



## ارزیابی ریزساختار و رفتار سایشی پوشش ترکیب آهن و تیتانیوم اعمال شده به روش HVOF

امیره جلالی، مهدی رئوفی، فردین نعمت‌زاده\*

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، مرکزی، ایران

## تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۱/۰۶

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷

پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

## کلیدواژه‌ها:

آلیاژ نایبرال،

پاشش حرارتی HVOF،

پودر معدنی TM

**چکیده** هدف از این پژوهش، یافتن روش پوشش‌دهی نوین، جهت کاهش هزینه‌های اقتصادی، برآوردن نیاز صنایع دریایی به پروانه‌های کشتی با استحکام بالا و افزایش طول عمر این قطعات در هنگام کار در محیط آب دریا است. بدین منظور، پودر کانی حاوی ترکیبی از آهن و تیتانیوم (TM) آسیاکاری شده، به روش پاشش حرارتی سوخت اکسیژن با سرعت بالا (HVOF)، روی سطح زیرلایه آلیاژ نایبرال، پوشش داده شد. برای ارزیابی خواص پوشش، از آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ نوری (OM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ریزسختی‌سنجی و زبری‌سنجی، استفاده شد. همچنین، ارزیابی رفتار تریبولوژی زیرلایه و پوشش، با استفاده از آزمون سایش بین روی دیسک، تحت بار ۱۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰۰ متر، در دمای محیط، انجام گرفت. نتایج حاصل از مشخصه‌یابی پودر، نشان‌دهنده توزیع مناسب اندازه ذرات و وجود فازهای حاوی عناصر آهن و تیتانیوم در پودر است. بر این اساس، بلورینگی و پایداری فازی پودر در پوشش، با حضور فازهای  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ،  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\text{Fe}_{2.6}\text{O}_4\text{Ti}_{0.52}$  تقویت شد. نتایج، نشان داد که سرعت بالای پرتاب ذرات به‌هنگام پاشش و متراکم‌بودن ساختار پوشش، باعث افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه، کاهش تخلخل و افزایش سختی پوشش می‌شود. این پوشش، با نرخ سایش کمتر نسبت به زیرلایه، موجب افزایش مقاومت به سایش چشمگیری در نمونه شد.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.222880.1078>URL: [http://www.jamt.ir/article\\_125340.html](http://www.jamt.ir/article_125340.html)

JAMT: Vol. 9, No. 4, (Winter 2021), 13-21

## Evaluation of Microstructure and Wear Behavior of Iron-Titanium Composition Coating Applied by HVOF Process

Amireh Jalali, Mahdi Raoufi, Fardin Nematzadeh\*

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Arak, Arak, Markazi, Iran

## Paper History:

Received: 2020-03-25

Revised in revised form: 2020-07-17

Accepted: 2021-01-31

## Keywords:

Nibral Alloy,  
HVOF Thermal Spray,  
TM Mineral Powder

**Abstract** The purpose of this investigation is to find a new coating method to reduce economic costs, meet the needs of the marine industry to high-strength ship propellers and increase the lifetime of these pieces during the operation in seawater. For this purpose, milled TM mineral powder (containing a combination of iron and titanium) was coated on the surface of a Nibral alloy substrate by high-speed oxygen fuel (HVOF) thermal spraying process. The coating properties were evaluated using X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), microhardness, and roughness analysis. Also, the tribological behaviour of the substrate and the coating was evaluated using the pin on disk wear test under a 10 N load and a distance of 1000 m at ambient temperature. The results of powder characterization indicate the suitable particle size distribution and the presence of phases containing iron and titanium elements in the powder. Accordingly, the crystallinity and phase stability of the powder in the coating were enhanced by the presence of  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , and  $\text{Fe}_{2.6}\text{O}_4\text{Ti}_{0.52}$  phases. The results showed that the high velocity of throwing particles during spraying and the density of the coating structure caused the increase of the coating adhesion to the substrate, the decrease of porosity and the increase of hardness of the coating. This coating, with a lower wear rate than the substrate, significantly increased the wear resistance of the specimen.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.222880.1078>URL: [http://www.jamt.ir/article\\_125340.html](http://www.jamt.ir/article_125340.html)

\*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، مرکزی، اراک، دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، تلفن: ۰۹۱۸۴۸۶۳۶۶۴، دورنگار: -

پیام نگار: f-nematzadeh@araku.ac.ir

Please cite this article as: Jalali, A., Raoufi, M., Nematzadeh, F., "Evaluation of microstructure and wear behavior of iron-titanium composition coating applied by HVOF process", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 9, No. 4, (2021), 13-21. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.222880.1078>).



## ۱- مقدمه

سرعت بالای دور پروانه‌ها، وجود ذرات شن و ماسه و بسیاری از موجودات زنده ریز در آب دریا، مانند جلبک‌ها و خزها که به سطح قطعات شناورها می‌چسبند، همگی عواملی هستند که تا اندازه زیادی، عمر طراحی اجزای فلزی در دستگاه‌های شناور، از جمله پمپ‌ها، شیرهای اتصال، چرخ‌دنده‌ها، لوله‌ها، دریچه‌ها و پروانه‌های کشتی را کاهش می‌دهند [۵]. در چند دهه اخیر، آلیاژهای نایبرال<sup>۳</sup>، به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی مناسب و مقاومت به خوردگی بالا، در صنایع دریایی، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند [۶]. نایبرال، آلیاژ پایه مس، با ۹ تا ۱۲ درصد آلومینیوم و ۳ تا ۶ درصد از عناصر افزودنی آهن و نیکل است. در کنار استحکام نسبتاً بالا، خواص دیگری مانند سهولت در ریخته‌گری، مقاومت در برابر زنگ‌زدگی و خوردگی بالا، باعث شده تا این آلیاژ، برای صنایع دریایی، مناسب باشد [۷]. به‌رغم این مزایا، سختی کم آلیاژ، آسیب فرسایشی ناشی از تشکیل حفره در شرایط جریان آشفته<sup>۴</sup> و در-نهایت، کاهش طول عمر پروانه‌ها، منجر به زیان تجمعی این فرایندها و در نتیجه، جایگزینی قطعات نایبرال، در فواصل منظم می‌شود؛ بنابراین، برای صرفه‌جویی در هزینه‌های بسیار زیاد تهیه و جایگزینی قطعات نو، می‌توان خواص موردنظر را با طراحی مناسب مکانیکی، انتخاب مواد و مهندسی سطح، بهبود بخشید [۸-۱۰].

