

# افزایش مقاومت به خوردگی کفش‌های اسکید بالگرد به روش HVOF

مصطفی لیوانی<sup>۱\*</sup>، فردین همت‌نژاد<sup>۲</sup>، محسن دهقانی محمدآبادی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

۳- استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴)

## چکیده

بالگردهای هوانیروز در اقصی نقاط ایران عزیز به پرواز در می‌آیند و انجام مأموریت در شرایط مختلف آب و هوایی، تأثیر زیادی بر روی قطعات این نوع بالگردها دارد و بعضاً دچار خوردگی می‌شوند. در این تحقیق به منظور کاهش میزان سایش و چسبندگی کفش‌های اسکید بالگرد، و همچنین افزایش مقاومت به خوردگی قطعه مذکور، از فرآیند HVOF استفاده می‌شود. فرآیند HVOF یکی از پیشرفته‌ترین سیستم‌های پاششی است که از مهم‌ترین مزایای آن می‌توان به حرارت‌دهی بسیار مؤثر و یکنواخت ذرات به دلیل تلاطم شدیدی که در محفظه احتراق رخ می‌دهد و همچنین اکسید شدن سطحی بسیار کم اشاره نمود. در این مقاله به منظور کاهش میزان سایش و چسبندگی کفش‌های اسکید بالگرد، پوشش‌دهی کاربید تنگستن بر روی آلومینیوم ۷۰۷۵ انجام شد. پوشش‌دهی به روش پاشش حرارتی صورت گرفته و به کمک پودر کاربید تنگستن علاوه بر افزایش سختی و مقاومت سطح، میزان سایش تا حد قابل توجهی کاهش یافت. ساختار متالوگرافی قطعه، پس از پوشش‌دهی WC86%-Co10%-Cr4% دارای تراکم بالا، ذرات اکسیدی نداشت و ذوب نشده بود. با ایجاد این پوشش میزان چسبندگی به ۸۹ مگاپاسکال افزایش یافت که این مقدار قابل مقایسه با پوشش‌های متعارف نمی‌باشد. همچنین نتایج حاصل از آزمون‌های سختی‌سنجی نشان می‌دهد که ریزسختی‌سنجی پوشش، سختی در حدود ۱۳۰۰ ویکرز داشته که نشان‌دهنده بالا بودن این سختی نسبت به پوشش‌های دیگر به صورت آبکاری است. با استفاده از پوشش WC86%-Co10%-Cr4%، میزان سایش هنگام فرود بالگرد در ۱۰۰۰ متر، به ۱۰<sup>-۵</sup> رسید که نشان از سختی بالا و کیفیت بالای پوشش است.

واژه‌های کلیدی: فرآیند HVOF - کاربید تنگستن - مقاومت سایش - سختی - کفش اسکید بالگرد

## Enhancing corrosion resistance of helicopter skid shoes by HVOF method

Mostafa Livani, Fardin Hemmatnejad, Mohsen Dehghani Mohammadabadi

### Abstract

Havaniroz helicopters fly in all parts of dear Iran and performing missions in different weather conditions has a great impact on the parts of these types of helicopters and sometimes they cause corrosion. In this research, to reduce the amount of wear and adhesion and enhancing corrosion resistance of helicopter skid shoes, the HVOF process is used. The HVOF process is one of the most advanced spraying systems which the most important advantages of that are the very effective and uniform heating of particles due to the intense turbulence that occurs in the combustion chamber, as well as very little surface oxidation. In this article, to reduce the wear and adhesion of helicopter brake shoes, tungsten carbide coating was done on 7075 aluminum. Coating was done by thermal spraying and with the help of tungsten carbide powder, in addition to increasing the hardness and resistance of the surface, the amount of wear was reduced to a significant extent. The metallographic structure of the part after the WC86%-Co10%-Cr4% coating had high density, no oxide particles and not melted. By creating this coating, the amount of adhesion increased to 89 MPa, which is not comparable to conventional coatings. Also, the results of the hardness tests show that the microhardness measurement of the coating had a hardness of about 1300 Vickers, which indicates that this hardness is higher than other coatings in the form of plating. By using WC86%-Co10%-Cr4% coating, the amount of wear during helicopter landing at 1000 meters reached 10<sup>-5</sup>, which shows the high hardness and high quality of the coating.

**Key words:** HVOF process - Tungsten carbide - Wear resistance - Hardness - Helicopter skid shoes

## مقدمه

آبکاری، اسپری شعله و روکش فلزی استفاده شوند، اما مواد غیرآلی توسط اسپری، انتشار، و یا تبدیل مواد شیمیایی به وجود می‌آیند. اسپری معمولاً به وسیله شلیک در درجه حرارت بالا انجام می‌شود. در ادامه پژوهش‌های انجام شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اوزاتو<sup>۷</sup> و همکاران به بررسی رفتارهای خوردگی و سایش پودر آهنی پوشش اسپری حرارتی در آلیاژ آلومینیوم پرداختند. پوشش اسپری پلاسما جوی در قالب عیار AA383 ورق آلیاژ آلومینیوم انجام شد، و این روند پوشش با ضخامت ۱۷۰ میکرومتر انجام شد و با استفاده از آزمایشی پودر FE-C با نیکل (تا ۱۴ درصد توده) و یا بدون نیکل مکمل اضافه شد [۱]. کاواکیتا<sup>۸</sup> و همکاران مطالعات خود را بر روی بررسی تخلخل پوشش HVOF<sup>۹</sup> انجام دادند. آن‌ها از طریق ارزیابی تخلخل اسپری، تجزیه و تحلیل مواد محلول مشتق پوشش داده شده فولاد در طول غوطه‌وری در محلول هیدروکلراید را مورد بررسی قرار دادند. این کار آن‌ها را قادر به شناسایی مقدار کمی از منافذ که در ضخامت پوشش و بر ساختار انباشته پوشش بود، کرد [۲]. یانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران به بررسی اثر اندازه دانه کاربرد بر ریزساختار و لغزش رفتار سایش پوشش WC88%-Co12% به روش اسپری HVOF پرداختند. خواص پوشش نشان داد که میانگین اندازه دانه کاربرد پوشش ۰/۸، ۱/۴ و ۲/۸ میکرومتر بوده و کاهش اندازه دانه کاربرد منجر به بیشتر شدن درجه تجزیه WC می‌شود. اصطکاک خشک و سایش آزمون با استفاده از آلومینای متخلخل Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به عنوان ماده جفت‌گیری انجام شد. ضریب اصطکاک پوشش تقریباً بدون در نظر گرفتن شرایط آزمون و اندازه دانه کاربرد ثابت بود. نرخ سایش با کاهش اندازه کاربرد در پوشش کاهش یافت [۳]. خامنه اصل و همکاران به بررسی پارامترهای پاشش و رفتار سایشی پوشش WC-Co حاصل از پاشش حرارتی HVOF پرداختند. تأثیر پارامترهای فرآیند به عنوان پارامترهای مستقل و دمای ذرات به عنوان پارامتر وابسته بر تجزیه فاز WC مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور از چهار عامل فاصله پاشش، نسبت اکسیژن به سوخت، نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ به عنوان ورودی استفاده شد. از سیستم اسپری واچ جهت اندازه‌گیری

بالگردهای هوانیروز در اقصی نقاط این مملکت در شرایط مختلف آب و هوایی به انجام مأموریت می‌پردازند و این شرایط آب و هوایی تأثیر زیادی بر روی قطعات این نوع بالگردها دارد و بعضاً دچار خوردگی می‌شوند، تصمیم بر آن شد گامی کوچک در جهت کمتر شدن این مشکل برداشته شود.

