخت (لیتر بر دقیقه)	۰/۵
فشار محفظه (بار)	۵

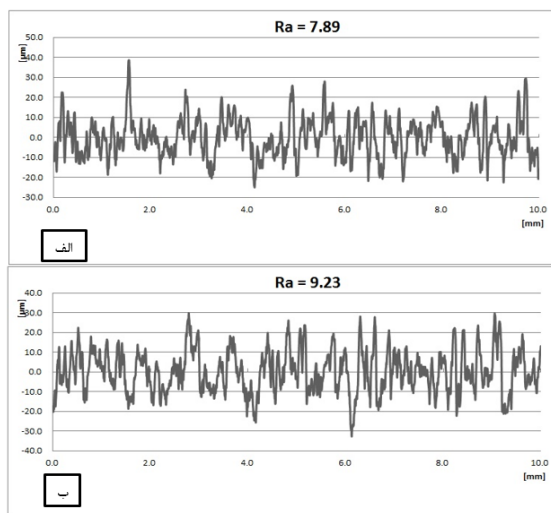
## نتایج

### بررسی فازی

الگوی پراش اشعه ایکس پوشش‌های NiCrBSi و NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> در شکل ۱ نشان داده شده است. الگوی پراش هر دو پوشش در زوایای ۲θ بین ۳۵ الی ۵۰ درجه دارای پهن شدگی قابل توجهی در پیک مربوط می‌باشد. این پدیده نشان‌دهنده غیر کریستالی یا آمورف بودن پوشش یا حداقل قسمتی از پوشش‌ها می‌باشد. در واقع مشخص می‌شود

خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف است که ذوب ذرات، حرکت به سمت زیرلایه و نشست آن‌ها را پیچیده‌تر می‌کند. هر عاملی که در ذوب ذرات اختلال ایجاد کند، زبری پوشش را بیشتر می‌کند لذا پوشش در حضور سولفید مولیبدن زبری بالاتری داشته است [۱۰].

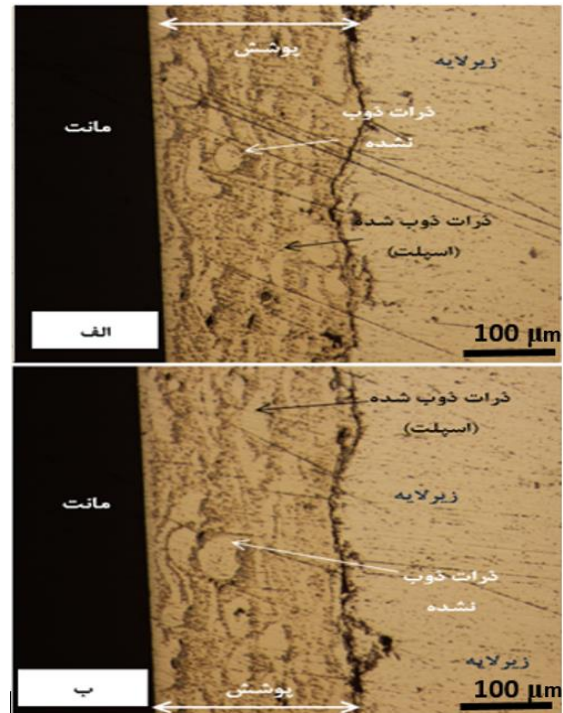
همین دلایل باعث شده است تا تخلخل پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> (۵/۱ درصد) بیشتر از پوشش NiCrBSi (۳/۴ درصد) باشد. این مقادیر با نرم افزار آنالیز تصویر بدست آمده است. دلیل ایجاد تخلخل در پوشش‌های پاشش حرارتی نیز همانطور که قبلاً ذکر شد روی هم قرار گرفتن ذرات ذوب شده، نیمه ذوب شده و ذوب نشده با سایزهای مختلف با حالات خمیری یا نیمه خمیری است که اجازه پر شدن کامل منافذ پوشش را نمی‌دهد و به عبارتی رشد لایه لایه (ذره ذره) پودرهای عبور کرده از تفنگ منجر به متخلخل شدن پوشش می‌گردد [۱۰].



شکل ۳- پروفیل زبری سنجی از سطح پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> (الف) و NiCrBSi (ب)

تصویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی بالا برای پوشش حاوی سولفید مولیبدن در شکل ۴ ارائه شده است. تخلخل‌ها که با پیکان‌های سفید رنگ نشان داده شده اند هم از نوع پیوسته و هم نامنظم هستند که به دلیل استفاده از دو نوع پودر مختلف قابل پیش‌بینی بود. به نظر می‌رسد که ذرات سولفید مولیبدن نیز در میان اسپلت‌ها قرار گرفته است که با پیکان زرد رنگ به آن اشاره شده است. با دقت در تصویر کاربیدها یا نیتريد‌ها نیز قابل شناسایی هستند که در قسمت‌های مختلف با پیکان‌های سیاه رنگ علامت گذاری شده‌اند. برای اثبات وجود عناصر تشکیل‌دهنده این فازها آنالیز EDS از ناحیه نقطه چین قرمز رنگ شکل ۴ تهیه شد که در شکل ۵ نتایج این آزمون دیده می‌شود. عنصر نیکل با بیشترین مقدار مشاهده می‌شود که به عنوان زمینه وجود دارد و بقیه عناصر نیز در تطابق نسبی با ترکیب پودر مصرفی می‌باشند. حضور کروم، بور، سیلیسیم و کربن نیز موید فازهایی است که در بالا ذکر گردید. سولفور و مولیبدن هم نشان دهنده رسوب ذرات سولفید مولیبدن در ترکیب است. البته برای قطعیت یافتن از حضور این ذرات نیاز است که در بزرگنمایی‌های بالاتر نیز آنالیز EDS تهیه شود.

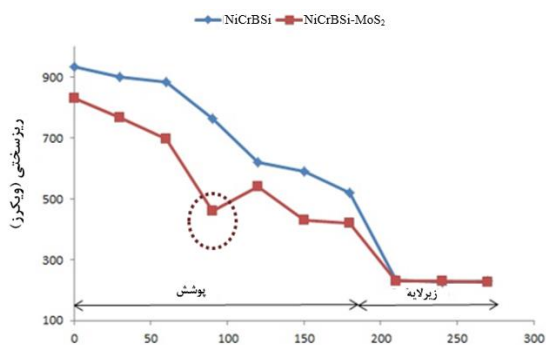
نرم افزار آنالیز تصویر و تصاویر سطح مقطع اندازه‌گیری شد. این میزان تفاوت در مورد پوشش‌های پاشش حرارتی قابل چشم پوشی است و نشان می‌دهد حضور ذرات سولفید مولیبدن تقریباً تأثیری روی ضخامت نداشته است. این موضوع یعنی عدم وابستگی ضخامت پوشش دهی به ذرات تقویت کننده در مطالعات دیگری نیز به آن اشاره شده است [۸] و [۹]. لازم بذکر است که این تصاویر پس از عملیات سنباده‌زنی با سنباده شماره ۵۰۰۰ تهیه شده و مقدار بسیار ناچیزی از سطح صاف شده است. اجزای مهم پوشش یعنی ذرات ذوب شده و ذوب نشده روی هر دو تصویر شکل ۲ علامت گذاری شده است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع پوشش NiCrBSi (الف) و NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> (ب)

شایان ذکر است که تمامی ذرات در حین فرایند کاملاً ذوب نخواهند شد و در اصطلاح اسپلت‌ها تنها اجزای تشکیل دهنده لایه‌های پوشش نیستند. تعدادی از ذرات بدون ذوب شدن (در اثر گیر کردن در قسمت‌هایی از تفنگ با فضای خالی ناهمگون بین پودر) و در اثر برخورد با ذرات دیگر یا تحت سرعت بالای اتمسفر حامل ذرات به سمت زیرلایه حرکت می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود تا این ذرات در حرکت تا حد بسیار زیادی شکل اولیه خود را در هنگام تشکیل لایه‌های پوشش حفظ کنند. به بیان دیگر این ذرات ذوب نشده یا نیمه ذوب شده به حالت لهیده روی سطح قرار می‌گیرند. اگر این ذرات زیاد باشند توانایی زبر کردن پوشش را دارند.

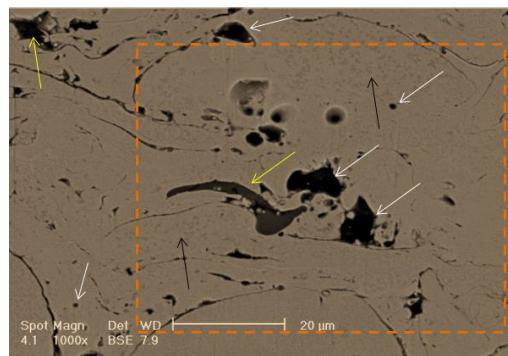
نمودار زبری سطح هر دو پوشش در شکل ۳ آورده شده است. این پوشش‌ها دارای فرورفتگی و برآمدگی‌های قابل توجهی هستند که به دلیل اثرات سایه‌اندازی و عدم ذوب کامل برخی از پودرهای مصرفی می‌باشد. پوشش دارای مولیبدن زبری بیشتری داشته است که به دلیل افزایش احتمالی سایز و شکل پودرها و استفاده از دو پودر مختلف با



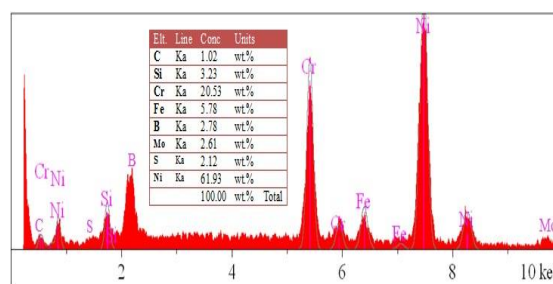
شکل ۶- نتایج سختی سنجی از مقطع پوشش و زیرلایه

