

بررسی خواص پوشش استلایت ۶ ایجاد شده به روش روکش کاری لیزر بر روی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI ۴۲۰

مرضیه ربانی خواه^۱، نادر نهبانی^۲ و محمود پیکری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بازرسی نفت، دانشگاه صنعت نفت آبادان

۲- استادیار و عضو هیأت علمی دانشگاه صنعت نفت آبادان

ms_mrkh@yahoo.com

چکیده

پودر استلایت ۶ طی فرآیند روکش کاری با پرتو لیزر موج پیوسته دی‌اکسید کربن ۱/۵ Kw به‌عنوان پوشش محافظ دو لایه بر روی ورقه‌هایی از فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI ۴۲۰ در محیط خنثی آرگون اعمال شده و مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS وجود پیوند متالورژیکی قوی بین پوشش - زیرلایه و همچنین وجود ساختاری همگن با ترکیب شیمیایی نزدیک به پودر را در طول عمق لایه مشخص نمود. لایه‌های روکش لیزر ساختاری دندریتی و ریز دانه با حضور فقط اندکی ناخالصی را نشان داد. در خواص مکانیکی نمونه پوشش دار، مانند مقاومت سایشی و ریزسختی در مقایسه با زیرلایه بهبود چشمگیری مشاهده شده است. از سوی دیگر خواص خوردگی نیز بسیار بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی:

استلایت ۶، روکش کاری با لیزر، فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی، سایش خراشان.

۱- مقدمه

کنند، بنابراین برای حفاظت آنها در برابر انواع مختلف تخریب، بهبود کیفیت سطح آنها لازم است. عملیات سطحی به دلیل اینکه ضمن افزایش عمر مفید قطعه، عملکرد سطح را نیز بهبود می‌بخشد، به ارزش قطعات می‌افزاید. به‌عنوان مثال اعمال پوشش ارزش محصول را تا ده برابر قیمت اولیه آن افزایش می‌دهد [۲]. سایش غلتک‌های نورد در فرآیند ریخته‌گری پیوسته را که به علت شرایط کاری سخت و دمای بالا رایج می‌باشد می‌توان با روکش کاری یک لایه مقاوم به سایش بر سطح غلتک کنترل نمود. همچنین برای تعمیر عیوب سطحی پره‌های توربین بخار که

خسارات حاصل از خوردگی فلزات در صنعت، هزینه‌ی فراوانی در بر دارد چرا که حدود نیمی از تولید سالانه‌ی فولاد برای تعویض قطعات مکانیکی خورده‌شده به کار می‌رود [۱]. اگر چه نمی‌توان مشکلات ناشی از خوردگی را به‌طور کامل حل نمود اما با استفاده از تکنیک‌های کنترل خوردگی می‌توان آنها را تا حدود زیادی کاهش داد. در کاربردهای فراوانی در صنعت، قطعات مکانیکی باید تحت شرایط سخت مانند تنش و بار زیاد، سرعت و دمای بالا، تماس با محیط شیمیایی خورنده و... کار

می‌شوند. به‌عنوان مثال گزارش شده‌است که روکش کاری لیزر فولاد زنگ‌نزن آستنیتی L ۳۱۶ با پودر استلایت ۲۱ سختی آن را از $0.1/1$ Hv ۵۵۰ به $0.1/1$ Hv ۷۵۰ افزایش می‌دهد ضمن آن که مقاومت به سایش خراشان آلیاژ را ۸۵٪ افزایش می‌دهد [۶].

در فرآیند روکش لیزر، بخشی از انرژی پرتو پرتو لیزر، جذب پودر شده و منجر به ذوب پودر قبل از رسیدن به زیر لایه می‌شود. بخش دیگر آن لایه سطحی نازکی از زیر لایه را ذوب کرده و در نتیجه پیوند متالورژیکی قوی ضمن حداقل اختلاط بین لایه پوشش و زیر لایه ایجاد می‌شود. هنگامی که پرتو لیزر حوضچه مذاب را که بخش اعظم آن پودر روکش و حجم کمی از آن زیر لایه می‌باشد، ترک می‌کند، حرارت از طریق زیر لایه به بیرون انتقال داده شده و آلیاژ سریعاً منجمد می‌شود.