یکی از قطعات مهم بالگردها کفش‌ها<sup>۱</sup> هستند که با استفاده از آن بالگردها قادر به انجام مأموریت در مکان‌های مختلف می‌باشند. برای جلوگیری از صدمه دیدن کفش‌ها از کفش‌های اسکید<sup>۲</sup> استفاده می‌شود که مانع از صدمه دیدن کفش‌ها در نشست و برخاست می‌شود. شرایط آب و هوایی مختلف و نشست و برخاست‌ها موجب فرسایش و خوردگی کفش‌های اسکید می‌شود.

روش‌های مختلفی برای پیشگیری و کاهش اثر خوردگی وجود دارد. از مهمترین روش‌های موجود می‌توان به انتخاب مناسب مواد، ممانعت‌کننده‌ها، پوشش‌دهی سطوح مستعد و سیستم حفاظت کاتدی (چه از طریق استفاده از جریان القایی و چه استفاده از فلزات فداشونده) را برشمرد.

برای این منظور پوشش‌ها از اهمیت زیادی برخوردارند، چرا که خود دربرگیرنده مکانیزم‌های مختلفی برای جلوگیری از خوردگی هستند. پوشش‌های اعمالی بر فلزات با روش‌های گوناگونی حفاظت در برابر خوردگی را انجام می‌دهند. از مهمترین موارد این مکانیزم‌ها می‌توان به محافظت در برابر خوردگی از طریق ممانعت در برابر نفوذ عامل خورنده<sup>۳</sup>، حفاظت کاتدی سیستم و جلوگیری از تماس مستقیم قطعه با محیط خورنده اشاره نمود. پوشش‌ها غالباً متشکل از چندلایه هستند. لایه ابتدایی<sup>۴</sup> باید از نقطه‌نظر چسبندگی و محافظت در برابر عوامل خورنده، ویژگی‌های مناسبی داشته باشد و یک بستر مناسب برای لایه‌های میانی<sup>۵</sup> و پوشش رویه<sup>۶</sup> فراهم نماید. پوشش‌ها را می‌توان بصورت‌های مختلفی دسته‌بندی نمود. یکی از این تقسیم‌بندی‌ها، تقسیم‌بندی پوشش‌ها بر اساس فلزی، معدنی و یا آلی بودن است. پوشش‌های فلزی می‌توانند توسط

<sup>1</sup> Shoes

<sup>2</sup> Skid Shoes

<sup>3</sup> Barrier

<sup>4</sup> Primer

<sup>5</sup> Middle Coat

<sup>6</sup> Top Coat

<sup>7</sup> Uozato

<sup>8</sup> Kawakita

<sup>9</sup> High Velocity Oxygen Fuel

<sup>10</sup> Yang

به بررسی تشکیل پوشش کاربید تنگستن مختلف همراه با تفنگ اسپری حرارتی پرداختند. پودر WC88%-Co12% با ضخامت ۵۳ تا ۶۳ میکرومتر با استفاده اسپری (HVOF) و اسلحه پرتاب شعله پاشیده شد. نسبت گاز در طول زمان پاشش به نفوذ پارامترهای اسپری روی کیفیت کفپوش متفاوت بود. سطح بررسی مورفولوژی پوشش WC88%-Co12%، توسط تفنگ پاشش شعله انجام دادند و نشان دادند که افزایش نرخ جریان گاز سوخت در کاهش زبری سطح و تخلخل و همچنین بهبود پخت ذرات مؤثر است [۹]. ثالث و نوروزی به بررسی ارزیابی تنش‌های پسماند در پوشش کاربید تنگستن کبالت حاصل از فرآیند HVOF با استفاده از روش XRD<sup>۵</sup> پرداختند. آنها تنش‌های پسماند در راستای ضخامت پوشش پاشش حرارتی WC88%-Co12% حاصل از فرآیند HVOF را بررسی کردند. این تنش‌ها با استفاده از پراش پرتو X در سطح آزاد پوشش و در راستای ضخامت پوشش در عمق‌های ۵۰، ۱۵۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرومتر بررسی شدند. تنش پسماند در عمق ۵۰ میکرومتر کششی و در سطح آزاد پوشش و در عمق-های دیگر فشاری به دست آمد [۱۰]. مورگان<sup>۶</sup> و همکاران تحقیقات خود را بر روی رابطه تجربی در حال توسعه برای پیش‌بینی سختی پوشش کاربید تنگستن به وسیله اسپری HVOF با استفاده از ابزارهای آماری مانند طراحی آزمایشات، تجزیه و تحلیل، تجزیه واریانس و رگرسیون انجام دادند [۱۱]. پیکاس<sup>۷</sup> و همکاران نشان دادند که در صورت استفاده از سوخت جت و اکسیژن، سرعت ذره بسیار بالاتر، و دمای ذرات بسیار پایین‌تر از زمانی است که از سوخت هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌شود. افزایش نرخ اکسیژن تأثیرگذاری مستقیمی بر واکنش‌ها احتراق دارد، ولی در تحقیق آنها افزایش بیش از اندازه اکسیژن باعث کاهش دمای ذرات شد. در هر دو سوخت با افزایش دما و دمای ذرات، درصد تخلخل و زبری سطح پوشش کاهش یافت [۱۲]. کامنیس<sup>۸</sup> و همکاران به بررسی مدل‌سازی عددی مکانیزم ذرات اسپری HVOF پرداختند. این مدل که یک مدل المان محدود (FE<sup>۹</sup>) توسعه داده شده است که به مطالعه تأثیر ذرات جامد حرارتی اسپری بر روی

دمای ذرات استفاده کردند. از روش تاگوچی به منظور طراحی، اجرای آزمایش‌ها و بهینه‌سازی استفاده کردند. نتایج تحلیل اثر میانگین آنها نشان داد که تغییرات فازی در فرآیند پاشش HVOF با دمای ذرات رابطه مستقیم داشته و بدین ترتیب کمترین میزان تجزیه فاز WC در کمترین دمای پاشش اتفاق می‌افتد [۴]. چیاوویبول<sup>۱</sup> و همکاران مطالعات خود را بر روی اثرات اندازه کاربید و محتوای شرکت بر ریزساختار و خواص مکانیکی اسپری HVOF پوشش WC-CO انجام دادند. آنها دوازده نوع پودر WC-Co با اندازه‌های مختلف به طور متوسط WC (۰/۲، ۲ و ۶ میکرومتر) و محتویات کبالت (۸، ۱۲، ۱۷ و ۲۵ درصد وزنی) بر روی بسترهای فولاد کربن با استفاده از فرآیند پاشش HVOF پوشش دادند. سختی، مدول یانگ، و چقرمگی پوشش اندازه‌گیری شد [۵]. رامش<sup>۲</sup> و همکاران فرسایش ذرات جامد پوشش WC-Co/NiCrFeSiB به وسیله اسپری HVOF را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد اسپری HVOF منجر به باقی ماندن زیاد WC در ماتریس پوشش همراه با تخلخل کمتر گردید [۶]. مارکوکسان و همکاران، با ارزیابی خواص مکانیکی مقایسه بین روش‌های مختلف پوشش‌دهی شامل روش‌های هوا-سوخت با سرعت بالا (HVOF)، هوا-اکسیژن با سرعت بالا (HVOF)، و اسپری گاز سرد (CGS) بر روی Ti-6-4 و IN718 پرداختند. نتایج آنها نشان داد روش‌های HVOF و HVOF دارای صافی سطح به مراتب بهتر، ضخامت پوشش بیشتر، تخلخل کمتر، سختی بیشتر، قدرت چسبندگی بیشتر برای IN718 و کمتر برای Ti-6-4، نسبت به روش CGS دارند [۷]. زوراسکی<sup>۳</sup> ریزساختار و خواص تریبولوژیکی پوشش نانو اندازه HVOF با سوخت جت را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که تجزیه WC به W<sub>2</sub>C و فازهای آمورف کمتر از پوشش WC88%-Co12% متداول است. آنها همچنین ساختار متراکم‌تری را به دست آوردند [۸]. بابلیس<sup>۴</sup> و بابلیس