### بررسی چسبندگی

چسبندگی از پارامترهای مهم هر پوشش برای دستیابی به مقاومت به سایشی بالاتر می‌باشد و بطور کلی از مشخصه‌های مهم پوشش‌های صنعتی با هدف ارتقای عملکرد و عمر کاری می‌باشد. برای ارزیابی این ویژگی از آزمون VDI 3198 استفاده شد. این آزمون اصولاً یک بررسی کیفی است و بر مبنای مقایسه سطح اثر و مقابله پوشش در برابر نیروی اعمالی می‌باشد [۱۰]. مطابق استاندارد مذکور پوشش‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند (شکل ۷). دسته اول پوشش‌هایی که از چسبندگی قابل قبولی برخوردارند (HF1 الی HF4) و دسته دوم پوشش‌هایی که چسبندگی مناسبی ندارند و در اصطلاح از نظر چسبندگی رد می‌شوند (HF5 و HF6). سطوح اثر نمونه‌ها در شکل ۸ ارائه شده است. هر دو پوشش در دسته اول یعنی پوشش‌های قابل قبول قرار می‌گیرند. با مقایسه تصاویر مشخص می‌گردد که پوشش NiCrBSi در دسته HF4 و پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> در دسته سوم قرار می‌گیرند. در واقع در شکل ۸-الف شعاع ترک‌ها بسیار بیشتر است در صورتی که در شکل ۸-ب شعاع ترک‌های ایجاد شده بسیار کمتر و محدودتر است، بنابراین پوشش دارای سولفید مولیبدن چسبندگی به مراتب بهتری داشته است. در پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> از آنجا که ذرات MoS<sub>2</sub> در سطح و مناطق مختلف پوشش قرار گرفته‌اند و با توجه به ساختار کریستالی این ماده، تحمل تغییر شکل پلاستیکی بیشتری در برابر اعمال نیرو در حین آزمون داشته است. به بیان دیگر پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> توانایی جذب تنش‌های بیشتری تا رسیدن به حد بحرانی برای ایجاد ترک دارد و این موضوع منجر به بهبود کلی چسبندگی این پوشش گردیده است. نکته مهم در چسبندگی پوشش‌ها این است که پیوستگی لایه‌ها می‌تواند عامل اثرگذاری باشد. هر دو پوشش همانطور که در تصاویر سطح مقطع مشاهده شد، لایه‌های ایجاد شده که شامل اسپلت‌ها، ذرات ذوب نشده، نیمه ذوب، کاربیدها و نیتریدها بودند پیوستگی مناسبی با هم دارند و جدایش اثرگذاری بین لایه‌ها دیده نمی‌شود. همچنین در پوشش‌های پاشش حرارتی مشخص شده است اثر تخلخل مناسب می‌تواند با کمک به تحمل کرنش باعث افزایش چسبندگی شود که به نظر می‌رسد در این پژوهش نیز این موضوع اثر گذار باشد.



شکل ۴- تصویر SEM از سطح مقطع پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub>



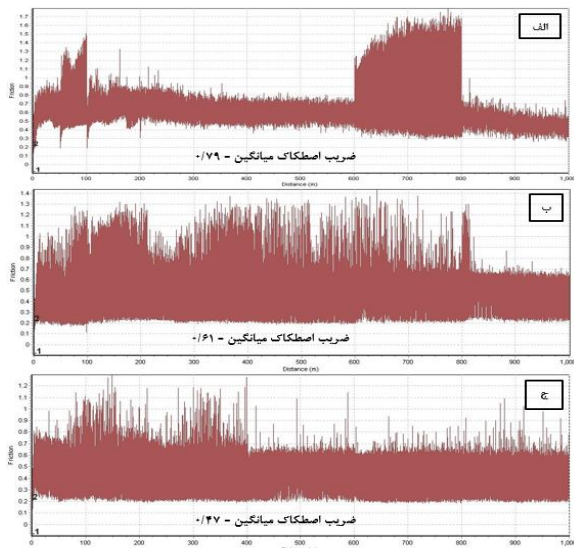
شکل ۵- نتایج آنالیز EDS از قسمت نقطه چین در شکل ۴

