



مقاله کامل پژوهشی

اثر ساچمه‌زنی پرنرزی بر خواص پوشش استلایت ۶ اعمال شده روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی

مهدی غلام‌پور^{۱*}، محمدحسن عامری^۲

^۱استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام علی، تهران، تهران، ایران
^۲کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام علی، تهران، تهران، ایران

چکیده آلیاژ استلایت ۶، به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی، روی زیرلایه‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن آستینیتی، لایه‌نشانی شد. نتیجه‌ی لایه‌نشانی، پوششی چسبنده به ضخامت 10 ± 100 میکرون بود. به منظور بهبود ویژگی‌های پوشش استلایت ۶ ایجادشده به روش جرقه الکتریکی، از فرایند ساچمه‌زنی پرنرزی، استفاده شد. ریزساختار پوشش، تغییرات ترکیب شیمیایی از سطح تا عمق، رفتار سایشی پوشش، ریزسختی و عیوب لایه پوشش قبل و بعد از فرایند ساچمه‌زنی پرنرزی، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و میکروسکوپ نوری، آنالیز عنصری خطی و ارزیابی سایشی بین روی دیسک، بررسی شد و تأثیر فرایند ساچمه‌زنی روی پوشش استلایت، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ساچمه‌زنی پرنرزی بر سطح پوشش استلایت ۶ (ایجادشده به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی) سبب می‌شود که مشخصه زبری سطح پوشش از ۱۴ به ۴/۵ میکرون کاهش یابد و سختی آن از ۴۵۰ به ۵۴۰ ویکرز افزایش پیدا کند؛ از طرفی خواص سایشی پوشش بهبود یابد، میزان عیوبی نظیر تخلخل‌ها، کم شده و میکروترک‌ها و نقص در ذوب شدگی‌ها در اثر تنش‌های پسماند فشاری و تغییر شکل موم‌سان شدید، کور شوند.

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۶/۲۴
دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۸/۲۰
پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

کلیدواژه‌ها:

لایه‌نشانی جرقه الکتریکی،
ساچمه‌زنی پرنرزی،
استلایت ۶،
فولاد زنگ‌نزن آستینیتی ۳۱۶

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.243604.1115> URL: https://www.jamt.ir/article_126419.html

Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 2, (Summer 2021), 83-96

Effect of High Energy Shot Peening on Properties of Stellite 6 Layer Coated on AISI 316 Using Electro-Spark Deposition

Mahdi Gholampour^{1*}, Mohammad Hassan Ameri²

¹ Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali University, Tehran, Tehran, Iran

² M. Sc., Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali University, Tehran, Tehran, Iran

Paper History:

Received: 2020-09-14
Revised in revised form: 2020-11-10
Accepted: 2021-10-04

Abstract Stellite-6 alloy was deposited on a SS316 stainless steel substrate by Electro-Spark Deposition; subsequently, the thickness of deposition layer was around 100 ± 10 micron. High Energy Shot Peening process was applied to improve coated layer properties. Microstructure, chemical composition, micro hardness variation in cross sections, wear properties and visual check for discontinuities of coated layer were

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، تهران، تهران، دانشگاه امام علی، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، تلفن: -، دورنگار: ۰۲۱-۶۱۰۴۸۴۲۶

پیام نگار: mahdi.gholampoor@gmail.com

Please cite this article as: Gholampour, M., Ameri, M. H., "Effect of high energy shot peening on properties of stellite 6 layer coated on AISI 316 using electro-spark deposition", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 2, (2021), 83-96. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.243604.1115>).



Keywords:

Electro-Spark Deposition,
High Energy Shot Peening,
Stellite 6,
Austenitic Stainless Steel 316

studied by employing Field Emission Scanning Electron Microscopy, Optical Microscopy, EDS line scan and pin on disk wear test, before and after the high energy shot peening process. The results show decreasing the surface roughness from 14 to 4.5 micron and improving the micro-hardness of coated layer from 450 to 540 HVN due to High Energy Shot Peening process on the Electro-Spark Deposition coated layers. On the other hand, the wear properties of the coating are improved, the number of defects such as porosities is reduced, and micro-cracks and defects in melts are healed due to compressive residual stress and severe wax deformation.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.243604.1115>

URL: https://www.jamt.ir/article_126419.html

۱- مقدمه

بسیار سریع می‌شود. در اثر این چرخه گرمایی، قطرات ریز مذاب، روی نوک الکتروود مصرفی شکل گرفته و توسط قوس الکتریکی و چرخش الکتروود به سمت زیرلایه شتاب می‌گیرند و در ادامه با برخورد به سطح سرد لایه زیرین، به دلیل نسبت بسیار پایین حجم قطرات مذاب به حجم کل قطعه، با سرعت بسیار زیادی منجمد می‌شوند و یک لکه نشست داده‌شده را شکل می‌دهند. در اثر تکرار این فرایند و نشست قطرات متعدد روی هم، در نهایت یک روکش فلزی چندلایه تشکیل می‌شود [۱۷-۲۰]. فرایند لایه‌نشانی جرقه الکتریکی در قیاس با دیگر فرایندهای جوشکاری، سرعت انجماد بسیار بالایی دارد که این مسئله امکان تشکیل ریزساختارهای بی‌شکل (آمورف^۸) را برای ترکیبات شیمیایی خاص فلزی فراهم می‌کند [۲۱]. بازیابی و تعمیر برخی آلیاژهای پیشرفته با استفاده از فرایند لایه‌نشانی جرقه الکتریکی به‌طور موفقی انجام شده است که می‌توان به تعمیر پره‌های توربین از جنس IN713^۹ اشاره کرد [۱۳]. روکش‌های فلزی ایجادشده به این روش به دلیل گرمای فرایندی بسیار پایین، تغییرات بسیار کمی در ماده زیرلایه ایجاد می‌کنند و در این روش برخلاف دیگر روش‌های جوشکاری، اعوجاج در زیرلایه بسیار ناچیز است [۲۲]. در روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی به دلیل پیوند متالورژیکی بین پوشش و زیرلایه، چسبندگی پوشش بالاست [۱۷، ۲۱ و ۲۳]. از طرفی این فرایند قادر است پوششی نازک با ضخامت میکرونی ایجاد کند [۲۱]. پوشش‌دهی استلایت ۶ روی سطح فولاد زنگ‌نزن آستینیتی در مقاوم‌سازی و یا بازیابی قطعات داخلی شیرآلات صنعتی که دارای ابعاد کوچک و هندسه نسبتاً پیچیده هستند، کاربرد دارد [۱۴ و ۱۵] که می‌توان به تویی^{۱۰} در شیرهای تویی^{۱۱} و دیسک^{۱۲} در شیرهای پروانه‌ای^{۱۳} اشاره کرد. این قطعات گاهی

استلایت ۱۶ یک آلیاژ پایه کبالت است که به دلیل خواص سایشی و فرسایشی مطلوب و جوش‌پذیری مناسب، کاربرد وسیعی در صنایع دارد. استفاده از این آلیاژ به صورت پوشش، بسیار معمول است [۴-۱]. پوشش‌دهی استلایت روی سطح فولادها به روش‌های مختلفی انجام و بررسی شده است که از آن میان می‌توان به روش‌های پاشش حرارتی^۲ [۵]، پاشش سرد^۳ [۶]، پاشش حرارتی سوخت اکسیژن با سرعت بالا (HVOF)^۴ [۵ و ۷]، روکش‌کاری جوش آرگون [۹ و ۱۰]، روکش‌کاری لیزری [۲ و ۱۱] و روکش‌کاری به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی^۵ [۱۲] یا به اختصار ESD اشاره کرد. یکی از کاربردهای شناخته‌شده برای روکش‌کاری استلایت روی سطح، تقویت خواص سایشی قطعاتی است که در معرض سایش و یا فرسایش قرار دارند؛ پره‌های توربین و پمپ [۱۳ و ۱۴]، قالب‌های ریخته‌گری تحت فشار^۶، اجزای داخلی شیرآلات صنعتی^۷ [۱۲ و ۱۵] و برخی از قطعات نظامی نظیر این قطعات هستند. طی دهه گذشته، روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی به‌خاطر قابلیت بالایی که در روکش‌کاری فلزی و تعمیر قطعات با مواد و هندسه پیچیده دارد، جذابیت پیدا کرده است [۱۳ و ۱۶].

لایه‌نشانی جرقه الکتریکی یک فرایند میکرو جوشکاری (لایه‌نشانی نازک) است که گرمای فرایندی بسیار پایینی دارد. در این روش از الکتروود مصرفی چرخان با جریان الکتریکی قوی و ضربانی، با دوره تکرار کوتاه برای ایجاد لایه پوشش استفاده می‌شود. در این فرایند، ضربان جریان الکتریکی در دوره‌ای بسیار کوتاه و گذرا سبب ایجاد یک چرخه گرمایی

⁸ Amorphous

⁹ Inconel 718

¹⁰ Ball

¹¹ Ball Valves

¹² Disk

¹³ Butterfly Valves

¹ Stellite-6

² Thermal Spray

³ Cold Spray

⁴ High Velocity Oxy-Fuel

⁵ Electro Spark Deposition

⁶ Die Cast Mold

⁷ Valve Trim Part

کاهش ضریب اصطکاک و بهبود خواص سایشی سطح می‌شود.