<sup>5</sup> X-Ray Diffraction<sup>6</sup> Murugan<sup>7</sup> Picas<sup>8</sup> Kamnis<sup>9</sup> Finite Element<sup>1</sup> Chivavibul<sup>2</sup> Ramesh<sup>3</sup> Zorawski<sup>4</sup> Babilius

بسترهای و ایجاد پارامترهای تأثیر ذرات حیاتی مورد نیاز برای اتصال مناسب می‌پردازد [۱۳]. جعفری و همکاران به مقایسه بین سینتیک اکسیداسیون پوشش WC88%-Co12% و WC86%-Co10%-Cr4% به روش HVOF پرداختند. آنها رفتار اکسیداسیون در دمای بالا از HVOF اسپری Cr4% Co10% WC و پوشش WC-Cr را مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. لی<sup>۱</sup> و همکاران، پوشش‌های Ti/TiBCN را روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با روکش لیزری ایجاد کردند. آنها تأثیر پوشش TiBCN بر ریزساختار، ریزسختی، خوردگی الکتروشیمیایی و مقاومت به سایش پوشش‌های روکش فلزی توسط SEM، XRD، تستر میکروسختی ویکرز، ایستگاه کاری الکتروشیمیایی سه الکترودی معمولی و سایش خشک رفت و برگشتی مستقیم مورد مطالعه قرار دادند [۱۵]. وانگ<sup>۲</sup> و همکاران اثر روش شوک لیزری را بر روی خواص خزشی و ارزیابی ریزساختاری سطح آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که LSP<sup>۳</sup> می‌تواند عمر خزش حالت پایدار را تا ۹۷ درصد در ۳۵۰ مگاپاسکال و دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و ۱۲۰ درصد در ۳۰۰ مگاپاسکال و دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس افزایش دهد. آنها مکانیسم بهبود خواص خزشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را توسط LSP با مشاهده TEM<sup>۴</sup> تجزیه و تحلیل کردند [۱۶]. کریمی و همکاران، تحلیل استحکام استاتیکی سوپرآلیاژ Rene-80 در دو حالت بدون پوشش و پوشش‌دار را بصورت تجربی انجام دادند. آنها پوشش‌های آلومینایدی نفوذی را با دو روش جداگانه نفوذی-پودری و نفوذی-دوغابی به ترتیب با نام تجاری Codep-B و دوغابی IP1041 بر این سوپرآلیاژ اعمال کردند و تأثیر این پوشش‌ها بر خواص کششی سوپرآلیاژ پایه نیکل Rene-80 در محدوده دمای ۲۵-۹۸۲ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در دماهای کاری پایین، نمونه‌های بدون پوشش دارای استحکام کششی بهتری نسبت به نمونه‌های پوشش‌دار است، ولی این رفتار در دماهای کاری بالا برعکس می‌شود که این رفتار اهمیت استفاده از پوشش‌دهی سوپرآلیاژ پایه نیکل را برای کاربردهای دما بالا مشخص می‌سازد. هم‌چنین مدل با پوشش نفوذی-دوغابی در

دمای کاری بالا دارای استحکام تسلیم و نهایی بهتری نسبت به پوشش نفوذی-پودری است [۱۷]. مهافل<sup>۵</sup> و همکاران، پژوهشی با هدف افزایش استحکام پوشش‌های اکسیداسیون میکروکوس ایجاد شده بر روی آلومینیوم ۷۰۷۵ در برابر تخریب تحت شرایط تماس لغزشی در دماهای بالا انجام دادند. آنها آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را در یک الکترولیت مبتنی بر آلومینات با و بدون افزودن ذرات مونوکلینیک ZrO<sub>2</sub> به صورت میکروکوس اکسید کردند. تجزیه و تحلیل‌های ریزساختاری آنها نشان داد که پوشش سنتز شده در یک الکترولیت اضافه شده با ZrO<sub>2</sub> شامل ذرات ZrO<sub>2</sub> است که لایه بیرونی مبتنی بر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و یک لایه داخلی یکپارچه مبتنی بر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> است که ویژگی‌های مشابه با پوشش سنتز شده در آلومینات بدون ZrO<sub>2</sub> را نشان می‌دهد [۱۸]. کریمی و همکاران عمر خزشی سوپرآلیاژ Rene-80 در دو حالت بدون پوشش و پوشش‌دار را بصورت تجربی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. آنها در این مقاله پوشش‌های آلومینایدی نفوذی با دو روش جداگانه نفوذی-پودری و نفوذی-دوغابی به ترتیب با نام تجاری Codep-B و IP1041 بر روی این سوپرآلیاژ اعمال شد و تأثیر این پوشش‌ها بر روی عمر خزشی این سوپرآلیاژ در دمای ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد به همراه متالوگرافی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار دارند. پارامترهای کنترلی شامل دما، تنش و عمر خزشی نمونه‌های بدون پوشش مطابق با استاندارد C50TF28 ارزیابی کردند. نمونه‌های خزشی بدون پوشش به طور میانگین پس از ۳۳ ساعت استحکام خود را از دست داده و گسیخته شده‌اند. نمونه‌های پوشش‌دار آلومینایدی ساده پودری به طور میانگین پس از ۴۵ ساعت و نمونه‌های پوشش آلومینایدی سلیسیم دوغابی به طور میانگین پس از ۵۱ ساعت استحکام خود را از دست داده‌اند. نتایج نشان داد که پوشش‌ها باعث افزایش عمر خزشی نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه‌های بدون پوشش حداقل در حدود ۱۲ ساعت می‌شود [۱۹]. مزیتسیلوئو و همکاران، رفتار ریزساختاری، مکانیکی و سایش پوشش‌های HVOF اسپری سرد آلیاژهای با آنتروپی بالا (HEAs) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد با استفاده از فرآیند اسپری سرد هیچ تغییر فازی رخ نمی‌دهد، در حالی که تشکیل اکسیدهای MnCr و Fe در پوشش‌های HVOF قابل مشاهده است که

<sup>1</sup> Li

<sup>2</sup> Wang

<sup>3</sup> Laser Shock Peening

<sup>4</sup> Transmission Electron Microscopy

<sup>5</sup> Muhaffel

(SEM<sup>۵</sup>) انجام دادند و اجزای محصولات خوردگی هر دو پوشش پس از قطبش پتانسیل ثابت با طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس (XPS<sup>۶</sup>) را شناسایی کردند. نتیجه تجربی آنها نشان داد که غیرفعال شدن هر دو پوشش بر مقاومت خوردگی آنها تأثیر می‌گذارد. افزایش غلظت سولفید با تأثیرگذاری بر یکپارچگی لایه‌های غیرفعال، مقاومت به خوردگی هر دو پوشش را کاهش داد [۲۳].