### بررسی ریزسختی

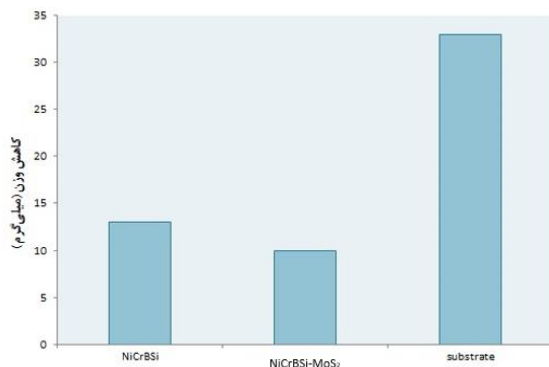
ریز سختی نمونه‌ها با آزمون میکروسختی سنجی در مقطع پوشش به سمت زیرلایه مورد بررسی قرار گرفت. از هر نمونه دو بار در مقطع آن‌ها سختی سنجی صورت گرفت و میانگین آن‌ها در شکل ۶ گزارش شد. آن چیزی که مشخص است افزایش قابل توجه سختی از زیرلایه به سمت پوشش‌ها می‌باشد که نشان می‌دهد پوشش‌ها می‌توانند برای کاربردهای سایشی مناسب باشند. حضور سولفید مولیبدن نیز با توجه به نرمی که دارد، منجر به افت حدود ۱۰۲ ویکری سختی در قسمت مربوط به پوشش مذکور شده است. نکته دیگری که با مقایسه دو پوشش مشاهده می‌شود کاهش ناگهانی و سپس افزایش در نقطه‌ای از سختی سنجی پوشش NiCrBSi می‌باشد. این اتفاق احتمالاً از آنجا نشأت می‌گیرد که ذرات سولفید مولیبدن همانطور که در تصویر SEM مشاهده شد در برخی نقاط با کمترین میزان ذوب در بین اسپلت‌ها قرار گرفته است که منجر به کاهش سختی در آن نقطه مخصوص شده است. در ادامه با گذر از آن ناحیه و رسیدن فازهای دیگر موجود در پوشش سختی مجدداً بیشتر شده است اما روند کلی تغییر نمی‌کند. دو عامل اصلی در سختی مناسب پوشش‌ها عبارتند از: (۱) پیوندهای بسیار قوی فصل مشترک پوشش/زیرلایه که به صورت مکانیکی بوده است. در هر دو پوشش با توجه به عملیات ماسه‌پاشی صورت گرفته، ذرات در میان پستی و بلندی‌های زیرلایه قرار گرفته و سپس فرایند ادامه ترسیب صورت گرفته است. دقیقاً به همین دلیل است که افت سختی به یکباره در فصل مشترک دیده نشده است و در نزدیکی فصل مشترک نیز مقادیر سختی خوب بوده است. (۲) حضور فاز نیکل-گامای فلزی و همچنین کاربیدها و بوراید‌ها که به طور ذاتی سرامیکی هستند و سختی مناسبی را در پوشش ایجاد کرده‌اند.

بین در تخلخل و درگیری بیشتر آن با پوشش ضریب اصطکاک دچار تغییراتی می‌گردد [۱۱].

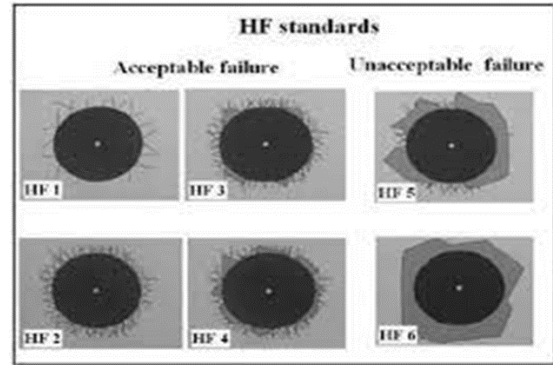
مقادیر کاهش وزن نمونه‌ها پس از آزمون سایش در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که مشخص است زیرلایه در برابر بار اعمالی مقاومت سایشی ضعیفی داشته است در حالیکه پوشش‌ها دچار کاهش وزن کمتری در حین آزمون سایش شده‌اند که مهم‌ترین عامل در کنار سختی بیشتر، ضریب اصطکاک کمتر پوشش‌ها در مقایسه با زیرلایه بدون پوشش می‌باشد. در بین دو پوشش، نمونه مولیبدن دار حدود ۳۰ درصد نسبت به حالت پوشش NiCrBSi مقاومت سایشی بهتری داشته است. این پوشش با وجود سختی کمتر، از آنجا که این پوشش مقاومت چسبندگی مناسب تری داشته است و خاصیت روانکاری بهتری را نیز از خود نشان داده است، توانسته رفتار سایشی برتری را ارائه دهد. به نظر می‌رسد توانایی مناسب ذرات سولفید مولیبدن در تغییر شکل پلاستیک نیز پارامتر دیگری برای تحمل بهتر نیروهای سایشی باشد.



