

تلفیق عملیات روکش کاری جوشی و کربوراسیون به منظور بازسازی قطعات صنعتی از فولاد

DIN- 25CrMo4

رضا سعیدی^۱، مسعود مصلائی پور^۲

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پردیس فنی مهندسی، گروه مهندسی مواد، دانشکده معدن و متالوژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲ دانشیار، پردیس فنی مهندسی، گروه مهندسی مواد، دانشکده معدن و متالوژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران



تاریخ دریافت:

۹۷/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش:

۹۷/۱۲/۱۰

مکاتبات

در این پژوهش از تلفیق عملیات روکش کاری و کربوراسیون جهت بازسازی چرخ دنده‌های ساخته شده از فولاد DIN-25CrMo4 استفاده شد. در این راستا ابتدا از عملیات روکش کاری توسط الکتروود قلیایی E 7018-1 به منظور جبران ضخامت از دست رفته و در ادامه از عملیات کربوراسیون جهت افزایش سختی و مقاومت سایشی روکش مذکور استفاده شد. مطالعات ریزساختاری و فازی حاکی از تغییر زمینه فریتی فلز پایه به یک زمینه مارتنزیتی همراه با آستنیت باقیمانده و ترکیبات غنی از آهن و کربن از قبیل کاربید Fe_3C در نمونه کربن‌دهی شده بود که موجب افزایش ۳۰٪~ سختی سطحی شد. بررسی رفتار سایشی نمونه‌ها بهبود چشم‌گیر رفتار سایشی (کاهش ۸۰٪ ضریب اصطکاک و کاهش ۹۰٪ مقدار وزن از دست رفته) نمونه کربن‌دهی شده را نشان داد. مطالعه SEM از سطوح ساییده شده دلالت بر تغییر مکانیزم سایش از سایش خراشان دو جسمی به مکانیزم ترک ریز ناشی از افزایش مقدار فاز مارتنزیت در نمونه کربن‌دهی شده داشت.

روکش، کربوراسیون، SMAW، ریزساختار، سایش

واژگان کلیدی

۱) مقدمه

سطح قطعات منشاء بسیاری از شکست‌ها و ناپیوستگی‌های ناشی از خستگی، سایش و خوردگی می‌باشد که در نهایت منجر به از کار افتادگی قطعات صنعتی می‌شود. لذا حفاظت و مقاوم‌سازی سطح از مسائل بسیار مهم در عمرکاری قطعات، کارآیی یک واحد تولیدی و هزینه‌های مربوطه می‌باشد [۱ و ۲]. از مهم‌ترین دلایل استهلاک قطعات صنعتی حین سرویس‌دهی می‌توان به پدیده سایش اشاره نمود که هزینه‌های زیادی را به همراه دارد. در آمریکا سالانه حدود ۱۷ میلیارد دلار صرف تعمیرات و بازسازی‌های مرتبط با سایش می‌شود [۳].

فولاد کم آلیاژ DIN-25CrMo4 با قابلیت شکل‌پذیری و جوش پذیری مطلوب یکی از مواد مهندسی بسیار مهم در ساخت قطعات صنعتی مانند محورها و چرخ‌دنده‌ها در صنایع هوایی و خودروسازی می‌باشد [۴]. از نقاط ضعف قطعات صنعتی ساخته شده با این آلیاژ می‌توان به پایین بودن مقاومت سایشی آنها به خصوص تحت بارهای دینامیکی اشاره نمود. همچنین به علت مقدار پایین کربن در ترکیب شیمیایی این فولاد (۰/۲۹-۰/۲۲ wt%) امکان افزایش سختی با عملیات حرارتی وجود ندارد [۵ و ۶]. از راهکارهای اقتصادی و صنعتی جهت بازسازی و افزایش عمر کاری قطعات ساییده شده می‌توان به عملیات روکش کاری جوشی همراه با عملیات کربن‌دهی اشاره کرد [۷-۱۰].

