

بررسی خواص سایشی روکش‌های فولاد ۱۷-۴PH و استلایت ۶ ایجادشده

با فرایند رسوب‌نشانی مستقیم لیزری روی زیرلایه فولاد ۱۷-۴PH

محمد رضا برهانی، سید رضا شجاع رضوی، فرید کرمانی، سید مسعود برکت، مرتضی ایلانلو،

محمد عرفان منش، حامد نادری سامانی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱)

چکیده

روکش‌کاری لیزری، فرایندی بین‌رشته‌ای است که از فناوری لیزر، طراحی و تولید به کمک رایانه، دستگاه موقعیت‌دهی مجهز به نرم‌افزار و تغذیه‌کننده ماده همراه با نازل بهره می‌گیرد. فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH کاربردهای گسترده‌ای در صنعت از جمله پره‌های توربین گازی دارد. با توجه به نوع کارایی این پره‌ها پس از مدتی در اثر برخورد با ذرات و آلودگی‌های محیطی دچار سایش و خوردگی می‌شود، بنابراین با توجه به هزینه بالای تعویض قطعه باید بازسازی شود. در این پژوهش خواص سایشی پوشش‌های فولاد ۱۷-۴ PH و استلایت ۶ روی زیرلایه فولاد ۱۷-۴ PH مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد: کاهش جرم ناشی از سایش پوشش استلایت ۶ در مقایسه با زیرلایه در حدود ۸۸ و ۹۳ درصد به ترتیب در بارگذاری‌های ۶ و ۵۴ نیوتن کاهش یافته است. همچنین کاهش جرم ناشی از سایش پوشش فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH در مقایسه با زیرلایه در بارگذاری ۶ نیوتن بطور یکسان و در بارگذاری ۵۴ نیوتن ۲۲ درصد کاهش یافته است. پوشش فولاد زنگ‌نزن و زیرلایه از اصطکاک بیشتری نسبت به پوشش استلایت ۶ برخوردارند. همچنین مکانیزم سایش پوشش فولاد زنگ‌نزن و زیرلایه به صورت خراشان و چسبان و مکانیزم سایش پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۶ نیوتن سایش خراشان و در بارگذاری ۵۴ نیوتن سایش ورقه‌ای می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ‌نزن ۱۷PH-۴، استلایت ۶، خواص سایشی، رسوب‌نشانی مستقیم لیزری.

Evaluation of wear properties of 17-4ph steel and satellite 6 coatings created by direct laser deposition process on 17-4ph steel substrate

Mohammad Reza Borhani, Seyed Reza Shoja Razavi, Farid Kermani, Seyed Masoud Morteza Ilanlou, Mohammad Erfan Manesh, Hamed Naderi Samani

Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology

(Received 17 July 2022, accepted 23 August 2022)

Abstract

Laser cladding is an interdisciplinary process that uses laser technology, design and, production with the help of a computer, a positioning device equipped with software and, a material feeder with a nozzle. 17-4 PH stainless steel has wide applications in the industry, including gas turbine blades. Due to the efficiency of these blades, after some time, due to contact with particles and environmental pollution, they will wear and corrode; therefore, due to the high cost of replacing the part, it must be rebuilt. In this research, the wear properties of 17-4 PH and Stellite6 steel claddings on 17-4 PH steel substrate were investigated. The results showed that the mass reduction due to the wear of the Stellite6 cladding compared to the substrate has decreased by about 88 and 93% in loadings of 6 and 54N, respectively. Also, the reduction in mass due to the wear of 17-4 PH stainless steel cladding as the substrate at the loading of 6N, which is reduced by 22% at the loading of 54N. The stainless-steel cladding and the substrate have more friction than the Stellite6 cladding. Also, the wear mechanism of the stainless-steel cladding and the substrate is scratchy and sticky and, mechanism of the Stellite6 cladding is scratch wear at 6N load and sheet wear at 54N load.

Keywords: 17-4 PH Stainless Steel, Stellite6, Wear Properties, Direct Laser Deposition.

E-mail of Corresponding author: moh_borhani65@mut.ac.ir.

مقدمه

فولاد ۴PH-۱۷ معروف‌ترین فولاد زنگ نزن رسوب سخت می‌باشد و در دسته مارتنزیتی قرار می‌گیرد. پایه و اساس این فولاد، ۱۷ درصد کروم است. استحکام و سختی بالا، مقاومت به خوردگی مناسب از ویژگی‌های این فولاد هستند. آلیاژهای استلایت، آلیاژهای پایه کبالت هستند و مهم‌ترین عناصر آلیاژی آن‌ها کربن، کروم، تنگستن، مولیبدن و نیکل می‌باشد. همچنین این آلیاژها ضریب اصطکاک پایینی داشته و نیاز به روان کاری کمی دارند. هر دسته از آلیاژهای استلایت برای کاربرد خاص طراحی می‌شوند. به‌عنوان مثال برای مقاومت به خوردگی بالا از گریدهای دارای کروم ۲۸ تا ۳۲ درصد استفاده می‌شود [۱-۲]. با استفاده از فرایند رسوب‌نشانی مستقیم لیزری می‌توان مواد مختلفی را روی سطح قطعات روکش داد. پس از انجماد سریع در فرایند، روکشی با ترکیب شیمیایی یکنواخت ایجادشده و فصل مشترک روکش با زیرپایه از پیوند متالورژیکی مناسبی برخوردار می‌شود. این فرایند از دقت کافی برخوردار بوده و میزان حرارت ورودی و آمیختگی در این فرایند کم می‌باشد و حداقل اعوجاج در فلز پایه ایجاد می‌شود. این ویژگی‌ها از طریق فرایندهای معمولی دیگر مانند جوشکاری یا پاشش حرارتی قابل دستیابی نیست [۳-۴].

گولسوی^۱ [۵] رفتار سایشی فولاد ۴PH-۱۷ را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مسافت سایش، کاهش جرم افزایش یافته و نرخ سایش کاهش یافته است. در تحقیقی مشابه لی^۲ [۶] و همکاران مقاومت به سایش فولاد ۴PH-۱۷ را بررسی کردند. در ابتدای آزمون، فولاد تحت بار اعمالی ۳۰ نیوتن قرار گرفته و تنش تماسی بسیار بالایی تحمل کرده است؛ در نتیجه شکستگی خشنی در سطح سایش ایجاد شد. به دلیل شکست‌های شدید در

سطح، ذرات ریز سایشی ایجاد شد. این ذرات ایجادکننده خش‌های سطحی موازی روی سطح سایش بودند. با توجه به افزایش مسافت سایشی ذرات جداشده بین نمونه و پین سایشی قرارگرفته و به سایش خراشان بیشتر کمک می‌کنند اضافه بر این، وجود ذرات اکسیدی که با میکروگراف دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص شده است، اثبات‌کننده سایش اکسیدی در طی آزمون سایش نیز می‌باشد. سایش اکسیدی به دلیل جدا شدن مواد سطحی در حین آزمون سایش و در معرض اکسید قرار گرفتن سطح ماده ایجادشده است. در اثر افزایش مسافت سایشی، ذرات اکسیدی بیشتری در تولیدشده است. به‌طور کلی مکانیزم غالب برای سایش، سایش خراشان به همراه سایش اکسیدی است.

اگر چه فولاد زنگ نزن ترکیب منحصر به فردی از خواص مکانیکی و چقرمگی دارد و به همین دلیل به طور گسترده در مصارف فراوان به کار می‌رود، اما مقاومت سایشی ضعیف این نوع از فولادها محدودیت‌های جدی برای کاربردهای آن ایجاد کرده است. برای غلبه بر این مشکل آلیاژهای استلایت به عنوان پوشش فولاد در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. به عنوان مثال گزارش شده است که روکش کاری لیزری فولاد زنگ‌نزن L۳۱۶ با پودر استلایت ۲۱ سختی آن را از ۵۵۰ ویکرز به ۷۵۰ ویکرز افزایش می‌دهد [۷ و ۸].