جهت تغذیه پودر به ناحیه مذاب، دو روش وجود دارد: نخست قرار دادن پودرها بر روی سطح و دیگری وزش پودر به درون پرتو لیزر در نقطه برخورد آن بر روی سطح. روش نخست شامل مشکلات فراوانی است که از آن جمله می‌توان به دشواری بودن نگهداری پودر در محل در حین ذوب به وسیله پرتو لیزر، نیاز به پرتو با توان بیشتر جهت ذوب کامل و اختلاط بیشتر با زیر لایه اشاره نمود. بنابراین معمولاً تکنیک وزش پودر ترجیح داده می‌شود [۷]. از آنجا که توان و سایز پرتو لیزر محدود می‌باشد، نمی‌توان منطقه وسیعی از سطح فلز را تنها با یک پاس که حداکثر پهنایی معادل با عرض پرتو لیزر دارد، پوشش داد، لذا همپوشانی پاس‌های مجاور نیز مورد نیاز می‌باشد. با انتخاب بهینه پارامترهای فرآیند که بر اساس مدل‌های نیمه تجربی محاسبه می‌شود، امکان ایجاد سطحی با کیفیت بالا و هندسه قابل کنترل فراهم می‌شود ضمن آنکه دستیابی به خواص مکانیکی و ریزساختار مطلوب نیز میسر می‌شود.

در مقاله حاضر، خواص پوشش محافظ یکی از پرکاربردترین آلیاژهای استلایت به نام استلایت ۶ که به روش لیزر بر روی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI ۴۲۰ ایجاد شده، گزارش می‌شود. از آن جا که خواص مکانیکی آلیاژهای استلایت وابسته

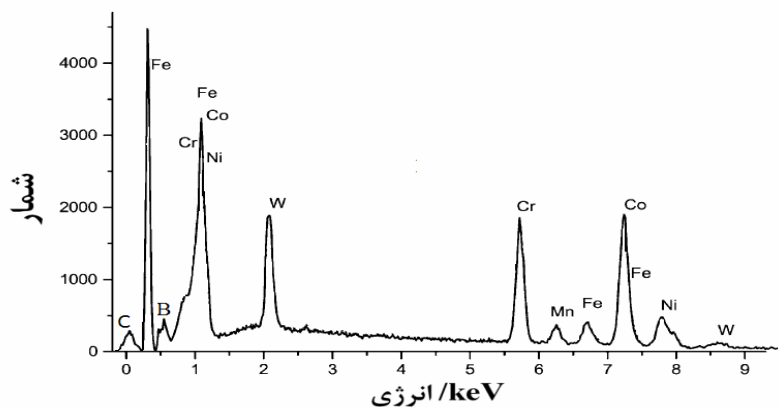
ناشی از تماس آنها با ذرات ساییده می‌باشد نیز می‌توان از روکش کاری استفاده کرد.

تکنیک جدید و پیشرفته‌ی ایجاد لایه‌های پوشش به روش روکش دهی لیزر، علاوه بر محافظت سطح فلز در مقابل زیان‌هایی که به علت شرایط کاری سخت مانند سایش، خزش و خستگی محتمل می‌باشند جهت تعمیر عیوب موضعی اجزای ماشین‌آلات نیز استفاده می‌شود [۳]. در سال‌های اخیر تمایل رو به رشد در کاربرد این تکنیک بهبود سطح خصوصاً در مواردی که پوشش‌های سطحی از تخریب فلز و هزینه اقتصادی مرتبط تا حد زیادی می‌کاهند، مشاهده شده‌است. مزایای این تکنولوژی، رسوب پوششی نازک، عاری از حفره و ترک و با ضخامت قابل کنترل بر روی سطح مورد نظر می‌باشد. زمان واکنش پرتو پرتو لیزر با پودر و زیر لایه کوتاه است که منجر به کاهش انرژی ورودی به قطعه و در نتیجه اعوجاج کمتر در قطعه نسبت به سایر روش‌های رایج عملیات سطحی می‌شود [۴].

انتخاب آلیاژ که با توجه به شرایط کاری قطعه انجام می‌شود نیز به اندازه انتخاب فرآیند روکش کاری سطح اهمیت دارد. گروهی از آلیاژهای پایه کبالت، استلایت نامیده می‌شوند. امروزه این آلیاژها بر حسب نیاز در بیست نوع تجاری با ترکیب شیمیایی متفاوت و به شکل‌های متنوع پودر، مفتول و ... تولید شده و برای کاربردهای گوناگون استفاده می‌شوند. از خصوصیات عمومی آلیاژهای استلایت می‌توان به حفظ استحکام مکانیکی در دمای بالا، مقاومت در برابر شرایط سایشی شدید، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون، مقاومت به خستگی حرارتی و خزش اشاره نمود [۵]. گرچه فولاد زنگ‌نزن 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 کرده‌است. برای غلبه بر این مشکل آلیاژهای استلایت به عنوان پوشش فولاد در صنایعی نظیر هوا-فضا، نفت و پتروشیمی، اتومبیل‌سازی و صنایع شیمیایی مانند پوشش دروازه و نشیمنگاه شیرها استفاده

جدول (۱): ترکیب شیمیایی (wt.%) زیر لایه، پودر استلایت اولیه و پوشش ایجاد شده به روش روکش کاری لیزر حاصل از تست EDS.