عملیات کربوراسیون سطحی، با اضافه کردن کربن بر لایه سطحی فولاد کم کربن در محدوده حرارتی 860°C - 950°C انجام می‌شود. در ادامه با سرد کردن سریع موجب تشکیل فاز مارتنزیت پر کربن با سختی و مقاومت به سایش بالا بر سطح زیر لایه چقرمه از فولاد کم کربن می‌شود [۱۱]. سختی سطح فولاد کربن داده شده عمدتاً تابع میزان درصد کربن نفوذ کرده در سطح است [۱۲-۱۴]. نظر به سختی بالای روکش ایجاد شده توسط الکترودهی سخت کاری و اهمیت قابلیت ماشین کاری روکش‌های ایجاد شده در اغلب کاربردهای صنعتی، در این پژوهش برای بازسازی چرخ‌دنده ساییده شده از فولاد DIN-25CrMo4 ابتدا توسط الکترودهی E 7018-1، جبران ضخامت از دست رفته به علت سایش انجام شد. در ادامه برای افزایش سختی و مقاومت سایشی، سطح روکش کاری شده تحت عملیات کربن‌دهی واقع شدند.

۲) مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد DIN-25CrMo4 با ترکیب شیمیایی $\text{Fe-0.23C-0.2Mo-1.15Cr-0.73Mn-0.02V}$ (wt%) به عنوان زیر لایه استفاده شد. جهت عملیات روکش کاری نمونه‌هایی در ابعاد $15 \times 35 \times 10$ mm³ از زیر لایه دریافتی برش و بعد از آماده سازی سطحی (سنگ زدن تا سمباده ۶۰۰) و چربی‌زدایی در حمام استون مورد عملیات روکش کاری واقع شدند. از الکترودهی E 7018-1 با قطر ۳ mm و ترکیب شیمیایی

$\text{Fe-0.05C-0.21Mo-0.3Cr-1.02Mn}$ (wt%) به عنوان آلیاژ روکش کاری استفاده شد. عملیات روکش کاری توسط فرآیند قوس دستی (SMAW) مطابق پارامترهای جوشکاری ارائه شده در جدول (۱) در وضعیت مسطح مطابق با استاندارد AWS A5.5 انجام شد.

از عملیات کربن‌دهی به روش جامد با استفاده از کک با خلوص بالا ۹۹/۹۸% (به عنوان ماده کربن‌زا) و کربنات سدیم (به عنوان ماده انرژی‌زا) جهت افزایش سختی سطحی و مقاومت سایشی فلز جوش راسب شده استفاده گردید. لازم به ذکر است در ابتدا پودر کک دریافتی توسط دستگاه آسیا مدل PBM-210 با نسبت گلوله‌ی آلومینا به پودر ۳ به ۱ در مدت زمان ۱۸۰ min و با سرعت چرخشی ۲۵۰ rpm آسیا گردید. در ادامه پودر کک آسیاشده با محلول ۱۱ wt% کربنات سدیم با آب گرم (70°C) (میزان بهینه بر اساس بررسی‌های انجام شده) مخلوط و پس از خشک شدن به طور کامل جهت کربن‌دهی مورد استفاده قرار گرفت. یک بوته استوانه‌ای از جنس فولاد SPK به عنوان جعبه سماتاسیون استفاده شد. جهت اشباع شدن بوته سماتاسیون از کربن، ابتدا بوته مورد نظر را از پودر آماده شده پر شده و به مدت زمان ۷ h ساعت در داخل کوره الکتریکی در دمای 950°C قرار گرفت. سپس نمونه‌های مورد نظر در مخلوط پودر کربوراسیون واقع و عملیات کربن‌دهی در دمای 900°C به مدت زمان ۱۰ h انجام و در خاتمه نمونه‌ها در روغن سریع سرد شدند.

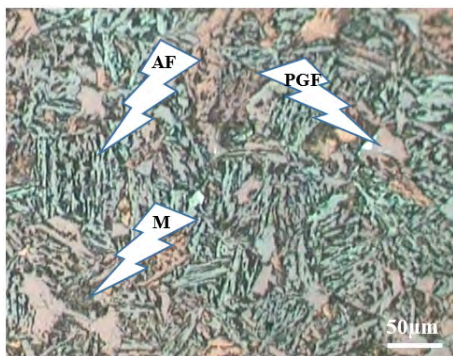
نمونه‌های متالوگرافی در ابعاد $310 \times 20 \times 30$ mm در راستای عمود بر مقطع روکش برش و پس از آماده‌سازی سطحی مطابق با روش‌های استاندارد متالوگرافی توسط محلول $10\text{g Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + 1\text{g KlemmI}$ به مدت 40 ± 5 s در دمای محیط مورد اچ شیمیایی رنگی قرار گرفتند. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی IROST انجام شد. همچنین بررسی ترکیب شیمیایی توسط آنالیز Spot-EDS صورت پذیرفت.

