

## The association of chemical composition microstructure and tribological properties of the coating on the 25CrMo4 DIN substrate by the SMAW process

Reza Saeedi<sup>1</sup>, \*Masoud Mosallae<sup>2</sup>, Alireza Mashreghi<sup>2</sup>, S.Sadegh Ghasemi<sup>2</sup>

1. M.Sc. student, Materials Engineering group, Faculty of Mining and Metallurgy, Yazd University, Yazd, Iran.
2. Associate Professor, Materials Engineering group, Faculty of Mining and Metallurgy, Yazd University, Yazd, Iran.

**Citation:** Saeedi R, Mosallae M, Mashreghi A, Ghasemi S.S. The association of chemical composition microstructure and tribological properties of the coating on the 25CrMo4 DIN substrate by the SMAW process. Metallurgical Engineering 2020; 22(4): 281-289 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.110249.1251>

**doi** : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.110249.1251>

### ABSTRACT

In the present study, the effect of chromium carbide element on microstructure, hardness and abrasive properties of welded coating on the DIN-25CrMo4 substrate was investigated. For this purpose, three groups of roughing electrodes with different chromium content (0-13 wt%) were made and roughing operation was performed by hand electrode arc process (SMAW). Optical and scanning microstructural studies (SEM) along with XRD fuzzy analyzes showed that with increasing chromium content the microstructure of the coating is varied from a ferritic field with needle and morphology morphologies into a rich austenite field of carbide phases such as  $(FeCr)_7C_3$ . The evaluation of the characteristics of roughened samples showed that the coating hardness increased by about 350% with increasing chromium content (the hardness of the chromium-plated coating and the hardness of the metal substrate were  $875 \pm 5HV$  and  $200 \pm 5HV$  respectively). Examining the wear behavior of the samples indicates a significant improvement in the wear resistance of the chromium-rich coating (an 80% reduction in the coefficient of friction and a 90% reduction in the amount of lost weight relative to the metal-tensile properties) The SEM study of washed surfaces implying a change in the wear mechanism from the two-body scrubbing wear to the cutting mechanism by increasing the volume fraction of carbide compounds in higher-chromium specimens.

**Keywords:** Cladding, Martensitic Stainless Steel, Microstructure, Wear Resistance, SMA.

Received: 26 June 2019

Accepted: 1 January 2020

■ ..... ■  
\* **Corresponding Author:**

**Masoud Mosallae, PhD**

**Address:** Materials Engineering group, Faculty of Mining and Metallurgy, Yazd University, Yazd, Iran.

**Tel:** +98 (11) 43057620

**E-mail:** mosal@yazd.ac.ir

## ارتباط ترکیب شیمیایی، ریزساختار و خواص تریبولوژیکی روکش جوشی راسب شده بر زیرلایه DIN-25CrMo4 توسط فرایند SMAW

رضا سعیدی<sup>۱</sup>، مسعود مصلائی پور<sup>۲</sup>، علیرضا مشرفی<sup>۲</sup>، سید صادق قاسمی<sup>۲</sup>

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

### چکیده

در پژوهش حاضر تاثیر عنصر کاربیدزای کروم بر ریزساختار، سختی و خواص سایشی روکش جوشی راسب شده بر زیرلایه DIN-25CrMo4 مورد بررسی واقع شد. بدین منظور سه دسته الکتروود روکش کاری با مقادیر مختلف کروم (۱۳-۳۰ wt%) ساخته و عملیات روکش کاری توسط فرآیند قوس الکتروود دستی (SMAW) انجام شد. مطالعات ریزساختاری نوری و روشی (SEM)، همراه با آنالیزهای فازي XRD نشان داد که با افزایش میزان کروم، ریزساختار روکش از یک زمینه فریتی با مورفولوژی های سوزنی و چند وجهی به یک زمینه آستنیتی غنی از فازهای کاربیدی از قبیل  $(FeCr)_3C$  تغییر می یابد. ارزیابی خصوصیات نمونه های روکش کاری شده نشان داد با افزایش میزان کروم در روکش، سختی روکش حدود ۳۵۰٪ افزایش می یابد (سختی روکش غنی از کروم و سختی فلز پایه به ترتیب  $875 \pm HV5$  و  $200 \pm HV5$  اندازه گیری شد). بررسی رفتار سایشی نمونه ها حاکی از بهبود چشمگیر مقاومت به سایش روکش غنی از کروم (کاهش ۸۰٪ ضریب اصطکاک و کاهش ۹۰٪ مقدار وزن از دست رفته نسبت به خواص سایشی فلز پایه) می باشد. مطالعه SEM سطوح ساییده شده دلالت بر تغییر مکانیزم سایش از سایش خراشان دو جسمی به مکانیزم برش ریز با افزایش کسر حجمی ترکیبات کاربیدی در نمونه های با مقدار کروم بالاتر دارد.