در این پژوهش از فرایند ساچمه‌زنی مکانیکی پرانرژی با نیرو و بسامد برخورد بالا به‌منظور بهبود خواص سایشی پوشش استلایت ۶ ایجاد شده به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی، استفاده شد و تأثیر آن بر ویژگی‌های سطح، مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد

جدول (۱)، ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی SS316 و آلیاژ استلایت ۶ را که در این پژوهش به ترتیب به‌عنوان زیرلایه و فلز پوششی به‌کار رفته‌اند، نشان می‌دهد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی و آلیاژ پایه کبالت استفاده‌شده در این پژوهش

| درصد وزنی | | | | |
|-----------|------|------|-----------|-----|
| W | Cr | C | استلایت ۶ | |
| ۴/۵ | ۲۷ | ۱ | | |
| Co | Si | Ni | Mn | Fe |
| Bal | ۱ | ۲/۵ | ۱/۱ | ۲/۵ |
| درصد وزنی | | | | |
| Mo | Cr | C | SS 316 | |
| ۱/۹ | ۱۸/۵ | ۰/۰۵ | | |
| Co | Si | Ni | Mn | Fe |
| ۰/۰۶ | ۰/۴۶ | ۱۱/۱ | ۱/۴ | Bal |

۲-۲- لایه‌نشانی جرقه الکتریکی

از روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی برای ایجاد پوشش استلایت ۶ روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی SS316 استفاده شد. در این پژوهش سطح یک ورق فولادی زنگ‌نزن آستنیتی SS316 به ضخامت ۲ میلی‌متر با سنباده شماره ۶۰۰ سنباده‌زنی شد و سپس به‌وسیله محلول استون، چربی‌زدایی گردید.

شکل (۱)، طرح‌واره فرایند لایه‌نشانی جرقه الکتریکی را روی سطح نشان می‌دهد. در این روش، از الکتروود چرخان با زاویه ۶۰ درجه نسبت به سطح استفاده شد. جرقه‌های کنترل‌شده به‌وسیله منبع تغذیه با پتانسیل الکتریکی ۱۲۰ ولت و جریان متوسط ۳ آمپر تولید شدند. سرعت خطی دسته عملگر ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی الکتروود ۳۰۰

در اثر عبور سیال دمابالا مثل بخار فوق‌داغ^۱ و یا سیالات نفتی حاوی ذرات ساینده، دچار فرسایش می‌شوند. با ایجاد پوشش استلایت ۶ روی سطح قطعات یادشده، می‌توان فرسایش آن‌ها را تا حد زیادی به تعویق انداخت. یکی از مهم‌ترین عیوب گزارش‌شده در اثر فرایندهایی نظیر پاشش حرارتی، پاشش سرد، HVOF، روکش‌کاری با لیزر و یا لایه‌نشانی جرقه الکتریکی، میکروتُرک‌ها و تخلخل‌هایی هستند که در پوشش ایجاد می‌شوند و می‌توانند به منزله محل جوانه‌زنی ترک‌ها باشند و تخریب پوشش را تسریع کنند [۶، ۱۱ و ۲۴]. از طرفی در فرایند لایه‌نشانی جرقه الکتریکی، به‌دلیل ذوب و انجماد سریع قطرات ریز مذاب، حجم بالایی از تنش‌های کششی در پوشش ایجاد می‌شود که سبب تسریع در رشد ترک‌ها خواهد شد [۱۸ و ۲۳]. به‌طورکلی گزارش شده است که می‌توان تأثیر این میکروتُرک‌ها و عیوب مشابه را در پوشش‌های اعمالی، با ضربه‌زنی^۲ سطح و ایجاد تنش‌های پسماند فشاری ناشی از آن، کاهش داد و یا آثار تخریبی آن‌ها را کم کرد [۲۴ و ۲۶]. در پژوهشی که کالنتیک^۳ و همکارانش [۲۴ و ۲۵] انجام دادند از فرایند ضربه‌زنی شوک لیزری^۴ برای ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در پوشش لیزری ایجادشده استفاده کردند. نتایج آن پژوهش نشان داد که به‌کارگیری تنش‌های پسماند فشاری سبب کاهش میزان تخلخل و کور شدن ترک‌ها و عیوب می‌شود که می‌تواند در افزایش خواص و یا بهبود عملکرد قطعه بسیار مؤثر باشد. فرایند ساچمه‌زنی پرانرژی^۵ یا به‌اختصار HESP، تأثیری شبیه به ضربه‌زنی شوک لیزری دارد و با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در سطح، ضمن آزاد کردن تنش پسماند کششی ناشی از فرایند لایه‌نشانی جرقه الکتریکی، باعث بهبود خواص مکانیکی پوشش می‌شود [۲۵]. مطالعه علیخانی و همکارانش [۲۷] نشان می‌دهد که ساچمه‌زنی روی سطح تیتانیوم خالص تجاری به روش عملیات ضربه‌زنی مکانیکی (SMAT)^۶، سبب فوق‌ریزدانه‌شدن^۷ ریزساختار سطح،

¹ Super-Heated Steam

² Peening

³ N. Kalentics

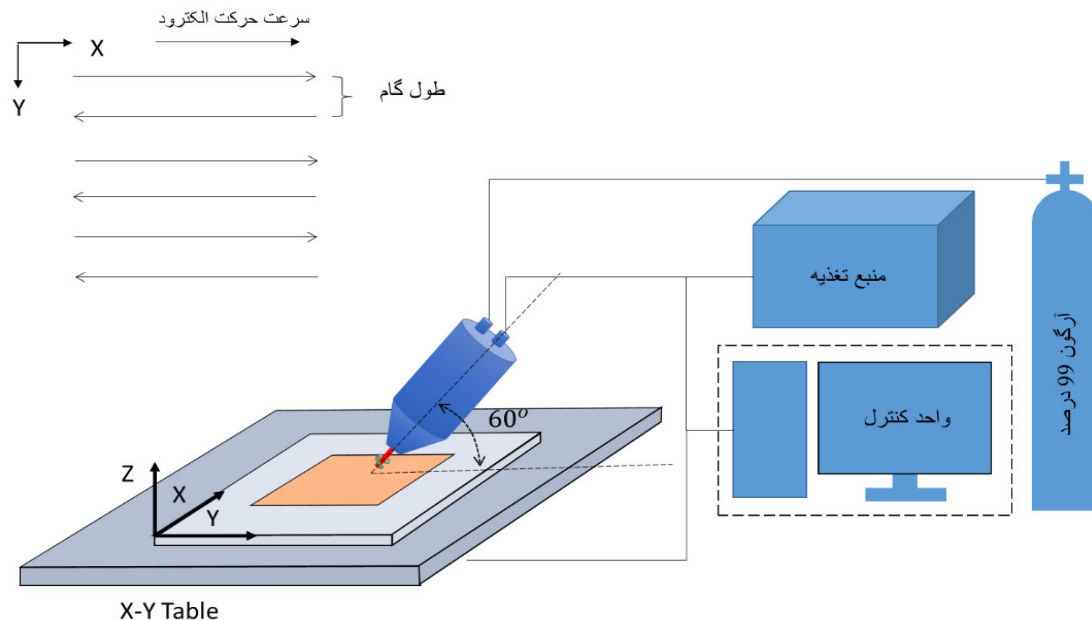
⁴ Laser Shock Peening

⁵ High Energy Shot Peening

⁶ Surface Mechanical Attrition Treatment

⁷ Ultrafine Grain

بار روبش مسیر در راستای X، به‌طور متوالی یک گام در مسیر Y حرکت می‌کند. جدول (۲)، مشخصه‌های فرایندی به‌کاررفته در لایه‌نشانی پوشش استلایت ۶ را روی سطح فولاد زنگ‌نزن نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرح‌واره روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی

سایش هاردکس^۱، استفاده شد. جدول (۳) مشخصه‌های به‌کاررفته در ساچمه‌زنی پرنرژی را نشان می‌دهد. در این فرایند ساچمه‌ها با نیرو و بسامد معین، به‌طور مکرر و در بازه زمانی مشخص به سطح برخورد می‌کنند. تفاوت عمده روش ساچمه‌زنی پرنرژی با روش ساچمه‌زنی معمولی، بالاتر بودن انرژی برخورد ساچمه‌ها در این روش است [۲۹]. در این پژوهش، سطح پوشش استلایت لایه‌نشانی‌شده به روش ESD به مدت ۶۰ دقیقه با ساچمه‌های فولاد ضدسایش هاردکس (به قطر ۰/۴ میلی‌متر و سختی ۶۵۰ ویکرز^۲) با نیروی ۱۰۰۰ نیوتن عملیات ساچمه‌زنی شد و این کار ۱۵ بار در ثانیه تکرار شد.