بررسی کیفی فازهای تشکیل شده در ساختار روکش‌ها توسط آزمون تفرق اشعه X با سرعت پیشروی $0.05^{\circ}/\text{sec}$ در بازه زاویه‌ای 10° - 100° توسط اشعه $\text{K}\alpha\text{Cu}$ با طول موج 1.54184 Åنگستروم انجام شد. توزیع سختی در امتداد مقطع روکش کاری شده با استفاده از دستگاه میکروسختی Koopa تحت بار اعمالی ۱ kg و مدت زمان نشست ۱۰ s اندازه‌گیری و رسم شد.

جهت بررسی مقاومت سایش نمونه‌ها، دیسک‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۴۰ mm و ارتفاع ۸ mm از مقطع روکش برش و بعد از مسطح نمودن سطح جوش تا سمباده ۸۰۰ سنگ زده شد. آزمون سایش به روش پین روی دیسک و از فولاد بلبرینگ با سختی RC ۶۴ و طول ۱۰۰ mm و قطر عرقچین ۵ mm به عنوان پین ساییده استفاده شد. همچنین آزمون تحت نیروی عمودی ۴۰ N با سرعت دورانی ۷۷ rpm در دمای 30°C و رطوبت ۱۰% در مسافت سایشی ۱۰۰۰ m انجام پذیرفت. کاهش وزن نمونه‌ها نیز با استفاده از ترازوی دیجیتالی

راسب ارائه شده است. همانگونه که از در شکل ۲-الف نشان داده شده است عملیات روکش کاری موجب ایجاد ساختار ستونی شکل از فاز فریت با مورفولوژی‌های مختلف ویدمن شاتن، مرزخانه‌ای و چند وجهی شده است. عملیات کربن‌دهی و کوینچ در روغن موجب ایجاد زمینه مارتنزیتی بشقابی همراه با آستنیت باقیمانده در بین تیغه‌های مارتنزیتی شد (شکل ۲-ب). در نمونه کربن‌دهی شده با حرکت از سطح فوقانی روکش به سمت نواحی پایین تر مقدار آستنیت باقیمانده افزایش می‌یابد (افزایش نواحی سفیدرنگ قسمت پایینی شکل ۲-ب) که می‌توان به نفوذ کمتر کربن در قسمت تحتانی روکش نمونه نسبت به سطح نمونه اشاره کرد.

نتایج بدست آمده از آنالیز خطی بعد از عملیات کربن‌دهی بر روی نمونه روکش کاری شده (شکل ۳) حاکی از افزایش حدود ۲۰٪ میزان کربن در سطح روکش بعد از عملیات کربن‌دهی دارد. همچنین میزان عمق نفوذ را مطابق آنالیز خطی در حدود ۱/۲ mm تخمین زده شد.



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز پایه

با دقت ۰/۱ mg بعد از هر ۱۰۰ متر سایش اندازه‌گیری شد. همچنین ضریب اصطکاک بین بین و سطح نمونه تعیین شد. به منظور تعیین مکانیزم سایش، سطوح ساییده شده مورد مطالعات SEM واقع شد.

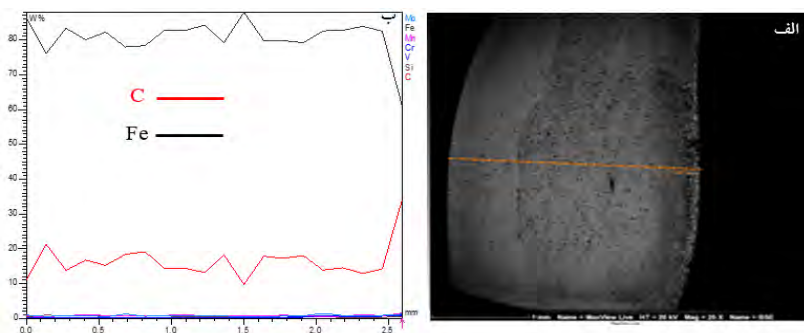
۳) نتایج و بحث ۱) مطالعات ریزساختاری

در شکل ۱ ریزساختار نوری زیرلایه دریافتی نشان داد شده است. نظر به وجود عناصری آلیاژی پایدار کننده فاز فریت مانند کروم و مولیبدن در ترکیب شیمیایی زیرلایه، ریزساختار آن از یک زمینه فریتی با مورفولوژی مختلف چندوجهی (PGF) و سوزنی (AF) با رنگ‌های آبی روشن و کرم همراه با جزایر پراکنده از مارتنزیت (M) که به صورت مناطق تیره تشکیل شود.