از متداول‌ترین آلیاژهای مورد استفاده در روکش کاری لیزری جهت بهبود خواص سایشی و خوردگی، آلیاژهای پایه کبالت است. آلیاژ استلایت ۶ یک آلیاژ پایه کبالت است و به خاطر حضور عناصری نظیر کروم مقاومت خوردگی و اکسیداسیون بالایی دارد و تشکیل کاربیدهای M_7C_3 و $M_{23}C_6$ و از طرفی حضور عناصری نظیر تنگستن و مولیبدن از طریق رسوب سختی با تشکیل کاربیدهای MC و M_6C و ترکیبات بین فلزی $Co_3(Mo,W)$ باعث بهبود سختی و استحکام می‌شوند [۹ و ۱۰]. از خصوصیات عمومی آلیاژهای استلایت می‌توان به حفظ استحکام

¹ H. Ozkan Gulsoy

² Ui-jiang Li

فلزی فولاد ۴PH-۱۷ و استلایت ۶ با اهداف تعمیری و مقایسه خواص سایشی آن انجام نشده است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی و مقایسه خواص سایشی روکش فولاد ۴PH-۱۷ و استلایت ۶ روی زیرلایه فولاد ۴PH-۱۷ با استفاده از روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری به عنوان یکی از فرایندهای نوین و پرکاربرد در زمینه تعمیر و بازسازی قطعات می‌باشد.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ به عنوان زیرلایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد با استفاده از آنالیز طیف‌سنجی جرقه‌ای^۳ مشخص و در جدول ۱ بیان شده است. ترکیب شیمیایی این پودرها با توجه به آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی^۴ انجام شده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی (%wt) فولاد ۴PH-۱۷

آلیاژ	Fe	Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Nb	Mo	C
فولاد ۴PH-۱۷	Bal.	۱۵/۸	۴/۹	۷/۹	۰/۹۶	۰/۵۳	۰/۳۷	۰/۲	<۰/۱

جدول ۲. ترکیب شیمیایی (%wt) پودر استلایت ۶

پودر آلیاژ	Fe	Co	Cr	Ni	Cu	Mo	W	Si	Nb	Mn
استلایت ۶	۴	Bal.	۷/۸	۴	-	۱	۴	۱/۵	-	-
فولاد ۴PH-۱۷	Bal.	-	۱۷/۴	۴/۰۵	۲/۹۸	-	-	<۰/۵	۰/۳۵	۰/۰۸۳

مکانیکی در دمای بالا، مقاومت در برابر سایش شدید، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون اشاره نمود. آلیاژ استلایت ۶ پرکاربردترین نوع از سوپر آلیاژهای استلایت است که در ترکیب شیمیایی اسمی آن عناصر کروم، تنگستن، نیکل، آهن، سیلیسیوم، کربن، به همراه مقدار جزئی مولیبدن حضور دارند. تنگستن و مولیبدن، عناصر سخت‌کننده از طریق تشکیل محلول جامد هستند [۱۲ و ۱۱].

چنین ویژگی‌هایی از استلایت ۶، این آلیاژ را به عنوان گزینه مناسبی برای محافظت از اجزاء و قطعات بکار گرفته شده در صنایع هوافضا، پتروشیمی و توربین‌های گازی که نیازمند تلفیقی از خواص شامل مقاومت سایشی، خوردگی و اکسیداسیون به‌ویژه در دماهای بالا هستند، معرفی کرده است [۱۳ و ۱۴].

کیم^۱ [۱۵] و همکاران مقاومت به سایش پوشش استلایت ۶ ایجادشده با جوشکاری قوس پلاسمایی را مورد بررسی قرار دادند. در مورفولوژی سطح ساییده شده از پوشش استلایت ۶ خراش‌ها و همچنین حفره‌هایی در اندازه ۱۰ الی ۲۰ میکرومتر با توزیع تصادفی مشاهده شد؛ ایجاد شدن این حفره‌ها به دلیل جدا شدن کاربیدهای یونکتیک از فاز زمینه می‌باشد. در تحقیقی مشابه، شین^۲ و همکاران [۱۶] مقاومت به سایش پوشش استلایت ۶ ایجاد شده با جوش قوس پلاسمایی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که سطح سائیده شده از پوشش استلایت ۶ از شیارهای زیادی برخوردار است. در این پژوهش اثرمولیبدن در ریزساختارها و خواص مقاومتی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش میزان Mo، میزان کاربیدهای $M_{23}C_6$ و MC افزایش می‌یابد و این تغییر ریزساختاری باعث بهبود خواص مکانیکی مانند سختی و مقاومت به سایش سطح تا ۳۰ درصد می‌شود.

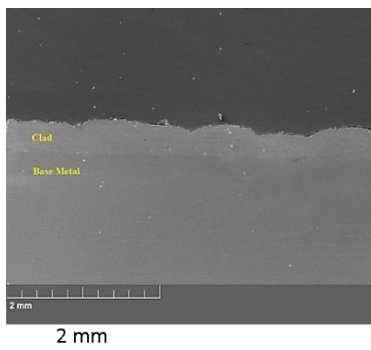
در تحقیقات انجام‌شده هیچ پژوهش جامعی در موضوع روکش‌کاری لیزری فولاد ۴PH-۱۷ به‌وسیله پودرهای

³. Spark Emission Spectroscopy

⁴. Energy Dispersive Spectroscopy (MIRA3TESCAN-XMU)

¹. H.J. Kim

². Jong-Choul Shin

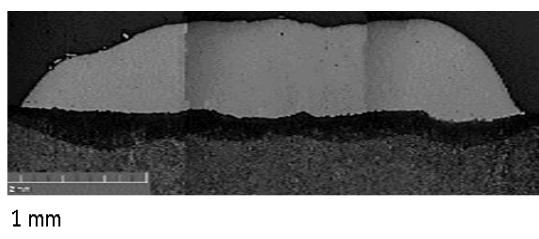


شکل ۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ با هم‌پوشانی ۳۰ درصد.

همچنین روکش‌کاری پودر استلایت با استفاده از توان ۲۵۰ وات، نرخ پاشش پودر ۴۰۰ میلی‌گرم بر ثانیه و سرعت رویش ۳ میلی‌متر بر ثانیه با هم‌پوشانی عرضی ۴۵ درصد انجام شد. اطلاعات هندسی تک‌پاس و هم‌پوشانی این آلیاژ نیز در جدول ۴ و شکل ۳ آورده شده‌است.

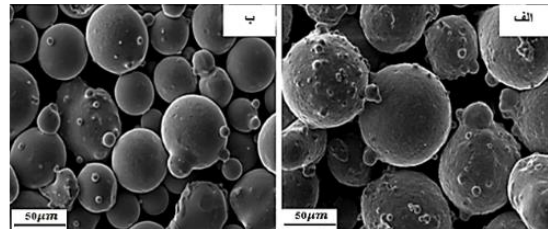
جدول ۴. خصوصیات هندسی روکش تک‌پاس استلایت ۶ روی زیرلایه فولاد ۴PH-۱۷

	۲۲۴ میکرون	ارتفاع روکش
	۱۲۱۵ میکرون	عرض روکش
	۱۹۰ میکرون	تعمیق و تغییرات دما از حرارت
	۱۰ درصد	آمیختگی هندسی



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی پوشش استلایت ۶ با هم‌پوشانی ۴۵ درصد.

در این پژوهش، از پودرهای تجاری استلایت ۶ و فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ ساخته‌شده به‌روش آتمیزاسیون گازی با متوسط اندازه دانه ۶۰ الی ۱۴۰ میکرون مطابق شکل ۱ استفاده شد.



50 μm

شکل ۱: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پودر الف- آلیاژ فولاد ۴PH-۱۷ و ب- آلیاژ استلایت ۶

جهت ساخت نمونه‌ها در این تحقیق از روش رسوب‌نشانی مستقیم لیزری^۱ (DMD) استفاده شد. روکش‌کاری لیزری به‌صورت تک‌مرحله‌ای و پاشش هم‌محور داخل پرتو لیزر انجام شد. روکش‌کاری لیزری فولاد ۴PH-۱۷ روی زیرلایه با استفاده از توان ۱۰۰ وات، نرخ پاشش پودر ۱۸۰ میلی‌گرم بر ثانیه و سرعت رویش ۲ میلی‌متر بر ثانیه با هم‌پوشانی عرضی ۳۰ درصد انجام شد. اطلاعات هندسی تک‌پاس و هم‌پوشانی در جدول ۳ و شکل ۲ آورده شده‌است.

جدول ۳. خصوصیات هندسی روکش تک‌پاس فولاد ۴PH-۱۷ روی زیرلایه فولاد ۴PH-۱۷

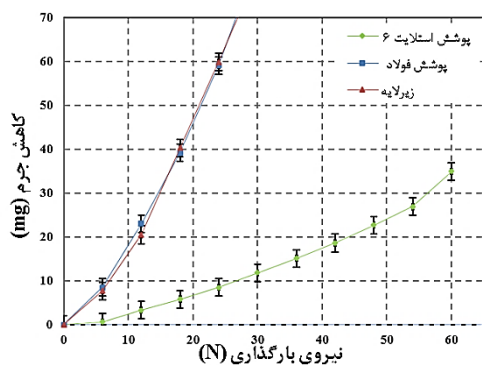
	۱۹۰ میکرون	ارتفاع روکش
	۱۱۰۲ میکرون	عرض روکش
	۲۱۴ میکرون	تعمیق و تغییرات دما از حرارت
	۱۳ درصد	آمیختگی هندسی

^۱ Direct Laser Deposition (MUT-DLD-C5)

اصطکاک توسط نرم‌افزار مربوط به دستگاه سایش رسم شده و مقدار ضریب اصطکاک تعیین شد.