۲-۴- متالوگرافی

به‌منظور بررسی ریزساختار پوشش و زیرلایه، از نمونه‌ها، برش عرضی تهیه و سپس سنباده‌زنی سطح مقطع انجام شد. در ادامه، با استفاده از پارچه پرداخت‌کاری و سوسپانسیون آلومینا با اندازه ذرات کمتر از ۰/۳ میکرون

دور در دقیقه بود که طی آن نوک الکتروود توسط جریان گاز محافظ آرگون با دبی ۱۵ لیتر بر دقیقه محافظت شد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، مسیر حرکت عملگر به‌صورت رفت و برگشتی است و پس از هر

جدول ۲. مشخصه‌های به‌کاررفته در لایه‌نشانی آلیاژ استلایت ۶ روی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی SS316

| مشخصه‌های منبع تغذیه | پتانسیل الکتریکی (ولت) | |
|----------------------|------------------------|---------------------------------|
| | ۱۲۰ | شدت جریان (آمپر) |
| | ۳ | ظرفیت خازن (فاراد) |
| عملگر | ۱۰۰ | چرخش الکتروود (دور بر دقیقه) |
| | ۳۰۰ | جریان گاز محافظ (لیتر بر دقیقه) |
| | ۱۵ | زاویه الکتروود (درجه) |
| | ۶۰ | سرعت حرکت (میلی‌متر بر دقیقه) |
| | ۵۰ | طول گام (میلی‌متر) |

۲-۳- ساچمه‌زنی پرنرژی

ساچمه‌زنی پرنرژی (به‌عنوان فرایند تکمیلی) برای بهبود خواص سطحی پوشش ایجادشده به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی انجام شد. از ساچمه‌های فولادی مقاوم به

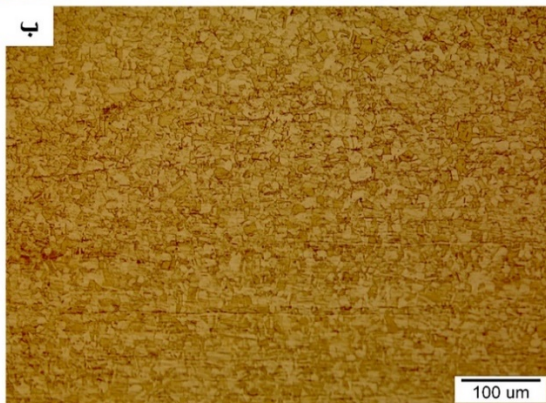
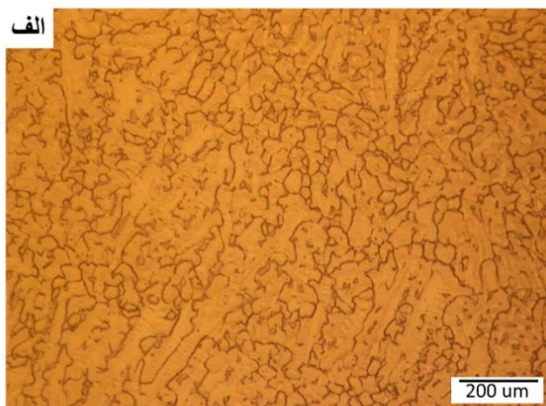
^۱ Hardex

^۲ Vickers

میکروسکوپ مجهز به دستگاه طیف سنج توزیع انرژی پرتو ایکس (EDXS) مدل IS2300 ساخت شرکت SERON کشور کره جنوبی بوده که جهت آنالیز عنصری استفاده شده است. به دلیل رسانا بودن سطح نمونه‌ها، نیازی آماده سازی وجود نداشت. تمیز بودن سطح نمونه‌ها برای تصویر برداری از الزام‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

شکل (۲)، تصویر میکروسکوپی ریزساختار استلایت ۶ و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را که به ترتیب به‌عنوان فلز پوششی و زیرلایه به کار رفته‌اند، نشان می‌دهد. ریزساختار مفتول آلیاژ استلایت ۶ به‌طور کلی از دانه‌های فاز فریت تشکیل شده است (شکل ۲-الف) اما وجود عنصر کاربیدزای قوی مثل تنگستن در کنار درصد قابل توجهی از عنصر کرم و کربن، باعث تشکیل ساختارهای پرلیتی ظریف در نواحی مرز دانه‌ای فاز فریت می‌شود که شناسایی آن‌ها تنها در بزرگنمایی‌های خیلی بالا امکان‌پذیر است [۲]. شکل ۲-ب، ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ شامل دانه‌های فاز آستنیت را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی ریزساختار الف) سوپرآلیاژ استلایت

۶ و ب) فولاد زنگ‌نزن آستنیتی SS316

(به‌عنوان ساینده)، پرداخت سطح مقطع برشی پوشش به‌خوبی صورت گرفت.

جدول ۳. مشخصه‌های به‌کاررفته در ساچمه‌زنی پرنرژی سطح

| جنس ساچمه | نیرو (نیوتن) | فرکانس برخورد (هرتز) | قطر ساچمه (میلی متر) | زمان (دقیقه) |
|--------------|--------------|----------------------|----------------------|--------------|
| فولاد هاردکس | ۱۰۰۰ | ۱۵ | ۰/۴ | ۶۰ |

۲-۵- ریزسختی سنجی

با استفاده از دستگاه مدل Buehler LTD و مطابق با استاندارد ASTM E384-99، ریزسختی نمونه‌ها ارزیابی شد. بار اعمالی ۱۰۰ گرم، زمان بارگذاری ۱۵ ثانیه و حداقل فاصله اثر فرورونده‌ها در تهیه پروفیل سختی، ۲۰ میکرون به‌صورت شعاعی بود. لازم به ذکر است برای افزایش دقت سختی‌سنجی، اندازه‌گیری قطر اثر به‌وسیله میکروسکوپ نوری مدل Olympus BX51M و با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر انجام شد.

۲-۶- زبری سنجی سطحی

با استفاده از دستگاه زبری‌سنج لیزری پرتابل Surtonic25، زبری سطح پوشش براساس استاندارد ISO-4287 اندازه‌گیری شد. با هدف افزایش اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده، روبش سطح در دو مسیر عمود بر هم در جهت x و y انجام شد.

۲-۷- ارزیابی خواص سایشی

ویژگی‌های سایشی استلایت در دمای محیط به روش سایش پین روی دیسک و براساس استاندارد ASTM G99-17 بررسی شد. در این پژوهش از ساچمه فولادی ضدسایش AISI52100 به‌عنوان ساینده با سختی ۸۵۰ ویکرز و قطر ۱ میلی‌متر استفاده شد. نیروی اعمالی، ۱۰ نیوتن و مسافت سایش، ۶۰۰ متر در مسیر دایره‌ای با سرعت خطی ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد. تصاویر ریزساختاری نمونه‌ها توسط یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XI30 ساخت شرکت Philips کشور هلند انجام شده است. این

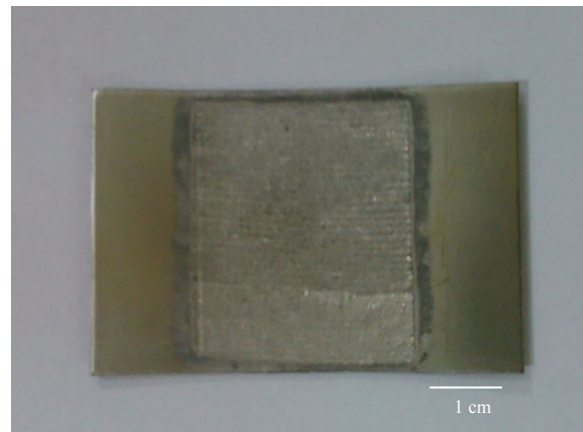
¹ Scanning Electron Microscopy

شکل ۴-الف و ب، به ترتیب مقطع برشی پوشش را در حالت لایه‌نشانی‌شده به روش ESD + HESP و ESD نشان می‌دهد.

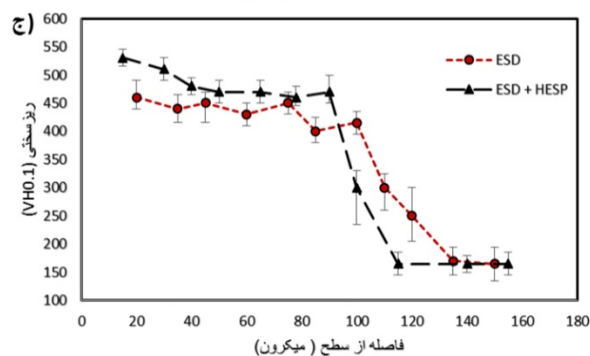
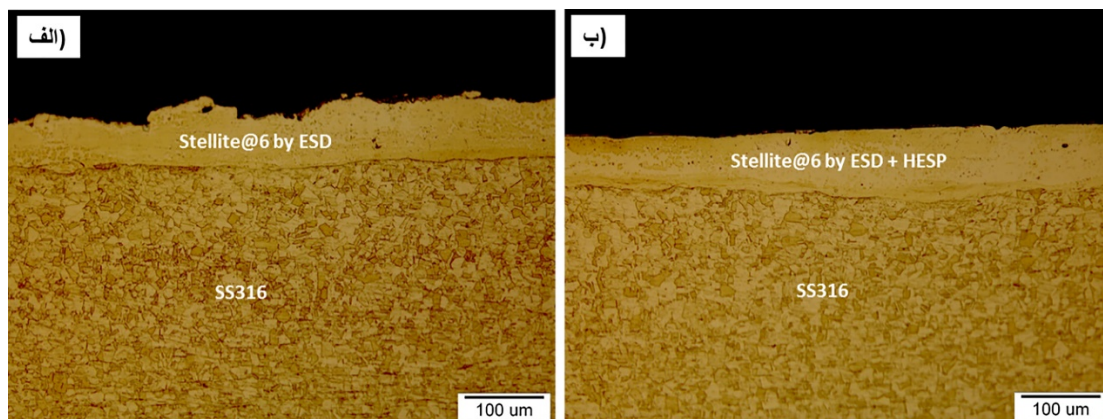
مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که پوشش نوع دوم به دلیل برخورد ساچمه‌ها، سطح یکنواخت‌تری دارد و موجی شدن سطح در اثر فرایند ESD به دلیل روبش سطح در دو بُعد است که بعد از ساچمه‌زنی پرنرژی با نیرو و بسامد مشخص، به خوبی اصلاح و برطرف شده است؛ به طوری که سطح پوشش، یکنواخت شده است.

سطح پوشش ایجادشده به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی، به طور معمول بافت‌دار است [۳۰]. این مسئله در برخی از کاربردها مطلوب است. به عنوان مثال ایجاد زبری و بافت کنترل‌شده روی سطح کاشتنی‌های پزشکی توصیه شده است [۳۱-۳۳]. اما در برخی دیگر از کاربردها، کاهش زبری سطح مرجح و مطلوب است؛ به این علت، به کارگیری روش‌هایی که بتوان به صافی و یکنواختی بهتری دست یافت، توصیه می‌شود.