در چند دهه اخیر، برخی از محققان، به‌منظور بهبود خواص سطحی، به‌خصوص افزایش مقاومت به خوردگی و افزایش عمر پروانه‌های شناور، به سراغ آلیاژهایی با عناصر استحکام‌بالا، از جمله نیکل، آلومینیوم، تیتانیوم و مولیبدن و یا روش‌هایی مانند پاشش قوس الکتریکی سیمی، تغییر شکل پلاستیک، فرایند اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری ذوبی و سخت‌کاری سطحی با لیزر رفته‌اند [۱۱-۱۷]. با اینکه هرکدام از این روش‌ها، تا اندازه‌ای بر افزایش مقاومت به خوردگی، استحکام‌بخشی و افزایش عمر قطعه، تأثیر می‌گذارد، ولی همچنان، امکان خستگی و کندگی قطعات، به دلیل حضور همیشگی موجودات زنده بسیار ریز، مانند جلبک‌ها و خزها در آب دریا و چسبیدن آن‌ها به قطعات زیردریایی‌ها، وجود دارد؛ از این‌رو، تاکنون، تحقیقاتی در رابطه با خواص مکانیکی و

بسیاری از تخریب‌ها در قطعات صنعتی، از سطح شروع می‌شود. شکست این قطعات در هنگام کار، به دلیل پدیده‌هایی نظیر خوردگی و خستگی با گذشت زمان است. از این‌رو، امروزه، به‌هنگام ساخت قطعات مهندسی مورد استفاده در صنایع، نه تنها به خواص توده ای (بالک) ماده، بلکه به نحوه طراحی و خواص سطحی قطعات نیز، توجه می‌شود. فناوری‌های نوین، باید توانایی آماده‌سازی بهتر سطح و افزایش طول عمر قطعات را داشته باشند تا بتوانند از فرسودگی و جایگزینی آنها با قطعات نو، به میزان قابل‌توجهی، جلوگیری کنند و در نهایت، کارایی مجموعه را افزایش دهند [۱].

پژوهشگران، به‌تازگی، برای کاستن از هزینه تولید مواد با کارایی بالا، توجه خود را به فنون پوشش سطح، معطوف کرده‌اند. با توجه به تنوع ترکیب موادی که برای پوشش‌دهی سطوح قطعات در صنایع مختلف به‌کار می‌روند، روش‌های مختلفی نیز برای پوشش‌دهی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از موفق‌ترین فناوری‌های پیشرفته پوشش، فرایند پاشش حرارتی است که می‌تواند برای طیف گسترده‌ای از مواد پوشش و زیرلایه‌ها، مورد استفاده قرار گیرد. در چند دهه اخیر، این فرایند، به‌علت ایجاد پوشش‌هایی با قابلیت منحصر به فرد برای حفاظت قطعات صنعتی در برابر شکست، گسترش چشمگیری یافته است [۱ و ۲].

روش سوخت اکسیژن با سرعت بالا<sup>۱</sup> (HVOF)، یکی از محبوب‌ترین روش‌های پاشش حرارتی است و در بسیاری از صنایع، به دلیل انعطاف‌پذیری و ایجاد پوشش با کیفیت بهتر، کاربرد بیشتری دارد [۳]. مواد در این فرایند، با اشتعال مخلوط گاز سوختی و اکسیژن، در داخل یک تفنگ، در حالت مذاب یا نیمه‌مذاب، با فشار و سرعت بسیار زیاد، به سمت قطعه کار، افشانه<sup>۲</sup> می‌شوند که منجر به ایجاد خواص فوق‌العاده بهتری نسبت به سایر روش‌های پوشش‌دهی می‌شود [۴]. این فرایند، در صنایع دریایی، برای افزایش طول عمر بدنه شناورهای کشتی کاربرد دارد؛ زیرا با استفاده از مواد اولیه کم‌هزینه، پوششی با استحکام و سختی بیشتر، همراه با تخلخل کمتر و مقاومت به خوردگی بهتر، ایجاد می‌شود [۱ و ۳].

<sup>3</sup> Nibral<sup>4</sup> Turbulent Flow<sup>1</sup> High Velocity Oxy Fuel<sup>2</sup> Spray

چسبندگی پوشش به زیرلایه و از بین رفتن لایه‌های اکسیدی، به وسیله ذرات آلومینا با اندازه مش ۲۰، فشار گاز ۷ بار و زاویه ۴۵ درجه، ماسه پاشی شدند.

جدول ۱. ترکیب عناصر مختلف آلیاژ مس C95800 [۱۹]

عناصر	مس	آلومینیوم	نیکل	آهن	منگنز
C95800	۸۱/۳	۹	۴/۵	۴	۱/۲

پودر فرآوری شده TM (حاوی عناصر آهن و تیتانیوم)، از معدن قره‌آغاج آذربایجان غربی در ایران، به عنوان پودر اولیه، انتخاب شد. هدف اصلی از انتخاب این پودر، به عنوان منبع تغذیه پاشش حرارتی HVOF روی زیرلایه نایبرال، بررسی امکان اعمال پوشش و ارزیابی پوشش تشکیل شده است تا بتوان برای افزایش طول عمر پروانه‌های شناور، با کمترین هزینه‌ها، اقدام کرد. در جدول ۲، ترکیب شیمیایی پودر TM مورد استفاده، پس از خردایش با خلوص ۹۵/۳ درصد، گزارش شده است. باتوجه به نیاز فرایند پاشش حرارتی HVOF به توزیع اندازه ذرات ویژه و همچنین معدنی بودن پودر مورد نظر، از دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای، به مدت ۶ ساعت، در محیط گاز آرگون، جهت آسیاکاری پودر، استفاده شد. سرعت آسیاکاری، ۱۸۰ دور در دقیقه و نسبت گلوله به پودر، ۲/۵ به ۱، انتخاب شد. باتوجه به تصویر پودر TM که در شکل ۱ آورده شده است، توزیع اندازه ذرات، با نرم‌افزار ImageJ و به صورت گزینش تصادفی ذرات، انجام شد. همچنین، برای اطمینان از توزیع ابعاد ذرات، اندازه‌گیری به کمک روش پراکندگی استاتیکی نور (SLS) بر پایه پرتو لیزر هم‌گرا، انجام شد. محدوده اندازه ذرات، ۱۰ تا ۵۰ میکرون بوده که بیشتر از ۹۰ درصد آن، در محدوده مورد نیاز، یعنی ۱۵ تا ۴۵ میکرون است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید، مورفولوژی ذرات، ترکیبی از اشکال کروی و گوشه‌دار است.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی پودر TM