نتایج و بحث

شکل ۴ منحنی‌های کاهش جرم زیرلایه و پوشش‌های لیزری فولاد زنگ‌نزن و استلایت ۶ را برحسب بار اعمالی در مسافت لغزش ثابت نشان می‌دهد. پوشش لیزری استلایت ۶ در مقایسه با پوشش لیزری فولاد و زیرلایه در باره‌ای مختلف کاهش جرم بسیار کم‌تری را نشان داده است. هم‌چنین پوشش لیزری استلایت ۶ نسبت به دو نمونه دیگر از پایداری بیشتری در مقابل افزایش بار اعمالی برخوردار است. مطابق شکل بعد از بارگذاری شش نیوتن، میزان کاهش جرم پوشش‌های فولادی و استلایت ۶ دچار کاهش جرم شدید شده‌اند؛ بنابراین بار شش نیوتن به‌عنوان بار اعمالی برای آزمون سایش انتخاب شد. بعد از بارگذاری ۶ نیوتن تغییرات کاهش جرم برای هر سه نمونه یکسان بود. در بارگذاری بیشتر از ۵۴ نیوتن پوشش استلایت ۶ کاهش شدیدی‌تری را پیدا کرد، بنابراین برای مقایسه بهتر پوشش استلایت ۶ با دو نمونه دیگر بار بعدی ۵۴ نیوتن انتخاب شد.



شکل ۴. تغییرات جرم نسبت به بار اعمالی مربوط به زیرلایه، پوشش استلایت ۶ و پوشش فولاد ۴PH-۱۷ در آزمون بارپذیری.

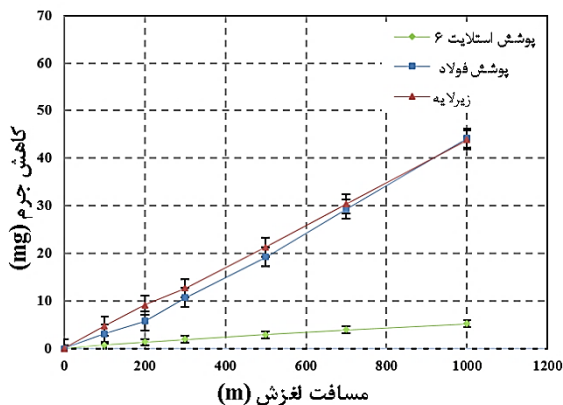
شکل ۵ میزان کاهش جرم نمونه‌ها بعد از آزمون سایش در بارگذاری ۶ نیوتن را نشان می‌دهد. میزان کاهش جرم نمونه‌ها برحسب مسافت پس از هزار متر لغزش می‌باشد.

برای بررسی بارپذیری و مقاومت به سایشی پوشش‌های استلایت ۶ و زیرلایه از دستگاه سایش رفت و برگشتی خشک، از نوع پین روی صفحه^۱ استفاده شد. داده‌های مربوط به آزمایش‌های سایش به‌صورت رفت و برگشتی در دمای محیط و بدون استفاده از روانکار انجام شد. کلیه‌ی آزمون‌ها در دمای محیط (۲۷ درجه سانتیگراد) و سرعت خطی ۰/۰۵ m/s انجام شد. در تمامی آزمون‌های بارپذیری و سایش از پین فولادی AISI ۵۲۱۰۰ استفاده شد. این پین از سختی ۸۰۰ و یکرز، طول ۵۰mm، قطر ۵mm و شعاع نوک ۲/۶mm برخوردار است. آزمون بارپذیری به‌دلیل تعیین میزان نیروی اعمالی در آزمون سایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون بر اساس کاهش جرم برحسب بار اعمالی در مسافت ثابت انجام شد. در آزمون بارپذیری برای دو پوشش و زیرلایه بعد از هر ۲۰۰ متر، بار اعمالی افزایش داده شد و آزمون تا حدی پیش رفت که کاهش جرم شدیدی در نمونه‌ها پدیدار شد. بعد از هر افزایش بار جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد تا میزان کاهش جرم نمونه‌ها به دست آید. به‌این ترتیب که اولین بارگذاری با اعمال بار ۶۰۰ گرم آغاز و در دوره‌های بعدی به‌تدریج پس از مسافت ۲۰۰ متر با یک افزایش گرمی نسبت به دوره قبلی تا بار ۵۴۰۰ گرم ادامه یافت. با توجه به نتایج آزمون بارپذیری میزان نیروی اعمالی برای آزمون سایش تعیین و مسافت سایش نیز انتخاب شد. نیروهای اعمالی برای آزمون سایش ۶ و ۵۴ نیوتن تعیین شد و مسافت سایش ۱۰۰۰ متر انتخاب شد. آزمایش‌های سایش با اندازه‌گیری کاهش وزن آن‌ها توسط ترازوی دیجیتال مدل سارتوریوس آنالیتیک^۲ با دقت ۰/۰۰۰۱g در مسافت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ متر انجام شد و منحنی‌های کاهش وزن برحسب مسافت لغزش ترسیم شد. در انتها به‌منظور تعیین ضریب اصطکاک در حین فرایند سایش، نمودارهای ضریب

^۱ Pin on Disc Wear Tester (Tsnco)

^۲ Sartorius Analytic

محلول جامد کبالتی و داشتن ساختار ریزدانه مقاومت به سایش پوشش استلایت ۶ بیشتر است.



شکل ۵. منحنی‌های کاهش جرم زیرلایه و پوشش‌های استلایت ۶ و فولاد ۴PH-۱۷ برحسب مسافت لغزش در آزمون سایش رفت و برگشتی با نیروی اعمالی ۶ N و سرعت خطی ۰/۰۵ m/s.

شکل ۶ میزان کاهش جرم نمونه‌ها بعد از آزمون سایش در بارگذاری ۵۴ نیوتن را نشان می‌دهد. کاهش جرم فولاد بدون پوشش معادل ۲۹۲/۷ mg اندازه‌گیری شده است؛ درحالی‌که کاهش جرم کمتری برای پوشش فولاد برابر ۲۲۷/۷mg ثبت شد. این نتیجه نشان از مقاومت به سایش بهتر پوشش فولاد نسبت به زیرلایه در بارگذاری ۵۴ نیوتن می‌باشد. کاهش جرم پوشش استلایت ۶ نسبت به دو نمونه دیگر خیلی کمتر بوده و برابر با ۲۰/۵ mg اندازه‌گیری شده است. این ارقام بیانگر مقاومت به سایش بهتر پوشش استلایت ۶ نسبت به نمونه‌های فولادی دارد. مقایسه میزان کاهش جرم نمونه‌ها در بارهای ۶ N و ۵۴ پس از طی مسافت ۱۰۰۰ متر در نمودار ستونی شکل ۷ ارائه شده است. میزان کاهش جرم نمونه‌ها در آزمون سایش با بار ۶ N نسبت به ۵۴ N کمتر بوده و این اختلاف کاهش جرم در پوشش فولاد و زیرلایه خیلی بیشتر می‌باشد.

