

اثر عنصر مولیبدن بر ریزساختار و مقاومت به سایش آلیاژ روکش سخت

Fe-Cr-C-Mo بر روی فولاد ساده کربنی

داود احمدی، محمد مهدی غفاری

گروه مهندسی مواد، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

حسین پایدار

گروه مکانیک، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۳/۲۴ - پذیرش مقاله: ۹۷/۰۲/۱۹)

چکیده

در این تحقیق مخلوطی از پودرهای فرمولیبدن (مقدار متغیر)، فروکروم و گرافیت (به مقدار ثابت) از طریق جوشکاری قوس تنگستن گاز GTAW بر روی زمینه فولاد ساده کربنی st37-2 روکش کاری شده است. بررسی خواص لایه ایجاد شده بر روی زیرلایه مربوطه با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM)، میکروآنالیزور عنصری (EDS) و ریزسختی‌سنجی صورت گرفت. آنالیز پرتو ایکس (XRD) مشخص نمود که ریزساختار نمونه‌های مورد آزمایش متشکل از کاربیدهای کروم (Cr_7C_3) و (CrC) و کاربیدهای مولیبدن (MoC) هستند. علاوه بر این مشخص گردید که فاز آستنیت و فریت در هر دو نمونه تشکیل شده است. با افزایش مولیبدن به سیم جوش پایه Fe-Cr-C کاربید کروم (CrC) کمتری بر روی پوشش ایجاد شده است. نتایج آزمون سایش، بالاترین مقاومت به سایش را مربوط به نمونه شماره ۲ حاوی Mo بیشتر با (۶۹ راکول سی) نشان داده است. مطالعه نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی در ارتباط با سطوح ساییده شده و بررسی آنها مشخص نمود که ساز و کار سایش برای نمونه حاوی مولیبدن، همراه با سایش خراشان، چسبان و شخم زدن است.

واژه‌های کلیدی: Fe-Cr-C-Mo، روکش سخت، ریزساختار، فرمولیبدن، GTAW.

The Effect of Molybdenum Element on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C-Mo Hard-Alloyed Alloy on Plain Carbon Steel

Davoud Ahmadi, Mohammad Mehdi Ghaffari

Department of Materials Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

Hossein Paydar

Department of Mechanical, Tiran Unit, Islamic Azad University, Tiran, Isfahan, Iran

(Received 14 June 2017, accepted 9 May 2018)

Abstract

In this research, a combination of Ferro-molybdenum powders (variable amount) and Ferro-chromium and graphite (constant amount) were coated on the st37 carbon steel substrate through Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). In order to study properties of the layer established under the layer, scanning electron microscope (SEM), EDS element microanalysis and microhardness assessment have been used, and x-ray diffraction analysis (XRD) specified that microstructure of the samples consists of (Cr_7C_3), (CrC) chromium carbides and (MoC) molybdenum carbides. In addition, it was found that the austenite and ferrite in both samples is composed of molybdenum wire with an increase in base Fe-Cr-C carbide (CrC) was created less on coverage. Wear highest abrasion resistance test results to the sample 2 (69 Rockwell C) is shown. The samples were studied by electron microscopy in conjunction with rubbed surfaces, the samples showed that the mechanism of wear, for example, contains molybdenum, abrasive wear, sticky type and plowing type.

Keywords: Fe-Cr-C-Mo, hardfacing, microstructure, Ferro-molybdenum, GTAW.

E-mail of Corresponding author: Weldingengineer.ghafari@gmail.com.

مقدمه

اصلی به سمت روکش افزایش یافته و در مقابل تراکم آنها در واحد سطح کاهش یافته است [۱۶]. ثابت و همکاران در تحقیق خود ریزساختار و مقاومت به سایش لایه رویه سخت پایه Fe-C-Nb را بر روی فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری GTAW مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با افزودن میزان نیویوم سختی سطح افزایش یافته و مقدار فاز مارتنزیت با کاهش همراه بوده و بر مقدار آستنیت افزوده شده و مقاومت به سایش لایه سخت نیز زیاد شده است [۱۷].

نوع کاربیدهای ($M_{23}C_6, M_7C_3, M_3C$) موجود در آلیاژهای Fe-Cr-C بستگی به نسبت Cr/C آلیاژ دارد. این نسبت تعیین کننده کاربرد آلیاژ در شرایط متفاوت سایش است [۱۸].

در تحقیق حاضر، تأثیر عناصر مولیبدن و کروم بر ریزساختار و همچنین سختی روکش ایجاد شده بر سطح آلیاژ مورد بررسی قرار گرفت، طوری که مقدار درصد وزنی مولیبدن متغیر بوده، ولی مقدار درصد کروم ثابت بوده است. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از مقالات پیشین، عمده تحقیقات صورت گرفته بر اساس نسبت متغیر کروم به کربن بوده است. اما در این پژوهش نسبت کروم به کربن ثابت بوده، ولی نسبت مولیبدن به کربن با تغییراتی برابر ۵ و ۵/۲ اتخاذ شده است.

هدف از انجام این پروژه تعیین خواص سایشی، مکانیکی و متالورژیکی بر سطح فولاد در رابطه با تغییر نسبت Mo/C به صورت پوشش پودری، در رابطه با سخت‌کاری سطحی بوده که با تغییر مقدار مولیبدن در پودر سطحی همراه بوده است. بدین منظور جهت آلیاژسازی سطحی به روش جوشکاری، از فرآیند GTAW دستی بر روی فولاد st37-2 استفاده شده است.