در این مقاله به منظور کاهش میزان سایش و چسبندگی کفش‌های اسکید بالگرد که از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵ ساخته شده است، و همچنین خوردگی قطعه مذکور، پوشش‌دهی کفش‌های اسکید بالگرد، با پودر کاربید تنگستن با نام تجاری GTV و فرمول شیمیایی ۴%Cr-۱۰%Co-۸۶%WC ساخت شرکت مرک آلمان با خلوص ۹۹/۹ درصد از فرآیند HVOF استفاده می‌شود. با متالوگرافی قطعه و آزمون‌های سختی‌سنجی کفش‌های اسکید بالگرد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### روش انجام پژوهش

در این بخش به تشریح مواد، ابزار و تجهیزات مورد استفاده در این مقاله پرداخته می‌شود. در بررسی هر موضوعی، لزوم مطالعه و شناخت و استفاده از ابزار و تجهیزات مرتبط با موضوع، امری ضروری به نظر می‌رسد. قبل از دسته‌بندی ابزار و تجهیزات، اصول به‌روزرسانی و کالیبراسیون آنها در اولویت قرار دارد.

### مواد پوشش‌دهنده

به منظور پوشش‌دهی کفش‌های اسکید بالگرد، از پودر کاربید تنگستن با نام تجاری GTV و فرمول شیمیایی ۴%Cr-۱۰%Co-۸۶%WC ساخت شرکت مرک آلمان با خلوص ۹۹/۹ درصد استفاده شد.

### سایر ترکیبات شیمیایی

برای آماده‌سازی و صاف کردن نمونه قبل از پوشش، پودر کاربید سیلیسیم (SiC) ساخت شرکت مرک آلمان با خلوص ۹۹ درصد مورد استفاده قرار گرفت.

این اکسیدها باعث افزایش سختی سطح و مقاومت در برابر سایش بهتر پوشش‌های HVOF شده است [۲۰]. وی<sup>۱</sup> و همکاران تأثیر آب‌بندی خلاء با رزین سیلیکون را بر مقاومت دراز مدت به خوردگی پوشش HVOF پاشیده شده WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl مورد مطالعه قرار دادند. آنها با بهره‌مندی از درزگیرها در نقص، پوشش مهر و موم شده را ارائه دادند که خوردگی کمتری پس از خوردگی طولانی مدت نسبت به پوشش بدون آب‌بندی نشان دادند. به دلیل عملیات خلاء، درزگیر به اندازه کافی نفوذ می‌کند و در داخل پوشش WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni باقی می‌ماند و از رشد حفره‌های خوردگی روی سطح پوشش مهر و موم شده جلوگیری می‌کند. مطالعه آنها نشان داد آب‌بندی خلاء با رزین سیلیکونی به طور مؤثر مانع از انتشار محلول خوردگی می‌شود و یک استراتژی عملی برای بهبود مقاومت به خوردگی پوشش‌ها ارائه می‌دهد [۲۱]. پاتنایاک<sup>۲</sup> و همکاران به توسعه پوشش‌های سخت و مقاوم در برابر سایش مبتنی بر سرامیک حاوی آلومینا آلائیده با ۰/۸ درصد سریا (CeO<sub>2</sub>) و اسکید گرافن کاهش‌یافته (rGO، ۰ - ۰/۲ درصد) روی فولاد ۱۷-۴ PH پرداختند. نرخ سایش ویژه پوشش Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CeO<sub>2</sub>-rGO در مقایسه با فولاد ۱۷-۴ PH ده برابر کاهش یافت. خواص بهبود یافته را می‌توان به ریزساختار متراکم پوشش‌ها با معرفی rGO<sup>۳</sup> و مشارکت rGO در فرآیند تریبولوژیکی نسبت داد [۲۲]. وی و همکاران تأثیر غلظت سولفید بر رفتارهای خوردگی پوشش‌های WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni و WC-Ni پاشیده شده با HVOF را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پوشش‌های WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni و WC-Ni بر روی فولادها با اسپری HVOF فرآوری کردند و رفتارهای خوردگی آنها در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl با غلظت‌های ۰، ۲۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ppm Na<sub>2</sub>S بررسی کردند. مقاومت به خوردگی هر دو پوشش در محلول‌های تجربی با آزمایش‌های الکتروشیمیایی شامل طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS<sup>۴</sup>)، پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی، پلاریزاسیون چرخه‌ای و قطبش پتانسیل ثابت اندازه‌گیری کردند. مورفولوژی پودرهای خوراک و پوشش‌های پاشیده شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی

<sup>1</sup> Wei

<sup>2</sup> Pattnayak

<sup>3</sup> Reduced Graphene Oxide

<sup>4</sup> Electrochemical Impedance Spectroscopy

<sup>5</sup> Scanning Electron Microscopes

<sup>6</sup> X-Ray Photoelectron Spectroscopy

## آماده‌سازی نمونه

در این تحقیق از آلومنیوم‌های با جنس ۷۰۷۵ به عنوان زیرلایه استفاده شد. قبل از انجام فرآیند پاشش، نمونه‌ها مورد فرآیند شن‌پاشی با استفاده از پودر کاربید سیلیسیم (SiC) قرار گرفته و سطح آن خشن‌سازی شد. سپس با استفاده از محلول شستشو تمیز شدند تا هر گونه آلودگی سطحی اعم از چربی، روغن، و مواد چسبناک پاک شود و سطح فلز آماده‌ی پاشش حرارتی شود.

## روش پوشش‌دهی

روش HVOF مخفف عبارت High Velocity Oxygen Fuel است و از نام آن به راحتی می‌توان استنباط کرد که این فرآیند اسپری حرارتی مربوط به استفاده از مواد مذاب (یا مواد نیمه‌مذاب) با سرعت بالا بر روی بسترها است. پوشش‌های HVOF می‌توانند خواص پوشش منحصربه‌فردی را برای طیف وسیعی از کاربردها در صنایع مختلف ارائه دهند و به همین دلیل است که این فرآیند اسپری حرارتی به یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای ایجاد پوشش‌های متراکم بر روی انواع سطوح تبدیل شده است.

از مزایای اسپری HVOF می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱. پوشش‌های سخت‌تر: تخریب کمتر فازهای کاربید که منجر به سختی بالاتر می‌شود.
۲. محافظت در برابر سایش بهتر: از آنجایی که پوشش‌ها سخت‌تر هستند، این امر باعث بهبود مقاومت در برابر سایش می‌شود.
۳. پوشش‌های متراکم‌تر و صاف‌تر: پوشش‌هایی که با این فرآیند به دست می‌آیند، متراکم‌تر و صاف‌تر هستند، زیرا سرعت ضربه بالاتر است.
۴. پوشش‌های ضخیم‌تر: پاشش HVOF تنش پسماند کمتری ایجاد می‌کند و این باعث ایجاد پوشش‌های ضخیم‌تر می‌شود.
۵. چسبندگی قوی: پوشش به شدت با بستر چسبیده است.
۶. مقاومت در برابر خوردگی بهتر: هنگامی که ترکیب بهینه پوشش و بستر انتخاب شود، می‌توان مقاومت خوبی در برابر خوردگی نیز با این پوشش‌ها بدست آورد. از آنجایی که پوشش‌ها متخلخل کمتری دارند، این امر باعث بهبود حفاظت در برابر خوردگی می‌شود.

