

اثر درجه رقت لایه‌های جوشکاری بر ریزساختار و مقاومت به سایش خراشان آلیاژ روکش

سخت پایه Fe-C-Mn روی فولاد ساده‌ی کربنی

مهدی محمدی خواه^۱، حامد ثابت^{۲*}، اکبر هادی‌زاده^۳، سعید محرابیان^۳ و نوید میرزامحمد^۳

چکیده

در این پژوهش، اثر درجه‌ی رقت لایه‌های رسوبی جوشکاری بر فولاد ساده‌ی کربنی (ST52) به روش^۴ FCAW با استفاده از سیم توپودری حاوی فرومنگنز بر ریزساختار و مقاومت به سایش آلیاژ روکش سخت پایه‌ی Fe-C-Mn مورد بررسی قرار گرفته است. بمنظور جوشکاری در ۳ حالت گوناگون از نظر لایه‌های رسوبی به صورت تک لایه، دولایه و سه لایه روی فولاد کربنی انجام و سپس آزمون‌های متالوگرافی نوری، SEM، ترکیب شیمیایی، سختی سنجی و سایش روی پاس‌های گوناگون هر لایه انجام گرفت. نتایج متالوگرافی مشخص کرد که ریزساختار لایه‌های رسوبی نخست و دوم شامل مارتنزیت و آستنیت بوده، ولی به دلیل تغییر درجه‌ی رقت در لایه‌های رسوبی، درصد فازهای مارتنزیت و آستنیت آن‌ها با یکدیگر متفاوت است. ریزساختار لایه‌های رسوبی سوم نیز از آستنیت تشکیل شده بود. نتایج آزمون ترکیب شیمیایی نیز مشخص کرد که با افزایش شمار لایه‌ها اندازه‌ی رقت تغییر کرده در نتیجه، ترکیب شیمیایی لایه‌های رسوبی با یکدیگر متفاوت است. نتایج آزمون‌های سختی و سایش خراشان روی نمونه‌های گوناگون مشخص کرد که با افزایش تعداد لایه‌ها، سختی و مقاومت به سایش کاهش می‌یابد. بررسی سختی سنجی پس از آزمون سایش، نشانگر افزایش دست کم ۱۰ درصد در اندازه‌ی سختی نمونه‌ها بود که دلیل این موضوع ناشی از تغییرات ایجاد شده در ریزساختار ناشی از کارسختی موضعی در نمونه‌های مورد سایش تشخیص داده شد. هم‌چنین، بالاترین سختی و بهترین مقاومت به سایش خراشان، به لایه‌ی رسوبی نخست مربوط بود. بررسی SEM سطوح سایش نیز مشخص کرد که سازوکار سایش تمامی نمونه‌های جوشکاری شده از نوع شخم‌زنی بوده، ولی با این تفاوت که عمق خطوط سایش مربوط به لایه‌ی رسوبی نخست کم‌تر از سایر نمونه‌ها بود.

واژه‌های کلیدی: درجه‌ی رقت، Fe-C-Mn، ریزساختار، مقاومت به سایش، فولاد ساده‌ی کربنی.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد- باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، شرکت کاوش جوش.

۲- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه آزاد اسلامی (واحد کرج).

۳- شرکت کاوش جوش.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: h-sabet@kia.ac.ir

4- Flux Cored Arc Welding

پیشگفتار

سایش عبارت است از کاهش تدریجی ماده از سطح جسمی که در مقابل سطح جسم دیگر حرکت نسبی دارد. سایش بر خلاف مدول الاستیسیته و سختی، ویژگی ذاتی ماده نیست و بستگی به مولفه‌های سطحی یک مجموعه (تریبوسیستم) دارد [۱]. سایش، نخست سبب تخریب‌های سطحی می‌شود، ولی در مراحل بعدی، می‌تواند سبب پیدایش سر و صدا، گرمای ناخواسته و تغییرات ابعادی در قطعات گردد. پدیده‌ی یادشده موجب اختلال در کارایی قطعات شده و ممکن است سبب شکستن آن‌ها گردد [۱ و ۲]. میزان سایش مواد بستگی به محیط سایش، نیروهای اعمالی، جنس و اندازه‌ی ذرات ساینده‌ی موجود در مجموعه و همچنین، فراسنج‌های متالورژیکی ماده‌ی مورد سایش مانند ساختار میکروسکوپی، فازها و دانه‌بندی دارد [۳].

ویژگی‌های آلیاژهای روکش سخت، تابعی از ترکیب شیمیایی، شرایط انجماد، سرعت سرد شدن (پس از انجماد)، ریزساختار و نوع، شکل و توزیع فازها است [۴]. براین اساس، آلیاژهای روکش سخت پایه‌ی آهنی براساس نوع سیستم آلیاژی بکار برده شده یا ریز ساختار میکروسکوپی، تقسیم‌بندی می‌شوند. براساس نوع سیستم آلیاژی، آلیاژهای روکش سخت به دو دسته‌ی Fe-C-X و Fe-Cr-C تقسیم‌بندی می‌شوند [۵]. آلیاژهای روکش سخت پایه‌ی Fe-C-X در شرایط سایش خراشان و همراه با ضربه، کاربردی گسترده دارند. برای نمونه، می‌توان به قطعات بکار رفته در صنایع سیمان، معدن و راه‌سازی اشاره کرد [۵ و ۶]. نوع و مقدار عناصر آلیاژی در آلیاژ روکش سخت Fe-C-X بر حسب سازوکار سایش و عملکرد لایه‌ی سخت انتخاب می‌شوند [۶]. برای نمونه، افزودن عنصر B بمنظور بهبود مقاومت به رفتگی مورد توجه بوده است. عناصری مانند Ti, V, Mo و Nb [۷]، به گونه‌ی عمده برای بهبود مقاومت به سایش خراشان، به سیستم آلیاژی Fe-C-X افزوده می‌شوند. این آلیاژها براساس ساختار میکروسکوپی به دسته‌های گوناگونی نیز تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از [۵-۷]: ۱- ساختار آستنیتی‌های اولیه همراه یوتکتیک

آستنیت- کاربید.