T = ۱۰۵۰ °C و ۰/۱ mm <> خردایش پودر اولیه TM							
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
۶۴/۹۵	۸/۱۲	۴/۷	۱/۲	۰/۵۲	۰/۶۶	۱۵/۱۸	۰/۴۸

مقاومت به سایش آلیاژ نایبرال، انجام نشده است. همچنین، به دلیل عدم مقرون به صرفه بودن و نبود امکانات کافی برای این روش‌ها (پاشش قوس الکتریکی سیمی، فرایند اصطکاکی اغتشاشی و ...) در داخل کشور، روش‌های نوین پوشش‌دهی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. براین اساس، دستگاه‌های پوشش‌دهی سطح، با هدف چگالی بالا و بهبود خواص مکانیکی، برای طولانی شدن عمر پروانه‌ها و به حداقل رسیدن هزینه قطعات فرسوده، توسعه یافته‌اند. مواد و روش پوشش‌دهی، باید در چنین شرایطی، مقاومت در برابر محیط‌های سخت را داشته باشند.

روند پاشش حرارتی HVOF، به عنوان روشی کارآمد، اقتصادی و آسان، برای ایجاد سطحی خشن، متخلخل و زیر، روی زیرلایه، امکان ایجاد پیوند مکانیکی مؤثری را بین پوشش و سطح نایبرال، فراهم می‌کند. در نتیجه، چسبندگی عالی بین پوشش و زیرلایه، موجب استحکام بالا و تخلخل بسیار کم پوشش می‌شود [۱].

در این تحقیق، باتوجه به پژوهش‌های پیشین، ویژگی‌های مطلوب روش پاشش حرارتی HVOF، ارزان بودن پودر معدنی TM حاوی عناصر آهن و تیتانیوم و همچنین، دسترسی سریع و آسان به این پودر در داخل کشور، تلاش شد تا جهت یافتن ایده‌ای نو برای افزایش عمر قطعات، کاهش هزینه‌های اقتصادی و بهبود خواص مکانیکی آلیاژ نایبرال، فرایند رسوب‌دهی این پودر، با روش پاشش حرارتی HVOF، روی زیرلایه نایبرال، اعمال و ارزیابی، انجام شود.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- آماده‌سازی زیرلایه و پودر

در این تحقیق، از آلیاژ نایبرال (نوعی آلیاژ مسی با کد UNS No.C95800)، به عنوان زیرلایه، جهت اعمال پوشش، استفاده شد. ترکیب شیمیایی آن، برای پروانه‌های کشتی، طبق استاندارد ASTM B148، در جدول ۱، ارائه شده است [۱۸].

زیرلایه مورد نظر، به دلیل نوع کاربردها، دارای پره‌های بسیار بزرگ، با حالت انحناء و خمیدگی است؛ در نتیجه، نمونه‌های زیرلایه، برای بررسی آزمایشگاهی، به ابعاد ۲×۲ سانتی متر، تهیه شدند. همچنین، سطح نمونه‌ها، برای افزایش

و پالایه‌های<sup>۱</sup> میکرونی، خنک می‌شوند. پوشش‌های حاصل، پس از ۹ پاس متوالی، به وجود آمدند.

### ۲-۳-۲- مشخصه‌یابی پودر و پوشش

#### ۲-۳-۲-۱- فازیابی

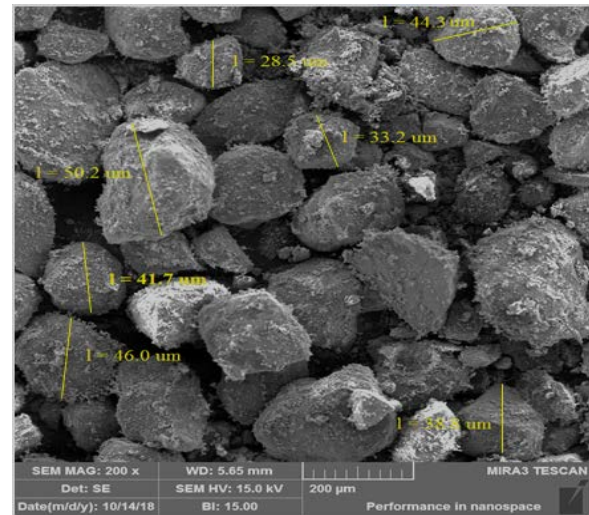
به‌منظور شناسایی فازهای موجود در ذرات پودر TM (حاصل از فرایند آسیاکاری) و پوشش ایجادشده، از آزمون پراش پرتوی ایکس، با دستگاه فیلیپس مدل Xpert MPD ساخت کشور هلند، استفاده شد. این آزمون، به‌وسیله پرتوی ایکس  $Cu-K\alpha$ ، طول‌موج  $1/05406$  آنگستروم و ولتاژ ۴۰ کیلوولت، با نرخ روبش  $0/02$  درجه و زمان توقف هر گام، ۱ ثانیه، انجام شد. محدوده آنالیز، با زاویه روبشی  $2\theta$  از  $10$  تا  $80$  درجه، انتخاب شد.

#### ۲-۳-۲-۲- تصویربرداری

تصویربرداری از پودر و سطوح پوشش پس از متالوگرافی نمونه‌ها در مقاطع عرضی، برای مطالعات ریزساختاری، بررسی شرایط سطحی و سطح مقطع پوشش، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مدل فیلیپس XL30، با ولتاژ ۱۵ کیلوولت، انجام شد. سطح نمونه، پیش از ورود به محفظه دستگاه SEM، با روکشی از طلا، پوشش داده شد تا با ایجاد رسانایی، الکترون‌های جمع‌شده روی سطح، خارج شود. همچنین، برای بررسی رفتار سایشی، تصویربرداری از سطح پوشش و زیرلایه، پس از آزمون سایش، انجام شد.

#### ۲-۳-۲-۳- زبری

زبری پوشش نیز، با استفاده از دستگاه زبری‌سنج موهر مدل Marsurf PS1 ساخت کشور آلمان، انجام شد. این دستگاه، با یک سر سوزن‌مانند، روی سطح، حرکت کرده و با توجه به تعداد نوسانات و حداکثر جابجایی، می‌تواند زبری سطح نمونه را مشخص کند. عدد گزارش‌شده با این دستگاه، زبری میانگین است. جهت جلوگیری از خطای آزمون، زبری نمونه، در سه نوبت، اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها، ثبت شد.