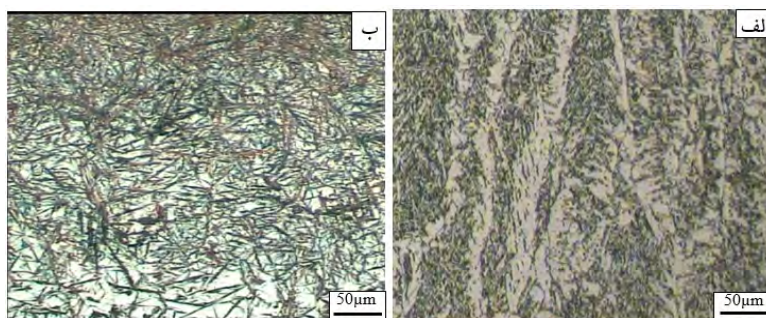
در شکل ۲ تصاویر نوری از ریزساختار روکش ایجاد شده با استفاده از الکتروند E 7018-1 در حالت قبل و بعد از عملیات کربن‌دهی روکش

جدول ۱: پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

سرعت جوشکاری	۰/۳ m/min
دمای پیش گرم	۱۰۰-۱۲۰°C
دمای پس گرم	۴۰-۴۳°C
دمای بین پاسی	۲۰-۲۲°C
شدت جریان و پلارینه جوشکاری	۱۱۳±۵(A) / DCEP
ولتاژ جوشکاری	۲۰±۲(V)
گرمای ورودی	۳۸۰±۲۰j/mm



شکل ۲: تصویر نوری از سطح نمونه روکش کاری شده E 7018-1 (الف) قبل از عملیات کربن‌دهی (ب) بعد از عملیات کربن‌دهی.

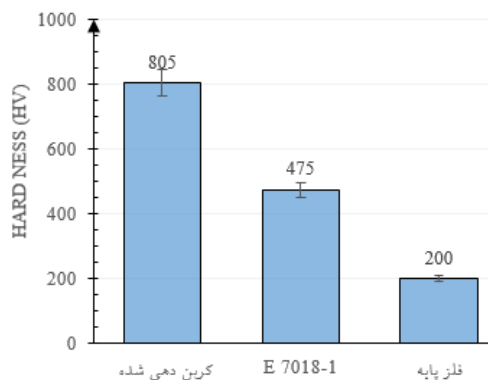


شکل ۳: تصویر آنالیز خطی از سطح روکش کربن‌دهی شده (الف) مسیر آنالیز خطی از سطح روکش، (ب) آنالیز خطی

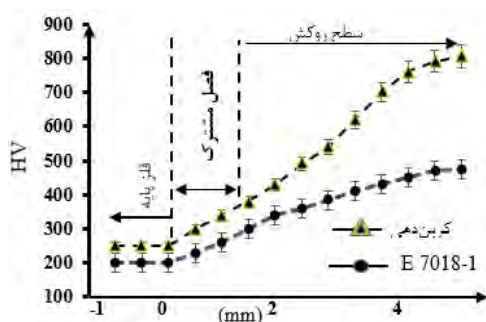
به میزان چشمگیری از سختی زیر پایه (HV 195 ± 5) بیشتر می‌باشد. افزایش سختی ایجاد شده در اثر عملیات کربن‌دهی نسبت به نمونه روکش‌دهی شده را می‌توان به تشکیل فازهای بین‌فلزی و مارتنزیت پرکربن نسبت داد. افزایش سختی با حرکت به نواحی فوقانی روکش، ناشی از کاهش میزان مشارکت فلز پایه (رقت) در این نواحی از نمونه روکش شده و افزایش میزان نفوذ کربن در قسمت سطحی روکش نمونه کربن‌دهی شده می‌باشد.