C	Mn	Si	Mo	Fe	W	Ni	Cr	Co	
۰/۲۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۱/۰۰	مابقی	-	۰/۶۰	۱۲/۰۰	-	زیر لایه
۱/۰۰	۱/۰۰ (حداکثر)	۲/۳۵	-	۳/۰۰ (حداکثر)	۷/۵۱	۱۳/۵۰	۱۹/۰۰	مابقی	پودر اولیه
۱/۲۵	۰/۷۴	۱/۸۳	-	۵/۰۹	۹/۹۴	۱۳/۹۱	۱۸/۷۹	۴۲/۶۳	روکش استلایت



شکل (۱): داده‌های آزمایش نیمه کمی EDS بر ترکیب شیمیایی پودر استلایت ۶.

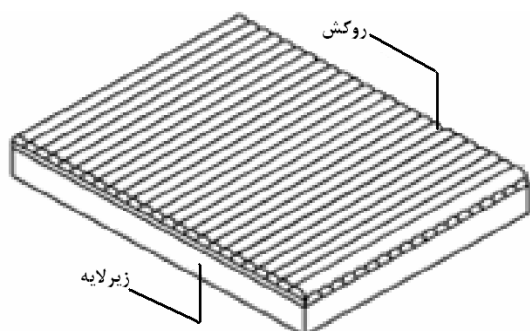
آورده شده است (شکل ۱). ورقه‌هایی از فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی AISI ۴۲۰ که ترکیب شیمیایی آن مشابه آنچه در صنعت برای تیغه‌های توربین بخار طراحی می‌شود (جدول ۱)، به عنوان ماده زیر لایه به کار رفته است.

قبل از اعمال پوشش، سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذ سمباده تا شماره ۱۰۰۰ آماده‌سازی شده است تا سطحی شبیه آنچه در عملیات مهندسی استفاده می‌شود، تهیه شود. نمونه‌ها در حمام آلتراسونیک در بنزن چربی‌زدایی شده و سپس با استون شسته شده و با جریان هوا خشک شده‌اند. جهت انتقال پودر به منطقه عملیات از جریان گاز آرگون استفاده شد. نرخ تغذیه پودر در حدود ۰/۲ g/t/s و زاویه تغذیه پودر نسبت به سطح نمونه ۴۵° کنترل شد. جریان گاز آرگون دیگری جهت حفاظت ناحیه مذاب و جلوگیری از تماس روکش با محیط که منجر به آلودگی آن می‌شود، اعمال شد. لازم است که قطعه کار عمود بر اشعه لیزر قرار داده شود تا حداقل انرژی برای فرآیند لازم باشد.

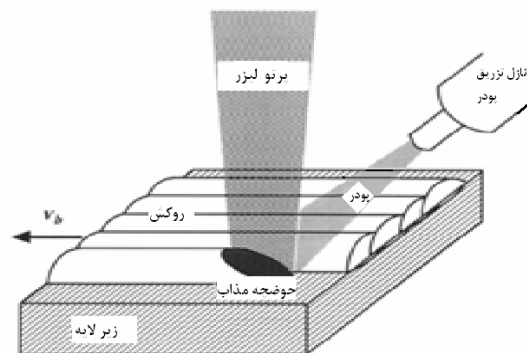
به ترکیب شیمیایی و ریزساختار آنها است و همچنین خواص سایشی تحت تأثیر اندازه و کسر حجمی فازها است، آنالیز ریزساختار، فازها، ترکیب شیمیایی، سختی و مقاومت به سایش روکش توسط تست‌های SEM، EDX، سختی‌سنجی و سایش به روش پین بر روی دیسک انجام می‌شود. تست‌های خوردگی نیز به روش پتانسیودینامیک برای پوشش و زیر لایه انجام شده، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- روش تحقیق