شکل ۱. تصویر SEM پودر TM پس از آسیاکاری مکانیکی

### ۲-۲- فرایند پوشش‌دهی

پوشش‌دهی پودر TM، روی سطح نمونه‌های نایبرال، با استفاده از دستگاه MEC HVOLF، انجام شد. این روند، با استفاده از تفنگ MJP-5000، سوخت نفت سفید و اکسیژن خالص بیمارستانی، صورت گرفت. متغیرهای ثابت مورد استفاده جهت انجام پوشش، در جدول ۳، گزارش شده است.

جدول ۳. متغیرهای مورد استفاده در فرایند HVOF

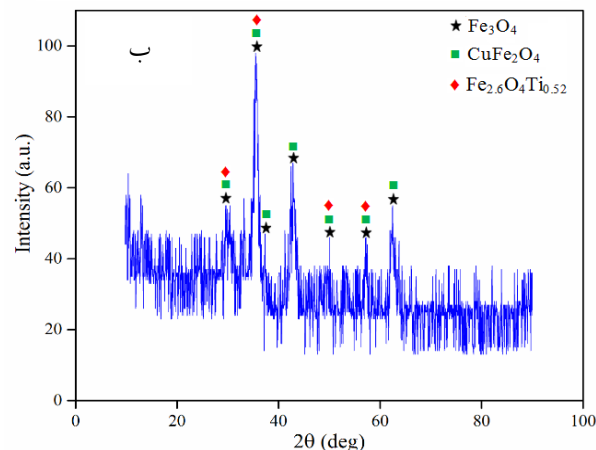
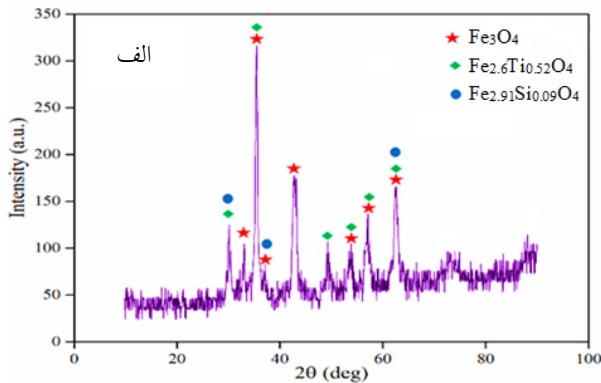
مقادیر	متغیرها
۷	فشار هوا (بار)
۱۰۰	طول نازل (میلی‌متر)
۳۰	فاصله پاشش (سانتی‌متر)
۸۵۰	جریان اکسیژن (میلی‌لیتر بر دقیقه)
۶	گاز حمل‌کننده (لیتر بر دقیقه)
۳۸۰	جریان سوخت (میلی‌لیتر بر دقیقه)

ذرات پودر در این دستگاه، پس از احتراق، به سمت زیرلایه، پرتاب می‌شوند. تفنگ پاشش، با حرکت رفت‌و-برگشت عمودی به سمت بالاوپایین، موجب روبش سطح زیرلایه و در نتیجه، ایجاد پوشش، روی سطح می‌شود. بین هر پاس، به دلیل افزایش دمای کاری قطعه و امکان تغییر ساختار متالورژیکی، توقف صورت می‌گیرد. از این رو، محفظه احتراق، نازل، مسیر گازهای خروجی و نمونه‌ها، به‌وسیله دستگاه آبگرد

<sup>1</sup> Filters

### ۲-۳-۴- سختی

ریزسختی پوشش و زیرلایه، با استفاده از دستگاه ریزسختی سنج ویکرز مدل Shimatzu HMV2 با دقت  $\pm 0.5$  ویکرز، ساخت کشور ژاپن، انجام شد. در این روش، امکان ارزیابی سختی قطعات و مقاطع خیلی کوچک و نازک، با استفاده از نیروهای خیلی سبک، وجود دارد. چون در این آزمایش، اثر فرورونده، کوچک است، بنابراین، سطح قطعه، باید کاملاً صاف و روشن باشد. در این آزمون، به علت سطح نازک، زبری و رنگ تیره پوشش، از نمونه‌ای برش عرضی داده شده به روش متالوگرافی، استفاده شد؛ به گونه‌ای که ریزسختی سطح پوشش و زیرلایه در یک نمونه پوشش داده شده، با انتخاب ۵ نقطه از عرض پوشش و ۵ نقطه از عرض زیرلایه به صورت پروفیل، اندازه‌گیری و میانگین‌های این ۵ نقطه به وسیله میکروسکوپ نوری تعبیه شده بر روی دستگاه، گزارش شد. در سراسر آزمون، بار اعمالی، ۱۰۰ گرم و زمان توقف، ۱۵ ثانیه، در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری ریزسختی، امکان مقایسه خواص مکانیکی پوشش‌ها و زیرلایه را فراهم می‌کند.



شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس، (الف) پودر TM و (ب) پوشش TM

الگوی پراش پرتوی ایکس پوشش TM، در شکل ۲ (ب)، حضور فازهای مگنتیت و اکسید آهن تیتانیوم موجود در پودر را در زوایای قبلی، با پهن‌شدگی پیک‌ها نسبت به پودر، تأیید می‌کند. پس می‌توان گفت فازهای موجود در پودر، با استوکیومتری یکسان، در پوشش نیز، حضور دارند و پایداری فازهای پودر، در روند پاشش، حفظ شده است. به علاوه، وجود

ریزسختی پوشش و زیرلایه، با استفاده از دستگاه ریزسختی سنج ویکرز مدل Shimatzu HMV2 با دقت  $\pm 0.5$  ویکرز، ساخت کشور ژاپن، انجام شد. در این روش، امکان ارزیابی سختی قطعات و مقاطع خیلی کوچک و نازک، با استفاده از نیروهای خیلی سبک، وجود دارد. چون در این آزمایش، اثر فرورونده، کوچک است، بنابراین، سطح قطعه، باید کاملاً صاف و روشن باشد. در این آزمون، به علت سطح نازک، زبری و رنگ تیره پوشش، از نمونه‌ای برش عرضی داده شده به روش متالوگرافی، استفاده شد؛ به گونه‌ای که ریزسختی سطح پوشش و زیرلایه در یک نمونه پوشش داده شده، با انتخاب ۵ نقطه از عرض پوشش و ۵ نقطه از عرض زیرلایه به صورت پروفیل، اندازه‌گیری و میانگین‌های این ۵ نقطه به وسیله میکروسکوپ نوری تعبیه شده بر روی دستگاه، گزارش شد. در سراسر آزمون، بار اعمالی، ۱۰۰ گرم و زمان توقف، ۱۵ ثانیه، در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری ریزسختی، امکان مقایسه خواص مکانیکی پوشش‌ها و زیرلایه را فراهم می‌کند.