کاهش جرم فولاد ۴PH-۱۷ بدون پوشش معادل با ۴۳/۸ میلی‌گرم اندازه‌گیری شده است که این مقدار برابر با کاهش جرم پوشش فولاد می‌باشد درحالی‌که کاهش جرم بسیار کمتری برابر با ۵/۲ میلی‌گرم برای پوشش استلایت ۶ ثبت شد. این نتیجه نشان‌دهنده افزایش هشت برابری مقاومت به سایش پوشش استلایت ۶ نسبت به زیرلایه و پوشش فولادی می‌باشد. با توجه به معادله با توجه به رابطه آرچارد^۱ حجم کل ماده ساییده شده در واحد مسافت لغزش (Q) با بار عمودی اعمالی (W) رابطه مستقیم و با سختی ماده نرم‌تر (H) نسبت عکس دارد. K در این رابطه ضریب سایش نام داشته که بدون بعد بوده و همواره کوچک‌تر از یک است. مقاومت در برابر سایش به عواملی دیگر از جمله مدول الاستیسیته، ریزساختار از جمله اندازه و توزیع ذرات سخت در آلیاژ، اندازه و سختی ذرات ساییده و مسیر سایش بستگی دارد [۱۷].

$$Q = \frac{KW}{H} \quad \text{رابطه آرچارد}$$

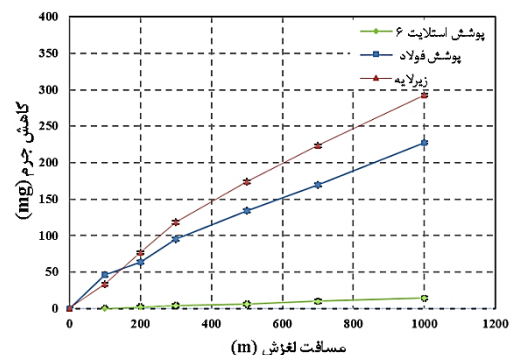
برای مثال مقدار سختی پوشش استلایت ۶ با استفاده از فرایند PTA حدود ۴۵۰ ویکرز بوده که در فرایند پوشش دهی با لیزر میزان سختی به مقدار ۵۳۰ ویکرز افزایش می‌یابد [۱۸]. سختی کمتر در پوشش PTA به دلیل وجود ساختار انجمادی درشت‌تر ریزساختار می‌باشد. ولی در آزمون سایش کاربردهای ریزتر در استلایت ۶ به آسانی از سطح روکش جدا می‌شوند. این نتیجه مشابه تحقیقات قبلی در مورد بهبود مقاومت به سایش آلیاژهای استلایت با افزایش اندازه کاربرد می‌باشد [۱۹].

بنابراین بهتر بودن مقاومت به سایش پوشش استلایت رابطه مستقیمی با سختی آن داشته و به دلیل وجود کاربردهای کروم Cr_7C_3 و $Cr_{23}C_6$ تشکیل شده در زمینه

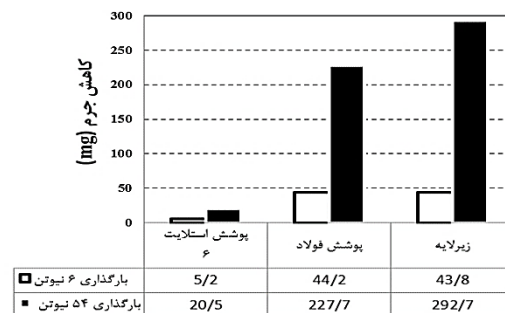
¹. Archard

تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت لغزش برای فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ بدون پوشش، پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ و پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۶ و ۵۴ نیوتن به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. ضریب اصطکاک برای پوشش استلایت ۶ در مقایسه با پوشش فولاد و فولاد بدون پوشش کمتر بوده است. با توجه به اینکه پوشش استلایت ۶ از سختی و مقاومت به سایشی بهتری برخوردار بوده، از ضریب اصطکاک کمتری نسبت به پوشش فولاد و زیرلایه برخوردار است. ضریب اصطکاک در بارگذاری ۵۴ نیوتن نسبت به بارگذاری ۶ نیوتن برای هر سه نمونه کاهش یافته است. طبق مدل بودن^۱ و تابور^۲ برای اصطکاک لغزشی فرض می‌شود که نیروی اصطکاک از دو منبع به وجود می‌آید که عبارت از:

۱- نیروی چسبندگی، حاصل از مناطق حاوی تماس واقعی بین سطوح (اتصال ناهمگونی‌ها) و ۲- نیروی تغییر شکل لازم جهت خیش زدن سطوح نرم‌تر توسط ناهمگونی‌های سطوح سخت‌تر می‌باشد. به نحوی که ضریب اصطکاک نتیجه شده (μ) برابر با مجموع دو ضریب اصطکاک مربوط به چسبندگی (μ_{adh}) و ضریب اصطکاک مربوط به تغییر شکل (μ_{def}) می‌باشد. با توجه به جنس پین که از فولاد سخت تهیه شده، در حین آزمون سایش در بارگذاری‌های ۶ و ۵۴ نیوتن در ناحیه تماس پین با پوشش فولاد زنگ‌نزن و زیرلایه، μ_{adh} افزایش یافته است؛ بنابراین، پوشش فولاد زنگ‌نزن و زیرلایه از اصطکاک بیشتری نسبت به پوشش استلایت ۶ برخوردارند هرچند که امکان دارد در حین آزمون سایش و با افزایش دمای موضعی لایه اکسیدی Fe_2O_3 در مسیر سایش تشکیل شده و ضریب اصطکاک را کاهش دهد. در پوشش استلایت ۶ در ابتدای فرایند سایش در هر دو



شکل ۶. منحنی‌های کاهش جرم زیرلایه و پوشش‌های استلایت ۶ و فولاد ۴PH-۱۷ برحسب مسافت لغزش در آزمون سایش رفت و برگشتی با نیروی اعمالی ۵۴ N و سرعت خطی ۰/۰۵ m/s.



شکل ۷. نمودار ستونی میزان کاهش جرم زیرلایه و پوشش‌های استلایت ۶ و فولاد زنگ‌نزن ۴-۱۷ در آزمون سایش رفت و برگشتی پس از ۱۰۰۰ m لغزش در بارگذاری‌های ۶ و ۵۴ نیوتن و سرعت خطی ۰/۰۵ m/s.

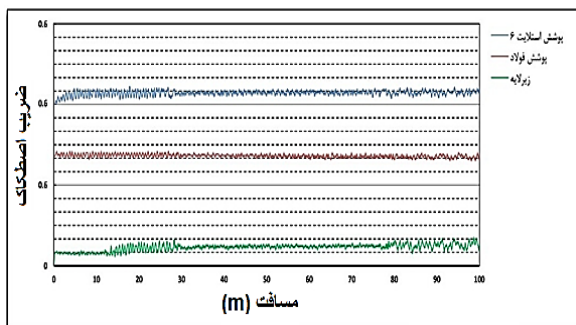
کاهش جرم پین فولاد AISI 52100 در آزمون سایش برای بارگذاری ۶ و ۵۴ N نیز در جدول ۵ نشان داده شده است. مطابق این جدول میزان کاهش جرم پین‌ها در مقابل کاهش جرم پوشش‌ها خیلی ناچیز بوده و دلیل آن بالاتر بودن میزان سختی پین می‌باشد. کاهش جرم پین‌ها در بارگذاری ۵۴ N نیز نسبت به بارگذاری ۶ N بیشتر بوده است.

جدول ۵. میزان کاهش جرم پین‌ها در تماس با نمونه‌ها در آزمون سایش رفت و برگشتی پس از ۱۰۰۰ m لغزش در بارگذاری‌های ۶ N و ۵۴ N و سرعت خطی ۰/۰۵ m/s

پوشش استلایت ۶	پوشش فولاد AISI 630	فولاد AISI 630 بدون پوشش	کاهش جرم پین فولاد در بارگذاری ۶ نیوتن (mg)
۰/۲	۰	۰/۳	۰/۲
۰/۸	۱	۱/۲	۰/۸

¹. Bowden

². Tabor

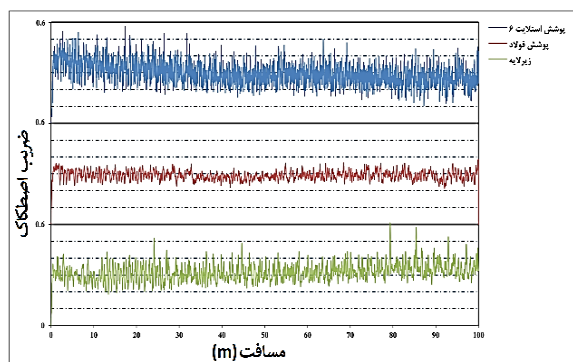


شکل ۹. تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت طی شده مربوط به فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ بدون پوشش و پوشش‌های لیزری استلایت ۶ و فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۵۴N.