سایش یکی از مهمترین عوامل تخریب قطعات مهندسی در صنعت و همچنین یکی از معضلاتی است که صنعت از دیرباز با آن مواجه بوده است [۱ و ۲]. بنابراین از روکش‌کاری به جهت جلوگیری از سایش و بهینه کردن عمر کاری قطعات مهندسی استفاده می‌شود [۳]. یکی از روش‌های متداول بهبود رفتار سطحی، افزودن عناصر آلیاژی نظیر کروم، تنگستن، بور و کربن به مذاب ایجاد شده در سطح و تشکیل فازهای سخت مانند WC و B_4C با ضخامت مناسب بر روی سطح است [۴]. عملیات جوشکاری به علت صرفه اقتصادی و ایجاد لایه‌های نسبتاً ضخیم و مقاوم به عملیات حرارتی، آب‌کاری و پوشش دادن در شرایط سایش خراشان و ضربه ارجحیت دارند [۵ و ۶]. باید توجه داشت هرگونه عملیات سطحی نباید ویژگی‌های حجمی (توده‌ای) ماده زیرلایه را کاهش دهد. خواص لایه سخت تابعی از ترکیب شیمیایی، انجماد، سرعت سرد شدن (بعد از انجماد) ریزساختار، نوع، شکل و توزیع فازها است [۷]. بر اساس نوع سیستم آلیاژی، لایه‌های سخت به دو دسته حاوی Fe-Cr-C و Fe-C-X تقسیم‌بندی می‌شوند [۸ و ۹]. تحقیقات راجع به ریزساختار آلیاژهای Fe-Cr-C نشان می‌دهد که این نوع آلیاژها ساختارهای یوتکتیک، هیپویوتکتیک و هایپریوتکتیک دارند [۱۰ و ۱۱]. که موجب افزایش مقاومت سایشی آنها می‌گردد [۱۲ و ۱۳].

عمده تحقیقات انجام شده بر روی Fe-Cr-C مطالعه ریزساختار و ارتباط آن با سختی بوده است [۱۴ و ۱۵]. بعنوان مثال ثابت و همکاران در مطالعات خود به بررسی اثر ترکیب شیمیایی بر ریزساختار و مقاومت به سایش آلیاژ روکش سخت Fe-Cr-C بر روی فولاد ساده کربنی ایجاد شده با فرآیند جوشکاری GTAW پرداختند. آنها در این تحقیق با نسبت متغیر Cr/C نشان دادند که اندازه، سختی و درصد اتم کروم کاربیدهای اولیه در هر ناحیه از منطقه

مواد و روش تحقیق

گرفتند. جهت انجام آزمون دو نمونه مخلوط پودر فرومولیبدن و فروکروم کم کربن و گرافیت با تلورانس ۰/۱ گرم توزین و با نسبت‌های وزنی خاص پوشش داده شدند. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلز پایه و در جدول ۲ مشخصات مخلوط پودرها برحسب گرم برای نمونه‌های ۱ و ۲ مشخص شده است.

برای انجام آزمایش، فولاد ساده کربنی St37-2 با ابعاد mm ۲۰۰×۱۲۰×۱۰ بعنوان فلز پایه به کار برده شد. برای این منظور لایه‌های اکسیدی موجود در سطح ورق با کمک فرز دستی به ضخامت یک میلی‌متر سنگ‌زنی شد و بعد از شستشو با آب گرم تحت چربی‌زدایی با استون قرار

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فلز پایه (درصد وزنی).

ترکیب شیمیایی	ماده	Fe	Cr	Mo	P	Mn	Si	C
St37-2	أبریل-۹۹	---	---	---	۰/۰۱۲	۰/۷۲۷	۰/۱۳۱	۰/۰۴۶

جدول ۲. مشخصات مخلوط پودرها برحسب گرم برای نمونه‌های ۱ و ۲.

نام عنصر	فرو مولیبدن (g)	فرو کروم (g)	کربن (g)
نمونه شماره ۱	۳۷/۵	۱۰۵	۱۵
نمونه شماره ۲	۷۵	۱۰۵	۱۵

جهت تهیه پودرها از آسیاب گلوله‌ای مدل SPEX800 با گلوله سرامیکی به مدت یک ساعت استفاده به عمل آمد. همچنین بمنظور ایجاد مخلوطی کاملاً همگن، فرآیند مخلوط پودرها بطور مجزا بوسیله دستگاه FX300-EC با استفاده از ۲۰٪ وزنی چسب سیلیکات سدیم صورت گرفت [۱۷ و ۱۸]. نمونه‌ها با ضخامت ۱ میلی‌متر پوشش داده شدند و در کوره عملیات حرارتی در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت خشک گردیدند. نمونه‌های خشک شده تحت عملیات روکش‌کاری از طریق جوشکاری به روش دو پاس (رفت و برگشت) از طریق جوشکاری قوس تنگستن گاز (GTAW) با میزان رقت ثابت به صورت رویه قرار گرفتند. جدول ۳ شرایط روکش‌کاری با استفاده از جوشکاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. شرایط عملیات روکش‌کاری با استفاده از روش جوشکاری.