### ۲-۳-۵- سایش

به منظور ارزیابی رفتار سایش، از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک مدل WTC02، در دمای محیط، استفاده شد. مکانیزم سایش، طبق استاندارد ASTM-G99، با حرکت چرخان پین روی دیسک، انجام می‌شود. پیش از انجام آزمون، پین و سطح نمونه‌ها، با استون، تمیز شدند. در این آزمون، پین کاربرد تنگستن، به قطر ۱ سانتی‌متر، با نیروی مشخص ۱۰ نیوتن و با سرعت ۱۱۰ دور بر دقیقه، روی سطح نمونه‌های دیسکی زیرلایه و پوشش، مسافت ۱۰۰۰ متر را طی کرد و کاهش وزن دیسک، برحسب مسافت لغزش، اندازه‌گیری شد.

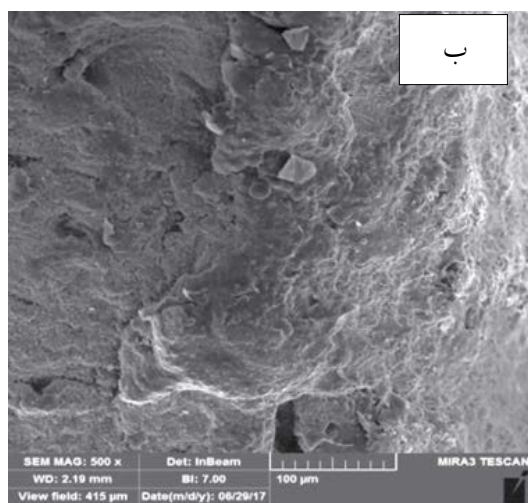
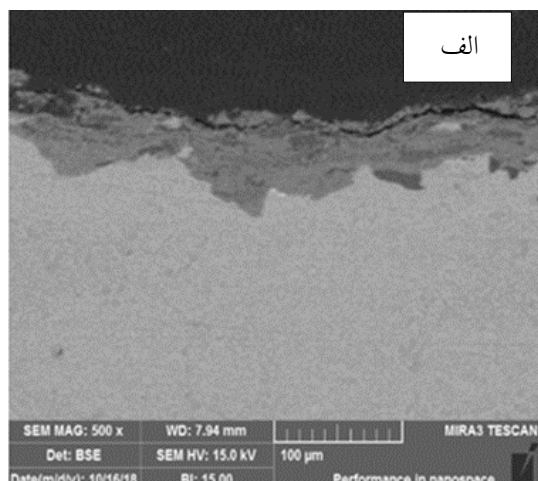
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی فازی و ریزساختار پوشش

شکل ۲ (الف و ب)، الگوی پراش پرتوی ایکس پودر و پوشش TM را به ترتیب، نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل ۲ (الف)، همان‌طور که انتظار می‌رود، فاز مگنتیت ( $Fe_3O_4$ )، در زوایای  $33.79^\circ$ ،  $35.45^\circ$

بودن زمان قرارگیری ذرات در معرض دمای بالا، بهینه‌نبودن ورود ذرات از منبع تغذیه به محفظه احتراق و یا وجود ذرات گوشه‌دار در پودر باشد. در پاس نهایی پاشش، ذرات ذوب‌نشده روی سطح پوشش، قابل مشاهده است. حفرات موجود در سطح پوشش، از یکنواختی، تراکم بالا و تخلخل کم پوشش، خبر می‌دهند.



شکل ۳. تصویر SEM، (الف) از سطح مقطع پوشش TM و

(ب) از سطح پوشش TM

تغییرات فازی در ساختار پوشش، با تشکیل فاز جدید  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  (مطابق با کارت مرجع ۰۴۲۷-۰۰۷۷-۰۱)، مربوط به اتصال قوی بین پوشش و زیرلایه، در پاس‌های اولیه پوشش-دهی در فرایند HVOF است و از امکان تشکیل لایه میانی نازک بین پوشش و زیرلایه، خبر می‌دهد. وجود این پیک جدید و احتمال حضور این لایه میانی، چسبندگی پوشش به زیرلایه را افزایش می‌دهد؛ اما نکته قابل توجه، عدم حضور فاز اکسید آهن سیلیکون در پوشش است که می‌تواند به دو دلیل باشد. اول این که ممکن است دی‌اکسید سیلیسیوم، از این فاز، جدا شده و به صورت لایه‌های اکسیدی، بین اسپلت‌ها، با درصد کم، قرار گرفته باشد که در الگوی پراش XRD، قابل مشاهده نیست. دوم، احتمالاً در اثر سرعت بالای پاشش، بخشی از این ذرات، به صورت ذوب نشده، به سطح قطعه، برخورد کرده و سپس، به محیط اطراف، پرتاب شده‌اند.

شکل ۳ (الف و ب)، تصویر SEM از سطح و سطح مقطع پوشش TM (اعمال شده به روش پاشش حرارتی HVOF) را نشان می‌دهد. پوشش‌های حاصل از فرایند HVOF، به دلیل وجود کمترین میزان گرما نسبت به دیگر روش‌های پاشش حرارتی، ذرات را به صورت مذاب یا نیمه مذاب درآورده که منجر به ایجاد پوششی با کمترین میزان عیوب می‌شود [۲۰]. عناصر موجود در پودر مورد استفاده، دارای نقطه ذوب‌های مختلف هستند که در اثر قرارگیری در جت گازی، عناصر با نقطه ذوب پایین، زودتر ذوب می‌شوند [۲۱]. زمان کمتر برای قرارگرفتن ذرات پودر در حالت پرواز و انتقال این ذرات به سطح زیرلایه با سرعت فراصوت در فرایند HVOF، باعث ساختار یکنواخت، استحکام پیوند و چسبندگی بالا، بقای فازی بهتر و درصد کمتر ذرات ذوب‌نشده می‌شود [۲۲].