شکل (۳)، تصویر بررسی در مقیاس میکرونی از سطح پوشش ایجادشده را به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی در ۵ لایه نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر نیز مشخص است، ناحیه‌ای مربع‌شکل به ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر از یک ورق فولاد زنگ‌نزن آستنیتی SS316 به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی، پوشش‌دهی شده است.



شکل ۳. تصویر سطح پوشش استلایت ۶ روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ اعمال‌شده به روش ESD



شکل ۴. مقاطع برشی از پوشش استلایت ۶ روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ (الف) لایه‌نشانی‌شده به روش ESD، (ب) لایه‌نشانی‌شده به روش ESD+HESP. (ج) نمودار تغییرات عدد سختی از سطح تا عمق برای تصاویر الف و ب

شکل ۴-ج، پروفیل ریزسختی از پوشش به سمت زیرلایه را نشان می‌دهد. نتایج ریزسختی مقطع پوشش

می‌یابد. مشاهدات نشان می‌دهد که مقدار این کاهش در حدود ۱۰ میکرون است.

شکل ۵-الف و ۶-الف، به ترتیب تصویر میکروسکوپی الکترونی از سطح نمونه ESD و ESD + HESP را در حالت شناسایی الکترون ثانویه و با دو بزرگنمایی متفاوت نشان می‌دهد. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که سطح پوشش ESD به ظاهر زبرتر از ESD + HESP است. به منظور صحت‌سنجی مشاهدات، ویژگی زبری سطح به روش زبری‌سنجی غیرتماسی لیزری اندازه‌گیری شد. شکل ۵-ب و ۶-ب، به ترتیب پروفیل زبری سطح پوشش استلایت ۶ را در حالت ESD و ESD + HESP نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این است که میانگین انحراف پروفیل زبری از خط متوسط، یا همان مشخصه زبری سطح (R_a)، از عدد $4/53$ میکرون (در ESD) به $1/9$ میکرون (در ESD + HESP) کاهش یافته است. همچنین از مقایسه پروفیل زبری دو پوشش مشاهده می‌شود که در اثر ساچمه‌زنی پرنرژ، ارتفاع بیشینه قله در سطح (R_p)، از عدد $13/9$ (در ESD) به $4/3$ (در ESD + HESP) کاهش یافته و شکل قله‌ها نیز از حالت تیز افزایشی و کاهشی شدید به حالت نرم و پهن درآمده است. قابل ذکر است که فرایند HESP اثر قابل‌توجهی روی عمق دره نداشته است؛ به این شکل که عمق بیشینه دره (R_v)، تغییرات محسوسی را نشان نمی‌دهد و عدد آن برای قبل و بعد از HESP به ترتیب $12/4$ و 11 میکرون است. پیش‌بینی می‌شود که فرایند HESP تعدادی از دره‌ها را کور کرده باشد، با این وجود درصد قابل‌توجهی از این دره‌ها، مشخصه خود را حفظ کرده‌اند. لازم به ذکر است که موج و شیب سطح پوشش در روش زبری‌سنجی لیزری با استفاده از امکانات دستگاه، تصفیه شده است و پروفیل‌های قابل‌مشاهده در تصویر ۵-ب و ۶-ب، صرفاً زبری سطح را نشان می‌دهند.

یکنواختی و کاهش زبری سطح پوشش در اثر فرایند ساچمه‌زنی پرنرژ (HESP)، علاوه بر کاهش تمرکز تنش در اثر کاهش زبری، سبب ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح و نیز کور شدن میکروتُرک‌ها و آزاد شدن تنش‌های پسماند کششی در پوشش می‌شود که ممکن است در اثر آن‌ها تخریب تشدید شود [۲۵ و ۲۶].

استلایت، عددی بیش از ۴۰۰ ویکرز را نشان می‌دهد؛ درحالی‌که عدد سختی مفتول آلیاژ استلایت به‌عنوان الکترو، ۳۸۰ ویکرز است. این مسئله را می‌توان به ذوب و انجماد سریع هنگام فرایند لایه‌نشانی، مرتبط دانست. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از سطح، عدد سختی پوشش، با شیب بسیار ملایم کم می‌شود. علت آن می‌تواند ناشی از تأثیر حرارتی نشست لایه‌های رویی پوشش باشد. البته رقیق‌شدگی^۱ پوشش نیز عامل مؤثر دیگر این مسئله است. در تصویر ۴-ج، پروفیل سختی نمونه پوشش‌دهی شده به روش ESD + HESP^۲ نیز نشان داده شده است. از مقایسه پروفیل سختی ESD + HESP با نمونه ESD درمی‌یابیم که میانگین سختی از سطح تا عمق ۳۵ میکرون در روش ESD + HESP در حدود ۷۰ ویکرز بالاتر است. علت این مسئله را می‌توان به تأثیر کارسختی، ناشی از فرایند ساچمه‌زنی پرنرژ، مرتبط دانست [۲۵، ۲۸]. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، ریزساختار فلز استلایت ۶ حاوی دانه‌های فاز فریت است [۴]. سختی و استحکام این نوع ریزساختار در اثر کارسختی، افزایش می‌یابد [۳۴]. نتایج به‌دست‌آمده در عمق ۳۵ تا ۱۰۰ میکرون، میانگین سختی بالاتری را برای منحنی ESD + HESP نسبت به ESD نشان می‌دهد؛ اما بنا به داده‌های به‌دست‌آمده و دقت اندازه‌گیری آن‌ها، این سختی بیشتر، معنی‌دار و قابل استناد نیست. دامنه تغییرات سختی در فاصله ۹۰ تا ۱۱۵ میکرون از سطح پوشش، گسترده است. این مسئله می‌تواند ناشی از رقیق‌شدگی در اثر فرایند ESD باشد که در ادامه نیز با روبش عنصری خطی^۳، به‌طور دقیق نشان داده شده است. رقیق‌شدگی سبب می‌شود که عدد سختی در این نواحی در محدوده میانی بین پوشش و زیرلایه قرار گیرد [۳۵]. نتایج پروفیل ریزسختی، عدد سختی زیرلایه را ۱۶۰ تا ۱۷۰ ویکرز نشان می‌دهد. در فاصله ۹۵ میکرون از سطح، دو منحنی پروفیل سختی یکدیگر را قطع کرده‌اند. علت آن، کاهش ضخامت پوشش در ESD + HESP نسبت به ESD در شرایط لایه‌نشانی مشابه است؛ چراکه در اثر فرایند ساچمه‌زنی پرنرژ، ضخامت ماده لایه‌نشانی شده در اثر کار مکانیکی و فرسایش سطح، کاهش

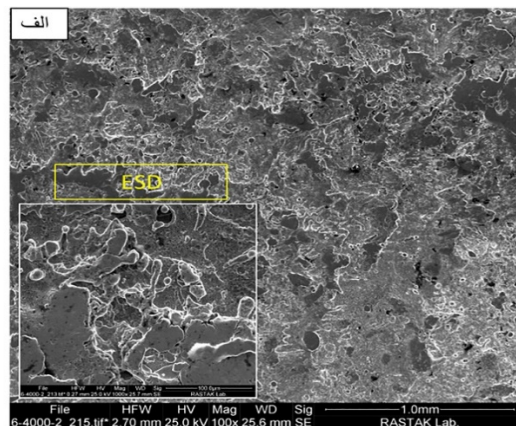
¹ Dilution

² Electro Spark Position + High Energy Shot Peening

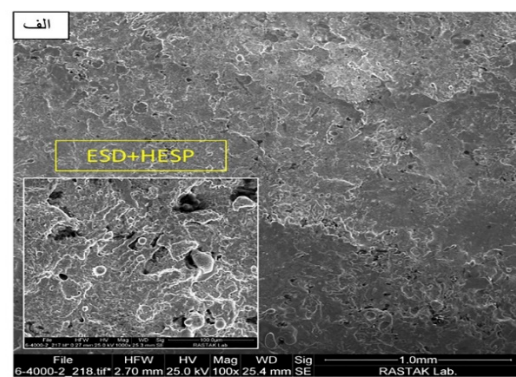
³ Line Scan

شکل (۷)، تصاویر SEM مقطع برشی پوشش استلایت ۶ را روی زیرلایه فولاد زنگ‌زن آستنیتی SS316 نشان می‌دهد. شکل ۷-الف، تصویر کلی مقطع برش و شکل ۷-ب، تصویر مقطع پوشش استلایت در بزرگنمایی بالاتر را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۷-الف و ب، ناپیوستگی‌هایی مثل تخلخل^۱، نقص در ذوب‌شدگی^۲ و ترک^۳ قابل مشاهده است. هرکدام از این عیوب می‌تواند منشأ تخریب پوشش و کاهش عملکرد آن باشد. نقص در ذوب‌شدگی، ناپیوستگی خطرناک و مخربی است. این عیب، زمانی اتفاق می‌افتد که قطره مذاب که از سر الکتروود جدا و به سمت سطح پرتاب می‌شود، دمای لازم را برای امتزاج و ایجاد پیوند متالورژیکی با لایه‌های زیرین نداشته باشد و یا این‌که آلودگی سطح زیر لایه ناشی از عدم حفاظت صحیح از سطح پوشش، امکان امتزاج را سلب نماید [۱۷]. این عیب، به دلیل شکل کشیده‌ایی که دارد، باعث تمرکز تنش در نوک ناحیه ناپیوسته شده و نسبت به بارگذاری کششی حساس است و سبب تسریع در تخریب پوشش می‌شود. عیب دیگری که در این پوشش قابل مشاهده است، ترک است. به دلیل ماهیت کشیده و تمرکز تنش در رأس آن و در راستای عمود بر سطح پوشش، از عیوب بسیار مخرب محسوب می‌شود. به دلیل ماهیت ترک و منشأ متالورژیکی آن، معمولاً این عیب در روش ESD در جهت انجامد اتفاق می‌افتد [۱۸]. ابراهیم‌نیا و همکارانش [۱۷] در پژوهشی مرتبط نشان دادند که جهت انجامد مرجح در ESD در راستای کشش گرمایی و عمود بر سطح پوشش است. از طرفی عنوان شده است که عیب ترک در راستای جدایش‌های عنصری ناشی از انجامد است.