به طور کلی، پوشش‌های HVOF به دلیل کیفیت بالا در مقایسه با پوشش‌های اسپری حرارتی که از طریق انواع دیگر فرآیندها به دست می‌آیند، شناخته شده‌اند. از معایب اسپری HVOF می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱. هزینه‌های بالاتر: در مقایسه با فرآیند اسپری قوس الکتریکی یا فرآیند اسپری شعله، پاشش HVOF با هزینه بالاتری همراه است، زیرا تجهیزات موردنیاز برای اجرای این روش گران‌تر هستند.

۲. برای عملیات دستی ایده آل نیست: برای فرآیند اسپری HVOF، فرآیند خودکار تفنگ اسپری نیاز است.

۳. مسئله نیروی انسانی: برای دستیابی به بهترین نتایج به پرسنل متخصص برای کار با تجهیزات اسپری HVOF نیاز است.

۴. محدودیت کاربرد: اسپری HVOF را نمی‌توان برای مهندسی سطح سطوح داخلی مانند سطوح داخلی زیرلایه‌های سیلندر مانند استفاده کرد.

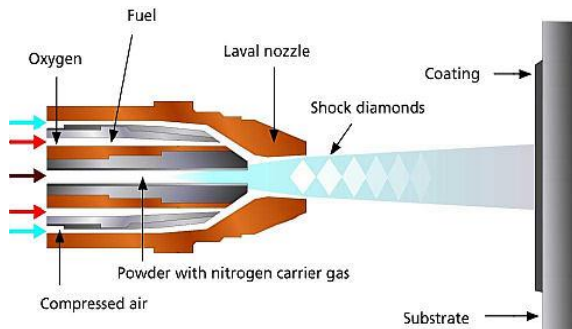
۵. محدودیت اندازه پودر: باید از توزیع اندازه‌های باریکتر استفاده کرد.

خواص عالی مقاوم در برابر سایش پوشش‌های HVOF به خوبی ثابت شده است. در طول دهه گذشته، HVOF به طور فزاینده‌ای به عنوان جایگزینی برای آبکاری کروم سخت برای چندین کاربرد، به ویژه مواردی که سایش و خوردگی شدید ترکیبی را تجربه می‌کنند، در نظر گرفته شده است [۲۴]. برخی از مزایای پوشش‌های HVOF نسبت به آبکاری کروم سخت عبارتند از:

۱. اثرات زیست محیطی کمتر بدون نگرانی‌های زیست محیطی و بهداشتی و ایمنی [۲۵].
۲. پوشش WC/Cr/Co دارای مقاومت سایشی ۴ تا ۵ برابر بیشتر از کروم سخت است [۲۶ و ۲۷].
۳. پوشش‌ها تأثیر ناچیزی بر عملکرد خستگی زیرلایه دارند، در حالی که آبکاری کروم سخت عملکرد خستگی زیرلایه را ۳۰-۵۰ درصد کاهش می‌دهد [۲۸].
۴. عمر آببندی طولانی در قطعات هیدرولیک [۲۹].
۵. نیاز به پوشش کمتری نسبت به روکش کروم سخت دارد و کیفیت رسوب‌دهی بهتری را در مجاورت سوراخ‌ها و محل‌های مهم ارائه می‌دهد [۳۰].

جدول ۱- پارامترهای مناسب برای پوشش‌دهی کفش‌های اسکید بالگرد

پارامتر	مقدار
اکسیژن ورودی به تفنگ	۰/۸ مترمکعب بر دقیقه
سوخت ورودی	$۲۳ \times ۱۰^{-۵}$ مترمکعب بر دقیقه
فاصله‌ی پاشش	۰/۳۵۵۶ متر
نوع پودر	WC86%-Co10%-Cr4%



شکل ۱- شماتیک پاشش حرارتی



شکل ۲- نمایی از پاشش HVOF

### میکروسکوپ الکترونی

جهت بررسی سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده با کاربرد تنگستن از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM) دانشگاه آزاد نجف آباد استفاده شد (شکل ۳).

۶. فولادهای استحکام بالا با روکش کروم سخت برای جلوگیری از شکنندگی هیدروژن نیاز به عملیات حرارتی دارند. این مورد با پوشش‌های HVOF لازم نیست [۲۵].

۷. پوشش طیف وسیعی از مواد با مواد پوششی متناسب با کاربرد، مانند پوشش‌های WC/Co، WC/Co/Cr، WC/Ni، Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/NiCr و آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی مبتنی بر نیکل.

۸. هزینه‌های چرخه عمر پوشش‌های کاربرد ۵۰ درصد آبکاری کروم سخت تخمین زده می‌شود [۳۰].

پوشش‌های HVOF در حال حاضر برای اجزای خاص از جمله ارباه فرود هواپیما، هاب‌های ملخ و توربین گاز در نظر گرفته شده‌اند [۲۸، ۲۹، ۳۱]. استفاده از پوشش‌های HVOF مقاوم در برابر سایش و خوردگی برای جک‌های هیدرولیک در ماشین‌آلات ساختمانی سنگین مانند تجهیزات متحرک زمین، برای جک‌های هیدرولیک زیردریایی و برای کاربردهای دریایی مانند شیرها و پمپ‌ها پیشنهاد شده است [۲۵].

با توجه به پوشش‌های سخت‌تر، محافظت در برابر سایش بهتر، چسبندگی قوی و مقاومت در برابر خوردگی بهتر پوشش‌های HVOF در مقایسه با پوشش‌های دیگر، در این پژوهش از این روش برای پوشش‌دهی کفش‌های اسکید بالگرد استفاده خواهد شد.

### دستگاه پاشش حرارتی

برای پاشش پودرهای مورد نظر بر روی نمونه‌های تهیه شده، از دستگاه HVOF شرکت نورافشان اصفهان استفاده شد. دستگاه مورد استفاده مدل MET JET 4PL ساخت شرکت متالیزیشن<sup>۱</sup> با سوخت مایع (ATK<sup>۲</sup>) می‌باشد که نسبت به دستگاه‌های دیگر HVOF دارای سرعت بالایی برای پاشش پودر بر روی زیرلایه می‌باشد و انرژی جنبشی بسیار بالا و سختی و چسبندگی مناسب‌تری را برای پوشش ایجاد می‌کند. پارامترهای مورد نیاز و مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. در شکل ۱ و شکل ۲ بترتیب شماتیک پاشش حرارتی و نمایی از پاشش HVOF نمایش داده شده است.

<sup>1</sup> Metalization

<sup>2</sup> Aviation Turbine Kerosene

می‌باشد، بنابراین اگر این پوشش تحت این شرایط کارکرد مناسبی داشته باشد، معیار مناسبی برای پوشش تحت شرایط واقعی به دست خواهد آمد. جنس ساینده (پین)، از فولاد ۵۲۱۰۰ با سختی در حدود ۶۳ راکول C استفاده شد.

### آزمون چسبندگی

جهت بررسی چسبندگی پوشش به زیرلایه، از استاندارد ASTM C633-1 استفاده شده است. آزمون چسبندگی این نمونه نیز با استفاده از دستگاه تست چسبندگی در آزمایشگاه خوردگی و پوشش پژوهشگاه رازی انجام شد.