همان‌طور که در شکل ۳ (الف) مشاهده می‌شود، پوشش، با ضخامت‌های مختلفی، روی سطح زیرلایه، قرار گرفته است که علت آن، توقف بین پاس‌های پاشش، سرعت بالای پرتاب ذرات و نرم‌بودن زیرلایه است. از این رو، ضخامت لایه پوشش، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، در پنج نقطه تصادفی، اندازه‌گیری و میانگین آن، برابر با  $33/76$  میکرون، گزارش شده است. ذرات ذوب‌نشده روی سطح پوشش، در تصویر ۳ (ب)، قابل مشاهده است که علت آن، می‌تواند کوتاه-

### ۲-۲- بررسی سختی

مقادیر ریزسختی، وابسته به نیروی وارده، محل اثر و چسبندگی بین پوشش و زیرلایه است. عدد سختی، معیار اولیه برای استحکام پوشش است. در آزمون ریزسختی، امکان ترک-خوردگی و شکست پوشش‌های متخلخل، وجود دارد. همچنین، وجود ذرات ذوب‌نشده درون پوشش نیز، به دلیل تشابه ساختاری با پودر اولیه، منجر به پراکندگی ذرات در

### ۳-۳- زبری سنجی

معمولاً پوشش‌های حاصل از پاشش حرارتی، در حالت پاشیده شده، استفاده نمی‌شوند و بعد از فرایند پاشش، به سنگ-زنی نهایی، جهت نیل به سطح بسیار صاف، نیاز دارند. هرچه زبری سطح، در پاشش حرارتی، کمتر باشد، کار سنگ‌زنی، برای صافی سطح نهایی، راحت‌تر و کم‌هزینه‌تر خواهد بود. عواملی مانند فاصله پاشش، زبری سطح زیرلایه، نسبت سوخت به اکسیژن، توزیع اندازه و سرعت ذرات، می‌تواند بر زبری سطح، تأثیرگذار باشند. توزیع یکنواخت و مورفولوژی کروی ذرات پودر، زبری سطح را کاهش می‌دهد [۲۳ و ۲۴]. پوشش TM، به دلیل توزیع یکنواخت آن و سرعت بالای ذوب ذرات به هنگام پاشش، حفرات و جاهای خالی را پر می‌کند؛ از این رو، تخلخل، کاهش و در نهایت، تاندازه‌ای زبری سطح پوشش، کم می‌شود؛ اما عوامل مهم‌تری، همچون مورفولوژی پودر TM و حضور ذرات ذوب‌نشده روی سطح پوشش، مانع از کاهش چشمگیر زبری پوشش می‌شود. جدول ۵، زبری پوشش را پس از فرایند HVOF، نشان می‌دهد. جهت اطمینان از نتایج عددی آن، سه بار از سطح نمونه، زبری گرفته شد.

جدول ۵. زبری پوشش پس از فرایند پاشش حرارتی HVOF

میانگین	۳	۲	۱
۶/۸۴۲±۰/۱	۶/۷۴۶±۰/۱	۶/۹۷۰±۰/۱	۶/۸۱۲±۰/۱

### ۳-۴- بررسی سایش

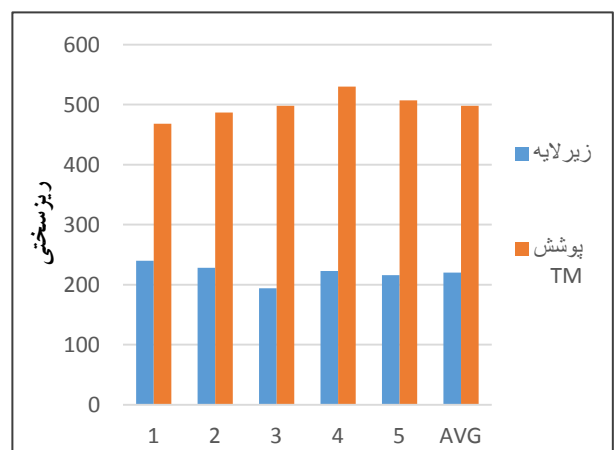
رفتار سایش مواد را می‌توان با عواملی همچون چسبندگی پوشش به زیرلایه، سختی و زبری پوشش، تغییر شکل پلاستیک و غیره، توجیه کرد. شکل ۵، نمودار کاهش وزن پوشش و زیرلایه را برحسب مسافت لغزش، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زیرلایه، در مقایسه با پوشش، کاهش وزن بیشتری دارد و این کاهش وزن، تا انتهای مسافت ۱۰۰۰ متری، روند صعودی دارد؛ اما برای نمودار پوشش، سایش در مسافت‌های اولیه، زیاد، ولی با گذشت زمان، در مسافت‌های بالاتر، دمای سطح تماس بین و دیسک، بر اثر تداوم حرکت بین روی سطح، افزایش یافته و شرایط را برای تشکیل ذرات اکسیدی، فراهم می‌کند. در نتیجه، این

هنگام پاشش، پیوند ضعیف بین پوشش و زیرلایه و در نهایت، کاهش سختی پوشش می‌شود [۲۱].

در آزمون ریزسختی، به علت پراکندگی نتایج به دست آمده و ضخامت‌های متفاوت پوشش (حاصل از پاشش حرارتی HVOF)، ۵ نقطه اثر در عرض پوشش و ۵ نقطه اثر در عرض زیرلایه برای یک نمونه ایجاد و میانگین‌های این ۵ نقطه با هم، مطابق با جدول ۴، گزارش و مقایسه شده‌اند. نمودار میله‌ای میانگین ریزسختی پوشش و زیرلایه، جهت مقایسه در شکل ۴، آورده شده است. پایین‌ترین سختی، مربوط به سطح زیرلایه است که نشان‌دهنده حفرات ریختگی و ریزساختار درشت‌دانه، به دلیل درصد پایین آلومینیوم در ساختار نایبرال است. به طور کلی، مقدار سختی پوشش، خیلی چشمگیر نیست. شاید نرم بودن زیرلایه و برعکس، ترد بودن پوشش، دلیلی برای امکان خطا در آزمون باشد. زیرا این عوامل، امکان کندی لبه‌های پوشش را به هنگام آماده‌سازی متالوگرافی (برش کاری) و اثر فرورونده ریزسختی، مستعد می‌کند؛ ولی در حالت مقایسه، سختی پوشش TM نسبت به زیرلایه، افزایش یافته و در نتیجه، خواص مکانیکی و استحکام پوشش، بهبود یافته است.