یکی دیگر از راهکارهای مناسب برای کاهش این عیوب، چکش‌کاری سطح پس از هر مرحله از پوشش‌دهی است. این روش نیز توسط پژوهشگران و توسعه‌دهندگان متعددی توصیه شده است و از اصطلاح پینینگ^۴ برای آن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این شیوه، ضمن کور کردن ترک‌ها و نقص در ذوب‌شدگی، باعث چگال‌تر شدن پوشش شده و با نشست تنش‌های پسماند فشاری در سطح، تنش‌های پسماند کششی ناشی از فرایند ESD را آزاد می‌کند و



شکل ۵. مشخصه‌های زبری سطح پوشش استلایت لایه‌نشانی شده به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی (ESD) (الف) تصویر SEM از سطح پوشش در دو بزرگنمایی (ب) منحنی زبری‌سنجی لیزری سطح به همراه مشخصه‌های سنجش زبری



شکل ۶. مشخصه‌های زبری سطح پوشش استلایت لایه‌نشانی شده به روش لایه‌نشانی جرقه الکتریکی به همراه ساچمه‌زنی پرنرژی سطح (ESD + HESP) (الف) تصویر SEM از سطح پوشش در دو بزرگنمایی (ب) منحنی زبری‌سنجی لیزری سطح به همراه مشخصه‌های سنجش زبری

¹ Porosity

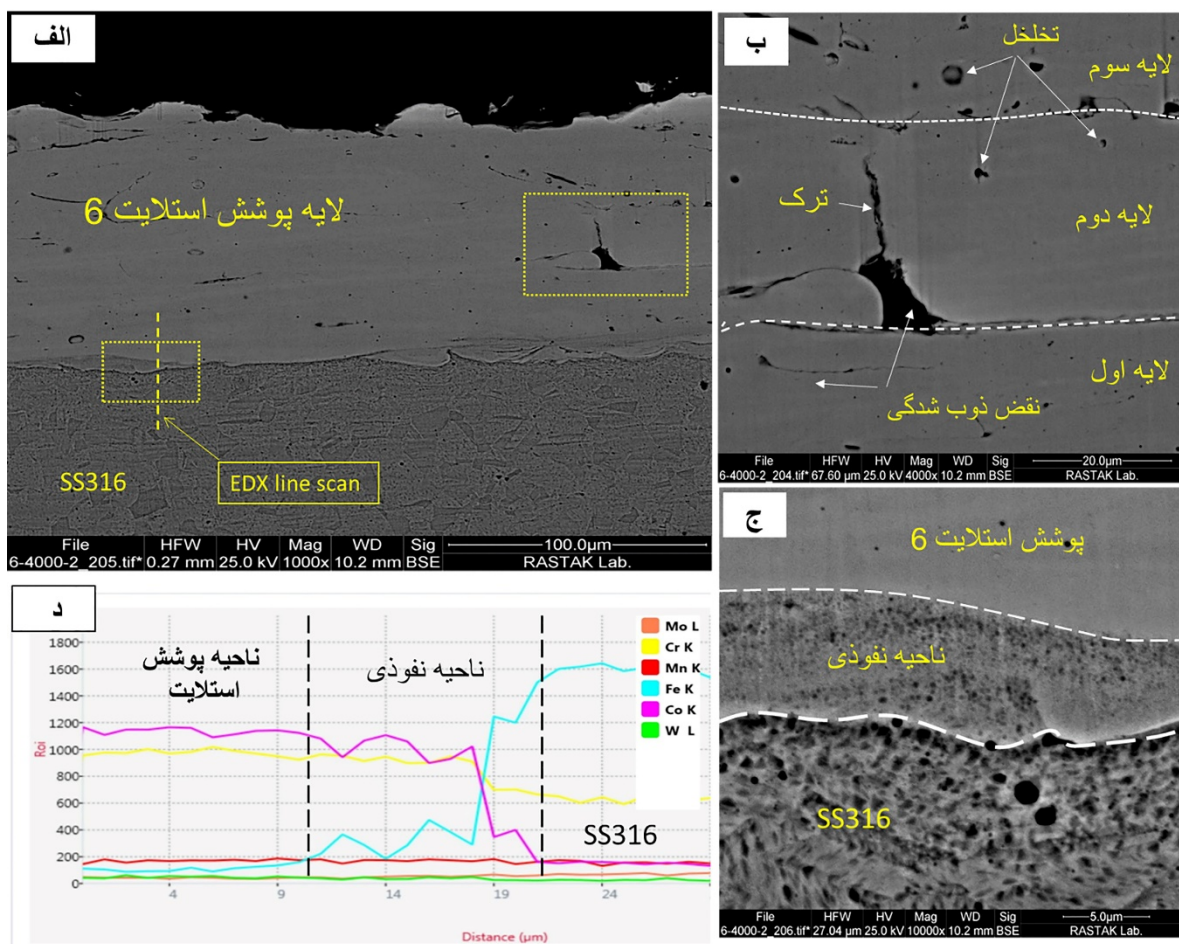
² Lack of Fusion

³ Crack

⁴ Peening

گذار این است که حداقل نفوذ عناصر آلیاژی از پوشش به زیرلایه و برعکس اتفاق می‌افتد. این مسئله به‌ویژه برای ایجاد پوشش‌های غیرهمجنس که ترکیبات شیمیایی آن‌ها در کنار هم قابلیت تشکیل ترکیبات بین‌فلزی ترد را دارند، بسیار مناسب است؛ چراکه احتمال ایجاد این ترکیبات مضر را کاهش می‌دهد [۱۷]. لازم به ذکر است که ترکیبات بین‌فلزی به دلیل ساختارهای ترد و شکننده‌ای که دارند، می‌توانند سبب تردشدگی و کاهش جوش‌پذیری بین دو آلیاژ فلزی غیرهمجنس شوند؛ بنابراین به‌حداقل رساندن رقیق‌شدگی به‌وسیله فرایند لایه‌نشانی جرقه الکتریکی می‌تواند بسیار مؤثر باشد.

تا حدود قابل توجهی ناپیوستگی‌ها را کاهش می‌دهد. یکی از اصلی‌ترین مزیت‌های روش ESD به‌عنوان یک روش پوشش‌دهی فلز روی فلز، ایجاد پیوند متالورژیکی بین پوشش و زیرلایه است که با توجه به گرمای محتوای ذاتی فرایند ESD، این پیوند متالورژیکی با رقیق‌شدگی کمی همراه است و ناحیه گذار در آن، ضخامت بسیار کمی دارد. شکل ۷-ج، نشان‌دهنده تصویر نزدیک‌تری از شکل ۷-الف است و ناحیه‌گذار و رقیق‌شدگی را به‌طور متمرکزتری نشان می‌دهد. به‌منظور درک بهتر رقیق‌شدگی در ناحیه گذار، آنالیز عنصری خطی آن در شکل ۷-د، نمایش داده شده است. همان‌طور که در این تصاویر قابل مشاهده است، طول ناحیه گذار در بیشینه حالت خود در حدود ۱۰ میکرون است. مزیت کوچک بودن ناحیه



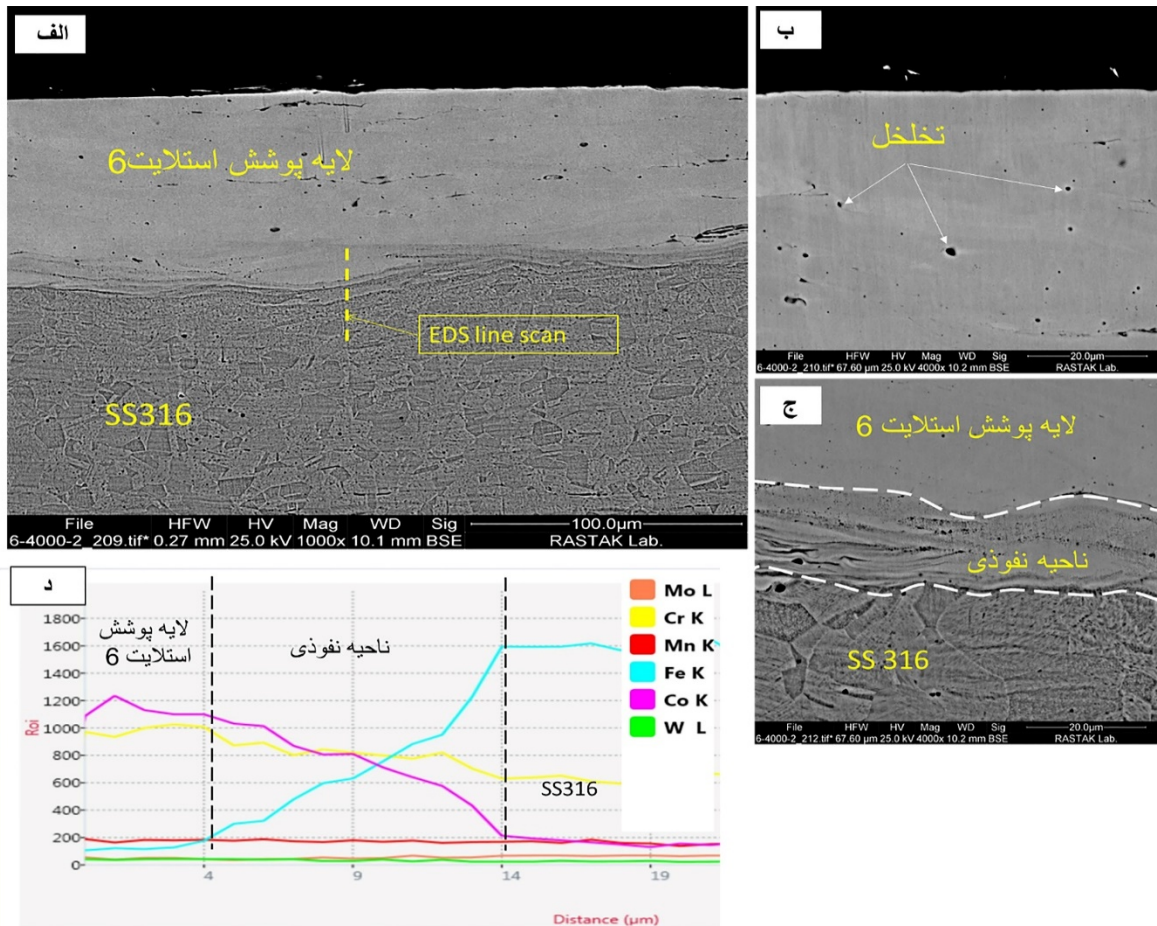
شکل ۷. تصاویر SEM پوشش استنلایت لایه‌نشانی شده به روش ESD روی سطح فولاد زنگ‌نزن آستینیتی الف) تصویر کلی مقطع عرضی پوشش و زیرلایه، ب) پوشش و عیوب آن، ج) لایه نفوذی بین پوشش و فلز پایه و د) آنالیز عنصری خطی EDS در ناحیه گذار از پوشش به زیرلایه