فرآیند جوشکاری	GTAW
قطبیت	DCEN
شدت جریان (A)	۱۱۰
ولتاژ (V)	۱۴
سرعت جوشکاری (cm/min)	۱۰
زاویه جوش‌کاری (Deg)	۶۰
گاز محافظ	آرگون با خلوص ۹۹/۹
دبی گاز (L/min)	۸
تعداد ردیف جوشکاری	۸
درصد هم‌پوشانی	۲۰
تعداد پاس	۲

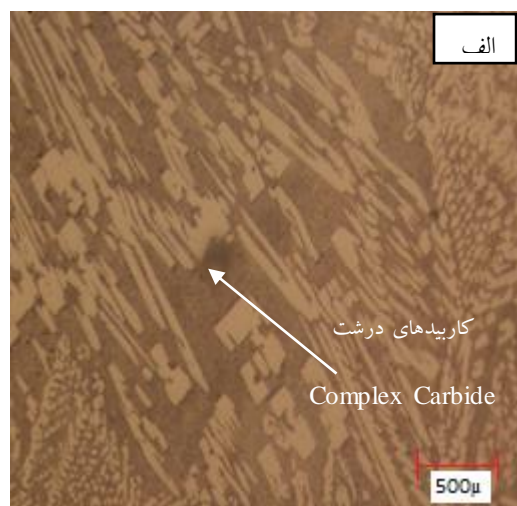
مطابق با استاندارد ASTM G99 با استفاده از پین فولادی بلبرینگ AISI ۵۲۱۰۰ با نیروی ۴۰ نیوتن در فاصله ۱۰۰۰ متر و قطع آن در ۱۰۰ متر و منحنی سایش بر حسب مقدار کاهش وزن - مسافت ترسیم شد.

بحث و نتایج

در شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های شماره ۱ و ۲ در ارتباط با ریزساختار از مقطع عرضی نمونه روکش کاری شده نشان داده شد. ناحیه روکش کاری شده شامل دو ناحیه مورفولوژی ستونی همراه با ساختار دندریتی است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، کاربیدهای کمپلکس درشت در زمینه یوتکتیکی، آستنیتی، فریتی و کاربیدهای ریز تشکیل شده است. نتایج نشانگر تشکیل کاربیدهای کمپلکس کروم و مولیبدن در ریزساختار نمونه‌ها است. با افزایش درصد مولیبدن بر اندازه کاربیدها و درصد میزان مولیبدن در کاربیدهای کمپلکس افزوده شده است.

پس از روکش کاری سطحی، آنالیز شیمیایی لایه‌ها بوسیله آنالیز طیف‌سنجی نور صورت گرفت. جهت اطمینان در ارتباط با مقدار کروم و مولیبدن هر نمونه، روش XRF به کار برده شد تا درصد خطا به حداقل برسد. بمنظور انجام آزمایش متالوگرافی، کلیه نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی با کاغذ سمباده به صورت دستی ساییده شده و با محلول نیتال ۲ درصد اچ گردیدند. با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی Philips X'pert MPD نقشه توزیع عناصر و آنالیز خطی انجام گردید. بر روی نمونه‌های صیقل یافته آزمایش (XRD) تحت زاویه 2θ ، ۱۰ تا ۱۱۰ درجه صورت گرفت.

میزان سختی هر نمونه به دو روش ماکروسختی با دستگاه سختی‌سنج lestor با نیروی ۳۰ کیلوگرم طبق استاندارد ASTM E92-82 و ریزسختی با دستگاه سختی‌سنج metlux3 با نیروی ۵۰ گرم طبق استاندارد ASTM E384-05A تعیین گردید. از آنجایی که آلیاژ روکش سخت پایه Fe-Cr-C-Mo برای کاربردهای سایش خراشان تحت نیروی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا آزمایش سایش



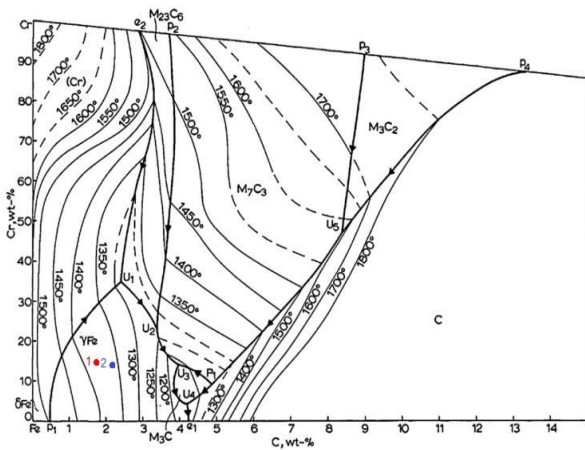
شکل ۱. (الف): تصویر میکروسکوپی نوری برای نمونه شماره ۱، (ب): تصویر میکروسکوپی نوری برای نمونه ۲.

می‌شود، در صورتی که در مقدار کروم و کربن تغییر چندانی حاصل نشده است.