۲- ساختار یوتکتیک آستنیت- کاربید

۳- ساختار کاربیدهای اولیه همراه یوتکتیک آستنیت- کاربید

۴- ساختار مارتنزیتی

۵- ساختار آستنیتی همراه کاربیدهای آلیاژی

۶- ساختار آستنیتی- مارتنزیتی

ساختارهای شامل آستنیت، برای کاربردهای مقاومت به سایش خراشان همراه با ضربه‌ی بالا و مقاومت به سایش خراشان زیر نیروهای کم، مناسب‌اند. ساختارهای حاوی مارتنزیت برای کاربردهای مقاومت به سایش خراشان زیر نیروهای کم و مقاومت به سایش چسبان فلز با فلز مناسب‌اند و ساختارهای حاوی کاربید برای کاربردهای مقاومت به سایش خراشان بسیار شدید، مقاومت به سایش در دمای بالا و مقاومت به سایش توام با خوردگی کم مناسب‌اند [۸ و ۹]. از بین عناصر آلیاژی برگزیده، عنصر منگنز با انرژی آزاد تشکیل کاربید 16 kJ/mol ، توانایی تشکیل کاربیدهای M_3C را در سیستم آهن-کربن داراست. افزودن بیش از حد منگنز (بیش‌تر از ۱۲ درصد) و کربن (بیش‌تر از ۰/۸ درصد) سبب تشکیل ساختار آستنیتی همراه کاربیدهای آلیاژی کمپلکس آهن منگنز با ترکیب $(\text{FeMn})_3\text{C}$ می‌گردد [۹]. این ساختار، توانایی استحاله‌ی مارتنزیتی را در تنش‌های القا شده دارد، از این رو، خانواده‌ی فولادهای آستنیتی منگنزی، مشهور به فولادهای هادفیلد بخشی از فولادهای مقاوم به سایش همراه با ضربه، شناخته شده‌اند و در صنایع معدنی و راه‌سازی به گونه‌ای گسترده بکار می‌روند [۱۰]. از آنجایی که عنصر منگنز نسبت به سایر عناصر آلیاژی (مانند کروم یا نایوبیم) از نظر اقتصادی، باصرفه‌تر است؛ لذا، استفاده از سیستم آلیاژی Fe-C-Mn به جای سیستم‌های آلیاژی Fe-C-Nb و Fe-Cr-C در کاربردهای سایش خراشان مورد توجه صنعت‌گران و پژوهشگران بوده است [۱۱ و ۱۲]. بر این اساس، استفاده از عناصر آلیاژی در آلیاژ روکش سخت پایه‌ی Fe-C-Mn مورد توجه پژوهشگران گوناگون بوده [۱۳-۱۷] و پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده

(ST52) با ابعاد $150 \times 30 \times 10$ میلی‌متر به‌عنوان فلز پایه (زیر لایه) استفاده شد. ورق‌های فولادی پس از آماده سازی اولیه که شامل: سنباذه زنی سطحی و شستشو با استن بود، به روش FCAW به گونه‌ی دولایه و سه لایه بر اساس فراسنج‌های ارایه شده در جدول ۱ مورد عملیات جوشکاری قرار گرفتند. شکل ۱، نمای شمار لایه‌های جوشکاری شده را نشان می‌دهد.

پس از جوشکاری نمونه‌هایی از سطح هر لایه تهیه و به روش اسپکتروگرافی نشرنوری^۱ (OES) با دستگاه مدل METAVISION-108N، ترکیب شیمیایی فلز رسوب تعیین شد. بمنظور تعیین ترکیب شیمیایی هر لایه، دست‌کم ۳ نقطه‌ی گوناگون از هر لایه، مورد آزمون قرار گرفت که میانگین نتایج آن‌ها به‌عنوان معیار ترکیب شیمیایی لایه‌ی رسوبی در نظر گرفته شد. هم‌چنین، بمنظور تعیین رقت هر لایه با توجه به ترکیب شیمیایی لایه‌ها از رابطه‌ی زیر استفاده شد [۴].

$$D = \frac{P_{x1} - P_{x2}}{P_{x3} - P_{x2}} \times 100$$

که در آن، P_{x1} : غلظت عنصر x در لایه‌ی موردنظر، P_{x2} : غلظت عنصر x در سیم جوش مصرفی، P_{x3} : غلظت عنصر x در لایه‌ی زیرین و D : میزان رقت (برحسب درصد) می‌باشد. گفتنی است اندازه‌ی رقت هر لایه از میانگین مجموع رقت‌های بدست‌آمده از عناصر کربن، منگنز، کروم و نیکل آن لایه، محاسبه گردید.

بمنظور متالوگرافی، نمونه‌ها پس از آماده سازی اولیه، شامل سنباذه زنی و پولیش، به وسیله‌ی محلول نایتال ۲درصد، اچ شدند. بررسی ریزساختار به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری مدل Prior England مجهز به سامانه‌ی تجزیه تصویری^۲ و هم‌چنین، میکروسکوپ الکترونی مدل VEGA TESCAN زیر ولتاژ شتاب دهنده‌ی ۲۰kV انجام گرفت، سختی سنجی هر لایه نیز به روش برینل با ساچمه‌ی ۲/۵ میلی‌متری و نیروی ۱۸۷/۵ کیلوگرم با