واژه های کلیدی: روکش کاری، کروم، ریزساختار، سایش.

دریافت: ۱۳۹۸/۴/۵ | پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۱

### ۱. مقدمه

ماده ای مناسب برای کاربردهای صنعتی باید علاوه بر خواص حجمی مناسب از خصوصیات سطحی ویژه ای برخوردار باشد. دسترسی به چنین موادی در اغلب موارد هزینه های بالایی را به همراه دارد. ولی با توسعه فرآیندهای مهندسی سطح امکان تحقق و توسعه این گونه مواد با مقاومت سطحی بالا و چقرمگی مناسب فراهم شده است [۱ و ۲].

فولاد DIN-25CrMo4 یک فولاد کم آلیاژ با قابلیت شکل پذیری و جوش پذیری مطلوب در ساخت قطعات صنعتی از قبیل میل لنگ ها، محورها و چرخ دنده ها در صنایع هواپیمایی و خودروسازی کاربرد بسیاری دارد [۳ و ۴]. از نقاط ضعف این آلیاژ می توان به پایین بودن مقاومت سایشی این فولاد تحت بارهای دینامیکی اشاره نمود که موجب مشکلات اساسی در کاربردهای صنعتی این دسته از مواد می گردد. نظر به مقدار

نسبتا کم کربن ( $0.18-0.22$  wt%) در این فولادها، امکان افزایش سختی سطحی با عملیات حرارتی وجود ندارد [۵ و ۶]. از راه کارهای صنعتی به منظور افزایش سختی و بهبود رفتار سایشی فولاد DIN-25CrMo4 می توان به عملیات روکشکاری اشاره نمود [۷]. از راه کارهای اقتصادی و صنعتی در زمینه روکشکاری، می توان به فرآیندهای مختلف جوشکاری اشاره کرد که دارای مزیت هایی از قبیل قیمت ارزان، سهولت اجرا و ضخامت بالای لایه روکش راسب شده می باشد [۸].

فرآیند (SMAW) به دلیل تنوع زیاد در ترکیب شیمیایی الکتروود، قابلیت اجرا در تمامی موقعیت ها و عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و گران قیمت از کاربردی ترین فرآیندهای جوشکاری برای روکشکاری است [۹ و ۱۰].

بررسی های زیادی در زمینه تاثیر ترکیب شیمیایی بر ریزساختار، سختی و بهبود رفتار سایشی روکش های جوش انجام شده است [۱۱، ۱۳]. Selvi و همکاران [۱۱] با افزایش

\* نویسنده مسئول:

دکتر مسعود مصلائی پور

نشانی: یزد، دانشگاه یزد، پردیس فنی مهندسی، دانشکده معدن و متالوژی گروه مهندسی مواد.

تلفن: ۴۳۰۵۷۶۲۰ (۱۱) ۹۸+

پست الکترونیکی: mosal@yazd.ac.ir

الکترودها قبل از عملیات روکشکاری به مدت ۲ hr جهت رطوبت زدایی در دمای ۳۰۰ °C مورد پخت مجدد واقع شدند. عملیات روکشکاری با فرآیند SMAW مطابق با پارامترهای جوشکاری ارائه شده در جدول (۲) در وضعیت مسطح مطابق با استاندارد AWS A5.5 انجام شد.