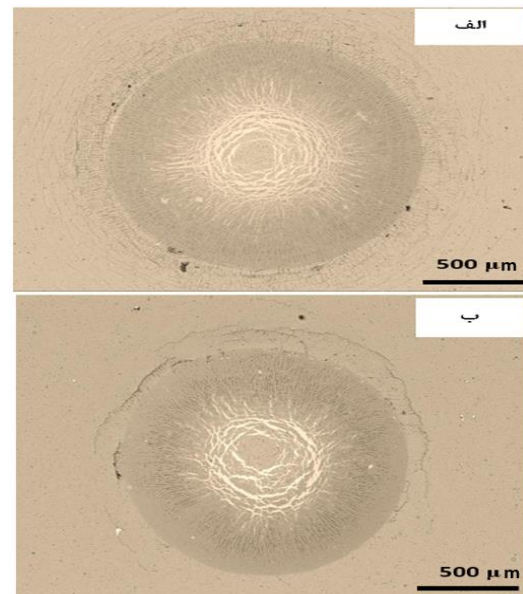
شکل ۹- تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌های الف) زیرلایه، ب) پوشش NiCrBSi و ج) NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> در آزمون سایش دمای محیط



شکل ۱۰- کاهش وزن نمونه‌ها پس از آزمون سایش دمای محیط



شکل ۷- شماتیکی از تقسیم‌بندی و مقایسه سطوح اثر آزمون [VDI3198] [۱۰]



شکل ۸- تصویر سطح اثر پس از آزمون چسبندگی مربوط به پوشش الف) NiCrBSi و ب) NiCrBSi-MoS<sub>2</sub>

### آزمون سایش در دمای محیط

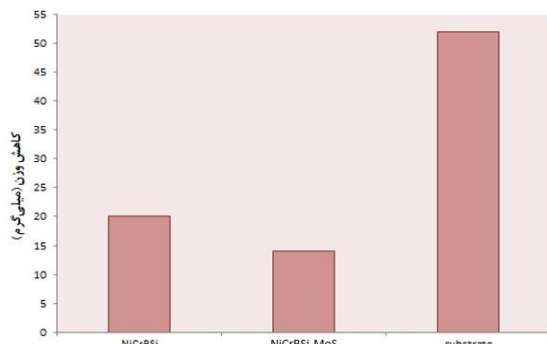
نمودار تغییرات ضرایب اصطکاک نمونه‌ها برای حالتی که آزمون سایش در دمای محیط انجام شده در شکل ۹ نشان داده است. اعمال هر دو پوشش باعث شده است تا ضریب اصطکاک کاهش یابد. زیرا فازهای موجود در سطح پوشش‌ها همچون نیکل یا سولفید مولیبدن از نظر ماهیت فیزیکی و مکانیکی خاصیت روانکاری بسیار بهتری نسبت به زیرلایه فولادی دارند.

با مقایسه ضرایب اصطکاک دو پوشش نیز می‌توان اذعان کرد که کاهش نسبی در حضور سولفید مولیبدن بوجود آمده است. در واقع این ذرات با قرار گرفتن در لایه‌های سطحی و درونی پوشش هنگام برخوردی مکانیکی برای ادامه لغزش شرایط را با ساختار کریستالی مناسبی که دارند فراهم می‌کنند و در نهایت منجر به کاهش ضریب اصطکاک می‌گردند. نکته دیگری که در مورد ضرایب اصطکاک پوشش‌ها (شکل ۹-ب و ج) دیده می‌شود. تغییرات بیشتری است که نسبت به زیرلایه دارند. دلیل اصلی این تفاوت، متخلخل بودن پوشش‌های پاشش حرارتی می‌باشد. در واقع در این دو نمونه با فرورفتن



### آزمون سایش دمابالا

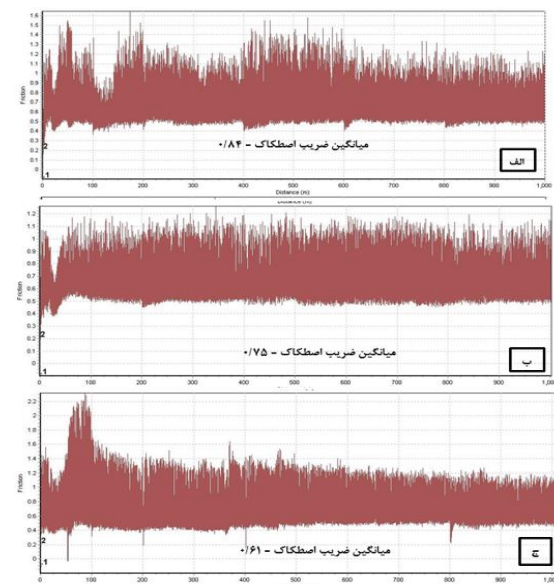
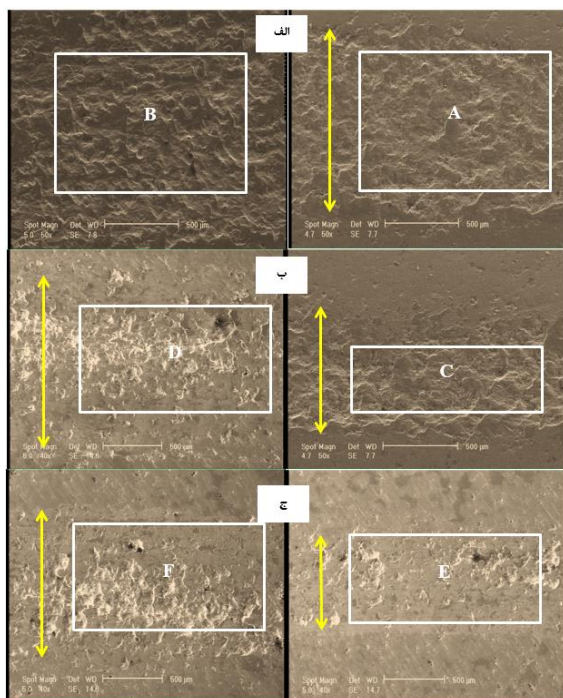
نمونه‌ها این است که برای هر نمونه، آزمون سایشی دما بالا منجر به تخریب بیشتر سطح آن شده است که در تطابق با نتایج کاهش وزن نمونه‌ها است. به عبارت دیگر عرض مسیر سایشی هر نمونه با بیشتر شدن دمای آزمون افزایش یافته است. این عرض سایشی بر روی هر شکل با پیکان‌های زرد رنگ علامتگذاری شده است. در مورد تصویر مربوط به سایش دمای بالای زیرلایه فولادی عرض مسیر سایشی بیشتر از ابعاد تصویر است که نشان می‌دهد کمترین مقاومت به سایش را این نمونه در سایش دما بالا داشته است. برای تحلیل کاملتر آنالیز EDS از سطح هر یک از سطوح سایشی تهیه شد که نتایج آن در جدول ۵ گزارش شده است.