۴(۳) بررسی سایش

روند تغییرات وزن نمونه‌ها حین آزمون سایش در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصله می‌توان متوجه تاثیر مطلوب عملیات کربن‌دهی در بهبود رفتار سایشی روکش جوشی ایجاد شده (کاهش چشمگیر وزن از دست داده شده) شد. بطوری که روکش ایجاد شده با الکتروود E 7018-1، تنها بعد از طی مسافت ۳۰۰ متر با کاهش وزن بسیار زیادی (حدود ۱۰/۳ mg) مواجه گردید. حال آنکه کاهش وزن نمونه کربن‌دهی شده بعد از طی مسافت ۱۰۰۰ متر کمتر از mg^2 بود. از نکات قابل توجه در این نمودار می‌توان به کاهش شیب کاهش وزن نمونه‌ی کربن‌دهی شده، با انجام سایش اشاره نمود. علت این را می‌توان ناشی از استحاله آستنیت به مارتنزیت و تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در سطوح سایش دانست. بعبارت دیگر تغییر فرم ایجاد شده حین مراحل ابتدایی سایش موجب کارسختی و در نتیجه افزایش سختی سطحی می‌گردد. انجام استحاله آستنیت به مارتنزیت و وقوع



شکل ۵: نتایج حاصل از آزمون سختی از سطح روکش نمونه‌ها



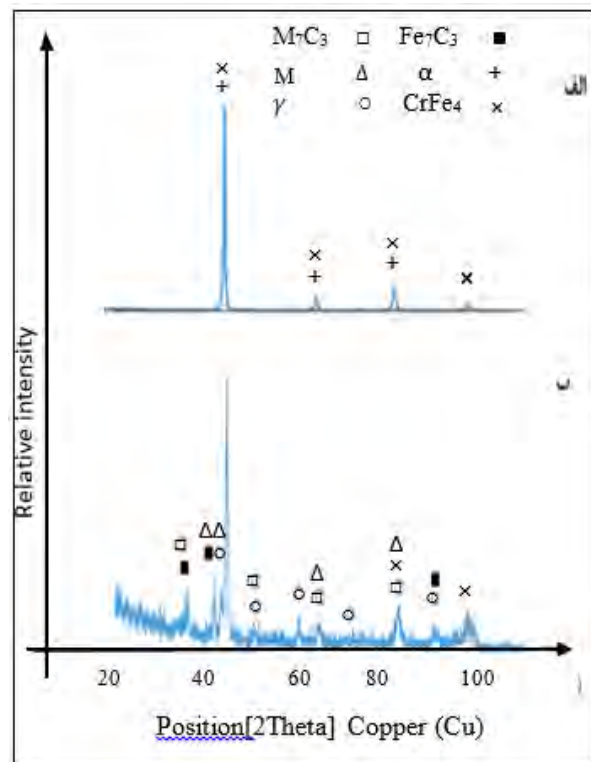
شکل ۶: نمودار سختی بر حسب فاصله از سطح روکش به سمت فلز پایه.

۲(۳) بررسی نتایج XRD

با توجه به نتایج آزمون تفرق اشعه ایکس از روکش نمونه‌ها در شکل (۴) و بررسی‌های انجام شده بر اساس میزان شدت و زاویه پیک‌های شناسایی شده مشخص گردید. با پایین بودن مقدار کربن ($0.1\% \text{ wt}$) و عنصر آلیاژی کروم در فلز جوش نمونه روکش شده هیچ گونه ترکیبات کاربیدی در ریزساختار این نمونه شکل نگرفته است و فاز ایجاد شده در ساختار روکش شامل یک زمینه فریتی همراه با ترکیبات بین‌فلزی از آهن و کروم به صورت $CrFe_4$ می‌باشد. عملیات کربن‌دهی موجب نفوذ کربن و همچنین با توجه به شرایط عملیات شامل (دمای عملیات و سرعت سرد شدن بالا) منجر به شکل‌گیری فازهای مارتنزیتی و آستنیت باقیمانده همراه با ترکیبات کاربیدی سختی از آهن و کربن در ریزساختار نمونه کربن‌دهی شده گردید. کارت ارائه شده توسط پایگاه داده JCPDS به شماره ۰۲۹۸-۰۰۳۳-۰۰، ۰۴۴-۰۰۰-۱۲۹۲، در انطباق با نتایج XRD می‌باشد.