پوشش‌ها توسط دستگاه لیزر موج پیوسته دی‌اکسید کربن ۱/۵ Kw اعمال شده‌اند. پرتو لیزر با قطر ۱۸ میلی‌متر توسط عدسی‌های نوری سلنید روی ($f = 127 \text{ mm}$) به گونه‌ای متمرکز شده است که قطر پرتو بر روی سطح کار ۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده و در طول فرآیند ثابت نگه داشته شده است. شدت پرتو اعمالی تقریباً برابر با 10^5 W/cm^2 بوده و خروجی لیزر با دقت $\pm 2\%$ کنترل شده است. ترکیب اولیه پودر استلایت ۶ که به شکل دانه‌های کروی با اندازه حدود $60 \mu\text{m}$ می‌باشد در جدول (۱)



شکل (۳): شمایی از پوشش تولید شده.

شکل (۲): شمای فرآیند روکش لیزر (V_0 بیانگر نرخ رویش می باشد).

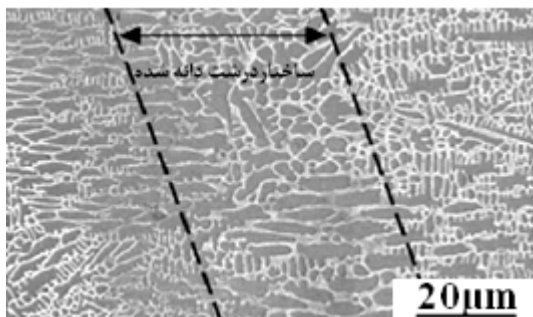
در هر لایه، پاور دستگاه لیزر، در پایان هر پاس خاموش شده و نازل سریعاً به موقعیت شروع جدید برگردانده شد (شکل ۲). مطابق شکل (۳)، دو لایه روکش اعمال شد چرا که با افزایش تعداد لایه‌ها احتمال وقوع ترک‌های سطحی افزایش می‌یابد [۱]. لایه‌های متوالی عمود بر یکدیگر بوده و همیشه از یک جهت نمونه شروع شده‌اند. نرخ رویش لیزر در طول فرآیند 25 mm/s ثابت نگه داشته شد. بر روی نمونه‌های زیر لایه به ابعاد $20 \times 20 \text{ mm}^2$ نوارهای روکش به ابعاد $1 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ (ارتفاع \times عرض) و حدود 30% همپوشانی نوار مجاور ایجاد شده‌است. نمونه‌های پینی شکل لازم برای تست سایش ($9 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) نیز با انجام روکش کاری لیزر و ثابت نگه داشتن پارامترهای فرآیند تهیه شد. پس از اتمام فرآیند روکش هیچ‌گونه عملیات حرارتی روی نمونه‌ها صورت نگرفت. پس از برش، پولیش و اچ نمودن نمونه‌ها، بررسی ریزساختار پوشش توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی Philips مدل X30 انجام شد. جهت آنالیز شیمیایی نمونه‌ها تست EDS انجام شد. اندازه‌گیری ریزسختی و یکرز با اعمال بار 300 gf بر سطح نمونه و عمود بر جهت نوارهای روکش برای فواصل مختلف از فصل مشترک پوشش و زیر لایه انجام گرفت. همان گونه که قبلاً بیان شد، تست‌های سایشی توسط دستگاه پین بر روی دیسک انجام شد. جنس دیسک مطابق با استاندارد ASTM G.۹۹ و از فولاد کربنی کربوره با سختی HRC ۶۰، قطر

20 mm و ضخامت 2 mm انتخاب شد. بین‌های روکش کاری لیزر شده، تحت بار 1 kg و 100 rev/min قرار گرفتند. در حین تست بین‌ها ثابت بوده و دیسک دایره‌وار چرخانده شد. برای مقایسه مقاومت سایشی روکش استلایت از داده‌های حاصل از انجام تست تحت شرایط یکسان بر روی فولاد زنگ‌نزن AISI420 و پوشش TiN (که به‌عنوان یک آلایژ مقاوم به سایش فوق‌العاده شناخته شده‌است) ایجاد شده به‌روش نیترووره‌گازی دمای بالای آلایژ $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ استفاده شده‌است [۸]. تست‌های الکتروشیمیایی با سلول خوردگی سه الکترودی در دمای اتاق انجام شد. منحنی‌های پلاریزاسیون توسط دستگاه پتانسیواستات Zahner مدل IM6ex و نرم‌افزار مربوطه‌ی Thales در محلول استاندارد NaCl $3/5\%$ رسم شدند. نمونه با سطح مقطع 1 cm^2 به‌عنوان الکتروکد کاری، به کار رفته‌است. سیم پلاتینی نورد شده به‌عنوان الکتروکد کمکی به کار رفته و پتانسیل نسبت به الکتروکد استاندارد اشباع کالومل سنجیده شده‌است. نرخ رویش 1 mv/s برای گستره‌ی پتانسیل 1000 mv تا 1000 mv اعمال شد.