است. Kazantseva و همکارانش [۱۳]، اثر عنصر بور بر رفتار سایش خراشان آلیاژ روکش سخت پایه‌ی Fe-C-Mn را بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها حضور بور (۱ درصد) در کنار منگنز، سبب تشکیل بوراید منگنز در ساختار آستینینی می‌شود که سبب بهبود مقاومت به سایش خراشان آلیاژ روکش سخت می‌گردد. این نتیجه در شرایط سایش رفتگی نیز به وسیله‌ی Kim و همکارانش [۱۴] گزارش شده است. Kulishenko و همکارانش [۱۵]، اثر عنصر کروم را بر مقاومت به سایش خراشان آلیاژ روکش سخت آستینینی منگنزدار مورد بررسی قرار دادند و مشخص کردند که حضور کروم (تا ۱۰ درصد) سبب افزایش مقاومت سایش خراشان می‌شود. Yildizli و همکارانش [۱۶]، رفتار مقاومت به سایش رفتگی آلیاژ روکش سخت آستینینی منگنزدار، شامل عناصر آلیاژی تیتانیم و تنگستن را در زوایای برخورد ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در مورد فولاد ساده‌ی کربنی بررسی کردند. بر پایه‌ی بررسی آن‌ها، بالاترین نرخ سایش در زاویه‌ی برخورد ۹۰ درجه و کم‌ترین آن در زاویه‌ی برخورد ۳۰ درجه انجام گرفته است که ناشی از حضور کاربیدهای پراکنده‌ی تیتانیم و تنگستن در زمینه‌ی آستینینی عنوان شده است. هم‌چنین، در پژوهشی که به وسیله‌ی Mendez و همکارانش انجام گرفت [۱۷]، اثر عنصر مولیبدن بر ریزساختار فولاد روکش سخت آستینینی منگنزدار بررسی شده است. نتایج بدست آمده در پژوهش یادشده، بیان‌گر بهبود مقاومت به سایش خراشان در دمای بالا در صورت حضور مولیبدن (تا ۳ درصد) در آلیاژ روکش سخت پایه‌ی Fe-C-Mn عنوان شده است. هم‌چنین، آن‌ها مشخص کردند که حضور مولیبدن در دمای محیط نیز سبب بهبود کار سختی آلیاژ روکش می‌شود. از آن‌جایی‌که گزارشی درباره‌ی اثر درجه‌ی رقت بر رفتار سایشی این دسته از آلیاژهای روکش سخت موجود نمی‌باشد، این پژوهش، برنامه ریزی و انجام گردید.

روش پژوهش

بمنظور انجام پژوهش، از ورق‌های فولاد ساده‌ی کربنی

^۱- Optical Emission Spectroscopy

^۲- Image Analysis

ریزساختار میکروسکوپی لایه‌ی رسوبی نخست را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، ریزساختار لایه‌ی رسوبی نخست، شامل مارتنزیت به همراه آستنیت می‌باشد. ریزساختار لایه‌ی رسوبی دوم در شکل (ب-۳) ارائه شده و شامل آستنیت بیش‌تر و مارتنزیت کم‌تر نسبت به لایه‌ی نخست می‌باشد. شکل (ج-۳)، ریزساختار میکروسکوپی لایه‌ی رسوبی سوم را نشان می‌دهد، همان‌گونه که از این شکل مشخص است، ریزساختار بدست آمده به گونه‌ی کامل از آستنیت تشکیل شده است. با توجه به این نتایج، بین ترکیب شیمیایی لایه‌های رسوبی و ریز ساختار میکروسکوپی بدست آمده، انطباقی کامل وجود دارد، به گونه‌ای که با افزایش درصد عناصر کربن، منگنز و نیکل در لایه‌های بالاتر، ریزساختار نیز از حالت مارتنزیتی به حالت آستنیتی تغییر یافته است زیرا کربن، منگنز و نیکل پایدارکننده‌ی آستنیت بوده و دمای شروع تشکیل مارتنزیت (Ms) را کاهش می‌دهند [۱۰ و ۱۳]. در واقع با توجه به تغییر درجه رقت لایه‌های گوناگون، ترکیب شیمیایی لایه‌ها تغییر کرده است و در نتیجه، با توجه به رابطه‌ی دمای تشکیل مارتنزیت (Ms)، تغییراتی در درصد فازهای مارتنزیت و آستنیت در ریزساختار لایه‌های گوناگون مشاهده می‌شود.

جدول ۳، دمای شروع تشکیل مارتنزیت را برای لایه‌های گوناگون ارائه می‌دهد، همان‌گونه که از جدول ۳ مشخص است، با توجه به دمای شروع تشکیل مارتنزیت در لایه‌ی رسوبی نخست که ۲۱۵ درجه‌ی سانتیگراد است، تشکیل مارتنزیت در این لایه در دماهای بالاتر از دمای محیط شروع شده؛ لذا، در دمای محیط درصد حجمی بالای از آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود که نتیجه‌ی آن، حضور درصد حجمی آستنیت باقی‌مانده‌ی کمی در ریزساختار می‌باشد. بررسی متالوگرافی به کمک تجزیه‌ی تصویری مشخص کرد که ریزساختار لایه‌ی نخست متشکل از ۸۰ درصد مارتنزیت و ۲۰ درصد آستنیت باقی‌مانده است. با توجه به ترکیب شیمیایی لایه‌ی دوم در جدول ۳، دمای تشکیل مارتنزیت در لایه‌ی دوم، ۵۲ درجه‌ی سانتیگراد است. بررسی متالوگرافی

استفاده از دستگاه سختی سنج مدل HVS-1000 انجام گرفت. آزمون سختی سنجی دست‌کم در مورد ۵ نقطه‌ی گوناگون از هر لایه انجام شد که میانگین نتایج آن‌ها به‌عنوان معیار سختی سنجی لایه‌ی رسوبی در نظر گرفته شد. آزمون سایش خراشان (ماسه‌ی خشک و چرخ لاستیکی) بر اساس معیار ASTM G65(A) با نیروی اعمالی ۱۳۰ نیوتن در مورد نمونه‌هایی به ابعاد $80 \times 30 \times 10$ میلی‌متر از هر لایه انجام شد. بدین منظور، ذرات کروی کوارتز با اندازه‌ی دانه‌ی AFS 50/70 با دبی ثابت (۳۵۰ گرم در دقیقه) به‌عنوان ذرات ساینده استفاده شدند. هم‌چنین، سرعت چرخش صفحه‌ی دوار ۲۰۰ دور در دقیقه و مسافت سایش ۴۳۰۹ متر در نظر گرفته شد. شکل ۲، نمای فرآیند آزمون سایش خراشان را نشان می‌دهد. بمنظور تعیین مقدار سایش، پیش و پس از انجام آزمون سایش، نمونه‌ها وزن و کسر وزنی آن‌ها با دقت ± 0.10 گرم تعیین گردید. هم‌چنین، بمنظور بررسی و تعیین سازوکار سایش نمونه‌ها پس از آزمون سایش بررسی‌های متالوگرافی (نوری و الکترونی) و سختی سنجی روی سطوح ساییده شده انجام گرفت.