شکل ۱۲- کاهش وزن نمونه‌ها پس از آزمون سایش دما بالا

نمودار ضریب اصطکاک نمونه‌های تحت آزمون در دمای بالا (دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. روند کاهش ضریب اصطکاک با اعمال پوشش برای زیرلایه در این دمای آزمون نیز مشاهده می‌شود اما این کاهش به اندازه سایش در دمای محیط نیست چرا که در دمای بالاتر مکانیزم‌های کاهش وزن دچار تغییر می‌گردد. به خصوص فعل و انفعالات شیمیایی، برخوردهای سنگین‌تر بین با سطح نمونه‌ها که می‌تواند باعث این تغییر شده باشد. کمترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> می‌باشد که نشان می‌دهد در دمای بالاتر سایش، این پوشش خاصیت روانکاری خود را توانسته است حفظ کند هر چند ضریب اصطکاک برای این پوشش از ۰/۴۷ (سایش در دمای محیط) به ۰/۶۱ (سایش دما بالا) افزایش یافته است. لازم بذکر است به طور کلی در هر سه نمونه ضریب اصطکاک نسبت به سایش در دمای محیط بیشتر شده است.

نمودار کاهش وزن مربوط به سایش دما بالای نمونه‌ها در شکل ۱۲ ارائه شده است. هر سه نمونه کاهش وزن بیشتری نسبت به سایش دمای محیط داشته‌اند با این تفاوت که این افزایش برای زیرلایه بسیار شدیدتر بوده است. این اتفاق نشان می‌دهد که فولاد زنگ نزن به کار رفته در این پژوهش در دماهای بالا نمی‌تواند مقاومت سایشی خوبی را ارائه دهد که عمدتاً به دلیل از بین رفتن فازهای اکسید کروی است که در طی سایش دمای بالاتر از ۲۰۰ درجه راحتتر کنده می‌شود [۱۲].



شکل ۱۱- تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌های الف) زیرلایه، ب) پوشش NiCrBSi و ج) NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> در آزمون سایش دما بالا

شکل ۱۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی سایش دمای محیط و دما بالای نمونه‌های الف) زیرلایه، ب) پوشش NiCrBSi و ج) NiCrBSi-MoS<sub>2</sub>

مکانیزم سایشی زیرلایه در دمای محیط سایش ورقه‌ای بوده و سطح در اصطلاح به صورت پوست پیازی دچار کندگی شده است. از آنجا که

### بررسی مکانیزم‌های سایشی

پس از انجام آزمون سایش، تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح سایشی نمونه‌ها تهیه شد که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. شایان ذکر است تصاویر سمت چپ مربوط به سایش دمابالا و تصاویر سمت راست مربوط به سایش در دمای محیط هستند. اولین نکته مشترک در همه

و عرض بسیار کمتر و در دمای بالاتر مکانیزم به ورقه‌ای و اکسیداسیونی تغییر می‌یابد. در پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> حضور ذرات سولفید مولیبدن باعث بهبود رفتار اصطکاکی شده و از ایجاد تخریب‌های عمیق‌تر و عریض‌تر جلوگیری کرده است. نکته مهم دیگر که در این پوشش قابل ملاحظه است با توجه به چسبندگی بالای پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> مکانیزم چسبان در هر دو دما مشاهده نمی‌گردد. به عنوان جمع‌بندی در جدول ۶ مکانیزم‌های هر نمونه در دو دمای آزمون سایش خلاصه شده است.