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- بررسی ریزساختار

تصاویر میکروسکوپ نوری پوشش استلایت ایجاد شده به‌روش روکش کاری لیزر، ریزساختاری همگن شامل یک مرز واضح در فصل مشترک پوشش - زیر لایه را نشان می‌دهد (شکل (۴)، بخش بالایی و پایینی به ترتیب). منطقه همگن و

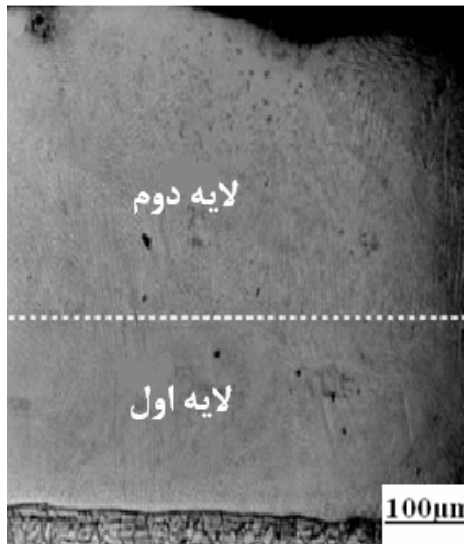


شکل (۶): ناحیه همپوشانی نوارهای روکش لیزر استلایت ۶.

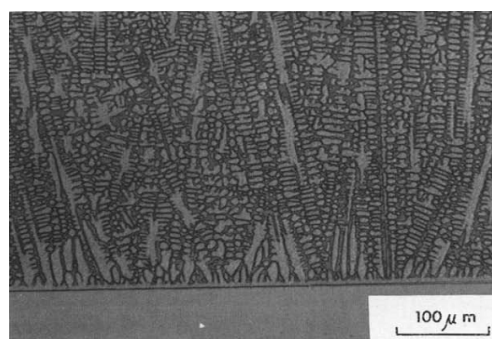
و سلولی تبدیل می‌شود. بنابراین نخستین فازی که در حین سرد شدن از فاز مایع آلیاژ استلایت ۶ ایجاد می‌شود شامل دندریته‌های غنی از Co با ساختار کریستالی FCC بوده و سپس کاربیدهای یوتکتیکی M_7C_3 ($M = Cr, Co, W$) در داخل مناطق بین دندریتی منجمد می‌شوند. در نتیجه ساختار پوشش ایجاد شده در فرآیند لیزر متشکل از یک ساختار هیپویوتکتیک دندریتی اولیه و یوتکتیک بین دندریتی می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل (۶) دیده می‌شود در ناحیه‌ی همپوشانی نوارها ساختار درشت تر شده‌است. همچنین نواحی نزدیک فصل مشترک از آنجا که به مدت طولانی تری در معرض دمای بالا قرار داشته‌اند، نواحی بین دندریتی درشت تر می‌شوند. به علت انجماد سریع در فرآیند لیزر، ریزساختار حاصل خیلی ریزتر از فرآیندهای عملیات سطحی رایج مانند PTA^۱ می‌باشد [۲].

پس از اعمال پوشش روی زیر لایه ترکیب شیمیایی پوشش بررسی شده که به همراه ترکیب شیمیایی پودر استلایت اولیه در جدول (۱) نشان داده شده‌است. از مقایسه داده‌ها نتیجه می‌شود که تغییری در ترکیب شیمیایی روکش لیزر شده، ایجاد نشده‌است بلکه مقادیر نسبی اجزای اولیه تولید شده‌اند. محتوای جزء اصلی استلایت، یعنی کبالت، در پوشش فقط کمی کمتر از مقدار اولیه است که نشان می‌دهد فرآیند با پارامترهای مناسب انجام شده و باعث شده درجه رقت نسبتاً قابل کنترل بوده و از ایجاد تغییرات مهم در ترکیب شیمیایی اولیه آلیاژ جلوگیری شود. به علت نفوذ کربن از زیر لایه به پوشش محتوای کربن