جدول ۲. پارامترهای جوشکاری مورد استفاده در این پژوهش

پارامتر جوشکاری	مقدار
سرعت جوشکاری	۳۰۰ mm/min
شدت جریان جوشکاری (آمپر)	۱۱۳±۵(A)
ولتاژ جوشکاری (ولت)	۲۰±۲(V)
قطر الکتروده (میلیمتر)	۳ mm
تعداد لایه روکش	۲
گرمای ورودی	۳۸۰±۱۰ J/mm
پلارپته	DCEP

نمونه‌های متالوگرافی در ابعاد ۳۰×۲۰×۱۵ mm<sup>3</sup> در راستای عمود بر مقطع روکش برش و پس از آماده سازی سطحی مطابق با روش‌های استاندارد متالوگرافی توسط محلول نایتال ۴٪ به مدت زمان ۷ sec در دمای محیط اچ شیمیایی شدند. مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی IROST انجام شد. همچنین بررسی ترکیب شیمیایی اجزا تشکیل دهنده روکش‌ها توسط آنالیز Spot-EDS صورت پذیرفت. بررسی کیفی فازهای تشکیل شده در ساختار روکش‌ها توسط آزمون تفرق اشعه X با سرعت پیشروی ۰/۰۵°/sec در بازه زاویه‌ای ۱۰۰°-۱۰° با استفاده از اشعه K<sub>αCu</sub> با طول موج ۱/۵۴۱۸۴ Å انجام شد.

پروفیل سختی در امتداد مقطع روکش کاری شده با استفاده از دستگاه میکروسختی Koopa و بار اعمالی ۱۰۰ g و مدت زمان نشست بار ۱۰ sec اندازه‌گیری و رسم شد. آزمون سایش به روش پین روی دیسک و از فولاد بلبرینگ با سختی RC64 به عنوان پین ساییده استفاده شد. همچنین آزمون تحت نیروی عمودی ۴۰ N در دمای ۳۰ °C و رطوبت ۱۰٪ در مسافت سایشی ۱۰۰۰ m انجام پذیرفت. کاهش وزن نمونه‌ها نیز با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۱ mg بعد طی مسافت سایشی مشخص اندازه‌گیری و ثبت گردید. سطوح ساییده شده و ذرات جدا شده از نمونه‌ها در حین آزمون سایش جمع‌آوری به منظور تعیین مکانیزم سایش مورد مطالعات SEM واقع شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### مطالعات ریزساختاری

بررسی ریزساختاری با میکروسکوپ نوری از زیرلایه (شکل ۱)

عنصر Cr از wt ۱۳٪ به wt ۱۷٪ در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که تشکیل کاربید کروم Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> در ریزساختار روکش موجب تاثیر قابل توجهی بر بهبود رفتار سایشی نسبت به خواص سایش زیر لایه می‌شود. عظیمی و شمعیان [۱۲] افزایش مقاومت سایشی در لایه‌های روکشی را ناشی از ترکیب بهینه‌ای از کروم با عناصر کاربیدزا نظیر Mo و Nb در پوشش الکتروده دانستند که با شکل‌گیری کاربید NbC و کاربید (Fe,Mo,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> در ریزساختار روکش سبب افزایش سختی سطحی و بهبود رفتار سایشی می‌گردد. John و همکاران [۱۳] تاثیر تعداد لایه‌های روکش بر خصوصیات سطحی نمونه‌ها را بررسی و گزارش دادند که با افزایش تعداد لایه‌های روکش بر سطح زیرلایه، سختی و مقاومت سایشی افزایش می‌یابد. آنها بهبود خواص سایشی روکش را بدلیل افزایش کسر حجمی کاربیدها و کاهش میزان مشارکت فلز پایه در لایه روکش گزارش نمودند.

در این پژوهش به منظور بهبود رفتار سایشی فولاد کم آلیاژ DIN-25CrMo4 از عملیات روکشکاری جوشی با استفاده از فرآیند SMAW استفاده شد. بدین منظور سه دسته الکتروده با مقادیر مختلف کروم و کربن ساخته و تاثیر ترکیب شیمیایی روکش بر ریزساختار، سختی و خواص سایشی روکش حاصله مورد ارزیابی و تحقیق واقع شد.

### ۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد کم آلیاژ DIN-25CrMo4 با ترکیب (Fe-0.25C-0.2Mo-1.15Cr-0.6Mn (wt%) به عنوان بستر (زیرلایه) استفاده شد. برای انجام روکشکاری نمونه‌هایی در ابعاد ۱۰×۳۵×۱۵ mm<sup>3</sup> از زیرلایه دریافتی برش و بعد از آماده سازی سطحی (سنگ زدن تا سمباده ۶۰۰) و چربی زدایی در حمام استون، تحت عملیات روکشکاری جوشی واقع شدند. به منظور بررسی تاثیر عنصر کروم بر ریزساختار و خواص روکش سه دسته الکتروده حاوی مقادیر مختلفی از کروم طراحی و با همکاری شرکت الکتروده یزد ساخته شد. در جدول (۱) ترکیب شیمیایی فلزجوش راسب شده از این الکترودها ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی لایه روکش برای نمونه‌های مختلف روکش کاری شده در پژوهش حاضر

کد الکتروده عنصر	Cr-H	Cr-M	Cr-L
C/.	۰/۶۵	۰/۵۱	۰/۰۵
Mo/.	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۲۱
Cr/.	۱۳/۴۴	۹/۵۴	۰/۳۰
Mn/.	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۴۲
Fe/.	Bal ..	Bal..	Bal

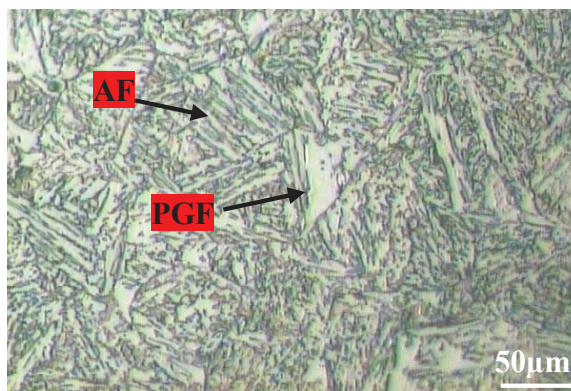


شکل ۳. ریزساختار نواحی مختلف روکش‌های ایجاد شده توسط الکتروود Cr-M و Cr-H. (الف) ناحیه فصل مشترک نمونه Cr-H، (ب) سطح فوقانی نمونه Cr-M، (ج) سطح فوقانی نمونه Cr-H.

در شکل ۴ بخشی از نمودار سه‌تایی Fe-C-Cr نشان داده شده است. موقعیت روکش‌های Cr-M و Cr-H به ترتیب توسط نقاط آبی و قرمز در این شکل مشخص شده است. می‌توان بیان نمود که انجماد لایه روکش با جوانه‌زنی و رشد فاز آستنیت در محدوده دمایی  $1450^{\circ}\text{C}$  تا  $1500^{\circ}\text{C}$  شروع و با استحاله یوتکتیک ( $M_7C_3 + \gamma \rightarrow L$ ) تکمیل می‌شود. بنابراین فازهای نهایی تشکیل شده در ریزساختار برای هر دو نمونه به علت ترکیب شیمیایی تقریباً یکسان روکش‌ها، به صورت یک زمینه آستنیتی کاربیدی می‌باشد.

مطالعات SEM-EDS از روکش نمونه Cr-L (شکل ۵) حاکی از تشکیل روکشی با زمینه غنی از آهن و مقادیر جزئی از مولیبدن و کروم می‌باشد. حضور این عناصر در ترکیب شیمیایی روکش را می‌توان به انحلال زیرلایه در لایه روکش نسبت داد. مطالعات SEM-EDS مناطق مختلف روکش در این نمونه دلالت بر جدایش عنصری و تشکیل اجزاء غنی

نشان داد که فلز پایه دارای زمینه فریتی درشت دانه (متوسط اندازه دانه  $10 \pm 120 \mu\text{m}$  و با مورفولوژی‌های مختلف فریت از قبیل فریت توده‌ای و فریت سوزنی تشکیل شده است.



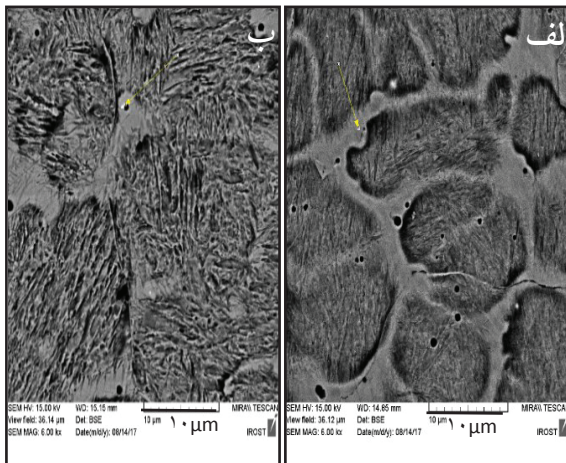
شکل ۱. ریزساختار نوری فلز پایه.