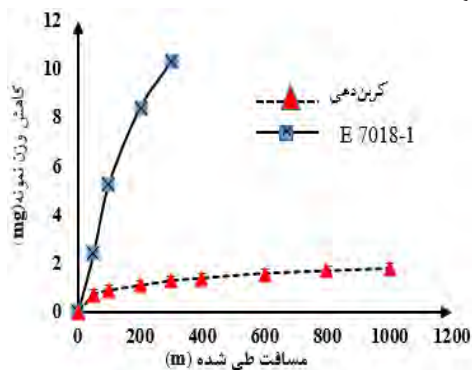
۳(۳) بررسی‌های ریزسختی

نتایج آزمون ریزسختی از زیرپایه و سطح روکش نمونه‌ها در شکل ۵ و توزیع سختی از سطح روکش به سمت زیرپایه در شکل ۶ ارائه شده است. همانگونه که از شکل‌ها برداشت می‌شود، انجام عملیات روکش جوشی و کربن‌دهی موجب افزایش $\sim 300\%$ سختی سطح روکش نسبت به سختی فلز پایه شده است. به طوری که بیشترین میزان سختی برابر با $805 \pm 2 \text{ HV}$ برای نمونه کربن‌دهی شده ثبت گردید که



شکل ۴: الگو پراش XRD از سطح روکش با الکتروود E 7018-1 (الف) قبل عملیات کربن‌دهی (ب) بعد از عملیات کربن‌دهی.

می‌دهد که بیانگر مکانیزم سایش خراشان دو جسمی از نوع خیش ریز به علت سختی بالای روکش مذکور می‌باشد. همچنین کندگی‌های ایجاد شده در ادامه مسیر سایش را می‌توان به وجود ریز ترک‌ها در لایه روکش نسبت داد. این ریز ترک‌ها در اثر تغییر شکل لایه‌های سطحی به هم متصل شده و موجب کندگی‌های بسیار ریز در مسیر سایش می‌شود که هم در بررسی سطوح ساینده شده و هم در بررسی ذرات حاصل از سایش (شکل ۹-ب) با توجه به اندازه کوچک ذرات جدا شده از سطح دیده می‌شوند. بنابراین مکانیزم غالب سایش در این نمونه را می‌توان مکانیزم برش ریز بیان کرد. وجود شیارهای پهن‌تر و عمیق‌تر در سطح نمونه روکش کاری شده با الکتروود E 7018-1 در مقایسه با نمونه کربن‌دهی شده (شکل ۹-ج) مبین یک حالت شخم زدگی در سطح حین سایش می‌باشد که از دلایل اصلی آن می‌توان به پایین بودن میزان سختی روکش اشاره کرد. جدا شدن ورقه‌های ذرات ساینده شده و همچنین لایه‌های ورقه‌ای شکل باقیمانده در سطح سایش دلالت بر مکانیزم ورقه‌ای سایش در این نمونه دارد.



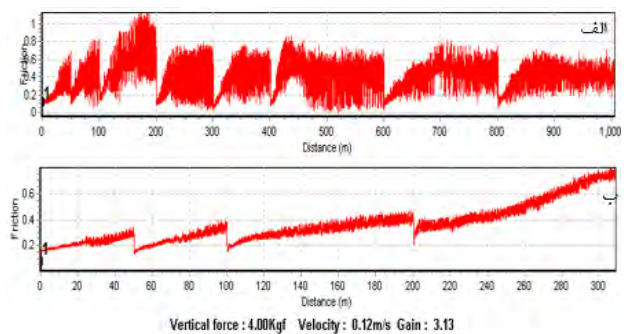
شکل ۷: نمودار کاهش وزن نمونه‌ها بعد از طی مسافت سایشی ۱۰۰۰ m

کارسختی در طی آزمون سایش توسط محققین دیگر نیز ارائه شده است [۱۴ و ۱۵].