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی، درجه رقت و ریزساختار

جدول ۲، ترکیب شیمیایی فلز پایه و سیم توپودری بکار رفته و جدول ۳، ترکیب شیمیایی و درجه‌ی رقت لایه‌های رسوبی گوناگون را ارائه می‌دهند. با توجه به جدول ۳، افزایش در تعداد لایه‌های جوشکاری سبب کاهش درجه‌ی رقت و افزایش درصد عناصر کربن، منگنز، کروم و نیکل در ترکیب شیمیایی لایه‌ها شده است. دلیل این موضوع ناشی از امتزاج فلز پایه با لایه‌های رسوبی می‌باشد، به این ترتیب که در لایه‌ی رسوبی نخست به دلیل امتزاج بیش‌تر فلز پایه با فلز جوش و در نتیجه رقت بالا، درصد عناصر کربن، منگنز، کروم و نیکل نسبت به سایر لایه‌ها کم‌تر است، ولی این عناصر در لایه‌های بعدی به دلیل کاهش امتزاج با فلز پایه، افزایش یافته‌اند، به گونه‌ای که بیش‌ترین غلظت این عناصر در لایه‌ی رسوبی سوم مشاهده می‌شود. شکل (الف-۳)،

می‌کند که به دلیل نیروی بالا (130N) در آزمون سایش و فشار ناشی از ذرات سخت، استحاله‌ی فازی آستنیت به مارتنزیت در نمونه‌های مربوط به لایه‌ی نخست و لایه‌ی دوم رخ داده است و در نمونه‌ی مربوط به لایه‌ی سوم به شکل دوقلویی‌های مکانیکی در ساختار آستنیت پدیدار شده است. این تغییرات در ساختار میکروسکوپی لایه‌ی آستنیتی منگن‌دار پس از آزمون سایش به وسیله‌ی پژوهشگران گوناگون نیز گزارش شده [۱۳ و ۱۵] که نتایج این پژوهش، تطابق خوبی با آن‌ها دارد، با این تفاوت که نتایج آن‌ها تغییرات ساختاری لایه‌ی روکش سخت را پس از آزمون سایش، در حالت تک لایه و تحت تاثیر ترکیب شیمیایی لایه‌ی رسوبی مورد بررسی قرار داده اند، ولی در این پژوهش تغییرات ترکیب شیمیایی با در نظر گرفتن درجه‌ی رقت و تعداد لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

سختی سطح

شکل ۵، مقادیر سختی لایه‌های گوناگون را پیش و پس از آزمون سایش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج سختی، مشخص می‌شود که سختی لایه‌ی نخست در دو حالت پیش و پس از آزمون سایش بالاتر از سختی لایه‌های دوم و سوم است. افزایش در سختی لایه‌ی نخست در حالت پیش از آزمون سایش، نسبت به دیگر نمونه‌ها، مربوط به رقت بالای این لایه و در نتیجه حضور کم‌تر عناصر کربن، منگنز و نیکل نسبت به سایر لایه‌ها می‌باشد که سبب تشکیل درصد حجمی بالایی از فاز مارتنزیت (80%) در ریز ساختار شده است. همان‌گونه که گفته شد، با افزایش تعداد لایه‌های جوشکاری در حالت پیش از آزمون سایش، مقدار کربن، منگنز، نیکل و کروم در ترکیب شیمیایی به دلیل کاهش درجه‌ی رقت افزایش یافته است. در نتیجه، دمای شروع استحاله‌ی مارتنزیتی به دماهای پایین‌تر منتقل شده است. بنابراین، با کاهش درجه‌ی رقت لایه‌ها، درصد حجمی آستنیت در لایه‌ها افزایش یافته که نتیجه‌ی آن، کاهش سختی با افزایش تعداد لایه‌ها می‌باشد.

کمی ریزساختار لایه‌ی دوم مشخص کرد که ریزساختار این لایه از 30% درصد مارتنزیت و 70% درصد آستنیت تشکیل شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی لایه‌ی سوم در جدول ۳، دمای تشکیل مارتنزیت به دماهای خیلی پایین‌تر از دمای محیط (132°C - درجه‌ی سانتیگراد) منتقل شده است، لذا شرایط برای تشکیل مارتنزیت در حین سرد شدن پس از جوشکاری در ریزساختار لایه‌ی سوم وجود نداشته و تمامی ریزساختار شامل آستنیت می‌باشد.