با بررسی آنالیز کوانتومتری (جدول ۴)، در نمونه شماره ۲ با افزایش میزان فرومولیبدن بر مقدار مولیبدن افزوده

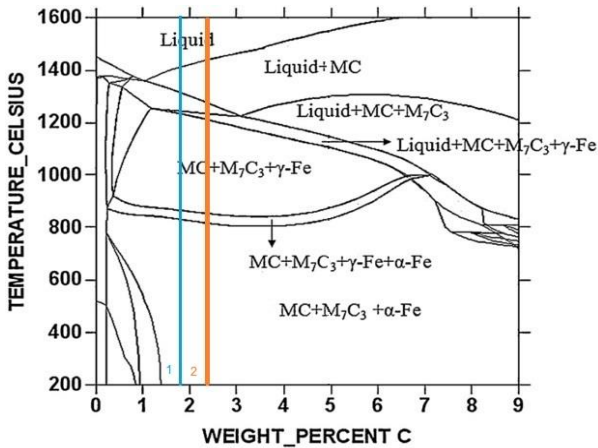
جدول ۴. آنالیز کوانتومتری ترکیب شیمیایی لایه رسوبی (بر حسب درصد وزنی) نمونه‌های شماره ۱ و ۲.

نام عنصر	Fe%	Mo%	Ni%	Cr%	Mn%	Si%	C%
نمونه شماره ۱	۷۳/۵۷	۶/۷۵	۰/۱۰۸	۱۶/۱۳	۰/۴۹	۰/۷۶	۱/۸
نمونه شماره ۲	۷۴/۲۷۰	۹/۴۴۳	۰/۰۹۶	۱۱/۹۸۲	۰/۵۳۷	۱/۱۸۷	۲/۱۶۴



شکل ۲. دیاگرام گوشه‌ای آهن با ساختار سه‌تایی آهن - کروم -

کربن [۱۳].



شکل ۳. نمودار انجماد یوتکتیک آلیاژهای سخت‌کاری Fe-Cr-C در

نمونه‌های ۱ و ۲ [۱۹].

با توجه نتایج بدست آمده در شکل ۶، از آنالیز پراش پرتو ایکس، شکل ۴ از نمونه شماره ۱، نشان‌دهنده کاربرد مولیبدن از نوع MoC است. نقاط C و D که نقاط روشن‌تری در این تصویر هستند، مطابق با آنالیزهای شکل ۷، مناطق غنی از مولیبدن را نشان می‌دهند. در این نقاط

مقدار درصد کربن و کروم را می‌توان در نمودار گوشه‌ای آهن با ساختار سه‌تایی آهن - کروم - کربن (شکل ۲) مشاهده نمود. این مقدار درصد با اعداد ۱ و ۲ بر روی نمودار مذکور نشان داده شد. با توجه به این نمودار، جوانه‌زنی و رشد فاز آستنیت در محدوده دمای ایزوترمال بین ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌گیرد و با گذشت زمان از شروع انجماد و تشکیل فاز آستنیت، کربن مذاب افزایش می‌یابد. بنابراین استحاله یوتکتیک $L \rightarrow \gamma + M_7C_3$ رخ می‌دهد که منجر به تشکیل کاربیدهای ریز مولیبدن در ناحیه بین دندریتها و کاربیدهای اولیه می‌شود.

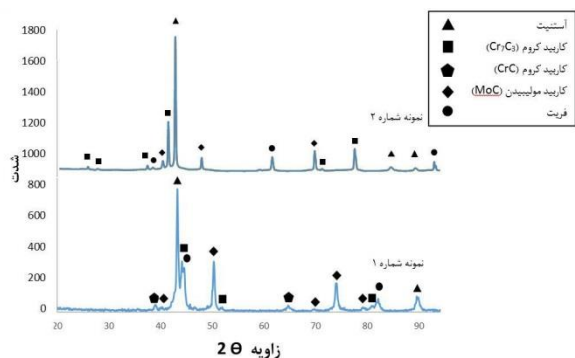
مسیر انجماد این نوع آلیاژها در شکل ۳ ارایه شده است که نشان دهنده فازهای نهایی تشکیل شده در روکش است.

نمودار انجماد نمونه‌های ۱ و ۲ مورد نظر بر اساس ترکیب شیمیایی اشاره شده در جدول ۲ قابل مشاهده است. همان‌گونه که اشاره شد، این ساختار هیپویوتکتیک است. بنابراین ابتدا در دمای حدود ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، ذرات ریز فاز کاربیدی MC در مذاب تشکیل می‌شود. سپس در دمای ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد فاز آستنیت ایجاد می‌شود. کاهش دما تا ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد منجر به تشکیل فاز کاربید M_7C_3 شده است و در نهایت در دمای حدود ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد، تبدیل فاز آستنیت به فریت آغاز می‌گردد. سرد شدن غیر تعادلی و هم‌چنین مشاهده پیک‌های فاز آستنیت در پراش پرتو ایکس باعث می‌شود این استحاله به طور کامل رخ ندهد [۲۰].

با توجه نتایج بدست آمده در شکل ۶، از آنالیز پراش پرتو ایکس، شکل ۵ از نمونه ۲، تصاویر کاربیدهای تیغه‌ای شکل و شش‌گوش (نقاط A و B) و تبدیل نسبت‌های جرمی کروم و کربن را نشان می‌دهد که کاربید به دست آمده از نوع کاربیدهای M_7C_3 است.