تصویر میکروسکوپ نوری از سطح روکش نمونه جوشکاری شده با الکتروود Cr-L در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به ترکیب شیمیایی روکش (جدول ۱) و مطالعات ریزساختاری این نمونه، می‌توان عنوان کرد که روکش جوشی نمونه Cr-L از یک زمینه کاملاً فریتی با مورفولوژی‌های مختلف از این فاز شامل سوزنی، چندوجهی و مرزدانه‌ایی تشکیل شده است [۱۴].

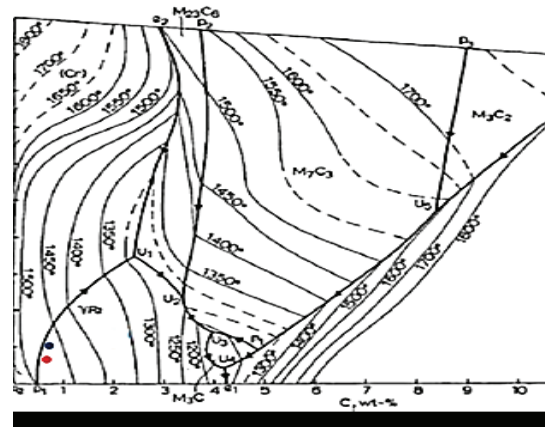


شکل ۲. ریزساختار نوری روکش جوشی نمونه Cr-L.

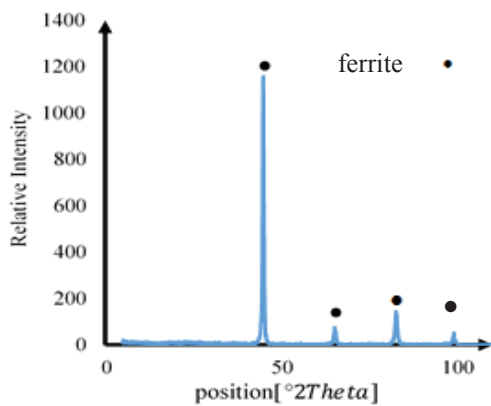
در شکل ۳ ریزساختار نواحی مختلف روکش‌های ایجاد شده توسط الکتروود Cr-M و Cr-H ارائه شده است. بر اساس انجماد روکش جوشی با رشد رونشستی (Epitaxial) بر فصل مشترک روکش/زیرلایه شروع و با مکانیزم رشد رقابتی ادامه می‌یابد [۱۵ و ۱۶]. مورفولوژی ستونی دانه‌ها در مجاورت فصل مشترک روکش/زیرلایه (شکل ۳-الف) مبین رشد رقابتی در مراحل اولیه انجماد روکش می‌باشد. اختلاف مورفولوژی‌های اجزاء روکش در نواحی پایینی (نواحی نزدیک به فصل مشترک روکش و زیرلایه) و نواحی فوقانی روکش را می‌توان به تغییر سرعت انجمادی و گرادیان دمایی اعمالی بر فاز مذاب با پیشرفت انجماد، نسبت داد [۱۷ و ۱۸].



شکل ۶. تصاویر SEM (الف) نمونه Cr-H (ب) نمونه Cr-M



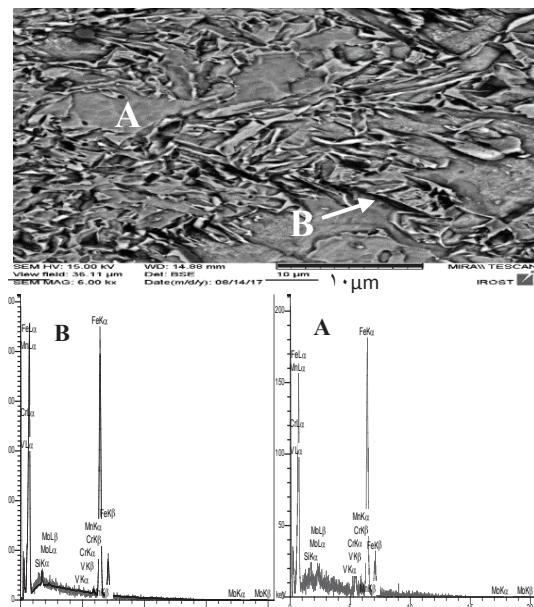
شکل ۴. دیاگرام سه تایی Fe-Cr-C نقاط آبی و قرمز به ترتیب مبین موقعیت نمونه‌های Cr-H و Cr-M می‌باشد.