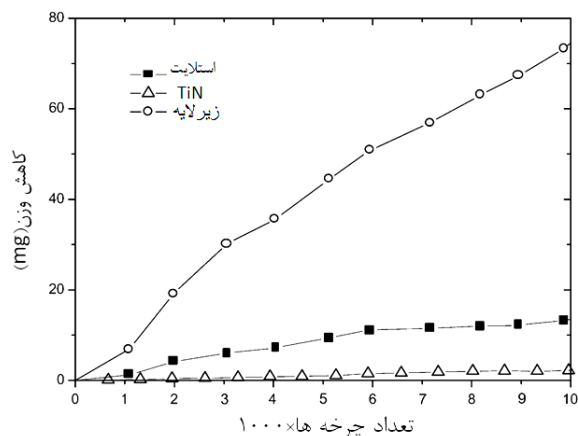
شکل (۴): سطح مقطع روکش استلایت ۶ (ارتفاع کل دو لایه ۰/۷ mm).



شکل (۵): ناحیه نزدیک به فصل مشترک روکش و زیر لایه.

صافی از مرز که منطبق با ناحیه ذوبی است و بیانگر پیوند متالورژیکی و چسبندگی خوب روکش به زیر لایه می‌باشد در شکل مشاهده می‌شود. نواحی تیره و کوچک با شکل نامنظم نشان‌دهنده‌ی حفرات گازی و ناخالصی‌های موجود در پوشش می‌باشند که به علت مقدار کم تأثیر چندانی بر خواص مکانیکی و کیفیت پوشش ندارند.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی (شکل ۵) ساختار متفاوتی از پوشش و زیر لایه را آشکار می‌سازد. به علت رشد هم‌محور اولین فاز ایجاد شده روی زیر لایه، یک ناحیه صاف به‌طور عمودی پیشرفت کرده و سپس به علت تغییرات شدید در نرخ سرد شدن و گرادیان‌های حرارتی با تغییر ارتفاع به ناحیه باریک



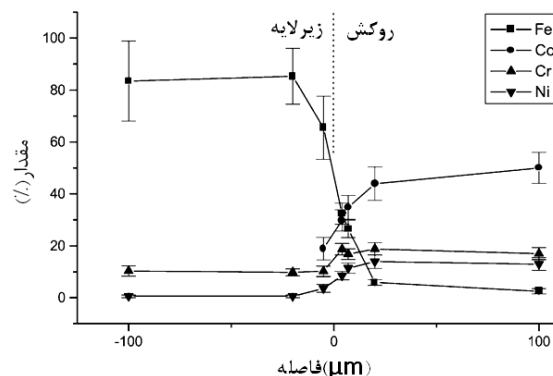
شکل (۹): مقاومت سایشی به صورت کاهش وزن به علت اصطکاک در حین تست وابسته به تعداد چرخه های سایش.

و زیر لایه، میزان Co و به مقدار کمتر در محتوای Cr و Ni نیز افزایش می یابد.

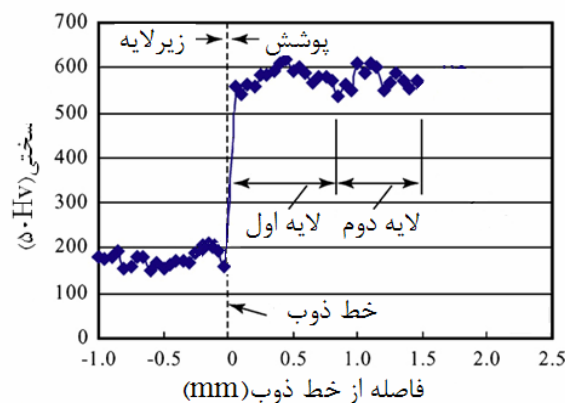
۳-۲- بررسی خواص مکانیکی

وابستگی ریز سختی و یکپارزه فاصله از فصل مشترک پوشش- زیر لایه در سطح مقطع عمود بر جهت روکش اندازه گیری و در شکل (۸) نشان داده شده است. مقدار سختی در سطح خارجی لایه روکش (۱۰۰۰ Hv) بسیار بیشتر از مقدار آن در زیر لایه (۲۰۰ Hv) می باشد. در فصل مشترک روکش- زیر لایه کمترین مقدار سختی مشاهده شده است چرا که این ناحیه در حین فرآیند تحت اثر بیشترین دما قرار می گیرد لذا سرد شدن در حین انجماد آهسته بوده و دانه های ایجاد شده درشت می باشند. به علت ترکیب شیمیایی یکسان سختی در هر یک از دو لایه تغییر نمی کند گرچه در فصل مشترک بین لایه ها به علت دوباره قرار گرفتن در معرض حرارت و ذوب مجدد یک نوار روکش توسط نوار بعدی سختی کاهش می یابد.