بررسی ریزساختار نمونه‌ها پس از انجام آزمون سایش مشخص نمود که در تمامی نمونه‌ها (تک لایه، دولایه و سه لایه) تغییراتی در ریزساختار بوجود آمده است. جدول ۴، ریزساختار لایه‌های گوناگون را پیش و پس از آزمون سایش نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است پس از آزمون سایش، تغییراتی در ریزساختار میکروسکوپی نمونه‌ها رخ داده است، همان‌گونه که از جدول ۴ مشخص است، در ریزساختار لایه‌ی نخست پس از آزمون سایش، درصد حجمی آستنیت کاهش یافته و به درصد حجمی مارتنزیت افزوده شده است، به گونه‌ای که در این نمونه پس از آزمون سایش درصد حجمی مارتنزیت در ریزساختار از 80% درصد به 90% درصد تغییر کرده است. شکل (الف-۴)، ریزساختار میکروسکوپی لایه‌ی نخست را پس از آزمون سایش نشان می‌دهد. این تغییرات در ریزساختار لایه‌ی دوم پس از آزمون سایش نیز مشاهده می‌شود، همان‌گونه که از جدول ۴ مشخص است، در ریزساختار لایه‌ی دوم پس از آزمون سایش، درصد حجمی مارتنزیت افزایش یافته است و از 30% درصد به 40% درصد تغییر کرده است، در مقابل درصد حجمی آستنیت از 70% درصد به 60% درصد کاهش یافته است. شکل (ب-۴)، ریزساختار میکروسکوپی لایه‌ی دوم را پس از آزمون سایش نشان می‌دهد. بررسی ریزساختار لایه‌ی سوم پس از آزمون سایش (شکل ج-۴) مشخص می‌کند که تغییراتی در درصد حجمی آستنیت رخ نداده است، ولی خطوطی در داخل دانه‌های آستنیت ظاهر شده است. دلیل این تغییرات در ریزساختار نمونه‌های گوناگون، ناشی از کارسختی موضعی در سطح سایش می‌باشد [۹ و ۱۶]. این موضوع مشخص

بیش‌تری در ریزساختار برخوردار بوده که نتیجه‌ی آن سختی و مقاومت به سایش خراشان بالاتر نسبت به سایر لایه‌هاست. از سوی دیگر، بررسی سطوح ساییده شده‌ی لایه‌های گوناگون پس از آزمون سایش به وسیله‌ی SEM که در شکل ۷ ارائه شده است، مشخص می‌شود که سازوکار سایش لایه‌ی نخست، لایه‌ی دوم و لایه‌ی سوم همگی شخم‌زنی می‌باشد و هیچ نوع ترک و یا کندگی در سطح نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود، با این تفاوت که عمق خطوط سایش نمونه‌ها با یکدیگر متفاوت است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کم‌ترین عمق خطوط شیار مربوط به لایه‌ی رسوبی نخست (شکل الف-۷) است و بیش‌ترین عمق خطوط شیار نیز مربوط به لایه‌ی رسوبی سوم (شکل ج-۷) می‌باشد و عمق خطوط شیار لایه‌ی دوم (شکل ب-۷) بین لایه‌ی نخست و لایه‌ی سوم است. دلیل این امر ناشی از نوع و سختی فازهای ایجاد شده در نمونه‌های گوناگون می‌باشد، از سوی دیگر، سایش شخم‌زنی به دلیل نرمی زمینه و سختی بالای ذرات ساییده بدست می‌آید [۱۵ و ۱۲]. این موضوع مشخص می‌کند که فاز آستنیت قدرت لازم را برای مقاومت در برابر ذرات ساییده ندارد زیرا بیش‌ترین مقدار سایش و هم‌چنین، بیش‌ترین عمق خطوط سایش مربوط به لایه‌ی رسوبی سوم می‌باشد. درحالی‌که لایه‌ی رسوبی نخست از کم‌ترین مقدار سایش و کم‌ترین عمق خطوط سایش برخوردار است که دلیل آن وجود درصد بالایی از فاز مارتنزیت در ریزساختار این لایه می‌باشد که در برابر ذرات ساییده، مقاومت نموده و مانع از بوجود آمدن شیارهای عمیق روی سطح شده‌اند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر درجه‌ی رقت ناشی از لایه‌های جوشکاری FCAW بر ترکیب شیمیایی، ریزساختار و مقاومت به سایش خراشان آلیاژ روکش سخت پایه‌ی Fe-C-Mn در مورد فولاد ساده‌ی کربنی مورد بررسی قرار گرفته شد و نتایج زیر بدست آمد:

بررسی‌های متالوگرافی این پژوهش و هم‌چنین، نتایج سایر پژوهش‌ها [۹ و ۱۵ و ۱۶] نشان می‌دهند که در حین فرآیند سایش خراشان، کار سختی موضعی بوجود می‌آید، بنابراین، روی سطح نمونه‌های ساییده شده، آزمون سختی سنجی انجام گرفت که نتایج بدست آمده از آن در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، پس از انجام آزمون سایش، سختی سطح لایه‌ها افزایش یافته است به گونه‌ای که در لایه‌ی نخست به میزان ۲۰ درصد، در لایه‌ی دوم ۱۵ درصد و در لایه‌ی سوم ۱۰ درصد افزایش سختی پس از آزمون سایش مشاهده می‌گردد. با توجه به این موضوع نتیجه می‌شود که لایه‌ی نخست هم پیش و هم پس از آزمون سایش از سختی بالاتری نسبت به لایه‌های دوم و سوم برخوردار بوده است. دلیل افزایش سختی پس از آزمون سایش در نمونه‌های لایه‌ی نخست و لایه‌ی دوم ناشی از تغییر در درصد حجمی مارتنزیت و آستنیت موجود در ریزساختار می‌باشد که دلیل آن همان‌گونه که ذکر شد، ناشی از استحاله‌ی آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت در اثر کارسختی موضعی در حین سایش بوده است. دلیل افزایش سختی پس از آزمون سایش در لایه‌ی سوم نیز ناشی از تشکیل دوقلوبی مکانیکی در اثر کارسختی می‌باشد.