شکل ۷. الگو پراش XRD از سطح نمونه Cr-L

Cr-L (شکل ۷) می‌توان برداشت نمود که این روکش از یک زمینه کاملاً فریتی تشکیل شده و عدم فازهای کاربیدی در همخوانی با مقادیر کم کربن (۰/۰۵ wt) و عناصر آلیاژی کاربیدزا از قبیل کروم می‌باشد.

نتایج حاصله از آنالیز XRD نمونه‌های Cr-M و Cr-H (شکل ۸) بیانگر وجود ترکیبات کاربیدی غنی از کروم و آهن در زمینه آستنیتی برای هر دو نمونه می‌باشد. با مقایسه الگوهای پراش بدست آمده از این دو نمونه می‌توان دریافت که افزایش عنصر کاربیدزای کروم در نمونه Cr-H موجب شدت بیشتر پیک‌های مربوط به ترکیبات کاربیدی  $M_7C_3$  در نمونه Cr-H نسبت به نمونه Cr-M شده است. کاهش شدت پیک‌های مربوط به فاز آستنیت در نمونه Cr-H نسبت به نمونه Cr-M را می‌توان به تاثیر فریت‌زائی کروم مرتبط نمود. لازم به ذکر است شدت پیک‌های یک فاز متناسب با مقادیر آن فاز می‌باشد. همان‌گونه که از شکل ۸ برداشت می‌شود با افزایش کروم در لایه روکش یک سری پیک‌های جدیدی مرتبط با ترکیبات بین فلزی غنی از آهن، کروم و وانادیم ( $CrVFe_3$ ) در الگوی پراش نمونه Cr-H ایجاد شد.



شکل ۵. تصویر SEM-BSE از روکش Cr-L، همراه با آنالیز EDS.

Cr و Mo در روکش Cr-L داشت. لازم به ذکر است نظر به کیفی بودن آنالیز EDS تنها می‌توان به حضور این عناصر در بخشهای مختلف روکش و مقایسه نسبی آنها با هم اکتفا نمود.

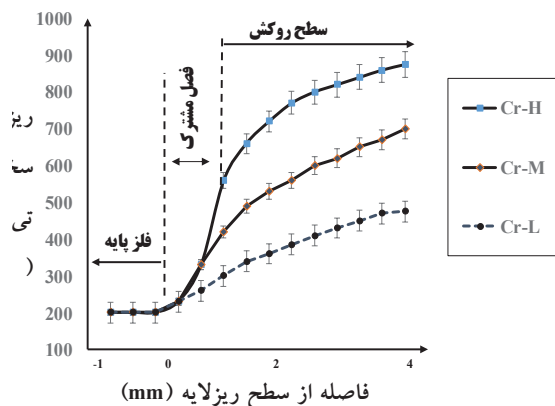
در شکل ۶ ریزساختار SEM در مد الکترون برگشتی از نمونه‌های Cr-M و Cr-H ارائه شده است. ریزساختار روکش نمونه Cr-H ظریف‌تر از ریزساختار روکش Cr-M می‌باشد که می‌تواند ناشی از غلظت بیشتر عناصر آلیاژی (جدول ۱) و افزایش مادون انجماد حین انجماد مذاب روکش Cr-H باشد.

#### ارزیابی نتایج تفرق اشعه ایکس (XRD)

با توجه به نتایج آزمون XRD از روکش ایجاد شده در نمونه

بر روی این نمونه سختی  $700 \pm 5$  HV را نشان داد. تحقیقات نشان داد که توزیع ذرات فاز دوم در ریزساختار نیروی ممانعت کننده‌ای را در برابر حرکت مرزدانه‌ها با زاویه کوچک یا بزرگ اعمال می‌کند. این عامل می‌تواند اثر قابل توجه‌ای بر تعویق، مهار و رشد دانه‌ها اعمال نماید [۲۰ و ۱۹] که موجب افزایش سختی می‌گردد.