نمودار کاهش وزن وابسته به تعداد چرخه های سایش برای پوشش، زیر لایه و آلیاژ مرجع TiN در شکل (۹) نشان داده شده است. مشاهده می شود که زیر لایه، کاهش وزنی سریع تر از نمونه استلایت دارد و مؤید این مطلب است که روکش لیزر نمودن با استلایت مقاومت سایشی زیر لایه را بهبود می بخشد.



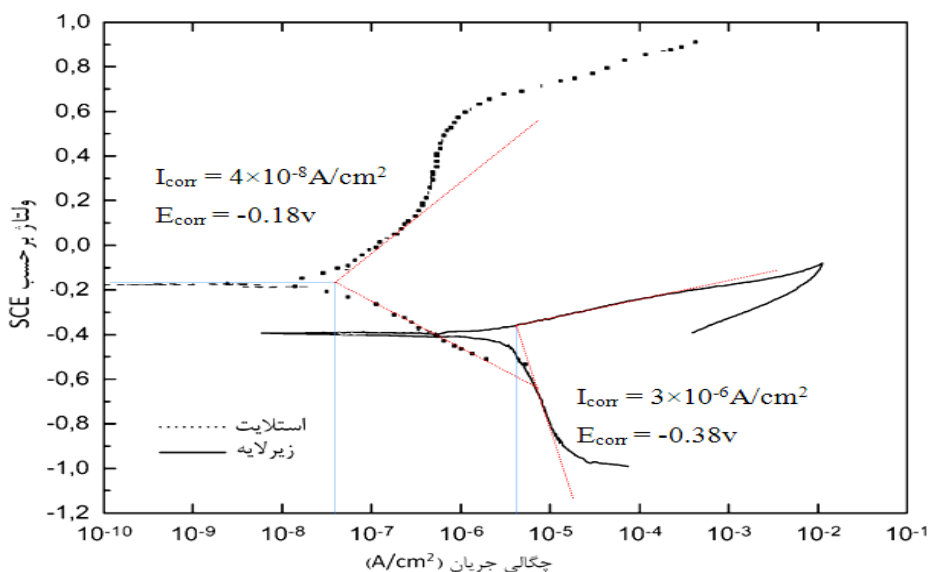
شکل (۷): وابستگی محتوای اجزای Fe, Ni, Cr, Co به فاصله از فصل مشترک پوشش و زیر لایه حاصل از تست EDS.



شکل (۸): وابستگی ریز سختی و یکپارزه فاصله از فصل مشترک روکش- زیر لایه.

پوشش افزایش یافته است که منجر به تسهیل تشکیل کاربیدهای کروم و در نتیجه افزایش سختی و مقاومت سایشی پوشش می شود.

تغییرات محتوای Fe, Co, Cr و Ni در طول سطح مقطع روکش از داده های EDS در نزدیکی فصل مشترک پوشش- زیر لایه استخراج شده است (شکل ۷). میزان آهن از مقدار اولیه ۸۳٪ در زیر لایه در فاصله ۲۵ μm از فصل مشترک، به مقدار ۵۰٪ در فصل مشترک و سپس به مقدار ۲۸٪ در پوشش استلایت در فاصله ۱۰ μm از فصل مشترک مشاهده می شود که مؤید افزایش در محتوای Fe روکش نسبت به مقدار اولیه آن در پودر استلایت در جدول (۱) می باشد. با افزایش فاصله از فصل مشترک روکش



شکل (۱۰): وابستگی پتانسیل خوردگی (نسبت به الکترود مرجع کالومل اشباع) به چگالی جریان برای زیر لایه (خط کامل) و روکش لیزر استلایت ۶ (نقطه چین).

لازم به ذکر است که روکش کاری لیزر سطح به علت انقباض در حین انجماد، منجر به ایجاد تنش‌های کششی باقیمانده می‌شود، به علاوه تفاوت در ضریب انبساط حرارتی مواد روکش و مواد زیر لایه این تنش‌ها را تشدید کرده و احتمالاً باعث ایجاد ترک‌هایی در سطح روکش می‌شود که در نهایت می‌تواند منجر به جدایش پوشش از زیر لایه شود. برای حل این مشکل راه‌حل‌های مختلفی مانند انتخاب بهینه‌ی پارامترهای فرآیند لیزر، تغییر در ترکیب شیمیایی روکش و همچنین پیش گرم زیر لایه پیشنهاد داده شده‌اند که در مقالات بعد به بررسی آنها خواهیم پرداخت.