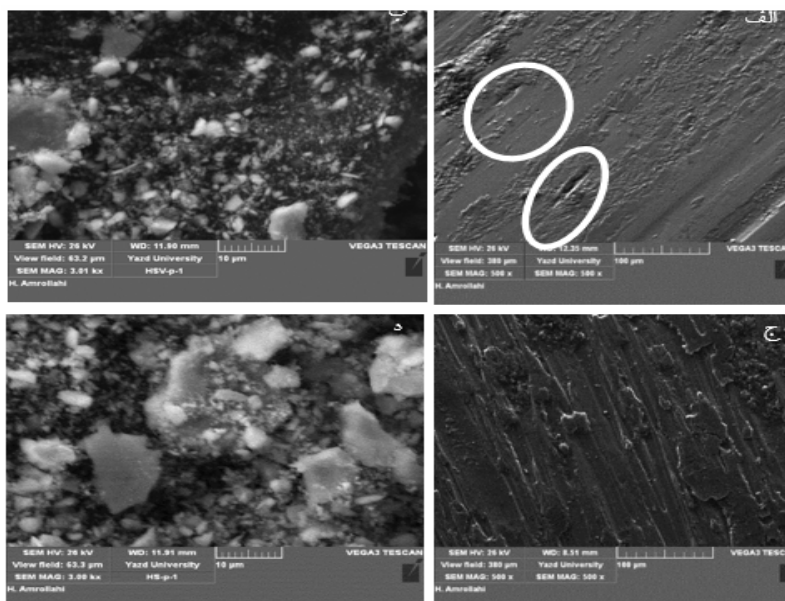
۵(۳) بررسی مکانیزم سایش

از عوامل موثر در ضریب اصطکاک می‌توان به سطح تماس واقعی بین پین و سطح روکش اشاره نمود. افزایش سختی در سطح روکش نمونه کربن‌دهی شده موجب ایجاد کمترین میزان ضریب اصطکاک (میانگین ~ 0.4) در این نمونه شده است (شکل ۸-الف). در مقابل سختی کمتر در نمونه روکش کاری شده با E 7018-1 منجر به نفوذ بیشتر پین در سطح روکش و تماس بیشتر پین با روکش مذکور و در نتیجه ایجاد ضریب اصطکاک بیشتر (میانگین ~ 0.8) می‌شود (شکل ۸-ب).

جهت بررسی بهتر و تشخیص ساز و کار غالب سایش در هر نمونه، مسیر سایش و ذرات ساینده شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. (شکل ۹-الف). تصویر SEM از سطح خیش خورده روکش نمونه کربن‌دهی شده با پهنای کم را نشان



شکل ۸: تغییرات ضریب اصطکاک بین پین و سطح روکش نمونه‌های (الف) نمونه کربن‌دهی شده (ب) نمونه روکشی با E 7018-1.



شکل ۹: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح ساینده شده و ذرات حاصل از سایش نمونه کربن‌دهی شده (الف و ب) و نمونه E7018-1 (ج و د).

۴) نتیجه گیری

با بررسی‌های انجام گرفته در رابطه با عملیات کربوراسیون بر روکش جوشی جهت بازسازی قطعات صنعتی ساخته شده از فولاد DIN-25CrMo4 مشخص شده که:

- ۱- از مزایای مهم بازسازی قطعات صنعتی به روش لایه گذاری با الکتروود E 7018-1 می‌توان به سختی کم و در نتیجه ماشین‌پذیری مطلوب برای ایجاد هندسه مورد نظر در نمونه اشاره نمود.
- ۲- حداکثر سختی در سطح روکش ایجاد و کاهش سختی با افزایش فاصله از سطح لایه روکش به سمت زیرلایه را می‌توان به علت مشارکت سطح زیر لایه در لایه روکش نسبت داد.
- ۳- مطالعات فازی XRD حکایت از تشکیل فاز مارتنزیت و ترکیبات کربیدی از آهن و کربن در نمونه کربن دهی شده دارد.
- ۴- عملیات کربوراسیون منجر به افزایش ۸۵ درصدی سختی سطح فلز جوش (475 ± 5 HV) به $(805 \pm 5$ HV) نسبت به سختی این سطح قبل از عملیات کربن‌دهی شد
- ۵- عملیات کربن‌دهی موجب و کاهش ۵۶٪ نرخ سایش (از 18 mg/m به 0.032 mg/m) نسبت به نمونه لایه گذاری شده با الکتروود E 7018-1 شده که دلیل آن را می‌توان ناشی از شکل‌گیری فاز سخت مارتنزیت در زمینه دانست که مانع از نفوذ پین در سطح روکش می‌شود.