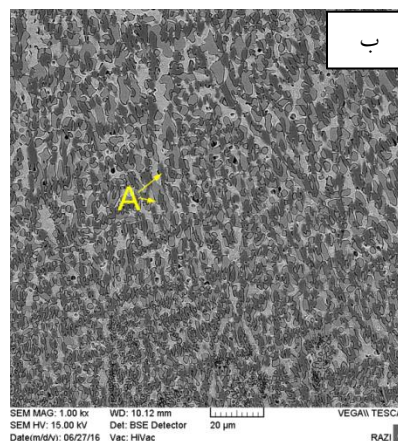
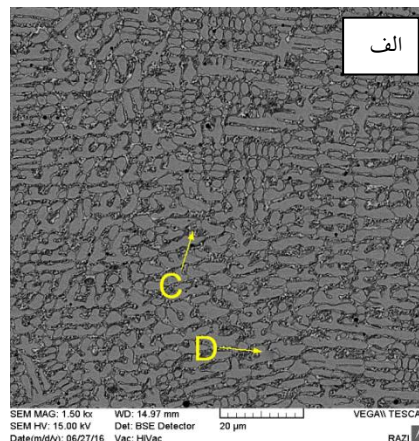
علاوه بر این آنالیز نقاط روشن، حضور مولیبدن را نشان می‌دهد که از نوع کاربیدهای MoC است. منطقه دندردیتی (نقطه D) غنی از آهن و بین دندردیت‌ها (نقطه E) متشکل از مولیبدن است. همان گونه که اشاره شد، دندردیت‌ها شامل فاز آستنیت هستند که در اثر پدیده کورینگ، مولیبدن از دندردیت پس‌زده می‌شود و مقدار آن بین شاخه‌ها افزایش می‌یابد.

در جدول ۵ آنالیز EDS مربوط به نمونه شماره ۱ نقطه‌های (A, C, D) و نمونه شماره ۲ نقطه‌های (A, B, C, D, E) مشاهده می‌شوند. با توجه به این جدول، بعنوان مثال نمونه شماره ۱ در نقطه C و نمونه شماره ۲ در نقطه E، با توجه به شکل ۶ آنالیز پراش پرتو ایکس می‌توان دریافت که مقدار درصد عنصر مولیبدن در نمونه ۲ به نسبت از نمونه شماره ۱ بیشتر است. علاوه بر این به این مساله می‌توان پی برد که در نمونه شماره ۲ علاوه بر افزایش میزان درصد عنصر مولیبدن، مقدار درصد عنصر کروم تغییر چشم‌گیری نداشته است.

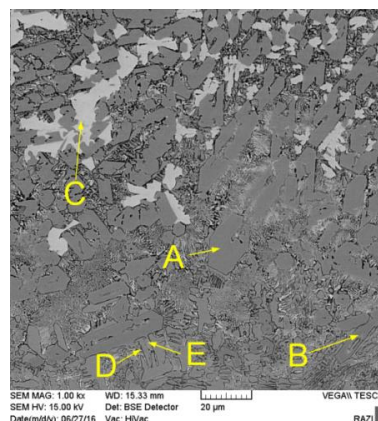


شکل ۶. آنالیز پراش پرتو ایکس (الف): نمونه شماره ۱ و (ب): نمونه شماره ۲.

کربن نیز وجود دارد. مقداری کربن در نقطه C مشاهده گردید که با کمی بررسی محاسباتی می‌توان متوجه شد که بخشی از کربن در تشکیل کاربید M_7C_3 نقش داشته است. همچنین در نقطه A حضور کروم را نشان داده شد.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) (الف و ب) نمونه شماره ۱ از محل آنالیز EDS



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی (BSE) نمونه ۲ از محل آنالیز EDS

جدول ۵. آنالیز EDS نمونه‌های شماره ۱ و شماره ۲.

نقطه D		نقطه C		نقطه A		نمونه شماره ۱
درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	
۱۱/۲	کربن	۳/۹۹	سیلیکون	۰۳/۳	کربن	
۸/۹۲	کروم	۲۸/۰۵	کروم	۵۶/۲۳	کروم	
۸۴/۹۲	آهن	۵۵/۴۸	آهن	۳۴/۲۳	آهن	
۵/۶۹	مولیبدن	۱۲/۴۹	مولیبدن	۷/۵۲	مولیبدن	

نقطه E		نقطه D		نقطه C		نقطه B		نقطه A		نمونه شماره ۲
درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	درصد وزنی	عنصر	
۱/۴۲	سیلیکون	۲/۱۱	سیلیکون	۵/۴۲	سیلیکون	۷۹/۳	کربن	۳/۹۵	کربن	
۱۱/۴۱	کروم	۸/۷۷	کروم	۱۱/۴۱	کروم	۵۰/۲۹	کروم	۴۵/۳۰	کروم	
۵۳/۱۵	آهن	۸۴/۵۲	آهن	۳۴/۲۸	آهن	۳۴/۲۶	آهن	۳۵/۴۴	آهن	
۳۲/۹۰	مولیبدن	۱۵/۶۰	مولیبدن	۴۸/۸۹	مولیبدن	۱۱/۶۶	مولیبدن	۱۵/۳۱	مولیبدن	

جدول ۵. نتایج آزمون ریزسختی درون کاربیدی و انحراف معیار فلز جوش Fe-Cr-C-Mo بر حسب HV.