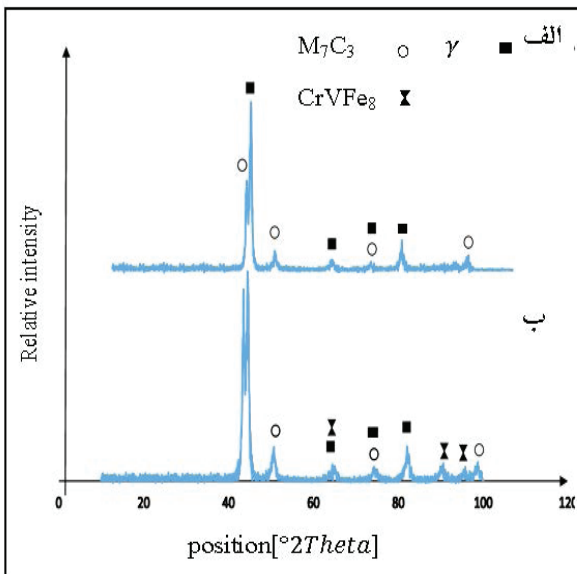
پروفیل سختی نمونه‌های روکش‌کاری شده در شکل ۹ رسم گردید. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است در تمامی نمونه‌ها با فاصله گرفتن از سطح زیرلایه به سمت سطح روکش میزان سختی افزایش می‌یابد. علت این تغییرات را می‌توان به کاهش میزان مشارکت فلز پایه (رقت) در نواحی سطحی روکش نسبت داد. با فاصله گرفتن از زیر لایه به سمت روکش ترکیب شیمیایی در سطح روکش به ترکیب شیمیایی الکتروود مصرفی نزدیکتر می‌شود که به علت حضور عناصر آلیاژی بیشتر و تشکیل ترکیبات کاربیدی و بالا بودن سرعت سرد شدن در این نواحی، میزان سختی در نواحی فوقانی روکش افزایش می‌یابد. افزایش سختی روکش‌های جوشی با حرکت از سطح زیرلایه به سمت فوقانی روکش همخوانی با نتایج دیگر محققین [۲۳ و ۲۱، ۲۲] می‌باشد.



شکل ۹. تاثیر ترکیب شیمیایی روکش بر پروفیل سختی نمونه‌های روکش‌کاری شده.

#### ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها

شکل ۱۰ کاهش وزن نمونه‌های سایشی را بعد از طی مسافت سایشی ۱۰۰۰ m برای هر سه نمونه روکش داده نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود کمترین میزان کاهش وزن مربوط به نمونه Cr-H می‌باشد که به علت سختی بالای روکش این نمونه می‌باشد. کاهش وزن این نمونه بعد از طی مسافت سایشی ۱۰۰۰ m کمتر از ۰/۷ mg تعیین شد. در مقابل سختی پایین در سطح روکش Cr-L، منجر به کاهش وزن شدیدی شده بطوری که تنها بعد از طی مسافت سایشی ۳۰۰ m کاهش وزنی بیشتر از ۱۰/۲ mg اندازه‌گیری شد. رفتار سایشی نمونه Cr-M مابین نمونه‌های فوق‌الذکر بود که