### جدول ۶- خلاصه‌ای از مکانیزم‌های احتمالی بر روی

#### نمونه‌های پژوهشی

نمونه	مکانیزم سایشی در دمای محیط	مکانیزم سایشی در دما بالا
زیرلایه	ورقه‌ای شدید، اکسیداسیونی کم	ورقه‌ای شدید، اکسیداسیونی زیاد
پوشش NiCrBSi	ورقه‌ای نسبی، چسبان کم	ورقه‌ای نسبی، اکسیداسیونی کم
پوشش NiCrBSi-MoS <sub>2</sub>	ورقه‌ای نسبی، اکسیداسیونی بسیار کم	ورقه‌ای کم و اکسیداسیونی نسبی

### نتیجه گیری

۱- مهم‌ترین فازهای ایجاد شده برای هر دو پوشش NiCrBSi و NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> فاز نیکل گاما می‌باشد در حالیکه کاربیدها و بورایدها از دیگر اجزای تشکیل‌دهنده پوشش‌های تولیدی بودند.

۲- پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> با تخلخل ۵/۱ درصد و زبری ۹/۲۳ نسبت به پوشش NiCrBSi با تخلخل ۳/۴ درصد و زبری ۷/۸۹ با توجه به اختلاف در مورفولوژی و سایز پودر مصرفی بیشتر، دارای تخلخل و زبری بیشتری بود.

۳- سختی زیرلایه فولادی (۲۳۰ ویکرز) با اعمال پوشش NiCrBSi حدوداً چهار برابر شد (۹۰۰ ویکرز) که به دلیل ماهیت مکانیکی مناسب پودرهای مصرفی بود. افزودن سولفید مولیبدن (پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub>) نیز با توجه به نرمی که دارد منجر به افت حدود ۱۰۲ ویکرز سختی نسبی گردید.

۴- مطابق آزمون چسبندگی هر دو پوشش دارای مقاومت چسبندگی خوبی هستند اما پوشش دارای MoS<sub>2</sub> با توجه به ساختار کریستالی و قابلیت تغییر شکل پلاستیک بهتر، رفتار چسبندگی بهتری دارد.

۵- با اعمال پوشش‌ها ضریب اصطکاک زیرلایه در هر دو آزمون سایش دمای محیط و دما بالا کاهش یافت که به دلیل سختی بالاتر و ترکیب فازی و شیمیایی مناسب پوشش‌های تولیدی بود.

در نتایج آنالیز EDS زیرلایه تحت سایش در دمای محیط مقدار کمی هم اکسیژن دیده می‌شود که نشان می‌دهد سایش اکسیداسیونی نیز اتفاق افتاده است. در این نمونه با توجه به نیروی بالایی که بر روی زیرلایه اعمال شده و همچنین سختی پایین نمونه، دمای نقاط تماس افزایش می‌یابد و مقداری اکسید روی سطح تماس زیرلایه ایجاد می‌گردد. در ادامه همین ذرات می‌توانند با کنده شدن به عنوان جسم سوم عمل کنند که البته در این نمونه کمتر شاهد این موضوع هستیم [۱۳].

انجام آزمون سایش در دمای بالا، باعث شده است تا مقدار بیشتری از سطح اکسید گردد چرا که علاوه بر عناصر مربوط به زیرلایه عنصر اکسیژن تا حدود ۱۵ درصد مشاهده می‌گردد و حاکی از سایش اکسیداسیونی نمونه می‌باشد. برای پوشش NiCrBSi مهمترین مکانیزمی که مشاهده می‌شود مکانیزم ورقه‌ای است اما با آنالیز EDS حضور عنصر آهن بیش از مقدار موجود در پوشش NiCrBSi مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد مکانیزم چسبان نیز از دیگر دلایل تخریب این نمونه بوده است.

### جدول ۵- نتایج آنالیز EDS از نواحی مشخص شده سطوح سایشی شکل ۱۳ (مقادیر بر حسب درصد وزنی است)

عنصر	ناحیه A	ناحیه B	ناحیه C	ناحیه D	ناحیه E	ناحیه F
Fe	۶۸/۳۲	۶۱/۶۸	۱۵/۹۷	۶/۰۳	۴/۷۸	۵/۸۸
Cr	۱۹/۲۱	۱۴/۷۱	۱۳/۷۶	۱۹/۵۵	۱۶/۴۵	۱۷/۸۶
Ni	۸/۶۶	۶/۰۷	۶۴/۴۴	۶۶/۹۰	۶۱/۰۸	۵۷/۰۵
Mn	۱/۷۶	۱/۲۱	-	-	-	-
Si	۰/۶۵	۰/۸۹	۳/۹۶	۱/۹۵	۴/۳۰	۳/۶۵
B	-	-	۱/۸۷	۱/۶۰	۲/۰۷	۰/۹۵
Mo	-	-	-	-	۶/۱۵	۵/۷۸
S	-	-	-	-	۴/۲۲	۳/۸۵
O	۱/۳۳	۱۵/۴۴	-	۳/۹۷	۰/۹۵	۴/۹۸