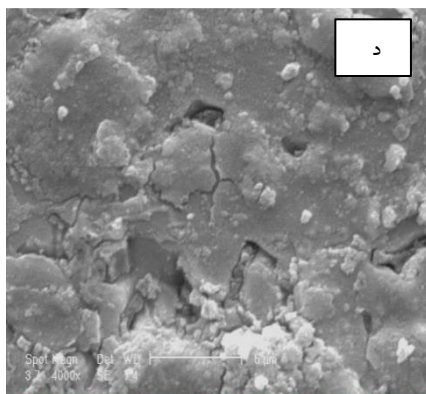
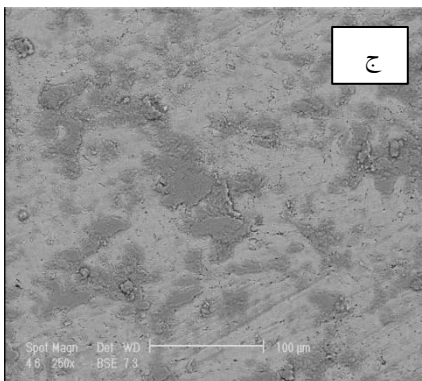
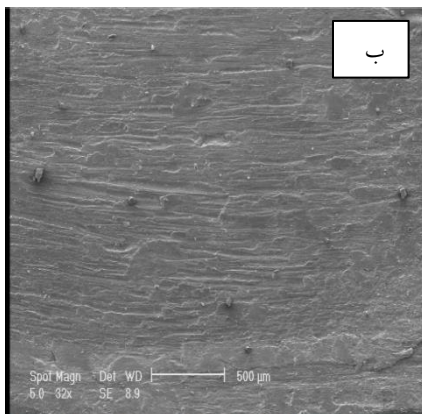
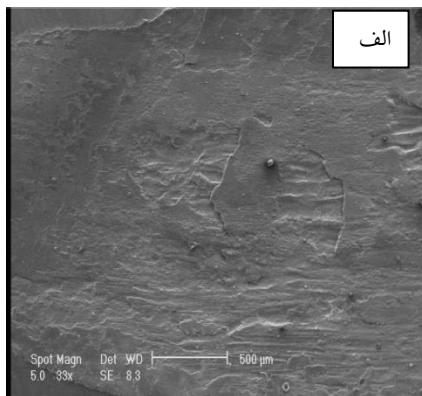
شماره نمونه	عدد سختی درون کاربیدی	انحراف معیار
۱	۱۴۶۰	۱۰۰
۲	۱۵۴۵/۴	۱۱۹/۶

با افزایش مولیبدن، به مقدار درصد این عنصر در داخل کاربیدهای کمپلکس افزوده شده و میزان کروم آنها نسبتاً کاهش یافته است. به همین دلیل از میزان درشت شدن این فازها کاسته شده است که مقدار کاهش در جدول ۶ نشان داده شد.

بیشترین ریزسختی نمونه شماره (۲)، ۱۵۴۵/۴ ویکرز است. این سختی بیانگر بیشتر شدن درصد عناصر آلیاژی، مانند کروم در نمونه شماره ۲ است که با توجه به آنالیز نمونه در جدول ۵ این مقدار سختی معقول به نظر می‌رسد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در جدول ۶ سطح نمونه شماره ۲ از سختی بیشتری نسبت به نمونه شماره ۱

آنالیز پراش پرتو ایکس در شکل ۶ از نمونه‌های سخت‌کاری شده Fe-Cr-C-Mo در حالت دو پاس و همپوشانی ۲۰٪ نشان داده شده است. آنالیز پراش پرتو ایکس در این شکل نشانگر وجود کاربید کمپلکس (M_7C_3) ، کاربید کروم (CrC) و کاربید مولیبدن (MoC)، فازهای آستنیت و فریت است که در هر دو نمونه به حالت دو پاس تشکیل شده است. از آزمایش پراش اشعه ایکس در شکل ۶ می‌توان دریافت که افزایش درصد عنصر مولیبدن در نمونه شماره ۲ باعث افزایش بیشتر پیک‌های کاربیدهای کمپلکس M_7C_3 شده است که علت آن مشارکت بیشتر عنصر کاربیدزای مولیبدن در تشکیل کاربید است. با افزودن مولیبدن به سیم جوش پایه Fe-Cr-C کاربید (CrC) کمتری بر روی پوشش ایجاد شد که علت پایین‌تر بودن انرژی آزاد تشکیل کاربید، و همچنین تمایل بیشتر مولیبدن نسبت به آهن برای تشکیل کاربید بوده است.



شکل ۷. تصاویر BSE و SE از نمونه‌های شماره ۱ (الف، ج) و شماره ۲ (ب، د).

برخوردار است. دلیل این امر را می‌توان به وجود درصد بیشتر کاربیدهای مولیبدن به همراه درصد ثابت کاربیدهای کروم در نمونه ۲ نسبت به نمونه ۱ در آلیاژ روکش دانست.