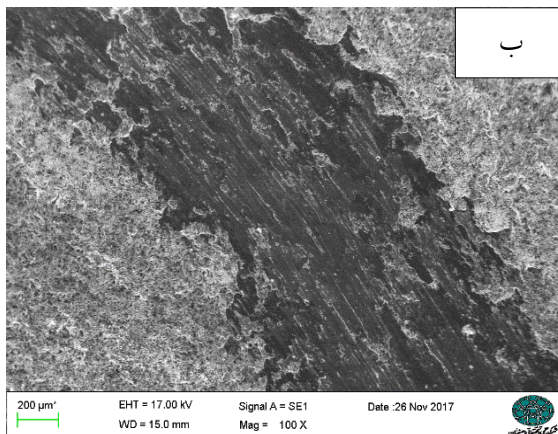
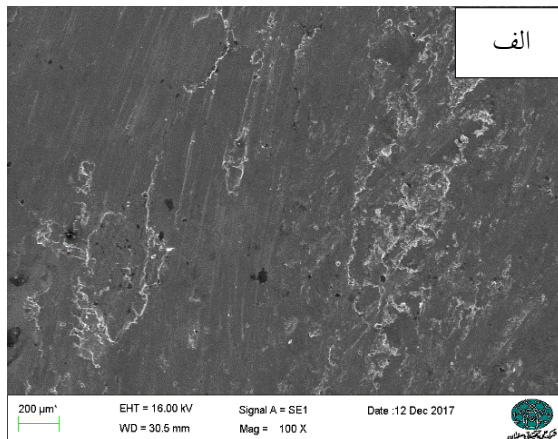
جدول ۴. میانگین ریزسختی زیرلایه و پوشش حاصل از فرایند

HVOF						
نقاط فرورونده	۱	۲	۳	۴	۵	میانگین
زیرلایه	۲۴۰	۲۲۸	۱۹۴	۲۲۳	۲۱۶	۲۲۰
پوشش TM	۴۶۸	۴۸۷	۴۹۸	۵۳۰	۵۰۷	۴۹۸



شکل ۴. مقایسه ریزسختی (برحسب ویکرز) زیرلایه و پوشش

هایی با عمق نسبتاً کم، هم‌جهت با مسیر سایش، ایجاد شده است. مقدار زیاد شیارهای موازی در سطح سایش، ویژگی مکانیزم سایش خراشان است؛ ولی هیچ‌گونه آثار ترک و شکست ذرات در پوشش، مشاهده نشد که این، می‌تواند عاملی برای توجیه کاهش وزن کمتر پوشش TM، نسبت به زیرلایه باشد.



شکل ۶. تصویر SEM (الف) نمونه زیرلایه بعد از آزمون سایش و (ب) نمونه پوشش TM بعد از آزمون سایش

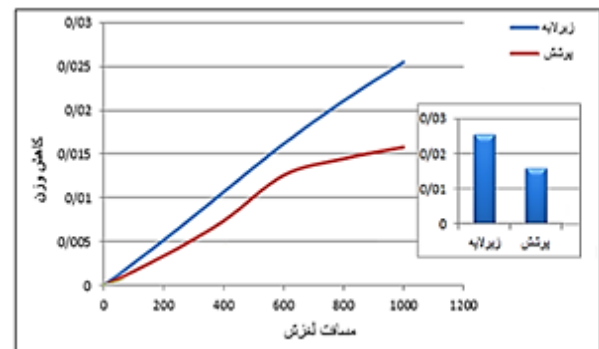
#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج فازیابی پودر TM، نشان داد که ساختار پودر، حاوی فازهایی مرکب از عناصر آهن و تیتانیوم است. همچنین، پوشش TM، علاوه بر حفظ پایداری فازی پودر در روند پوشش‌دهی، حاوی فاز  $CuFe_2O_4$  است. این فازها، در بلورینگی، بهبود خواص و خلوص بالای پوشش، نقش به‌سزایی دارند.

۲- کندگی لبه‌های پوشش به‌هنگام برش‌کاری، به‌علت نرم‌بودن زیرلایه و برعکس، تردبودن پوشش، به‌طور مستعدی

ذرات، با سطح پوشش TM، جوش خورده و منجر به تشکیل لایه‌هایی لعاب‌مانند می‌شوند که نرخ سایش را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، با انجام این آزمایش در مسافت‌های بالاتر، احتمال ثابت شدن نرخ سایش برای نمونه TM، وجود دارد. نتایج کلی نرخ کاهش وزن برای زیرلایه و پوشش نیز، به‌ترتیب، برابر ۰/۰۲۵۵ و ۰/۰۱۴۳ گرم است.

باتوجه به این‌که میزان کاهش وزن، با سختی رابطه معکوس دارد، می‌توان گفت که پوشش TM با مقدار سختی بیشتر (باتوجه به شکل ۴)، کاهش وزن کمتر و درنهایت، مقاومت به سایش بالاتری نسبت به زیرلایه دارد. همچنین، با توجه به نتایج زبری حاصل، روند کاهش وزن پوشش و زیرلایه، کاملاً آشکار است؛ بنابراین، کاهش وزن نمونه، بستگی به سختی بیشتر، زبری کمتر و چسبندگی بهتر پوشش به زیرلایه دارد.



شکل ۵. نمودار کاهش وزن نمونه‌های زیرلایه (نایبرال) و پوشش TM بر حسب مسافت سایش

تصاویر SEM در شکل ۶، مسیر سایش زیرلایه و پوشش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر الف مشاهده می‌شود، زیرلایه، به‌صورت یکنواخت، ساییده نشده و لبه‌هایی بر سطح ساییده‌شده، قابل مشاهده است. باتوجه به این‌که زیرلایه، بسیار نرم‌تر از گلوله است، گلوله در همان شروع سایش، با ایجاد سطح تماس واقعی بین گلوله و نمونه، در سطح نمونه، نفوذ می‌کند. پس ماده، روی سطح، توسط گلوله، جابجا شده و به‌صورت برآمدگی در دو طرف شیار، شکل گرفته است که منجر به کرنش زیاد زیرلایه می‌شود. افزایش صعودی ضریب اصطکاک و کاهش وزن زیاد، مشخصه ساز و کارهای خیش‌ریز، برش‌ریز و ایجاد لبه در سطح زیرلایه است. در تصویر ب نیز، ذرات پوشش، کنده شده و میکروخراش-