آزمون سایش خراشان

نتایج بدست آمده از آزمون سایش خراشان (ASTM G65) در مسافت ۴۳۰۹ متر در شکل ۶، ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است، کم‌ترین اندازه‌ی سایش (بالاترین مقاومت به سایش) مربوط به لایه‌ی نخست است، هم‌چنین، اندازه‌ی سایش لایه‌ی دوم از لایه‌ی سوم کم‌تر بوده و بالاترین اندازه‌ی سایش (کم‌ترین مقاومت به سایش) مربوط به لایه‌ی سوم است. دلیل این امر ناشی از ریزساختارهای میکروسکوپی و در نتیجه، سختی هر لایه بوده و از آنجایی که لایه‌ی نخست درجه‌ی رقت بالاتری نسبت به سایر لایه‌های رسوبی دارا می‌باشد؛ لذا، در هنگام سرد شدن پس از جوشکاری از درصد حجمی مارتنزیت

- ۴- ح. ثابت، تکنولوژی و متالورژی جوشکاری، نشر فنی امیر، کرج، ص ۱۷۰-۱۷۲، ۱۳۸۷.
- ۵- م. محمدی خواه، ح. ثابت، ع. شکوه‌فر، س. محرابیان و ا. هادی‌زاده، "بررسی و مقایسه‌ی ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش لایه‌های سخت کامپوزیتی ایجاد شده به روش جوشکاری FCAW حاوی ذرات TiC و TiCN روی فولاد ساده‌ی کربنی"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال چهارم، شماره ۱، ص ۲۱-۳۱، بهار ۱۳۸۹.
- 6- M. Mohammadikhah, H. Sabet, A. Shokouhfar, A. Hadizade and S. Mehrabian, "Improve wear resistance of steel by composite cladding of in situ ceramic particles (TiCN, TiC) produced with FCAW", IIW Conference, Turkey, Istanbul, 2010.
- ۷- ح. ثابت، س.ر. امیرآبادی‌زاده، م. صادقی، ن. میرزاحمد، "بررسی ریزساختار و مقاومت به سایش لایه رویه سخت پایه Fe-C-Nb روی فولاد ساده‌ی کربنی"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال سوم، شماره ۳، ص ۴۳-۵۰، پاییز ۱۳۸۸.
- 8- L.A. Dobrzanski, A. Grajcar, W. Borek, "Microstructure evolution and Phase Composition of High-Manganese Austenitic Steels", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 31, [2], pp. 26-33, 2008.
- 9- K. Bolanowski, "Wear of Hadfield Cast Steel Machine Parts Due To Impact and Abrasion In Service Enviroment", Terotechnologie, Vol. 7, pp. 23-28, 2007.
- 10- D. Akeel, E. Subhi, A. Omar, A. Abdulrazaq, "Phase Transformations of Hadfield Manganese Steels", Eng. & Technology, Vol. 25, [6], pp. 63-69, 2007.
- 11- S. Kumar, K.P. Mondal, A.K. Jha, "Effect of Microstructure and Chemical Composition of Hardfacing Alloy on Abrasive Wear Behavior", Material Science and Technology, 8, pp.10-20, 2000.
- 12- M.F. Buchely, J.C. Gutierrez, L.M. Leon, A. Toro, "The Effect of Microstructure on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys", Wear, Vol. 259, pp.52-61, 2005.

- ۱- با کاهش اندازه‌ی رقت ناشی از افزایش تعداد لایه‌های رسوبی، از اندازه‌ی فاز مارتنزیت در ریزساختار کاسته و به فاز آستنیت افزوده می‌شود، هم‌چنین، سختی و مقاومت به سایش خراشان کاهش می‌یابد.
- ۲- بالاترین مقاومت به سایش خراشان (کم‌ترین کاهش وزن) مربوط به لایه‌ی رسوبی نخست می‌باشد که دلیل این امر ناشی از وجود درصد حجمی بالای فاز مارتنزیت در ریزساختار این لایه است.
- ۳- سختی نمونه‌ها پس از آزمون سایش (دست‌کم ۱۰ درصد) افزایش یافت که دلیل آن ناشی از تغییرات ریزساختاری لایه‌ها و افزایش جزیی مارتنزیت در ریزساختار میکروسکوپی لایه‌ی نخست و لایه‌ی دوم و تشکیل دوقلویی مکانیکی در لایه‌ی سوم می‌باشد.
- ۴- سازوکار سایش خراشان لایه‌های گوناگون، شخم‌زنی می‌باشد ولی عمق خطوط شیارها با یکدیگر متفاوت است. کم‌ترین عمق خطوط شیار مربوط به لایه‌ی نخست رسوبی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش، با حمایت‌های مالی شرکت کاوش جوش انجام شده است. بدین وسیله از مدیریت و کارشناسان واحد پژوهش و کنترل کیفیت شرکت کاوش جوش به دلیل همکاری در انجام این پروژه قدردانی می‌گردد.

منابع

- ۱- ح. ثابت، ش. میردامادی، ش. خیراندیش و م. گودرزی "مروری بر فرآیندهای سختکاری سطحی (Hardfacing) از طریق جوشکاری"، مجله جوشکاری، فصلنامه انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیر مخرب ایران، شماره ۵۱، ص ۷۱-۷۷، پاییز ۱۳۸۷.
- 2- "Surface Engineering", Vol. 5, ASM Handbook, ASM International, pp. 733-740, 1994.
- 3- AWS Welding Handbook, "Clad Steel and Applied Liner", 7th edition, pp 653-670, 1998.

13- V. Kazantseva, U. Ludmila, I. Kveglis, "The Structure and Wear Properties of Fe-Mn-C Alloy", Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies, Vol. 18, pp. 376-383, 2009.

14- J.H. Kim, K.S. Na, G.G. Kim, J.Y. Oh, C.S. Yoon, S.J. Kim, "The Effects of Mn and B on the Cavitations Erosion Resistance of Fe-Base Hardfacing Alloys", Materials Science and Engineering A, Vol. 477, pp. 204-207, 2008.

15- B. Kulishenko, A. Balin, M. Filippov, "Electrodes for Hardfacing Components Subjected to Abrasive and Impact-Abrasive

Effects", Welding International, Vol. 19, pp. 326-329, 2005.

16- K. Yildizli, M. Eroglu, M.B. Karamis, "Microstructure and Erosive behavior of Weld deposits of High Manganese Electrode", Surface&Coating Technology, Vol. 201, pp. 7166-7173, 2007.

17- J. Mendez, M. Ghosh, W.B.F. Mackay, T.J.N. Smith, R.W. Smith, "Weldability of Austenitic Manganese Steel", Journal of Materials Processing Technology 153-154, pp. 596-602, 2004.