جدول ۶. نتایج آزمون میکروسختی از سطح روکش آلیاژی Fe-Cr-C-

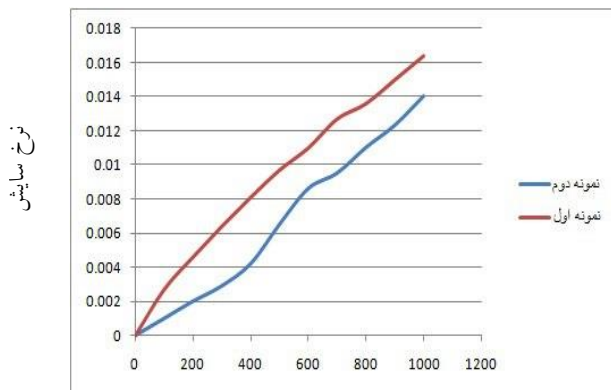
Mo بر حسب HV

انحراف معیار	نمونه ۲	نمونه ۱	
۴/۲۴۲۶۴۱	۶۶	۶۳	سختی سطح مقطع نمونه

بررسی خواص سایشی

ساختار هیپویوتکتیک آلیاژ Fe-Cr-Mo-C به علت دارا بودن مقادیر زیادی از کاربیدهای کروم و مولیبدن، دارای سختی بسیار بالا است. به وضوح می‌توان مشاهده نمود که خراش‌های ناشی از سایش روی سطح نمونه شماره ۱ (شکل ۷ الف و ب) عمیق‌تر از نمونه شماره ۲ (شکل ۷ ج و د) هستند. علاوه بر این ریزترک‌ها و حفره‌های ناشی از اعمال نیروی سایش بر روی قطعه دیده می‌شود (شکل ۷ الف از نمونه ۱ و ب از نمونه ۲). حفره‌های مشاهده شده یکنواخت نیستند. این بدین معناست که این حفرات می‌توانند اثر کاربیدهای درشتی باشند که در اثر نیروی فشاری سایش، تراشیده و از جای خود کنده شده‌اند. ولی در نمونه شماره ۲ به دلیل سختی بالاتر، شدت اثر خراش و همچنین تغییر فرم پلاستیکی در شکاف‌های موجود کمتر است. همچنین در شکل ۷ ج از نمونه شماره ۱ و د از نمونه شماره ۲، وجود مکانیزم سایش چسبان را می‌توان مشاهده نمود.

با توجه به شکل ۸ نمودارهای ضریب اصطکاک و شکل ۹ نرخ سایش می‌توان چنین استنباط کرد که کاهش نرخ سایش نمونه‌های ۱ و ۲ در مسافت‌های ۵۰۰ و ۸۰۰ متر، ناشی از عدم تشکیل ترک در سطح و تجمع ناپجایی‌ها در لایه زیرین سطح است. به بیان بهتر، ایجاد ناپجایی‌ها



مسافت سایش بر حسب متر

شکل ۱۰. نرخ سایش نمونه‌های ۱ و ۲.

۲- افزایش مولیبدن باعث درشت شدن کاربیدهای کمپلکس حاوی مولیبدن گردیده و سختی سطح را در نمونه شماره ۱ از ۶۳ راکول سی و در نمونه شماره ۲ به ۶۹ راکول سی افزایش داد.

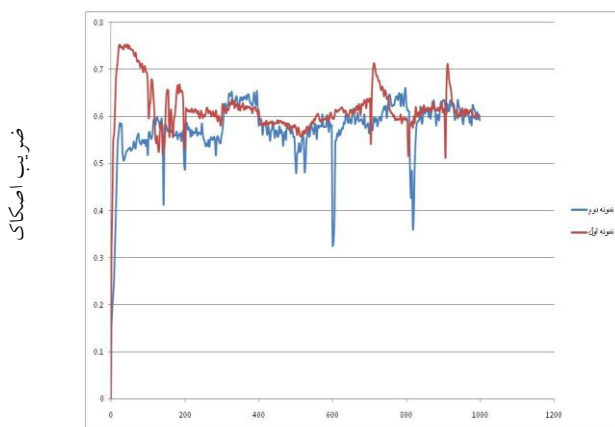
۳- با توجه به نتایج آنالیز عنصری نمونه‌های شماره ۱ و ۲، در داخل کاربید با افزایش درصد مولیبدن در پوشش، بر مقدار درصد این عنصر در کاربیدهای کمپلکس افزوده شده و میزان کروم آن با کاهش همراه بوده است و به همین دلیل میزان ریزسختی این فاز کاهش یافته است.

۴- افزایش عنصر Mo باعث افزایش کسر حجمی کاربیدها در ریزساختار شده و به همین خاطر سختی سطح پوشش‌ها افزایش داشته است.

۵- در آزمون سایش پس از ۵۰۰ متر بر ضریب اصطکاک افزوده شده و همزمان نرخ سایش نیز روندی افزایشی نشان داده است. این افزایش به علت جدایش ذرات کاربید Cr_7C_3 و همچنین جدایش ذرات ورقه‌ای شکل در اثر مکانیزم ریزترک بوده است.

۶- بررسی آزمون سایش مشخص نمود که ساز و کار سایش برای نمونه حاوی مولیبدن، همراه با سایش خراشان، چسبان و شخم زدن است.

تنش‌های پسماند، منجر به تشکیل ترک در سطح می‌شود و نرخ سایش نمونه‌ها را افزایش می‌دهد [۲۰]. بنابراین با مقایسه ضریب اصطکاک این دو نمونه می‌توان چنین برداشت نمود که ضریب اصطکاک نمونه شماره ۱ نسبت به نمونه شماره ۲ بیشتر است. بدنبال آن میزان کاهش وزن نمونه شماره ۱ نیز بیشتر است. علاوه بر این، همان‌طوری که در تصاویر SEM مشاهده شد، میزان حفرات نمونه شماره ۱ نیز بیشتر از نمونه شماره ۲ بود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، سختی نمونه شماره ۲ (به علت بالاتر بودن مقدار مولیبدن) بیشتر است. بررسی مقاومت به سایش در نمونه شماره ۲ بالاتر است و از نتایج آنالیز عنصری داخل کاربید می‌توان استنباط کرد، با افزایش درصد عنصر مولیبدن در پوشش، درصد عنصر مولیبدن در داخل کاربیدهای کمپلکس افزایش یافته و سختی بالاتر ۶۹ راکول سی در نمونه شماره ۲ و سختی ۶۳ راکول سی از نمونه ۱ در نمودار ۶ و ۷ کاملاً مشخص است.