۴- نتیجه گیری

پودر استلایت ۶ در فرآیند روکش کاری لیزر، به عنوان پوشش دو لایه محافظ بر روی ورقه‌هایی از فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی اعمال شد. نتایج بررسی‌های میکروسکوپ نوری، شیمیایی و متالوگرافی برای لایه‌های پوشش استلایت، ریزساختاری ریزدانه، همگن از نظر ترکیب شیمیایی، با حضور تعداد کمی ناخالصی و عیوب ساختاری، چسبندگی عالی روکش

به علاوه نرخ سایش (شیب منحنی سایش در نمودار) برای آلیاژ استلایت ۶ تقریباً ثابت و نزدیک به نرخ سایش آلیاژ TiN می‌باشد.

۳-۳- بررسی رفتار خوردگی

نتایج آزمون خوردگی به صورت منحنی‌های پتانسیودینامیکی برای نمونه با روکش لیزر استلایت (نقطه چین) و زیر لایه (خط کامل) در شکل (۱۰) نشان داده شده است. از مقایسه‌ی پتانسیل‌های خوردگی نتیجه می‌شود که مقدار پتانسیل خوردگی (E_{Corr}) برای نمونه با روکش استلایت در مقایسه با زیر لایه به جهت مثبت حرکت کرده است. همچنین مقدار جریان خوردگی (I_{Corr}) و در نتیجه نرخ خوردگی در حالت روکش لیزر شده خیلی کمتر از زیر لایه بدون روکش می‌باشد. همانگونه که در نمودار تافل مواد روئین همواره یک مرحله عمودی مشاهده می‌شود، در نتایج تست خوردگی برای نمونه پوشش شده نیز، حضور یک مرحله نزدیک به عمود قابل تشخیص است، هر چند ارتفاع آن کم است. این ویژگی نمونه پوشش‌دار ممکن است به علت قابلیت ایجاد فیلم روئین فوق العاده محافظ کروم باشد.

- [5] G. Xu, M. Kutsuna, Z. Liu and L. Sun, "Characteristic Behaviours of Clad Layer by a Multi-Layer Laser Cladding with Powder Mixture of Stellite-6 and Tungsten Carbide", *Surface & Coatings Technology* 201, pp. 3385-3392, 2006.
- [6] D. Persson, E. Coronel, S. Jacobson and S. Hogmark, "Surface Analysis of Laser Cladded Stellite Exposed to Self-Mated High Load Dry Sliding", *Wear* 261, pp. 96-100, 2006.
- [7] R. Jendrzejewski and G. Sliwinski, "Investigation of Temperature and Stress Fields in Laser Cladded Coatings", *Applied Surface Science* 254, pp. 921-925, 2007.
- [8] E. King, B.J. Fernandes, J. Damborenea and J. Ruiz, "High Temperature Gas Nitriding of Ti₆Al₄V to Improve Wear Surface Properties", *Rev. Metal. Madrid* 36, pp. 403-409, 2000.

۶- پی نوشت

1- Plasma Transferred Arc Welding

به زیر لایه و حداقل رقت را آشکار می سازد. مشاهده شد که با اعمال پوشش سختی سطح افزایش یافت و همچنین در سطح پوشش مقاومت به سایش بالا و قابل مقایسه با TiN حاصل شد. بررسی و مقایسه رفتار خوردگی پوشش و زیر لایه نیز بیانگر افزایش در مقاومت خوردگی می باشد.

۵- مراجع

- [1] H. Alemohammad, Sh. Esmaili and E. Toyserkani, "Deposition of Co-Ti Alloy on Mild Steel Substrate Using Laser Cladding", *Materials Science and Engineering A* 456, pp. 156-161, 2007.
- [2] A. S. D'Oliveira, P. S. Silva and R. Vilar, "Microstructural Features of Consecutive Layers of Stellite 6 Deposited By Laser Cladding", *Surface and Coatings Technology* 153, pp. 203-209, 2002.
- [3] R. Jendrzejewski, A. Conde, J. Damborenea and G. Sliwinski, "Characterisation of the Laser-Clad Stellite Layers for Protective Coatings", *Materials and Design* 23, pp. 83-88, 2002.
- [4] W. C. Lin and C. Chen, "Characteristics of Thin Surface Layers of Cobalt-Based Alloys Deposited by Laser Cladding", *Surface & Coatings Technology* 200, pp. 4557-4563, 2006.