### نتایج و بحث

در این بخش نتایج از پژوهش صورت گرفته در این مقاله ارائه می‌شود. برای این منظور در ابتدا نتایج حاصل از تحلیل میکروسکوپی ارائه می‌شود. سپس نتایج آزمون‌های سختی و در انتها آزمون‌های چسبندگی ارائه خواهند شد.

### تحلیل میکروسکوپی

جهت شناخت بیشتر نسبت به وضعیت مورفولوژی پودر کاربرد تنگستن از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که مورفولوژی پودر کاربرد تنگستن مورد استفاده در پوشش به صورت کروی بوده و توزیع مناسبی از عناصر سازنده در حجم پودر وجود دارد. یکی از دلایل بررسی مورفولوژی پودر و بررسی شماتیک پودر، اهمیت و سایز آن در فرآیند پاشش حرارتی است که اثر میزان سیالیت در آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

در ضمن هر چه میزان اندازه ذرات ریزتر و حتی در مقیاس نانو باشد، علاوه بر افزایش سرعت عملیات، چسبندگی و یکنواختی پوشش بیشتر حاصل می‌شود. این رفتار با افزایش سرعت تزریق پودر در محفظه احتراق، به مراتب آسان‌تر می‌شود و از طرفی پوشش یکنواخت‌تری در فرآیند پاشش حرارتی به دست می‌آید.

در شکل ۴-ب توزیع کبالت مشاهده می‌شود که میزان کبالت در نواحی سطحی ذرات پودر کمی بیشتر از مرکز پودر است. این نکته باعث می‌شود که کاربرد تنگستن کمتر در معرض حرارت قرار بگیرد و از طرفی باعث پایدار بودن خواص پودر می‌گردد.



شکل ۳- نمایی از دستگاه CS3200

تمام تصاویر در بزرگنمایی‌های مختلف گرفته شد. دستگاه مورد استفاده مدل CS3200 ساخت شرکت کم‌اسکن<sup>۱</sup> کشور انگلستان می‌باشد.

### دستگاه تخلخل‌سنج

برای به دست آوردن تخلخل سطح موقع پوشش داده شده با کاربرد تنگستن از دستگاه SEM با قابلیت آنالیز BSE<sup>۲</sup> استفاده شد.

### آزمایش‌های متالوگرافی

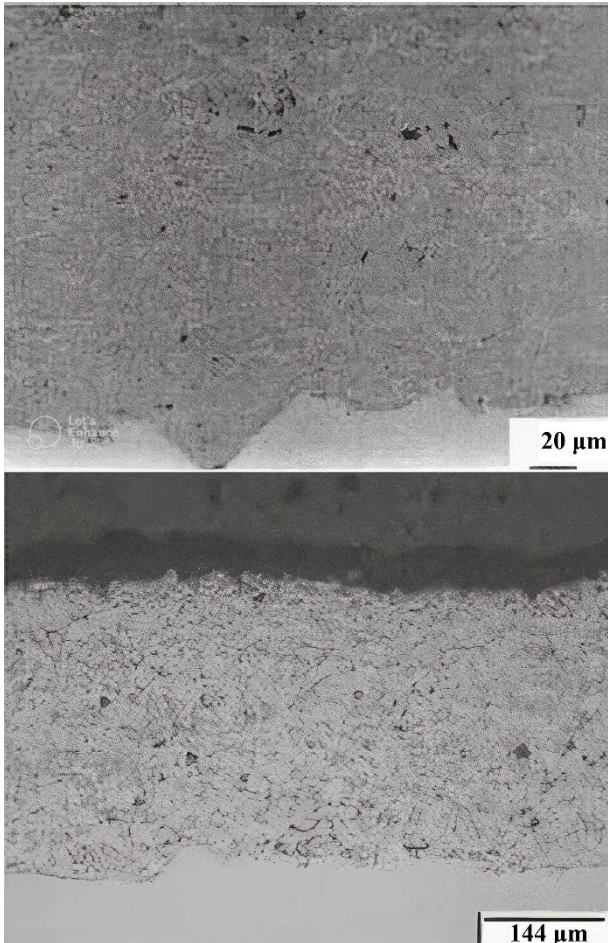
برای به دست آوردن میزان تخلخل پوشش، باندهای مکانیکی بین پوشش و زیرلایه، ضخامت پوشش و توزیع ذرات کاربرد صورت گرفت. همچنین از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی SEM استفاده شد. تمام تصاویر در بزرگنمایی‌های مختلف گرفته شد. تمام فرآیندهای متالوگرافی، شامل آماده‌سازی و SEM انجام شد.

### آزمون سایش

برای بررسی تأثیر پوشش‌دهی بر رفتار تریبولوژیکی کفش‌ها، آزمون سایش بر روی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM G99 انجام شد. برای به دست آوردن سختی نمونه‌های پوشش داده شده، از دستگاه سختی‌سنج پژوهشگاه رازی استفاده گردید. نکات مهم در مورد آزمون سایش، میزان نیروی اعمالی، سرعت تست، دمای انجام تست و نوع تست می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت حرکت و نیروی اعمالی بیش از حد تریبوسیستم در نظر گرفته شده است و سایش از نوع خراشان

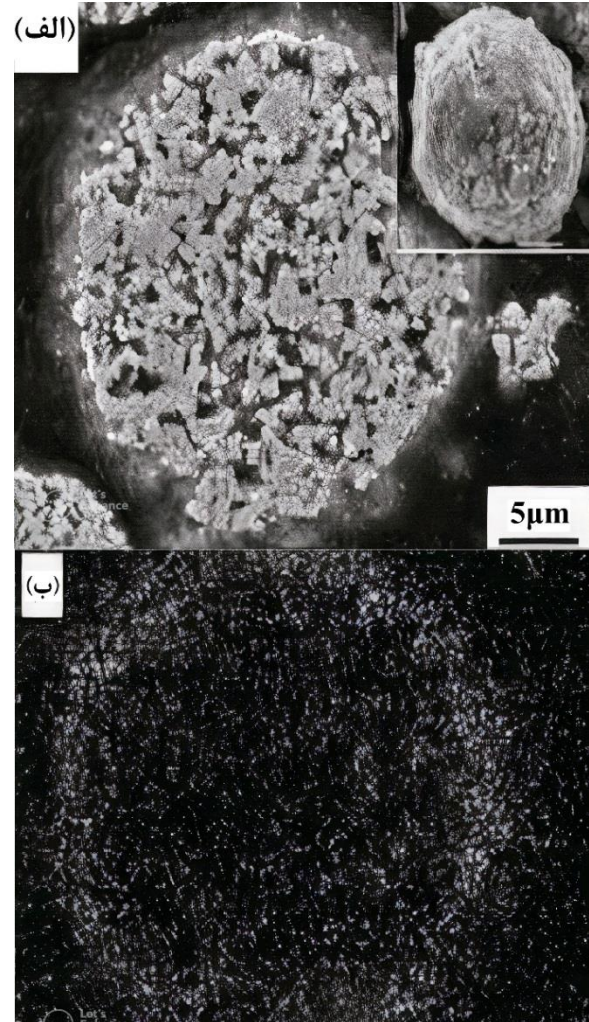
<sup>1</sup> Camscan

<sup>2</sup> Back-Scattered Electron Detector



شکل ۵- سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده با پودر کاربرد تنگستن

شکل ۶ نشان‌دهنده تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مقطع پوشش می‌باشد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که پوشش صورت گرفته دارای یکنواختی مناسب و اتصال مکانیکی یکنواختی با سطح زیرلایه دارد. در شکل ۶ چسبندگی مناسب با زیرلایه مشاهده می‌شود. در شکل ۶ از یک نقطه پوشش با استفاده از قابلیت میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) که به BSE و SE معروف است، استفاده شده است. هدف از این بررسی، مشاهده احتمال وجود هرگونه تخلخل می‌باشد. تصاویر به دست آمده حاکی از آن است که پوشش مورد نظر عاری از هرگونه تخلخل می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده با کیفیت بودن پوشش باشد.