مسافت سایش بر حسب متر

نتیجه‌گیری

۱- عملیات سخت‌کاری سطحی با پودر جوش پایه-Fe $Cr-C-Mo$ بر روی فولاد ساده کربنی باعث تشکیل کاربیدهای کمپلکس کروم و مولیبدن در زمینه آستنیت و فریتی شده است.

مراجع

12. S., Atamert, & H. K. D. H. Bhadeshia, *Microstructure and stability of Fe- Cr- C hardfacing alloys*. Materials Science and Engineering: A, 130(1)(1990)101-111.
13. Lin, C. M., Chang, C. M., Chen, J. H., & W. Wu, *The effects of additive elements on the microstructure characteristics and mechanical properties of Cr-Fe-C hard-facing alloys*. Journal of Alloys and Compounds, 498(1) (2010)30-36.
14. M., Kirchgaßner, E., Badisch, & F. Franek, *Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact*, Wear, 265(5) (2008)772-779.
15. E., Zumelzu, I., C., Goyos, Cabezas, O., Opitz, & A., Parada, *Wear and corrosion behaviour of high-chromium (14–30% Cr) cast iron alloys*, Journal of Materials Processing Technology, 128(1)(2002)250-255.
۱۶. ثابت حامد، خیراندیش شهرام، میردامادی شمس‌الدین، گودرزی مسعود، بررسی ریزساختار و مشخصات کاربردهای $(Cr, Fe)_7C_3$ در آلیاژهای پیرویوتکتیک روکش سخت پایه Fe-Cr-C، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، بهار، شماره اول، ص ۲۱-۳۴، (۱۳۹۰).
۱۷. ثابت حامد، امیرآبادی زاده سیدرضا، صادقی محمد، میرزا محمد نوید، بررسی ریزساختار و مقاومت به سایش لایه رویه سخت پایه Fe-C-Nb بر روی فولاد ساده کربنی، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، پاییز، شماره سوم، ص ۴۳-۵۰، (۱۳۸۸).
18. S., Atamert, & H. K. D. H. Bhadeshia, *Microstructure and stability of Fe- Cr- C hardfacing alloys*, Materials Science and Engineering: A, 130(1)(1990)101-111.
۱۹. صمیمی بهراد، سعادت عباس، خانزاده قره شیران محمد رضا، بررسی تاثیر افزودن مولیبدن بر خواص سایشی و متالورژیکی پوشش‌های سخت Fe-Cr-C، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، دانشکده مهندسی مواد، (۱۳۹۴).
20. J., Yang, J., Tian, F., Hao, T., Dan, X., Ren, Y., Yang, & Q. Yang, *Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe-Cr-C alloy hardfacing metals with different La₂O₃ additives*, Applied Surface Science, 289(2014). 437-444.
1. F., Molleda, J., Mora, F. J., Molleda, E., Mora, E., Carrillo, & B. G., Mellor, *A study of the solid-liquid interface in cobalt base alloy (Stellite) coatings deposited by fusion welding (TIG)*. Materials characterization, 57(4) (2006) 227-231.
2. F., Madadi, F., Ashrafizadeh, & M., Shamanian, *Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM*. Journal of Alloys and Compounds, 510 (2012)71-77.
3. J.R. Davis, ASM handbook, volume 6: welding, brazing and soldering. ASM International, Materials, USA, (1993)787-799.
4. Y. C., Lin, & Y. C. Chen, *Reinforcements affect mechanical properties and wear behaviors of WC clad layer by gas tungsten arc welding*, Materials & Design, 45(2013)6-14.
5. S., Buytoz, M., Ulutan, & M. M. Yildirim, *Dry sliding wear behavior of TIG welding clad WC composite coatings*. Applied Surface Science, 252(5)(2005)1313-1323.
6. M. F., Buchely, J. C., Gutierrez, L. Leon, & A., Toro, *The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys*, Wear, 259(1), 52-61.
7. R., Kumar, P., Kumari, & K. L. A. Khan, *A review paper on research work done in hardfacing*, Int. J. Appl. or Innov. Eng. Manag, 5(2016)129-134.
8. S. G., Sapate, & A. V. RamaRao, *Erosive wear behaviour of weld hardfacing high chromium cast irons: effect of erodent particles*, Tribology International, 39(3) (2006)206-212.
9. Dwivedi, D. K., *Microstructure and abrasive wear behaviour of iron base hardfacing*, Materials Science and Technology, 20(2004) 1326-1330.
10. R., Chotěborský, P., Hrabě, M., Müller, J., Savková, & M. Jirka, *Abrasive wear of high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys*, Research in Agricultural Engineering, 54(2008)192-198.
11. C. W., Kuo, C., Fan, S. H., Wu, & W., Wu, *Microstructure and wear characteristics of hypoeutectic, eutectic and hypereutectic (Cr, Fe) 23C6 carbides in hardfacing alloys*, Materials transactions, 48(9)(2007) 2324-2328.