ساجمه‌زنی پرنرزی، عیوب ناشی از فرایند ESD مانند تخلخل و نقص در ذوب‌شدگی، از بین نرفته است و همچنان

شکل (۸)، تصویر برش عرضی پوشش را در حالت ESD + HESP نشان می‌دهد. در شکل ۸-الف، بعد از

سایشی آن قابل ملاحظه است. شکل ۸-ب، نشان‌دهنده تصویری با بزرگنمایی بیشتر از شکل ۸-الف است. شکل ۸-ج، لایه نفوذی بین پوشش و فلز پایه و شکل ۸-د، شرایط ناحیه گذار و نفوذ بین پوشش و زیرلایه را در ESD + HESP نشان می‌دهد. تفاوت قابل ملاحظه‌ای با شرایط ESD وجود ندارد و شرایط ناحیه نفوذی و رقیق‌شدگی در هر دو فرایند مشابه است. تصویر ۸-د، روبش عنصری خطی را نشان می‌دهد و همان‌طور که در این تصویر نیز مشاهده می‌شود، بیشینه ناحیه رقیق‌شدگی در فرایند ESD + HESP همانند فرایند ESD، ۱۰ میکرون است و ناحیه متأثر از حرارت و تغییرات متالورژیکی در زیرلایه، قابل شناسایی نیست.

قابل مشاهده است؛ با این وجود بررسی و مقایسه شکل ۸-الف و ۷-الف، نشان می‌دهد که عیوبی همچون نقص در ذوب‌شدگی، به اصطلاح کور شده‌اند. فرایند پینینگ قادر است تا میزان تأثیر تخریبی تخلخل و دیگر عیوب پوشش‌ها را کاهش دهد. فرایندهای متعددی با هدف پینینگ به کار می‌رود که می‌توان به ضربه‌زنی با شوک لیزری و ساچمه‌زنی مکانیکی اشاره کرد [۲۵]. از طرفی لازم به ذکر است که میزان تأثیرگذاری فرایند ساچمه‌زنی در این پژوهش بسیار قابل ملاحظه است و همان‌طور که نتایج نیز نشان می‌دهند، درصد عیوب و تأثیر مخرب آن‌ها کاهش یافته است. این مسئله در کنار کاهش زبری سطح، افزایش سختی و استحکام پوشش، در مجموع امکان بهبود خواص پوشش را فراهم می‌کند که در عملکرد



شکل ۸. تصاویر SEM برش عرضی پوشش استتالیت لایه‌نشانی شده به روش ESD روی سطح فولاد زنگ‌نزن آستینیتی بعد از ساچمه‌زنی پرنرژی سطح (الف) تصویر کلی مقطع عرضی پوشش و زیرلایه در نمای ۱۰۰۰ برابر، (ب) پوشش و عیوب آن، (ج) لایه نفوذی بین پوشش و فلز پایه و (د) آنالیز عنصری خطی EDS در ناحیه گذار از پوشش به زیرلایه

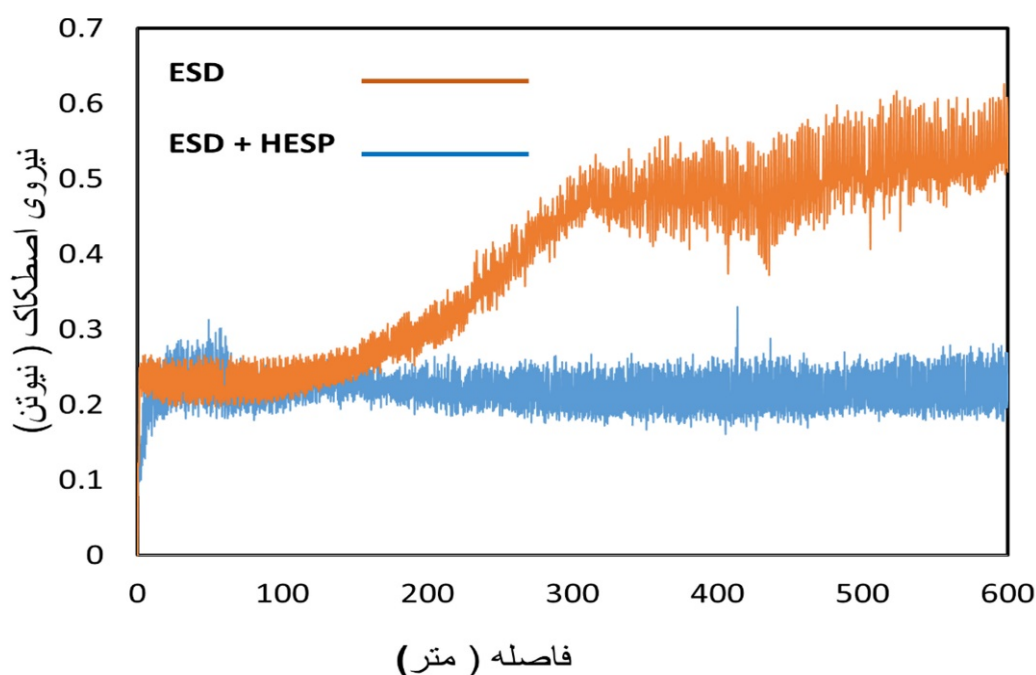
اعمال شده به روش ESD + HESP نشان می‌دهد. نیروی اصطکاک درحین سایش سطح پوشش ایجاد شده به

شکل (۹)، نمودار تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به مسافت سایش را در ارزیابی سایشی پوشش استتالیت ۶

تا ۶۰۰ متری نیز اعدادی بیش از ۰/۴۸ نیوتن را نشان می‌دهد که با شیبی ملایم، در فاصله ۶۰۰ متری از مسیر سایش، این عدد به ۰/۶ نیوتن می‌رسد. دامنه نوسان نقطه‌ای نیروی اصطکاک یکی دیگر از مشخصه‌های نمودار ESD است. این دامنه از شروع تا ۳۰۰ متری مسیر سایش، محدود است؛ درحالی‌که از فاصله ۳۰۰ تا ۶۰۰ متری به شکل قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و گاهی به ۰/۱ نیوتن نیز می‌رسد. نوسانات گسترده نیروی اصطکاک معمولاً به سازوکار سایش چسبان و یا کندگی پوشش حین سایش، ارتباط داده می‌شود [۳۶ و ۳۷].

روش ESD + HESP، به‌طور متوسط ۰/۲۲ نیوتن است و دامنه نوسان پایداری دارد. به‌طور کلی پوشش ESD + HESP، رفتار سایشی پایداری را تا فاصله ۶۰۰ متر نشان می‌دهد.