شکل ۴- نتایج تحلیل میکروسکوپی، الف) تصویر SEM پودر WC86%-Co10%-Cr4% و ب) تصویر توزیع کبالت در ذرات پودر WC86%-Co10%-Cr4%

نکته مهم در بحث سندبلاست<sup>۱</sup>، اتصال قابل قبول و مطمئن بین پوشش و زیرلایه می‌باشد که این عملکرد در شکل ۵ نشان داده شده است. در این تصاویر سطح مقطع نمونه‌های پوشش‌دار با پوشش پودر WC86%-Co10%-Cr4% را نشان می‌دهد. این تصاویر به صورت متالوگرافی انجام شده است. این اتصال مکانیکی ایجاد شده با استفاده از سندبلاست باعث افزایش چسبندگی بین لایه‌های پوشش با زیرلایه می‌گردد. از مزیت‌های این پودر می‌توان به تخلخل کمتر از ۱ درصد، عدم حضور ذرات اکسیدی و ذوب شده آن اشاره کرد.

<sup>1</sup> Sandblast

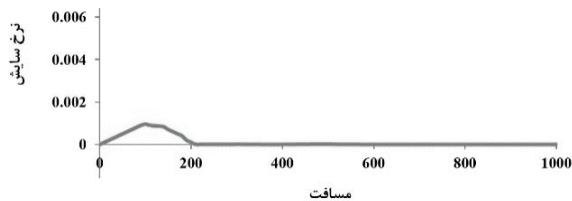
### نتایج آزمون‌های چسبندگی

با بررسی میزان چسبندگی از آزمون چسبندگی پوشش WC86%-Co10%-Cr4% مشخص شد استحکام چسبندگی عددی برابر با ۸۹ مگاپاسگال می‌باشد که نشان‌دهنده عالی بودن چسبندگی پوشش به زیرلایه است. شکل ۷ نرخ سطح ساییده شده -WC86 %-Co10 % Cr4% را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده کیفیت بالای پوشش و یکنواختی آن پس از طی مسیری حدود ۲۰۰ متر می‌باشد.

### نتیجه‌گیری نهایی

پس از ارزیابی و تحلیل نمونه‌های تهیه شده، با جایگزینی پوشش WC86%-Co10%-Cr4% برای کفش‌های بالگرد نتایج زیر حاصل شد:

➤ ساختار متالوگرافی پوشش WC86%-Co10%-Cr4% دارای تراکم بالا، عدم ذرات اکسیدی و ذوب شده می‌باشد.



شکل ۷-نرخ سایش بر حسب مسافت ساییده شده پوشش WC86%-Co10%-Cr4%

➤ نتایج حاصل از آزمون‌های سختی‌سنجی نشان داد پوشش دارای سختی در حدود ۱۳۰۰ ویکرز بوده که نشان‌دهنده بالا بودن این سختی نسبت به پوشش‌های دیگر به صورت آبکاری است.

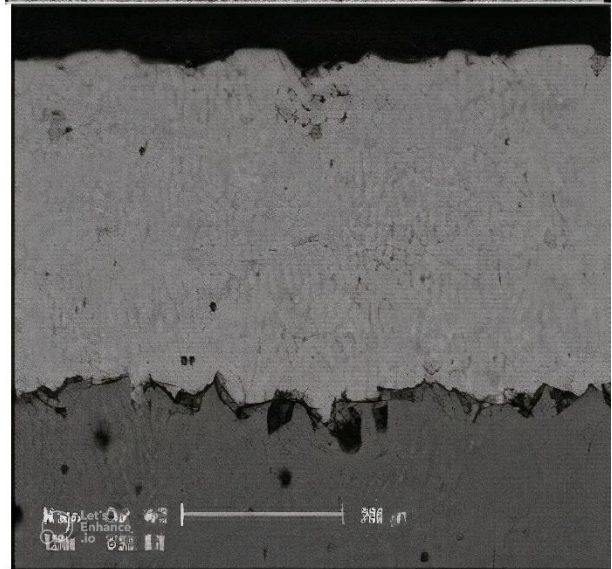
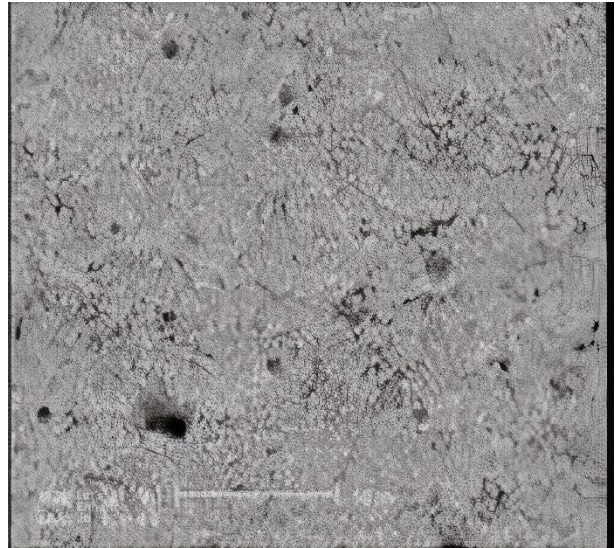
➤ سختی پوشش بسیار بالا می‌باشد که نشان از کیفیت پوشش می‌باشد.

➤ مقاومت سایشی پوشش مورد نظر بسیار بالاتر از پوشش‌های متعارف می‌باشد.

➤ استحکام چسبندگی بالای ۸۹ مگاپاسگال، قابل مقایسه با پوشش‌های متعارف نمی‌باشد.

➤ کاربرد تنگستن در برابر تأثیر شدید سایش مقاوم می‌باشد.

➤ ساخت پوشش تنگستن برای محافظت از کفش اسکید که به صورت موفق انجام شد، نشان‌دهنده کارایی این روش می‌باشد.



شکل ۶- مقطع پوشش کاربرد تنگستن مورد نظر و تصویر BSE از پوشش جهت تخلخل سنجی

### نتایج آزمون‌های سختی

نتایج حاصل از آزمون‌های سختی‌سنجی نشان می‌دهد که پوشش دارای سختی در حدود ۱۳۰۰ ویکرز می‌باشد که در مقایسه با نتایج کوتو<sup>۱</sup> و همکاران [۳۲] که سختی  $1379 \pm 75$  ویکرز برای پوشش‌دهی آلومینیوم 7075-T6 با WC83%-Co17% به روش HVOF بدست آورده بودند، مقدار مناسبی به نظر می‌رسد. همچنین سختی در حدود ۱۳۰۰ ویکرز نشان‌دهنده بالا بودن این سختی نسبت به پوشش‌های دیگر به صورت آبکاری است.

<sup>1</sup> Couto

## منابع و مراجع

sprayed nanostructured WC-12Co coatings,” *Surf. Coat. Tech.*, vol. 220, pp. 276-281, 2013.