بررسی مکانیزم سایش فولاد ۴PH-۱۷ بدون پوشش

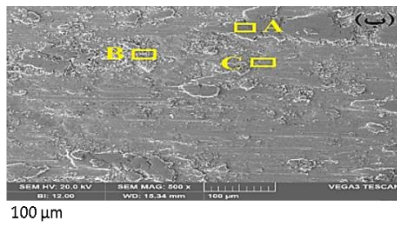
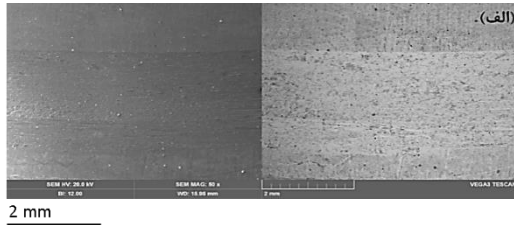
به‌منظور ارزیابی دلایل بهبود مقاومت به سایشی پوشش لیزری استلایت ۶ در مقایسه با پوشش لیزری فولاد ۴PH-۱۷ و زیرلایه، سطوح سایش به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج توزیع انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۰ تصاویر الکترونی روبشی از مسیر سایش زیرلایه در بارگذاری ۶N با پهنای $2/147 \text{ mm}$ را نشان می‌دهد. مسیر سایش از شیارهای موازی برخوردار بوده که این شیارها مربوط به سایش خراشان است. با توجه به سختی بالای پین فولاد مورد استفاده در آزمون سایش که برابر با ۸۰۰ ویکرز بوده و از دو برابر سختی فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ (۳۵۰ ویکرز) بیشتر می‌باشد، می‌تواند در فولاد زنگ‌نزن سایش خراشان ایجاد کند. نسبت Ha/Hs تعیین‌کننده سایش خراشان می‌باشد؛ که Ha سختی پین و Hs سختی نمونه است؛ اگر نسبت Ha/Hs بیشتر از ۱/۲ شود سایش خراشان پلاستیکی در نمونه ایجاد خواهد شد. احتمال کارسختی در مسیر سایش زیرلایه وجود داشته و سختی به‌صورت موضعی به مقادیر بالاتری افزایش یافته است. ولی همچنان اختلاف سختی بین پین و نمونه زیاد بوده و سایش خراشان پایدار می‌باشد. افزایش سختی موضعی در مسیر سایش باعث می‌شود که سایش خراشان ایجادشده به حالت خیش‌زدگی باشد که تشکیل شیارهای کم‌عمق و موازی در مسیر سایش تأییدکننده

بارگذاری ضریب اصطکاک بالاتری به‌دست‌آمده و باگذشت زمان و طی مسافت سایش ضریب اصطکاک کاهش‌یافته و به مقدار ثابتی رسیده است. به نظر می‌رسد در شروع آزمون سایش تماس مستقیم پین با فلز بیشتر بوده و مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب اصطکاک نزدیک به مقادیر سایش دمای محیط است. با ادامه فرایند سایشی با توجه به افزایش دمای موضعی به نظر می‌رسد که لایه اکسیدی Cr_2O_3 روی سطح تشکیل شده و باعث کاهش تماس مستقیم پین با فلز شده است. در نتیجه ضریب اصطکاک کمتر شده و به یک حالت پایداری رسیده است. ضرایب اصطکاک در بارگذاری ۵۴ نیوتن در مقایسه با ۶ نیوتن در هر سه نمونه کاهش قابل توجهی داشته‌اند. به‌علت این موضوع است که در اثر افزایش میزان بارگذاری، در حین آزمون دمای موضعی افزایش بیشتری داشته و لایه‌های اکسیدی بیشتری در مسیر سایش ایجادشده است که باعث کاهش تماس پین با سطح نمونه‌ها شده و بنابراین ضریب اصطکاک کاهش‌یافته است.



شکل ۸. تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت طی شده مربوط به فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ بدون پوشش و پوشش‌های لیزری استلایت ۶ و فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶N.

ذرات سایشی از اندازه و شکل یکنواختی برخوردار بوده و بیانگر یکسان بودن نرخ سایش است.

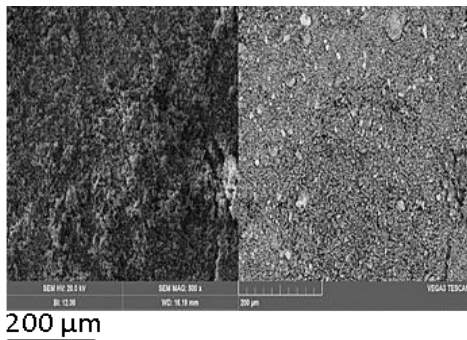


شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶N در دو بزرگنمایی مختلف.

جدول ۶. نتایج طیف‌سنجی تفکیک انرژی مسیر سایش

فولاد ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶N

درصد وزنی									نقطه
Mn	O	Nb	Si	C	Ni	Cu	Cr	Fe	
۰/۷	۱۴/۹	۰/۳	۱/۳	۵/۵	۳/۴	۲/۷	۱۲/۹	۵۸/۳	A
۰/۸	۹/۵	۰/۳	۰/۹	۹/۱	۳/۰	۲/۰	۱۳/۶	۶۰/۹	B
۰/۵	۱۱/۲	۰/۰	۰/۹	۱۴/۷	۲/۸	۲/۵	۱۲/۱	۵۵/۳	C



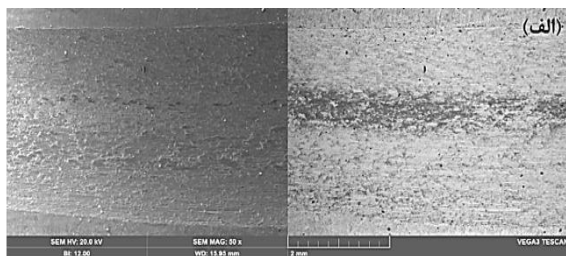
شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایشی

فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶N

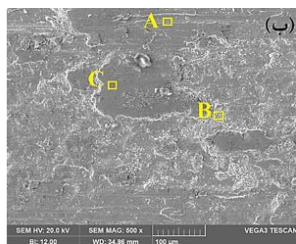
مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی از مسیر سایش در بارگذاری ۵۴ N در شکل ۱۳ نشان داده شده است. پهنای سایش در این بارگذاری در مقایسه با بارگذاری N ۶ به مقدار ۳/۷۵۷mm افزایش یافته است. مسیر سایش از

این موضوع می‌باشد. همچنین لهدگی‌هایی در مسیر سایش مشاهده شد که این لهدگی‌ها نشان‌دهنده سایش چسبان می‌باشد و با توجه به نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی مطابق جدول ۶ مشخص می‌شود که این ناپیوستگی هم‌جنس با زیرلایه بوده است. مکانیزم سایش چسبان را می‌توان این‌طور بیان نمود که در حین سایش بر اثر تغییر شکل پلاستیک و سایش خراشان ذرات سایشی از فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ جدا شده و در مسیر سایش و در تماس با پین قرار گرفته‌اند و در اثر حرکت رفت و برگشتی پین روی سطح سایشی له شده و سایش چسبان ایجاد گردیده است. علاوه بر این احتمال کارسختی در این ناپیوستگی‌ها وجود داشته و این نقاط از استحکام بیشتری نسبت به خود نمونه برخوردار شده‌اند. در ادامه سایش، جدا شدن ذرات دیگر از سطح سایشی وجود داشته و این ذرات می‌توانند به ناپیوستگی‌های قبلی متصل شده و روی ناپیوستگی‌های قبلی ناپیوستگی‌های جدیدی تشکیل شود. این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که پیوند بین ناپیوستگی‌ها با سطح زیرین در اثر اعمال بار متناوب و تکراری در حرکت رفت و برگشتی پین روی سطح سایش به‌طور موضعی تضعیف شود. همچنین، طبق نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از نقاط مشخص شده شکل ۱۰-ب که در جدول ۶ بیان شده است، ترکیب شیمیایی این نواحی اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته و ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی اکسیژن در مسیر سایش وجود داشته است که به دلیل اصطکاک بین پین سایشی و نمونه، دما بین دو سطح سایشی افزایش یافته و اکسیداسیون خفیفی در مسیر سایش ایجاد شده و به احتمال زیاد اکسید آهن Fe_2O_3 که از پایداری بیشتری نسبت به سایر اکسیدهای آهن در دمای پایین برخوردار می‌باشد، در مسیر سایش تشکیل شده است. شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایش را نشان می‌دهد، مطابق تصویر میکروسکوپی الکترونی برگشتی ذرات به یکدیگر فشرده و در برخی نقاط به حالت آگلومره می‌باشند. ریزبودن ذرات سایشی دلیل دیگر بر سایش خراشان از نوع خیش ریز می‌باشد. همچنین

اکسیژن در ذرات به مقدار ۲۲/۶ درصد وزنی رسیده که نشان‌دهنده اکسیداسیون بیشتر ذرات سایشی می‌باشد. عیوب شبکه‌ای و ریز بودن ذرات سبب افزایش نفوذ اکسیژن به داخل سطوح و در نتیجه اکسیداسیون بیشتر می‌شود.