پیوست‌ها

جدول ۱- فراسنج‌های جوشکاری نمونه‌ها.

دستی FCAW	فرآیند
GAAM ELECTRIC/ PARS MIG602	دستگاه جوشکاری
۱/۶	قطرسیم (mm)
۴-۵	طول قوس (mm)
۲۸-۳۰	ولتاژ (V)
۳۵۰-۴۰۰	جریان (A)
۱ لایه-۲ لایه-۳ لایه	تعداد لایه‌ها
CO ₂ /۲۰+Ar	نوع گاز
DCEP	قطبیت
۷۰۰	سرعت ورود سیم (Cm/min)
۳۰-۳۲	سرعت جوشکاری (Cm/min)
۱۷-۱۸	حرارت ورودی هر پاس (kJ/cm)

جدول ۲- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فولاد ST52 و سیم جوش توپودری. * - ترکیب شیمیایی سیم جوش توپودری بر اساس استاندارد ISO 6847:2000 و بر اساس ۵ لایه رسوبی تعیین شده است.

فلز	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
ST52	۰/۲۲	۱/۶۰	۰/۵۵	۰/۰۴	۰/۰۴	-	-	-	باقیمانده
سیم جوش*	۰/۸۱	۱۵/۱۰	۰/۴۸	۰/۰۳	۰/۰۳	۴/۰۸	۰/۵۷	۰/۰۰۹	باقیمانده

جدول ۳- ترکیب شیمیایی (درصدوزنی)، درجه‌ی رقت، دمای تشکیل مارتنزیت و ریزساختار لایه‌های گوناگون رسوبی.

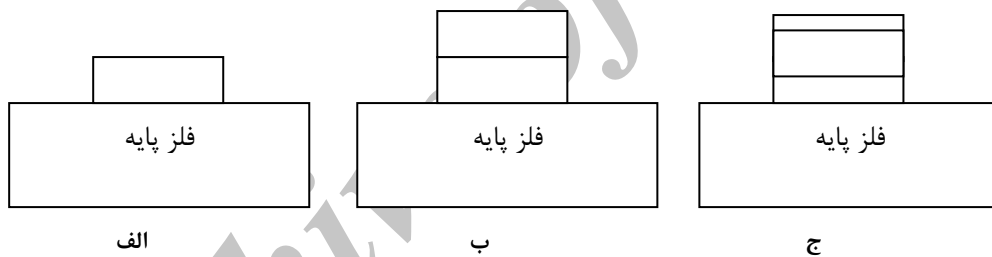
درجه رقت (درصد)	ریزساختار**	Fe	Mo	Ni	Cr	Mn	C	لایه	دمای تشکیل مارتنزیت $[M_s(^{\circ}C)]$
۷۵	$M\%80 + A\%20$	باقیمانده	۰/۰۰۳	۰/۴۱	۲/۰۱	۴/۹۵	۰/۴۲	نخست	۲۱۵
۴۵	$M\%30 + A\%70$	باقیمانده	۰/۰۰۵	۰/۴۹	۲/۵۲	۸/۵۱	۰/۶۵	دوم	۵۲
۱۵	$A\%100$	باقیمانده	۰/۰۰۸	۰/۵۵	۳/۸۱	۱۴/۰۶	۰/۷۸	سوم	-۱۳۲

* $M_s(^{\circ}C) = 539 - 423\%C - 20/4\%Mn - 17/7\%Ni - 12/1\%Cr - 7/5\%Mo$ [۱۳].

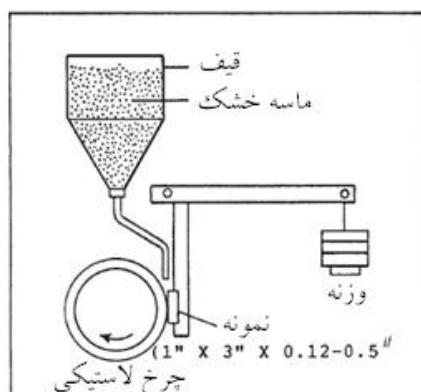
** M= مارتنزیت - A= آستنیت

جدول ۴- ریزساختار لایه‌های گوناگون پیش و پس از آزمون سایش.

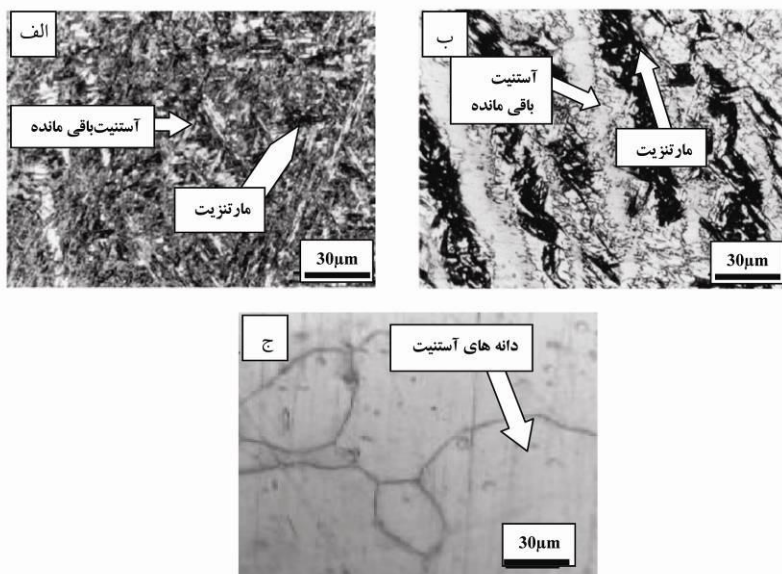
لایه‌ها	ریزساختار پیش از آزمون سایش	ریزساختار پس از آزمون سایش
لایه نخست	$M\%80 + A\%20$	$M\%90 + A\%10$
لایه دوم	$M\%30 + A\%70$	$M\%40 + A\%60$
لایه سوم	$A\%100$	$A\%100 +$ دوقلوبی مکانیکی