[9] A. Babilius and K Babilius, “Formation of Tungsten Carbide Coatings with Different Thermal Spray Guns,” *J. Mat. Sci.*, vol. 15, no. 3, 2009.

[10] R. Sales and S. Nourouzi, “Residual Stresses Evaluation in Tungsten Carbide Cobalt Coating from HVOF Process Using XRD Method,” *Metallurgical Eng.*, vol. 17, no. 54, pp. 46-56, 2014. (in Persian)

[11] K. Murugan, A. Ragupathy, V. Balasubramanian and K. Sridhar, “Developing Empirical Relationship to Predict Hardness in WC- 10Co-4Cr HVOF Sprayed Coatings,” *Proced. Mat. Sci.*, vol. 5, pp. 918-927, 2014.

[12] J. A. Picas, M. Punset, M. T. Baile, E. Martín and A. Forn, “Effect of oxygen/fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings,” *Surf. Coat. Tech.*, vol. 205, pp. 364-368, 2011.

[13] S. Kamnis, S. Gu , T. J. Lu and C. Chen, “Numerical modeling the bonding mechanism of HVOF sprayed particles,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 4, pp. 1038-1043, 2009.

[14] M. Jafari, M. H. Enayati, M. Salehi, S. M. Nahvi and C. G. Park, “Comparison between oxidation kinetics of HVOF sprayed WC-12Co and WC-10Co-4Cr coatings,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, pp. 78-84, 2013.

[15] Y. Li, P. Zhang, P. Bai, L. Wu, B. Liu and Z. Zhao, “Microstructure and properties of Ti/TiBCN coating on 7075 aluminum alloy by laser cladding,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 334, pp. 142-149, 2018.

[16] J. T. Wang, L. Xie, K. Y. Luo, W. S. Tan, L. Cheng, J. F. Chen, Y. L. Lu, X. P. Li and M. Z. Ge, “Improving creep properties of 7075 aluminum alloy by laser shock peening,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 349, pp. 725-735, 2018.

[1] S. Uozato, K. Nakata and M. Ushio, “Corrosion and wear behaviors of ferrous powder thermal spray coatings on aluminum alloy,” *Surf. Coat. Tech.*, vol. 169-170, pp. 691-694, 2003.

[2] J. Kawakita, S. Kuroda and T. Kodama, “Evaluation of through-porosity of HVOF sprayed coating,” *Surf. Coat. Tech.*, vol. 166, no. 1, pp. 17-23, 2003.

[3] Q. Yang, T. Senda and A. Ohmori, “Effect of carbide grain size on microstructure and sliding wear behavior of HVOF-sprayed WC-12% Co coatings,” *J. Wear*, vol. 254, no. 1-2, pp. 23-34, 2003.

[4] S. Khameneh Asl, M. Heydarzadeh Sohi, K. Hokamoto and M. Uemura, “Effect of heat treatment on wear behavior of HVOF thermally sprayed WC-Co coatings,” *J. Wear*, vol. 260, no. 11-12, pp. 1203-1208, 2006.

[5] P. Chivavibul, M. Watanabe, S. Kuroda and K. Shinoda, “Effects of carbide size and Co content on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-Co coatings,” *Surf. Coat. Tech.*, vol. 202, no. 3, pp. 509-521, 2007.

[6] M.R. Ramesh, S. Prakash, S.K. Nath, Pawan Kumar Sapra and B. Venkataraman, “Solid particle erosion of HVOF sprayed WC-Co/NiCrFeSiB coatings,” *J. Wear*, vol. 269, no. 3-4, pp. 197-205, 2010.

[7] N. Markocsan, C. Lyphout, L. G. Östergren and M. Sieger, “Comparison between High-Velocity-Air-Fuel (HVAF) and Cold-Gas-Spray (CGS) by evaluating mechanical properties of Ti-6-4- and INCONEL718-coatings,” *Test Report INCO718*, 2011.

[8] W. Zorawski, “The microstructure and tribological properties of liquid-fuel HVOF

- [24] B. D. Sartwell, K. Legg and P. E. Bretz, "Status of HCAT/JG-PP program on replacement of hard chrome plating with HVOF thermal spray coatings on landing gear,".
- [25] T. Lester, "Replacing hard chromium by thermally sprayed coatings," *Weld. Met. Fabr.*, 1999.
- [26] UK Health & Safety Executive.
- [27] C. Reignier, A. Sturgeon, D. Lee and D. De Wet, "HVOF sprayed WC-Co-Cr as a generic coating type for replacement of hard chrome plating," *ITSC*, 2002.
- [28] B. D. Sartwell, P. M. Natishan, I. L. Singer, K. Legg, J. D. Schell and J. P. Sauer, "Replacement of chromium plating using HVOF thermal spray coatings,".
- [29] K. Legg and B. Sartwell, "Hard Chromium Alternative Team update - Improving performance while reducing cost,".
- [30] M. E. Graham, K. O. Legg and T. Bernecki, "HVOF as a repair technology replacement for hard chrome," *Proceeding of the 4th Thermal Spray Coatings organised by Gorham Advanced Materials Inc*, 1997.
- [31] J. D. Schell and M. Rechtsteiner, "Replacement of chromium plating using advanced material technologies on gas turbine components,".
- [32] M. Couto, S. Dosta and J. M. Guilemany, "Comparison of the mechanical and electrochemical properties of WC-17 and 12Co coatings onto Al7075-T6 obtained by high velocity oxy-fuel and cold gas spraying," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 268, pp. 180-189, 2015.
- [17] M. Karimi, M. Livani and H. R. Zarei, "Experimental analysis of strength of coated nickel base superalloy Rene-80," *J. aeronaut. Eng.*, vol. 22, no. 2, 2020. (in Persian)
- [18] F. Muhaffel, M. Baydogan and H. Cimenoglu, "A study to enhance the mechanical durability of the MAO coating fabricated on the 7075 Al alloy for wear-related high temperature applications," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 409, 2021.
- [19] M. Karimi, M. Livani and H. R. Zarei, "The effect of aluminide coating on the creep life of Rene 80 nickel base superalloy," *J. Solid Fluid Mech.*, vol. 11, no. 2, 2021. (in Persian)
- [20] A. Silvello, P. Cavaliere, S. Yin, R. Lupoi, I. Garcia Cano and S. Dosta, "Microstructural, Mechanical and Wear Behavior of HVOF and Cold-Sprayed High-Entropy Alloys (HEAs) Coatings," *J. Therm. Spray Tech.*, vol. 31, pp. 1184-1206, 2022.
- [21] Z. Wei, L. Zhang, K. Wang, J. Cheng, and S. Hong, "Improving the long-term corrosion resistance of HVOF sprayed WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni coating by vacuum sealing with silicone resin," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 26, pp. 344-355, 2023.
- [22] A. Pattnayak, A. Gupta, N. V. Abhijith, D. Kumar, J. Jain and V. Chaudhry, "Development of rGO doped alumina-based wear and corrosion resistant ceramic coatings on steel using HVOF thermal spray," *Ceram. Int.*, vol. 49, No. 11, pp. 17577-17591, 2023.
- [23] Z. Wei, D. Cui, Z. Wei and S. Hong, "Effect of sulphide concentration on corrosion behaviors of HVOF-sprayed WC-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni and WC-Ni coatings," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 111, 2023.