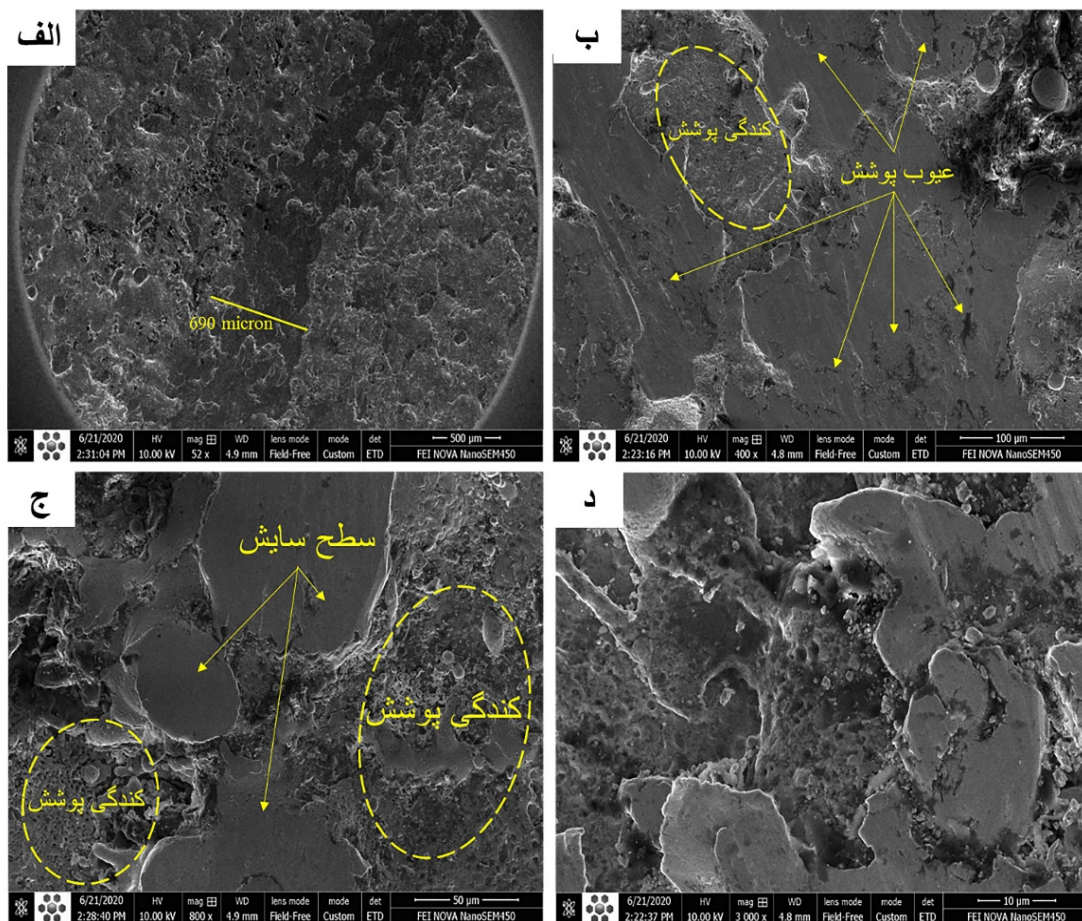
در شکل (۹)، نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی اصطکاک روی سطح پوشش اعمالی به روش ESD، نشان می‌دهد که نیروی اصطکاک از لحظه شروع تا فاصله ۱۷۰ متری از مسیر سایش، مشابه با نمونه ESD + HESP است. این نیرو در فاصله ۱۷۰ تا ۳۰۰ متری از مسیر سایش با شیب مشخصی از ۰/۲۲ به ۰/۴۸ نیوتن افزایش یافته و در ادامه، در فاصله ۳۰۰



شکل ۹. نمودار نیروی اصطکاک اندازه‌گیری شده در مسافت‌های سایشی متفاوت برای سطح پوشش استلایت ۶ اعمال شده روی سطح فولاد زنگ‌نزن آستینیتی به روش‌های لایه‌نشانی جرقه الکتریکی ESD و لایه‌نشانی جرقه الکتریکی به همراه ساچمه‌زنی پراثری سطح

کندگی‌ها را می‌توان به گسترش نوسانات نیروی اصطکاک در نمودار شکل (۹)، در ناحیه ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر از نمودار ESD مرتبط دانست. به‌طور کلی در توضیح رفتار سایشی پوشش ESD می‌توان گفت که افزایش نیروی اصطکاک در فاصله ۱۷۰ تا ۳۰۰ متری از مسیر سایش، نشان از شروع این کندگی‌هاست که در اثر آن، زبری افزایش چشمگیری یافته و سبب افزایش نیروی اصطکاک بین ساینده و سطح سایش می‌شود. در نهایت نرخ این کندگی‌ها در مسافت ۳۰۰ متر به شدت کاهش یافته و شیب افزایش نیروی اصطکاک کند می‌شود.

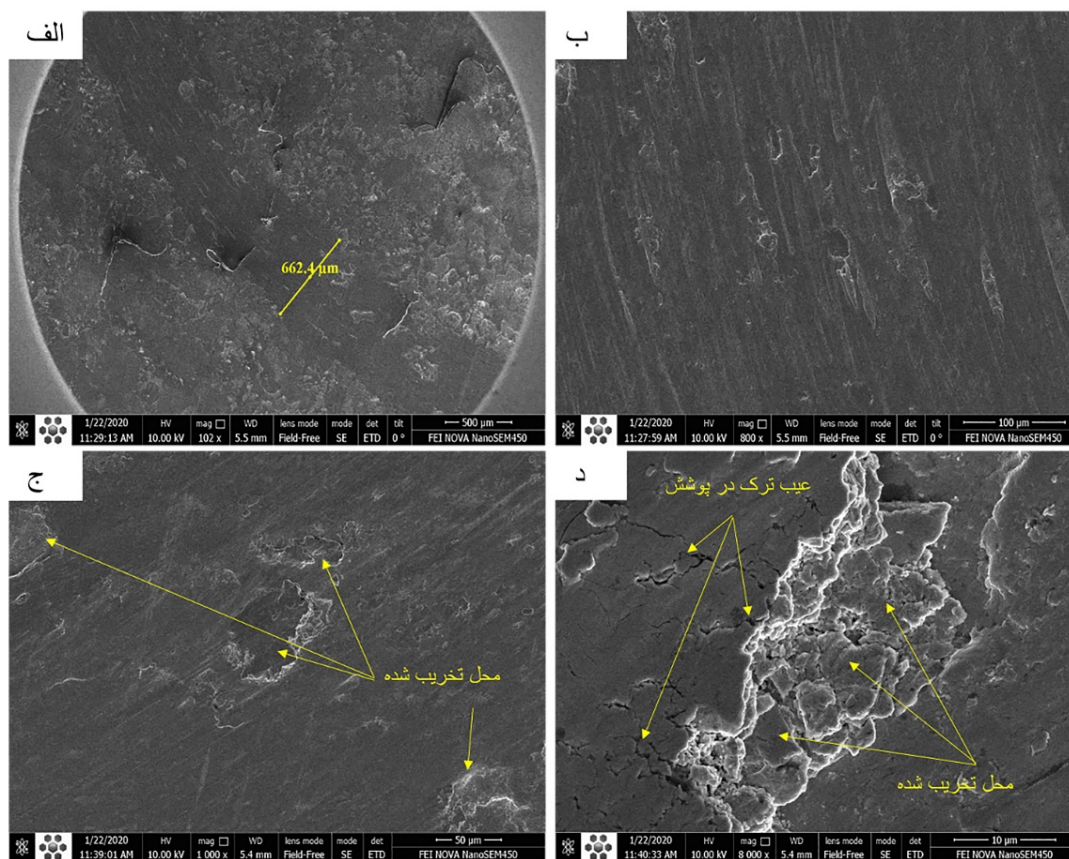
شکل (۱۰)، سطح سایش پوشش استلایت ۶ اعمال شده به روش ESD را نشان می‌دهد. شکل ۱۰-الف، تصویر کلی از ناحیه تحت سایش را نمایش می‌دهد. عرض مسیر سایش، ۶۹۰ میکرون اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۰-ب، بررسی‌های دقیق‌تری از سطح مسیر سایش را نشان می‌دهد که در نمونه پوشش استلایت اعمالی به روش ESD میزان کندگی‌ها در اثر سایش بسیار زیاد است. ترد بودن ساختار پوشش استلایت ۶ در کنار عیوب متعدد موجود در پوشش اعمال شده به روش ESD، عامل مؤثری در افزایش کندگی‌هاست؛ به‌نحوی که قسمت‌های متعددی در مسیر سایش دچار کندگی شده‌اند. این



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM از سطح مسیر سایش پوشش استلایت ۶ اعمال شده به روش ESD، (الف) تصویر کلی سطح و مسیر سایش، ب و ج) مواضع تحت سایش و د) محل کنده شدن پوشش استلایت در اثر فرایند سایش

هستند. وجود این عیوب در کنار ماهیت ترد پوشش استلایت ۶، سبب کندگی پوشش به صورت موضعی در سطح مسیر سایش شده است که این مسئله می‌تواند توجیه‌کننده نوسانات نیروی اصطکاک در نمودار شکل ۱۰ نیز باشد. به طور معمول وجود این نوع عیوب در سطح پوشش، عملکرد سطح سایش را کاهش می‌دهد. تصویر ۱۱-د، به طور مشخص ناحیه‌ای از پوشش را نشان می‌دهد که طی فرایند سایش دچار کندگی شده است. مقایسه کاهش وزن بین پوشش استلایت ۶ اعمال شده به روش ESD و ESD + HESP نشان می‌دهد که میزان کاهش وزن نمونه ESD (۰/۱۸۴ گرم) بیشتر از نمونه ESD + HESP (۰/۰۷۳ گرم) است که این مسئله نیز گواه بر تحلیل صورت گرفته بر رفتار سایشی این دو پوشش است. به طور کلی پوشش استلایت ۶ ایجاد شده به روش ESD + HESP رفتار سایشی مناسب تری را نسبت به روش ESD نشان می‌دهد.