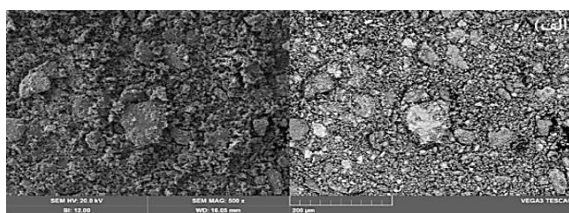


2 mm

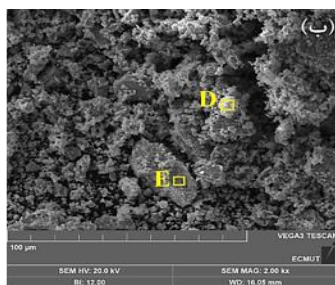


100 μm

شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش فولاد ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۵۴N در دو بزرگنمایی مختلف.



200 μm



100 μm

شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایشی فولاد ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۵۴N در دو بزرگنمایی مختلف.

شیارهای موازی عمیق‌تری برخوردار بوده که نشان‌دهنده سایش خراشان شدیدتری در بارگذاری ۵۴N می‌باشد. علاوه بر این شیارها در مسیر سایش ناپیوستگی‌های بسیاری مشاهده می‌شود که بیانگر سایش چسبان می‌باشد. برخی نقاط در مسیر سایش از کنتراست روشن‌تری برخوردار می‌باشد. با توجه به نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از این مناطق مشخص شده در شکل ۱۲-ب که در جدول ۷ آورده شده است مشخص می‌شود میزان اکسیژن در این نقاط بیشتر است. همچنین لهیدگی‌های که در مسیر سایش مشاهده شده درصد وزنی اکسیژن را ۱۹ درصد وزنی نشان داده است. مکانیزم سایش برای زیرلایه در بارگذاری ۵۴ نیوتن را می‌توان این‌طور بیان نمود. با توجه به افزایش بار اعمالی و سختی بالای پین نسبت به زیرلایه در ابتدا سایش خراشان شدیدی در مسیر سایش ایجاد شده است و ذراتی از نمونه جدا شده و با توجه به ریز بودن ذرات سایشی و افزایش عیوب ساختاری این ذرات به راحتی با اکسیژن موجود در هوا واکنش داده و اکسید شده‌اند. این ذرات به یکدیگر چسبیده و به حالت کشیده درآمده‌اند و در هنگام برخورد پین با آن‌ها به مسیر سایش چسبیده و سایش چسبان را ایجاد کرده‌اند. همچنین در اثر افزایش دمای موضعی به دلیل وجود اصطکاک بین پین و نمونه احتمال اکسیداسیون خفیفی در مسیر سایش وجود داشته است. با توجه به پایدار بودن اکسید Fe_2O_3 به احتمال زیاد این اکسید در مسیر سایشی تشکیل شده است. شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایشی را نشان داده، این ذرات از اندازه‌های بزرگ‌تری نسبت به ذرات سایشی در بارگذاری ۶ نیوتن برخوردار بوده و به احتمال زیاد سایش خراشان به صورت خیش ریز و برش ریز بوده است. ذرات سایشی در شکل و اندازه‌های مختلفی می‌باشند که بیانگر غیریکسان بودن نرخ سایش در بارگذاری ۶ N می‌باشد. نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از ذرات سایشی شکل ۱۳-ب در جدول ۷ آورده شده است. درصد وزنی

جدول ۷. نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از مسیر سایش

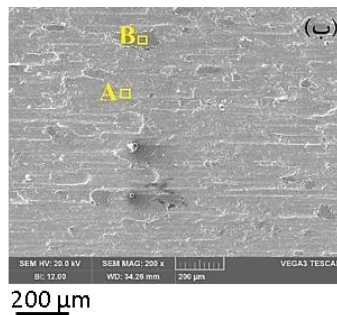
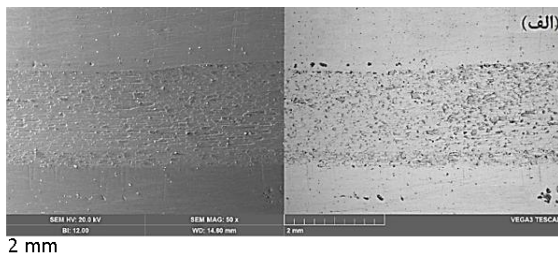
و ذرات سایشی فولاد ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۵۴N

درصد وزنی									نقطه
Mn	O	Nb	Si	C	Ni	Cu	Cr	Fe	
۰/۶	۲/۵	۰/۲	۰/۹	۵/۲	۳/۶	۲/۸	۱۴/۳	۶۹/۹	A
۰/۳	۱۸/۱	۰/۱	۰/۸	۱۰/۱	۳/۴	۲/۳	۱۱/۵	۵۳/۳	B
۰/۵	۱۹/۲	۰/۰	۰/۷	۴	۳/۲	۲/۵	۱۲/۳	۵۷/۷	C
۰/۵	۱۶/۳	۰/۶	۱/۰	۵/۲	۳/۷	۲/۸	۱۱/۹	۵۸/۲	D
۰/۳	۲۲/۶	۰/۳	۰/۸	۵/۲	۲/۶	۲/۰	۱۱/۵	۵۴/۶	E

الکترونی روبشی از ذرات سایشی پوشش لیزری فولاد ۴PH-۱۷ می‌باشد. ذرات سایشی از لحاظ اندازه و شکل غیریکنواخت بوده است، پس می‌توان گفت که نرخ سایش در حین فرایند ثابت نبوده و افزایش یافته است. با توجه به ریزبودن ذرات سایشی می‌توان بیان کرد که سایش خراشان از نوع خیش ریز بوده و میزان عیوب سطحی این ذرات بیشتر است که در تماس با اکسیژن موجود در هوا راحت‌تر واکنش داده و اکسیداسیون ذرات سایشی را در پی داشته و در برخی نقاط ذرات سایشی به یکدیگر فشرده و به حالت آگلومره درآمده‌اند.

بررسی مکانیزم سایش پوشش لیزری فولاد ۴PH-۱۷

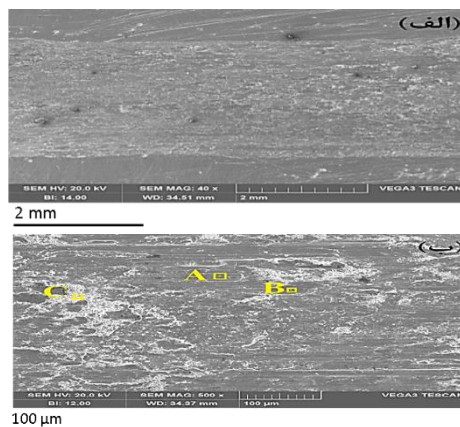
شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح سایش پوشش لیزری فولاد ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶ نیوتن را نشان می‌دهد. پهنای مسیر سایش برابر با ۲/۲۵ mm اندازه‌گیری شد. مطابق شکل شیارهای موازی در مسیر سایش مشاهده می‌شود، این شیارهای موازی نشان‌دهنده سایش خراشان بوده است. سختی پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ با توجه به آزمون ریزسختی سنجی برابر با ۳۵۰ ویکرز اندازه‌گیری شد که از سختی پین کمتر می‌باشد و با توجه به نسبت Ha/Hs که بیشتر از ۱/۲ می‌شود؛ مکانیزم سایشی، مکانیزم سایش پلاستیکی می‌باشد. در برخی نقاط نیز لهیدگی‌های ایجادشده که بیانگر سایش چسبان می‌باشد. میزان این لهیدگی‌ها و ناپیوستگی‌ها نسبت به زیرلایه در همین بارگذاری کاهش یافته است. با توجه به یافته‌های طیف‌سنجی توزیع انرژی از مسیر سایش مطابق جدول ۸ میزان اکسیژن در نقاط لهیده بیشتر بوده و به ۲۰ درصد وزنی رسیده است. با توجه به اصطکاک بین پین و سطح سایشی دمای مسیر سایش به صورت موضعی افزایش یافته و باعث می‌شود در حین سایش ذرات جداشده از سطح دوباره توسط پین به سطح سایشی چسبیده و میزان عیوب ساختاری این ذرات افزایش یافته و اکسید شوند. مکانیزم غالب سایش برای پوشش لیزری فولاد، خراشان و در برخی نقاط سایش چسبان بوده است. شکل ۱۵ تصویر میکروسکوپی



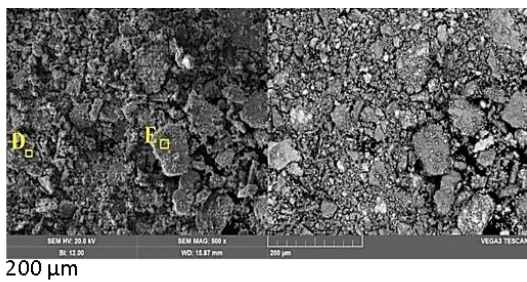
شکل ۱۴. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش پوشش فولاد ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶N در دو بزرگنمایی مختلف.