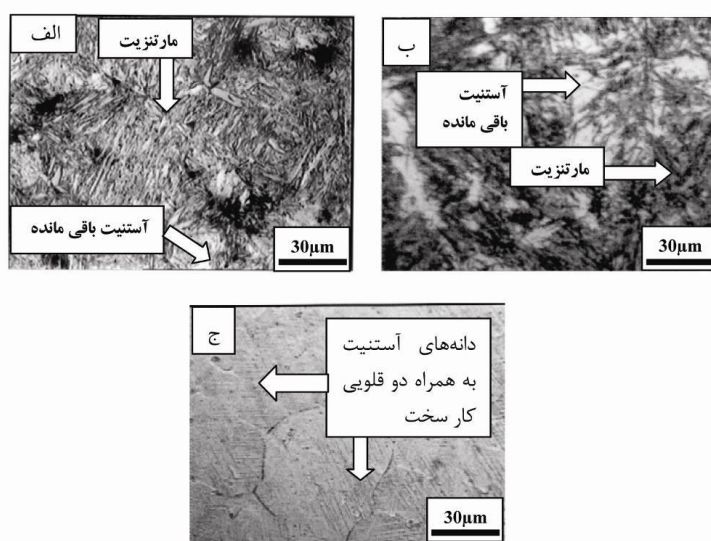
شکل ۱- نمایی از شمار و چگونگی لایه‌ها در نمونه‌های جوشکاری شده
الف- تک لایه، ب- دو لایه، ج- سه لایه.



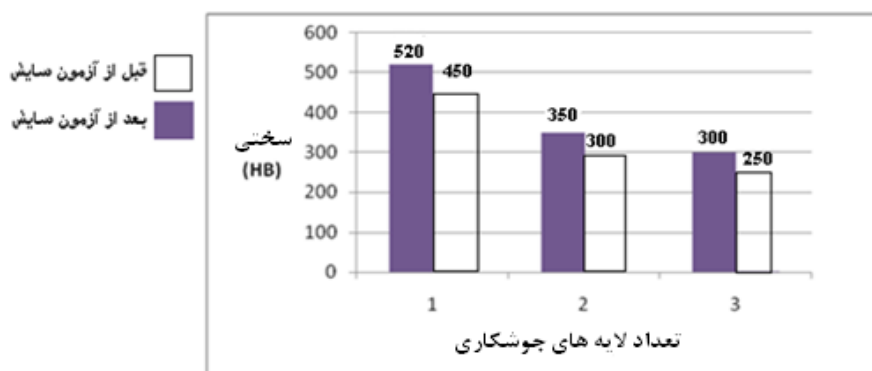
شکل ۲- نمای آزمون سایش خراشان بر اساس معیار ASTM G65.



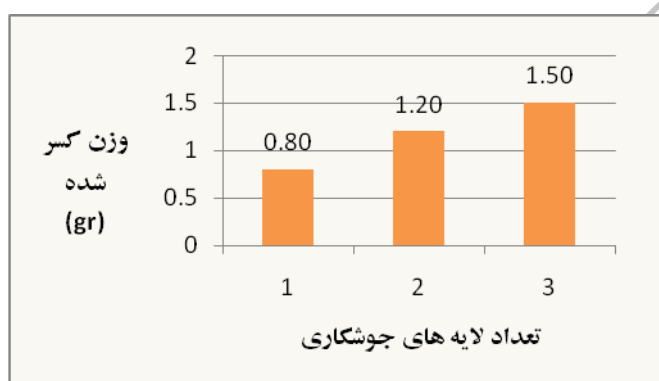
شکل ۳- تصویر ریزساختار میکروسکوپی لایه‌های رسوبی گوناگون پیش از آزمون سایش نمونه‌ها
الف- لایه‌ی نخست، ب- لایه‌ی دوم، ج- لایه‌ی سوم.



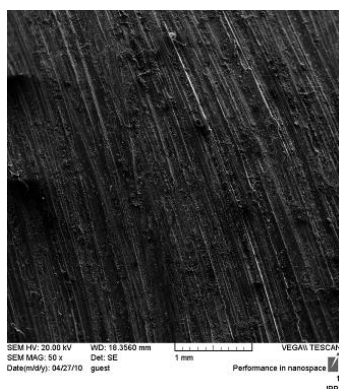
شکل ۴- تصویر SEM از ریزساختار میکروسکوپی لایه‌های گوناگون رسوبی پس از آزمون سایش
الف- لایه‌ی نخست، ب- لایه‌ی دوم، ج- لایه‌ی سوم.



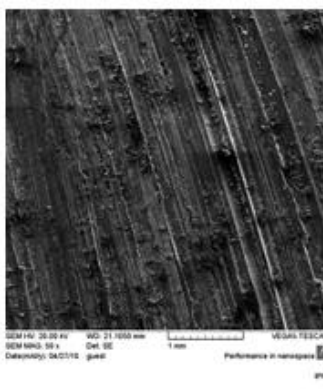
شکل ۵- نتایج آزمون سختی سنجی پیش و پس از آزمون سایش.



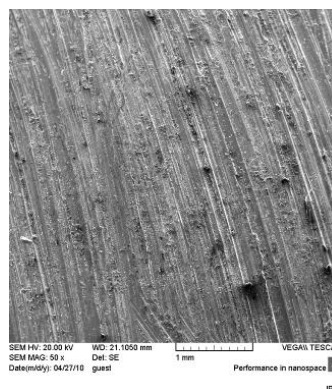
شکل ۶- نتایج آزمون سایش نمونه‌های گوناگون در مسافت ۹۰۰ متر.



الف



ب



ج

شکل ۷- تصاویر SEM از سطح سایش: الف- لایه‌ی رسوبی نخست، ب- لایه‌ی رسوبی دوم، ج- لایه‌ی رسوبی سوم.