8. Kucita P., "The development of a wear resistance aluminum bronze (Cu-Al-Fe) coating", Ph. D. Thesis, Southampton University, (2016). <http://eprints.soton.ac.uk/id/eprint/403720>
9. J-Barr, C., "Severe plastic deformation of nickel aluminium bronze alloys for marine applications", Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Melbourne City University, (2015). <http://hdl.handle.net/11343/54883>
10. Holmberg, K., Erdemir, A., "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions", *Friction*, Vol. 5, No. 3, (2017), 263-284. <https://doi.org/10.1007/S40544-017-0183-5>
11. Tang, C. H., Cheng, F. T., Man, H. C., "Laser surface alloying of a marine propeller bronze using aluminium powder: Part I: Microstructural analysis and cavitation erosion study", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, No. 8, (2006), 2602-2609. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.12.021>
12. Tang, C. H., Cheng, F. T., Man, H. C., "Laser surface alloying of a marine propeller bronze using aluminium powder: Part II: Corrosion and erosion-corrosion synergism", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, No. 8, (2006), 2594-2601. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.12.022>
13. Park, K. S., Kim, S., "Corrosion and corrosion fatigue characteristics of cast NAB coated with NAB by HVOF thermal spray", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 158, No. 10, (2011), 335-340. <https://doi.org/10.1149/1.3622343>
14. Poorman, C. A., *The use of thermal spraying to enhance the bonding characteristics of a urethane coated propeller: Trident scholar project report*, Edited by PN, United States Naval Academy, Maryland, (1999). <https://www.amazon.com/-/es/Corey-Poorman/dp/B00IT6GRY0>
15. Lv, Y., Wang, L., Xu, X., Lu, W., "Effect of post heat treatment on the microstructure and microhardness of friction stir processed NiAl bronze (NAB) alloy", *Metals*, Vol. 5, No. 3, (2015), 1695-1703. <https://doi.org/10.3390/met5031695>
16. Fuller, M. D., "Friction stir processing and fusion welding in nickel aluminum propeller bronze, department of mechanical and astronautical engineering", Thesis Collection, Naval Postgraduate School, California, (2006). <http://hdl.handle.net/10945/2687>
17. Cottam, R., Barry, T., "Laser processing of nickel-aluminum bronze for improved surface corrosion properties", *Journal of Laser Applications*, Vol. 25, (2013). <https://doi.org/10.2351/1.4799555>
18. ASTM B 505/B 505M-18, *Standard specification for copper alloy continuous castings*, (2018). <https://www.astm.org/COMMIT/SUBCOMMIT/B0505.htm>
19. ASTM B148-18, *Standard specification for aluminum-bronze sand castings*, (2009). <https://www.astm.org/Standards/B148.htm>
20. Pawlowski L., *Science and engineering of thermal spray coatings*, Second Edition, John Wiley & Sons, (2008). [https://www.researchgate.net/publication/233857052\\_The\\_Science\\_and\\_Engineering\\_of\\_Thermal\\_Spray\\_Coatings](https://www.researchgate.net/publication/233857052_The_Science_and_Engineering_of_Thermal_Spray_Coatings)
21. Sidhu, H. S., Sidhu, B. S., Prakash, S., "Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite coating", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 2, (2007), 232-238. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.035>
22. Tan, J. Ch., "Optimization of the HVOF thermal spray process for coating, forming and repair of components, mechanical & manufacturing engineering", Ph. D. Thesis, Dublin City University, (1997). <http://doras.dcu.ie/19435/> (Accessed: 2 Oct 2013).
23. Davis, J. R., *Surface engineering for corrosion and wear resistance*, ASM International, CRC Press, (2001). <http://doras.dcu.ie/19435/>
24. Amin, S., Panchal, H., "A review on thermal spray coating processes", *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)*, Vol. 2, No. 4, (2016), 556-563. <http://poudfafshan.com/wp-content/uploads/2019/05/A-Review-on-Thermal-Spray-Coating-Processes-1.pdf>

افزایش می‌یابد؛ از این رو، نتایج حاصل از مقدار عددی سختی پوشش، افزایش می‌یابد، اما خیلی چشمگیر نیست؛ سختی پوشش TM، در حالت مقایسه با سختی زیرلایه، افزایش یافته و باعث بهبود خواص مکانیکی و استحکام پوشش شده است.

۳- سازوکار غالب سایش در هر دو نمونه زیرلایه و پوشش، با شرایط یکسان، شامل جدا شدن ذرات از سطح است که منجر به سایش خراشان و در نهایت چسبان می‌شود.

۴- پوشش TM، به دلیل سختی بالاتر، چسبندگی مناسب، زبری کمتر و همچنین، باتوجه به کاهش وزن کمتر در مقایسه با زیرلایه، مقاومت به سایش بالاتری دارد که تا حدودی می‌تواند بر عمر قطعات تأثیرگذار باشد، ولی چشمگیر نیست.

## ۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله، از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه اراک، به لحاظ پشتیبانی از این طرح، در قالب طرح پژوهشی با عنوان «بررسی خواص سایشی پوشش تیتانو- مگنتیت اعمال شده به روش پاشش حرارتی HVOF روی زیرلایه نایبرال» طی قرارداد شماره ۹۷/۲۳۳۱ مورخ ۹۷/۰۴/۰۴، سپاسگزاری می‌کنند.

## مراجع

1. Mahbub, H., "High velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray deposition of functionally graded coatings", Ph. D. Thesis, Dublin City University, (2005). <http://doras.dcu.ie/17346/> (Accessed: 30 Aug 2012).
2. Zhao, L., Lugscheider, E., "Influence of the spraying processes on the properties of 316L stainless steel coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 162, No. 1, (2002), 6-10. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00560-1](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00560-1)
3. Scrivani, A., Lanelli, S., Rossi A., Groppetti, R., Casadei, F., Rizzi, G., "A contribution to the surface analysis and characterisation of HVOF coatings for petrochemical application", *Wear*, Vol. 250, No. 1-12, (2001), 107-113. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00621-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00621-4)
4. Sobolev, V. V., Guilemany, J. M., Nutting, J., *High velocity oxy fuel spraying: Theory, structure-property relationships and applications*, Edited by Joshi, Sh., Institute of Materials, Minerals and Mining, CRC Press, (2004). <https://www.amazon.com/dp/1902653726>
5. Tuthill A. H., *Guidelines for the use of copper alloys in seawater*, (1987). <https://www.copper.org>
6. Wharton J. A., Barik, R. C., Kear, G., Wood, R. J. K., Stokes, K. R., Walsh, F. C., "The corrosion of nickel-aluminium bronze in seawater", *Corrosion Science*, Vol. 47, No. 12, (2005), 3336-3367. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.053>
7. Raghavan V., "Al-Cu-Fe (aluminum-copper-iron)", *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, Vol. 26, (2005), 59-64. <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1007%2Fs11669-010-9743-3>