جدول ۸. نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی مسیر سایش پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶N

درصد وزنی									نقطه
Mn	O	Nb	Si	C	Ni	Cu	Cr	Fe	
۰/۳	۵/۳	۰/۳	۱/۵	۹/۷	۳/۳	۳/۳	۱۴/۴	۶۲/۰	A
۰/۴	۱۹/۹	۰/۱	۱/۳	۵/۸	۲/۹	۲/۷	۱۲/۷	۵۴/۲	B



شکل ۱۶. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از طیف‌سنجی تفکیک انرژی مسی سایش پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۵۴N در دو بزرگنمایی مختلف.



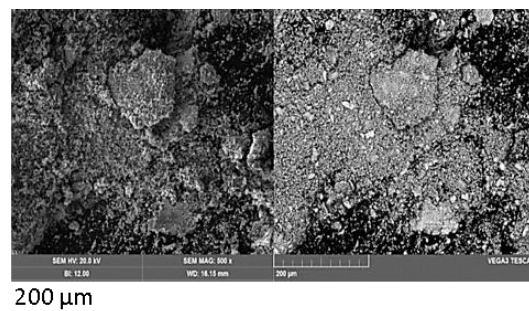
شکل ۱۷. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایشی پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۵۴N

جدول ۹. نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از مسی و ذرات سایشی پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۵۴N

درصد وزنی									نقطه
Mn	O	Nb	Si	C	Ni	Cu	Cr	Fe	
۰/۴	۳/۲	۰/۲	۰/۹	۸/۶	۳/۵	۲/۵	۱۴/۳	۶۶/۵	A
۰/۷	۱۴/۹	۰/۳	۱/۳	۵/۵	۳/۴	۲/۷	۱۲/۹	۵۸/۳	B
۰/۸	۹/۵	۰/۳	۰/۹	۹/۱	۳/۰	۲/۰	۱۳/۶	۶۰/۹	C
۰/۰	۴/۴	۰/۲	۱/۶	۶/۴	۳/۸	۳/۶	۱۵/۱	۶۴/۸	D
۰/۲	۱۲/۳	۰/۴	۰/۹	۳/۳	۳/۲	۳/۰	۱۴/۳	۶۲/۳	E

بررسی مکانیزم سایش پوشش لیزری استلایت ۶

تصویر میکروسکوپی الکترونی از مسی سایش پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۶ N در شکل ۱۸ نشان داده شده است. مسی سایش از پهنای ۲/۲ میلی‌متر برخوردار می‌باشد. در مسی سایش خطوط موازی وجود داشته که

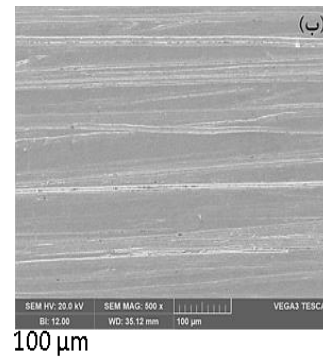
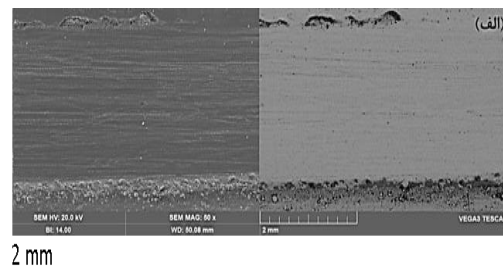


شکل ۱۵. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایشی پوشش فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ در بارگذاری ۶N

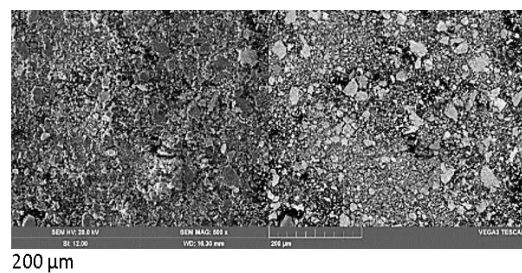
در ادامه، شکل ۱۶ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسی سایش در بارگذاری ۵۴ نیوتن برای پوشش فولاد زنگ‌نزن را نشان می‌دهد. در اثر افزایش بار از ۶ به ۵۴ نیوتن پهنای مسی سایش به ۳/۵ میلی‌متر افزایش یافته است. مسی سایش از شیارهای موازی برخوردار بوده که آثار لبه و تورق در کناره‌های این شیارها به‌وضوح قابل مشاهده است. حضور شیارهای نسبتاً عمیق می‌تواند به دلیل سایش خراشان ریزبرش باشد. آثار ناپیوستگی‌ها که بیانگر سایش چسبان بوده در تصویر مشخص است و در مقایسه با بارگذاری ۶ نیوتن این ناپیوستگی‌ها افزایش یافته‌اند. نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از نقاط مشخص شده در جدول ۹ آورده شده است. درصد وزنی عناصر در ناپیوستگی‌های مطابق ترکیب شیمیایی پوشش فولادی می‌باشد. فقط درصد وزنی اکسیژن در این نقاط بیشتر بوده و به ۱۵ درصد وزنی رسیده که این مقدار در مقایسه با بارگذاری ۶ نیوتن کاهش یافته است. شکل ۱۷ تصویر میکروسکوپی از ذرات سایشی را نشان می‌دهد. ذرات سایشی نسبت به بارگذاری ۶ نیوتن بزرگ‌تر می‌باشند که تأیید می‌کند سایش خراشان از نوع ترک ریز بوده است. همچنین درصد وزنی اکسیژن در ذرات ۱۲ درصد وزنی بوده و نشان می‌دهد اکسیداسیون ذرات کمتر می‌باشد.

یافته‌های میکروسکوپی الکترونی از مسیر سایش پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۵۴ نیوتن مطابق شکل ۲۰ می‌باشد. پهنای مسیر سایش در مقایسه با بارگذاری ۶ نیوتن اختلاف چندانی نداشته است. مسیر سایش از شیارهای کم‌عمق‌تری برخوردار بوده و بیانگر سایش خراشان خفیف‌تری می‌باشد و مکانیزم سایش در بارگذاری ۵۴ نیوتن متفاوت بوده است. با توجه به شکل ۲۰ که ذرات سایشی را در این بارگذاری نشان می‌دهد این ذرات به صورت ورقه‌ای بوده و از اندازه بزرگ‌تری در مقایسه با ذرات سایش نمونه‌ها برخوردار بودند؛ بنابراین مکانیزم سایش در بارگذاری ۵۴، ورقه‌ای بوده و در اثر حرکت پین روی سطح پوشش استلایت ۶ ذرات به صورت ورقه‌ای جدا شده‌اند. در برخی نقاط مسیر سایش ناپیوستگی‌هایی به صورت لهدگی مشاهده می‌شود. در حین آزمون سایش و در اثر حرکت پین بر روی پوشش استلایت ۶ با توجه به افزایش بار اعمالی، پوشش اعمالی به صورت ذرات بزرگ‌تر و به حالت ورقه‌ای از مسیر سایش جدا شده که در برخی نقاط با تماسی که پین با این ذرات داشته است این ذرات به حالت لهدگی به مسیر سایشی چسبیده و سایش چسبان را به وجود آورده است. نتایج آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی در جدول ۱۰ نشان داده شده است. نتایج آنالیز طیف‌سنجی توزیع انرژی از کنتراست تیره و روشن شکل ۲۰-ب مشخص می‌کند که لهدگی دارای ۴۱/۱ درصد وزنی کبالت، ۱۹/۹ درصد وزنی کروم و ۲۰/۷ درصد وزنی اکسیژن بوده و بیانگر ترکیب آلیاژ استلایت ۶ می‌باشد. در آن نقطه، اکسیداسیون سطحی به صورت خفیفی تشکیل شده است. در مقابل آنالیز شیمیایی نقطه B ۵۵/۸ درصد وزنی کبالت، ۲۶/۵ درصد وزنی کروم و ۰/۶ درصد وزنی اکسیژن را نشان داده است؛ بنابراین در هنگامی که ذرات توسط مکانیزم عیوب سطحی تمایل واکنش این ذرات با اکسیژن بالا بوده و باعث اکسیداسیون خفیفی در ذرات شده است. به همین

بیانگر سایش خراشان می‌باشد. این خطوط شیباری از عمق کمی برخوردارند. با توجه به سختی بیشتر پین نسبت به پوشش استلایت، در اثر حرکت‌های رفت و برگشتی نوک پین بر روی سطح پوشش تغییر شکل پلاستیکی ایجاد شده و سطح پوشش به حالت خیش زنی درآمده است و ذراتی از سطح پوشش جدا شده است. شکل ۱۹ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایشی را نشان می‌دهد. ذرات سایشی از اندازه و شکل‌های غیریکنواخت برخوردار بوده و بیانگر ثابت نبودن نرخ سایش در بارگذاری ۶ نیوتن می‌باشد.