مکانیزم سایشی در دمای بالا همچنان ورقه‌ای است با این تفاوت که مقدار تخریب افزایش نسبی یافته است و کندگی‌ها عمق بیشتری نیز پیدا کرده‌اند. در این جا مکانیزم اصلی ورقه‌ای است و با توجه به حضور اکسیژن مکانیزم اکسیداسیونی نیز محتمل می‌باشد. برای پوشش NiCrBSi-MoS<sub>2</sub> در دمای محیط مکانیزم ورقه‌ای است اما با مقادیر

### حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

### مشارکت نویسندگان

انجام آزمایشها: هند خلف شایع؛  
تحلیل داده‌ها و نتایج: هند خلف شایع، محمد رزازی بروجنی  
نگارش نهایی: هند خلف شایع، فرهاد عظیمی فر، محمد رزازی بروجنی.

### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

۶- مقادیر ضریب اصطکاک نمونه‌ها با افزایش دمای آزمون سایش، مقداری افزایش یافت (به طور مثال افزایش از ۰/۴۷ به ۰/۶۱ در حضور سولفید مولیبدن) که به دلیل درگیری بیشتر سطوح، ایجاد اکسیدهای سطحی و فعل و انفعالات شیمیایی بیشتر در دمای بالاتر می‌باشد.

۷- پوشش حاوی سولفید مولیبدن هم در سایش دمای محیط و هم در سایش دمابالا، مقاومت سایشی بهتری در اثر خاصیت روانکاری مناسب این ذرات داشت (به ترتیب ۱۰ و ۱۳ میلی گرم کاهش وزن).

۸- مکانیزم سایشی اکثر نمونه‌ها ورقه‌ای بود در حالیکه با انجام سایش در دمای بالا مکانیزم اکسیداسیونی نیز بر روی نمونه‌ها مشاهده گردید.

### ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

## References

- [1] Peterson, Marshall B. Friction and Wear Investigation of Molybdenum Disulfide I: Effect of Moisture. No. NACA-TN-3055. 1953.
- [2] Johnson, Virgil R., and George W. Vaughn. "Investigation of the mechanism of MoS<sub>2</sub> lubrication in vacuum." *Journal of Applied Physics* 27.10 (1956): 1173-1179.
- [3] Kumar, Rahul, et al. "Solid lubrication at high-temperatures—a review." *Materials* 15.5 (2022): 1695.
- [4] Gou, Junfeng, et al. "A Comparison Study of the Friction and Wear Behavior of Nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ Composite Coatings With and Without Nano-MoS<sub>2</sub>." *Journal of Thermal Spray Technology* 31.3 (2022): 415-428.
- [5] He, Yang, et al. "Self-lubricating Ni-P-MoS<sub>2</sub> composite coatings." *Surface and Coatings Technology* 307 (2016): 926-934.
- [6] Habib, K. A., et al. "Effects of thermal spraying technique on the remelting

- behavior of NiCrBSi coatings." *Surface and Coatings Technology* 444 (2022): 128669..
- [7] Mukhtar, Sheikh Haris, et al. "Nano-mechanical and nano-tribological characterisation of self-lubricating MoS<sub>2</sub> nano-structured coating for space applications." *Tribology International* 178 (2023): 108017.
- [8] Somervuori, Mervi, et al. "Comparative study on the corrosion performance of APS-, HVOF-, and HVOF-sprayed NiCr and NiCrBSi coatings in NaCl solutions." *Journal of Thermal Spray Technology* 31.5 (2022): 1581-1597.
- [9] Zouari, S., et al. "Comparative study of HVOF-sprayed NiCrBSi alloy and 316L stainless steel coatings on a brass substrate." *Journal of Thermal Spray Technology* 28.6 (2019): 1284-1294.
- [10] Konuru, S. Lakshmi Kanth, V. Umasankar, and Arun Sarma. "A comparison of qualitative and quantitative adhesion analysis for a composite thin film



system." *Materials Today: Proceedings* 46 (2021): 1243-1246.

[11] Singh, Gagandeep, Manpreet Kaur, and Rohit Upadhyaya. "Wear and friction behavior of NiCrBSi coatings at elevated temperatures." *Journal of Thermal Spray Technology* 28 (2019): 1081-1102.

[12] Zandrahimi, Morteza, A. Poladi, and Jerzy A. Szpunar. "The formation of martensite during wear of AISI 304 stainless steel." *Wear* 263.1-6 (2007): 674-678.

[۱۳]. خسروی، محسن، لطفی، بهنام، عرفانمنش، محمد، رمضانی، مظاهر. اعمال و مشخصه‌یابی پوشش‌های نانوساختار اکسید کروم پاشش حرارتی شده. فصلنامه علمی - پژوهشی مواد نوین. 5(20): 165-174. 1394 ,