شکل (۱۱)، تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح سایش پوشش اعمالی به روش ESD + HESP را نشان می‌دهد. عرض مسیر سایش در شکل ۱۱-الف، ۶۶۳ میکرون اندازه‌گیری شده است. تصویر ۱۱-ب و ج، به ترتیب مسیر سایش را با بزرگنمایی ۸۰۰ و ۱۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. وجود شیارهای کشیده در مسیر حرکت ساینده، نشان از وجود سایش خراشان در این نمونه است. از طرفی کندگی‌هایی در سطح مسیر دیده می‌شود که این مسئله را می‌توان به عیوب موجود در پوشش استلایت ایجاد شده به روش ESD + HESP ارتباط داد. با هدف درک بهتر این مسئله، تصویری با بزرگنمایی ۸۰۰۰ برابر، از یکی از این نواحی که شکل تخریبی آن با شکل شیار کشیده در مسیر سایش متفاوت است و شکلی لکه‌ای دارد، تهیه شد. شکل ۱۱-د، نمای ۸۰۰۰ برابر از مسیر سایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر به خوبی قابل مشاهده است، این نواحی دارای ترک‌های ریز متعدد



شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مسیر سایش پوشش استالایت ۶ اعمال شده به روش HESP + ESD. تصویر کلی (الف) و سطح و مسیر سایش، ب و ج) مواضع تحت سایش و د) محل کنده شدن پوشش استالایت در اثر فرایند سایش

۴- نتیجه گیری

روش لایه نشانی جرقه الکتریکی (ESD) قادر است تا لایه پوششی استالایت ۶ را با ضخامت‌های چند ده میکرون روی سطح فولاد زنگ‌نزن آستنیتی لایه نشانی کند؛ اما به طور کلی، پوشش ایجاد شده با محدودیت‌هایی نظیر تخلخل، نقص در ذوب‌شدگی و ترک مواجه است. به کارگیری روش ساچمه‌زنی پرانرژی در شرایط کنترل شده، ضمن کاهش آثار تخریبی عیوب موجود در پوشش اعمال شده به روش جرقه الکتریکی، باعث بهبود خواص سایشی، افزایش سختی و کاهش زبری سطح پوشش استالایت می‌شود.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت دانشگاه افسری امام علی، به ویژه جناب آقای دکتر عبدالرضا محمدی، تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

- Gao, W., Lian, Y., Xie, G., Huang, J., Zhang, L., Ma, M., Zhao, C., Zhang, Z., Liu, K., Zhang, S., Zhang, J., "Study of dry sliding wear characteristics of stellite 6B versus AISI M2 steel at various sliding velocities", *Wear*, Vol. 402-403, (2018), 169-178. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.02.015>
- Bartkowski, D., Bartkowska, A., "Wear resistance in the soil of Stellite-6/WC coatings produced using laser cladding method", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 64, (2017), 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.12.013>
- Wood, P. D., Evans, H. E., Ponton, C. B., "Investigation into the wear behaviour of Stellite 6 during rotation as an unlubricated bearing at 600 °C", *Tribology International*, Vol. 44, (2011), 1589-159. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.02.011>
- Gülsoy, H. Ö., Zgün, Ö. Ö., Bilketay, S., "Powder injection molding of Stellite 6 powder: Sintering, microstructural and mechanical properties", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 651, (2016), 914-924. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.058>
- Houdková, Š., Pala, Z., Smazalová, E., Vostřák, M., Česánek, Z., "Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 318, (2017), 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.012>
- Cinca, N., López, E., Dosta, S., Guilemany, J. M., "Study of stellite-6 deposition by cold gas spraying", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 232, (2013), 891-898. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.120>
- Sassatelli, P., Bolelli, G., Lassinantti Gualtieri, M., Heinonen, E., Honkanen, M., Lusvarghi, L., Manfredini, T., Rigon, R., Vippola, M., "Properties of HVOF-sprayed Stellite-6 coatings", *Surface*

21. Pliszka, I., Radek, N., "Corrosion resistance of WC-Cu coatings produced by electrospark deposition", *Procedia Engineering*, Vol. 192, (2017), 707-712. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.122>
22. Salmaliyan, M., Malek Ghaeni, F., Ebrahimnia, M., "Effect of electro spark deposition process parameters on WC-Co coating on H 13 steel", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 321, (2017), 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.04.040>
23. Lima, C. R. C., Belém, M. J. X., Fals, H. D. C., Rovere, C. A. D., "Wear and corrosion performance of Stellite 6® coatings applied by HVOF spraying and GTAW hotwire cladding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 284, (2020), 116734. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116734>
24. Kalentics, N., Sohrabi, N., Tabasi, H. G., Griffiths, S., Jhabvala, J., Leinenbach, C., Burn, A., Logé, R. E., "Healing cracks in selective laser melting by 3D laser shock peening", *Additive Manufacturing*, Vol. 30, (2019), 100881. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100881>
25. Kalentics, N., de Seijas, M. O. V., Griffiths, S., Leinenbach, C., Logé, R. E., "3D laser shock peening—A new method for improving fatigue properties of selective laser melted parts", *Additive Manufacturing*, Vol. 33, (2020), 101112. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101112>
26. Bikdeloo, R., Farrahi, G. H., Mehmanparast, A., Mahdavi, S. M., "Multiple laser shock peening effects on residual stress distribution and fatigue crack growth behaviour of 316L stainless steel", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 105, (2020), 102429. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102429>
27. Alikhani Chamgordani, S., Miresmaeili, R., Aliofkhaezai, M., "Improvement in tribological behavior of commercial pure titanium (CP-Ti) by surface mechanical attrition treatment (SMAT)", *Tribology International*, Vol. 119, (2018), 744-752. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.044>
28. Farzan, F., Shahverdi, H. R., Malek Ghaeni, F., "Effect of wet and dry conditions on wear behavior of amorphous coating of Fe-Cr-Mo-Nb-C-B", *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 15, (2018), 76-87. <https://doi.org/10.22068/ijmse.15.2.76>
29. Riveiro, A., Maçon, A. L. B., del Val, J., Comesaña, R., Pou, J., "Laser surface texturing of polymers for biomedical applications", *Frontiers in Physics*, Vol. 6, (2018), 149-157. <https://doi.org/10.3389/fphy.2018.00016>
30. Ebrahimi, A., Esfahani, H., Fattah-alhosseini, A., Imantala, O., "Study on ceramic composite TiB/TiB₂ coating mechanism on commercial pure titanium and its osteoconduction", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 7, (2018), 35-42. <https://doi.org/10.30501/jamt.2018.91740>
31. Farnoush, H., "Corrosion and bonding strength enhancements in bioglass coating on CP-Ti by using a combination of micro-arc oxidation and electrophoretic deposition", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 6, (2017), 61-69. <https://doi.org/10.30501/jamt.2017.70356>
32. Fereiduni, E., Ghasemi Banadkouki, S. S., "Improvement of mechanical properties in a dual-phase ferrite-martensite AISI4140 steel under tough-strong ferrite formation", *Materials & Design*, Vol. 56, (2014), 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.005>
33. Yao, J., Li, Z., Li, B., Yang, L., "Characteristics and bonding behavior of Stellite 6 alloy coating processed with supersonic laser deposition", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 661, (2016), 526-534. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.077>
- and *Coatings Technology*, Vol. 338, (2018), 45-62. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.078>
8. Brownlie, F., Anene, C., Hodgkiess, T., Pearson, A., Galloway, A. M., "Comparison of hot wire TIG Stellite 6 weld cladding and lost wax cast Stellite 6 under corrosive wear conditions", *Wear*, Vol. 404-405, (2018), 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.03.004>
9. Rajeev, G. P., Rahul, M. R., Kamaraj, M., Bakshi, S. R., "Microstructure and high temperature mechanical properties of wire arc additively deposited Stellite 6 alloy", *Materialia*, Vol. 12, (2020), 100724. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100724>
10. Apay, S., Gulenc, B., "Wear properties of AISI 1015 steel coated with Stellite 6 by microlaser welding", *Materials & Design*, Vol. 55, (2014), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.056>
11. Kreivaitis, R., Žunda, A., Kupčinskas, A., Jankauskas, V., "A study of tribological behaviour of W-Co and Cu electro-spark alloyed layers under lubricated sliding conditions", *Tribology International*, Vol. 103, (2016), 236-242. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.010>
12. Xie, Y. J., Wang, M. C., "Microstructural morphology of electrospark deposition layer of a high gamma prime superalloy", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, (2006), 691-698. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.034>
13. Ruizhu, Z., Jingrui, L., Dakao, Y., Yuanyuan, Z., "Mechanical properties of WC-8Co wear-resistant coating on pump impellers surface by electro-spark", *Rare Metal Materials and Engineering*, Vol. 44, (2015), 1587-1590. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(15\)30097-7](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(15)30097-7)
14. Ding, Y., Liu, R., Yao, J., Zhang, Q., Wang, L., "Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 329, (2017), 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.018>
15. Durdu, S., Aktuğ, S. L., Korkmaz, K., "Characterization and mechanical properties of the duplex coatings produced on steel by electro-spark deposition and micro-arc oxidation", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 236, (2013), 303-308. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.10.004>
16. Baghjari, H., Malek Ghaini, F., Shahverdi, H., Mapelli, C., Barella, S., Ripamonti, D., "Laser welding of niobium to 410 steel with a nickel interlayer produced by electro spark deposition", *Materials & Design*, Vol. 107, (2016), 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.022>
17. Ebrahimnia, M., Malek Ghaini, F., Xie, Y. J., Shahverdi, H., "Microstructural characteristics of the built up layer of a precipitation hardened nickel based superalloy by electrospark deposition", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 258, (2014), 515-523. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.045>
18. Liu, D., Gao, W., Li, Z., Zhang, H., Hu, Z., "Electro-spark deposition of Fe-based amorphous alloy coatings", *Materials Letters*, Vol. 61, (2007), 165-166. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.04.042>
19. Rastkerdar, E., Aghajani, H., Kianvash, A., Sorrell, C. C., "Parametric optimization of electro spark microwelding of aluminum clad steel", *International Journal of Engineering*, Vol. 31, (2018), 1151-1146. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.07a.20>
20. Fakoori Hasanabadi, M., Malek Ghaini, F., Ebrahimnia, M., Shahverdi, H. R., "Production of amorphous and nanocrystalline iron based coatings by electro-spark deposition process", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 270, (2015), 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.016>