شکل ۱۸. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۶ N در دو بزرگنمایی مختلف.



شکل ۱۹. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ذرات سایشی پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۶N

نتیجه‌گیری

(۱) کاهش جرم ناشی از سایش پوشش فولاد ۱۷-۴PH در مقایسه با زیرلایه در بارگذاری ۶ نیوتن یکسان بوده که در بارگذاری ۵۴ نیوتن ۲۲ درصد کاهش یافته است.

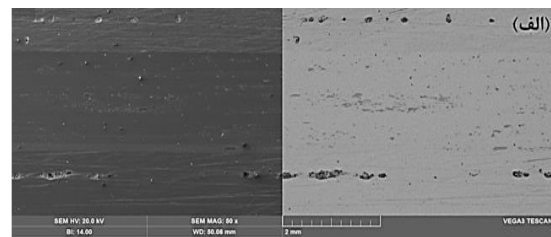
(۲) کاهش جرم ناشی از سایش پوشش استلایت ۶ در مقایسه با زیرلایه در حدود ۸۸ و ۹۳ درصد به ترتیب در بارگذاری‌های ۶ و ۵۴ نیوتن کاهش یافته است. این اختلاف نشان‌دهنده بهتر بودن پوشش استلایت ۶ نسبت به زیرلایه است. دلیل این بهتر بودن، وجود کاربیدهای Cr_7C_3 ، $Cr_{23}C_6$ و محلول جامد کبالتی در استلایت ۶ می‌باشد.

(۳) پوشش فولاد زنگ‌نزن و زیرلایه از اصطکاک بیشتری نسبت به پوشش استلایت ۶ برخوردارند. همچنین مکانیزم سایش پوشش فولاد زنگ‌نزن و زیرلایه به صورت خراشان و چسبان و مکانیزم سایش پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۶ نیوتن سایش خراشان و در بارگذاری ۵۴ نیوتن سایش ورقه‌ای می‌باشد.

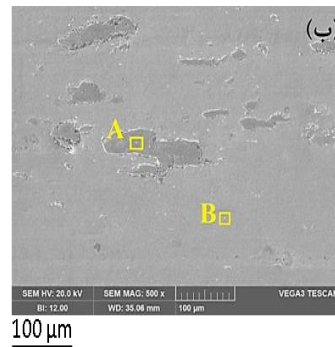
مراجع

- Sanjeev, K. C., P. D. Nezhadfar, C. Phillips, M. S. Kennedy, N. Shamsaei, and R. L. Jackson. *Tribological behavior of 17-4 PH stainless steel fabricated by traditional manufacturing and laser-based additive manufacturing methods*, Wear 440 (2019) 203100.
- Yao, Jianhua, Yiping Ding, Rong Liu, Qunli Zhang, and Liang Wang., *Wear and corrosion performance of laser-clad low-carbon high-molybdenum Stellite alloys*, Optics & Laser Technology 107 (2018): 32-45.
- شجاع رضوی، س.ر. «روکش‌کاری لیزری»، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۵.
- شجاع رضوی، س.ر. و همکاران، «ساخت افزایشی با رسوب‌نشانی مستقیم لیزری»، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۱۳۹۸.

دلیل در نقاط ناپیوسته که نشان‌دهنده سایش چسبان می‌باشند حاوی اکسیژن نسبتاً بالایی می‌باشند. نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی از ذرات نیز اکسیداسیون ذرات را تأیید می‌کند. ذرات سایشی از نظر شکل و اندازه غیریکنواخت بوده بنابراین می‌توان بیان کرد که نرخ سایش در حین آزمون غیر یکسان بوده است.



2 mm



100 μm

شکل ۲۰. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مسیر سایش پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۵۴ N در دو بزرگنمایی مختلف.

جدول ۱۰. نتایج طیف‌سنجی توزیع انرژی مسیر سایش و ذرات سایشی پوشش استلایت ۶ در بارگذاری ۵۴N

درصد وزنی									نقطه
Ni	Mn	O	Si	Fe	W	C	Cr	Co	
۰/۱	۰/۷	۲۰/۷	۱/۶	۶/۳	۳/۲	۶/۴	۱۹/۹	۴۱/۱	A
۰/۴	۰/۴	۰/۶	۲	۳/۴	۴/۳	۶/۵	۲۶/۵	۵۵/۸	B
۰	۰/۲	۲۱/۶	۱/۵	۵/۶	۳/۰	۵/۰	۲۰/۷	۴۲/۴	C
۰/۳	۰/۳	۱/۴	۰/۲	۰/۵	۰/۳	۱/۳	۳۱/۵	۶۴/۲	D

14. Motallebzadeh, Amir, Erdem Atar, and Huseyin Cimenoglu, *Sliding wear characteristics of molybdenum containing Stellite 12 cladding at elevated temperatures*, Tribology International 91 (2015): 40-47.
15. Kim H.-J., and Y. J. Kim, *Wear and corrosion resistance of PTA weld surfaced Ni and Co based alloy layers.*, Surface engineering 15, no. 6 (2013): 495-501.
16. Shin, Jong-Choul, Jung-Man Doh, Jin-Kook Yoon, Dok-Yol Lee, and Jae-Soo Kim. *Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of cobalt-base Stellite hardfacing alloys*, Surface and Claddings Technology 166, no. 2-3 (2003): 117-126.
۱۷. ای.ام. هوتچینگز، تریبولوژی؛ اصطکاک و سایش مواد مهندسی، ترجمه سعیدرضا بخشی انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۳.
18. Ahmed, R., H. L. de Villiers Lovelock, and S. Davies., *Sliding wear of blended cobalt based alloys*, Wear 466 (2021): 203533.
19. Lin, W. C., and C. Chen. *Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding*, Surface and Coatings Technology 200, no. 14-15 (2006): 4557-4563.
5. Gülsoy, H. Özkan. *Dry sliding wear in injection molded 17-4 PH stainless steel powder with nickel boride additions*, Wear 262, no. 3-4 (2007): 491-497.
6. Li, Gui-jiang, Jun Wang, Cong Li, Qian Peng, Jian Gao, and Bao-luo Shen. *Microstructure and dry-sliding wear properties of DC plasma nitrided 17-4 PH stainless steel*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 266, no. 9 (2008): 1964-1970.
7. Persson, Daniel HE, Ernesto Coronel, Staffan Jacobson, and Sture Hogmark. *Surface analysis of laser cladded Stellite exposed to self-mated high load dry sliding.*, Wear 261, no. 1 (2006): 96-100.
8. Rajeev, G. P., M. Kamaraj, and Srinivasa R. Bakshi. *Comparison of microstructure, dilution and wear behavior of Stellite 21 hardfacing on H13 steel using cold metal transfer and plasma transferred arc welding processes*, Surface and Claddings Technology 375 (2019): 383-394.
9. Thawari, Nikhil, Chaitanya Gullipalli, Jitendra Kumar Katiyar, and T. V. K. Gupta. *Effect of multi-layer laser cladding of Stellite 6 and Inconel 718 materials on clad geometry, microstructure evolution and mechanical properties*, Materials Today Communications 28 (2021): 102604.
10. Liu, Rui, Mengyu Zhang, Jiacheng Yu, Qifan Yang, and Shiyu Gao. *Microstructural Transformation and High-Temperature Aluminum Corrosion Properties of Co-Based Alloy Cladding Prepared by Laser Cladding*, Claddings 12, no. 5 (2022): 603.
11. Hemanandh, J., G. SenthilKumar, R. Devaraj, S. Ganesan, M. Selvakumar, and S. Sukesh Kumar, *Stellite alloy cladding on the valves of a four stroke diesel engine*, Materials Today: Proceedings 44 (2021): 3866-3871.
12. Yao, Jianhua, Yinping Ding, Rong Liu, Qunli Zhang, and Liang Wang, *Wear and corrosion performance of laser-clad low-carbon high-molybdenum Stellite alloys.*, Optics & Laser Technology 107 (2018): 32-45.
13. Ratia, V. L., Deen Zhang, M. J. Carrington, J. L. Daure, D. G. McCartney, P. H. Shipway, and D. A. Stewart, *The effect of temperature on sliding wear of self-mated HIPed Stellite 6 in a simulated PWR water environment*, Wear 420 (2019): 215-225.