تشکر و قدر دانی

نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از مدیریت محترم شرکت الکتروود یزد جناب مهندس عسگری، اعضای محترم پژوهشی شرکت الکتروود یزد آقایان دکتر فاخری، مهندس عمانی و مهندس راستی به پاس همکاری در انجام پژوهش حاضر اعلام می‌دارند.

۵) مراجع

- [1]. Sapate, S. G., and A. V. RamaRao. "Erosive wear behaviour of weld hardfacing high chromium cast irons: effect of erodent particles." *Tribology International* 39, no. 3 (2006): 206-212.
- [2]. de Melo, Anderson CA, Júlio César G. Milan, Márcio B. da Silva, and Álisson R. Machado. "Some observations on wear and damages in cemented carbide tools." *Mechanical Sciences and Engineering* 28, no. 3 (2006): 269-277..
- [3]. Spittel, M., and T. Spittel. "Steel symbol/number: 25CrMo4/1.7218." *Metal Forming Data of Ferrous Alloys-deformation behavior* "Springer, Berlin, Heidelberg 32, (2009): 1038-1043.
- [۴] رحیمی، ا. "تعمیر ابزارها و قالب‌های تحت سایش"، انتشارات جهان جام جم، چاپ اول، ص ص ۱۱۲-۱۱۳، سال ۱۳۹۳.
- [۵]. کامنیچینی، ای.، ر. شکری، "کاربرد و عملیات حرارتی فولادها" مرکز نشر دانشگاهی، ص ص ۱۵۳-۱۵۵، سال ۱۳۶۶.
- [۶]. تاسمون، ا. رحیمی، ا. "تعمیر ابزارها و قالب‌های تحت سایش به روش جوشکاری با گاز محافظ (MIG,MAG,TIG)" انتشارات جام جم، ص ص ۲۴۱-۲۴۳، سال ۱۳۹۳.
- [7]. Kirchgaßner, M., Badisch, E., & Franek, F. (2008). Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear*, 265(5-6), 772-779..
- [8]. Handbook, AWS Welding. "Welding Processes—Arc and Gas Welding and Cutting, Brazing, and Soldering." Miami: American Welding Society, vol. 7, pp. 235-241, 2008
- [۹]. علمی حسینی، ر. خسروی، ح. "بررسی تاثیر مقدار کربنات سدیم به عنوان ماده انرژی زا بر عمق لایه کربوره فولاد کم کربن ۱۵۹۲۰"، فصل نامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال ۳، شماره ۲، ص ص ۳۷-۴۵، پاییز ۱۳۸۸
- [۱۰]. علمی حسینی، ر. خسروی، ح. قادری، ا. "بررسی تاثیر هوای اضافی و فعال ساز بر عمق سختی در فرآیند کربن دهی جامد فولاد DIN 18CrNi8"، فصل نامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال ۳، شماره ۴، ص ص ۶۶-۷۴ زمستان، ۱۳۸۸
- [11]. Selvi, S., S. P. Sankaran, and R. Srivatsavan. "Comparative study of hardfacing of valve seat ring using MMAW process." *Journal of materials Processing technology* 207, no. 1-3 (2008): 356-362.
- [۱۲]. عظیمی، ق. شمعانیان، م. "روکش کاری فولاد ساده کربنی با الکترودهای پرکروم، وارزیابی ریزساختار و رفتار سایشی روکش". فصل نامه علوم مهندسی سطح، سال ۴، شماره ۶، ص ص ۸۲-۸۵ زمستان ۱۳۸۷.
- [13]. Coronado, John J., Holman F. Caicedo, and Adolfo L. Gómez. "The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits." *Tribology International* 42, no. 5 (2009): 745-749.
- [14]. Mendez, Patricio F., Nairn Barnes, Kurtis Bell, Steven D. Borle, Satya S. Gajapathi, Stuart D. Guest, Hossein Izadi, Ata Kammyabi Gol, and Gentry Wood. "Welding processes for wear resistant overlays." *Manufacturing Processes* 16, no. 1 (2014): 4-25
- [15]. Wang, X. H., F. Han, X. M. Liu, S. Y. Qu, and Z. D. Zou. "Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings." *Materials Science and Engineering: A* 489, no. 1-2 (2008): 193-200.