شکل ۸. الگو پراش XRD (الف) سطح نمونه Cr-M (ب) سطح نمونه Cr-H

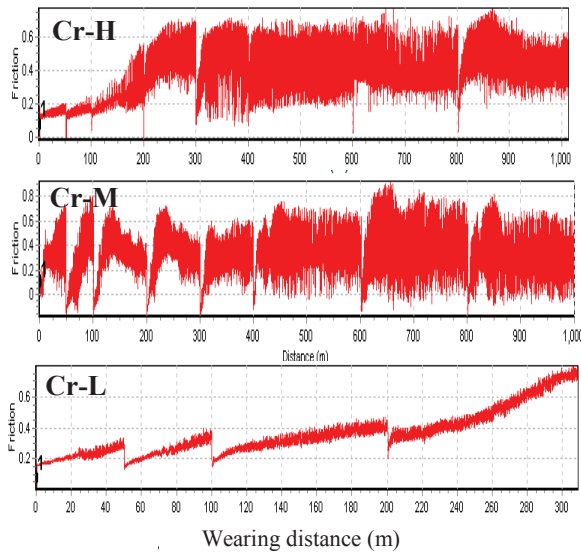
#### بررسی‌های ریزسختی

نتایج آزمون میکروسختی از زیرلایه (DIN-25CrMo4) و سطوح روکش‌کاری شده در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که برداشت می‌شود، عملیات روکشکاری جوشی در تمامی نمونه‌ها موجب افزایش سختی (از ۲۰۰٪ تا ۳۵۰٪) در سطح روکش نسبت به فلز پایه شده است. نتایج آزمون سختی نشان داد با افزایش کروم در روکش، سختی روکش ایجاد شده افزایش می‌یابد. افزایش سختی با افزایش میزان کروم در همخوانی با نتایج ریزساختاری و مطالعات فازی XRD می‌باشد. به عبارت دیگر افزایش سختی مذکور را می‌توان به افزایش میزان کاربیدها نسبت داد. بیشترین مقدار سختی  $(875 \pm 5$  HV) در نمونه Cr-H ثبت گردید که به مراتب از سختی زیرلایه  $(700 \pm 5$  HV) بالاتر می‌باشد. در نمونه Cr-M نیز با وجود عناصر آلیاژی و ترکیبات کاربیدی تشکیل شده سختی به مقدار زیادی افزایش پیدا کرد. نتایج آزمون سختی

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون سختی از سطح روکش‌های ایجاد شده در این پژوهش

نمونه آزمون	Cr-H	Cr-M	Cr-L	BM
اول	۸۴۴	۶۹۴	۴۶۴	۱۹۷
دوم	۸۹۶	۷۱۰	۴۷۳	۱۹۸
سوم	۸۶۵	۷۰۸	۴۹۳	۲۰۴
چهارم	۹۰۲	۶۹۵	۴۶۸	۲۰۰
پنجم	۸۴۳	۶۹۰	۴۷۷	۲۰۱
میانگین	$875 \pm 5$	$700 \pm 5$	$475 \pm 5$	$200 \pm 5$

می‌توان ناشی از پدیده کارسختی دانست که در ابتدای مسیر سایس به علت سختی کمتر ضریب اصطکاک بالاتر و در ادامه با سخت‌تر شدن سطح روکش ناشی از استحاله آستنیت به مارتنزیت میزان ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.



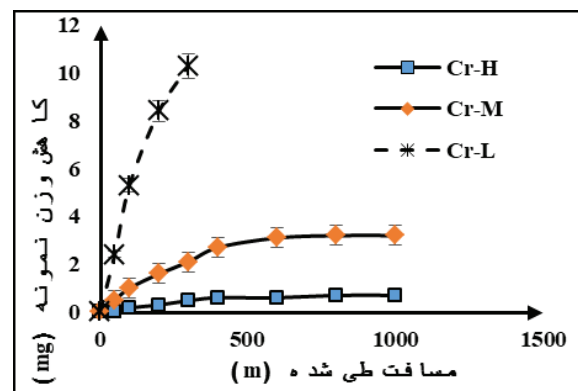
شکل ۱۱. تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت پیموده حین آزمون سایس نمونه‌های Cr-H، Cr-M و Cr-L.

جهت بررسی کامل‌تر و تعیین مکانیزم غالب سایس در هر نمونه، مسیر سایس و ذرات حاصل از آن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی واقع شدند (شکل ۱۲). بررسی سطوح سایس مربوط به روکش نمونه‌های Cr-H و Cr-M (شکل ۱۲-الف و ب) حاکی از سطوح خیش خورده با پهنا و عمق کم و همچنین وجود لایه‌های چسبیده بر سطح می‌باشد. می‌توان استنباط نمود که سایس در این دو نمونه ابتدا با مکانیزم سایس خراشان دو جسمی از نوع خیش ریز شروع و در ادامه، سایس با مکانیزم خراشان سه جسمی دنبال می‌شود. نظر به کندگی‌ها و شیارهای ایجاد شده در سطح سایس این نمونه‌ها، مکانیزم غالب سایسی در نمونه‌های Cr-H و Cr-M مکانیزم ریزترک می‌باشد. توضیح آنکه سختی بالای سطح موجب ریزترک‌هایی در اثر تغییر شکل در لایه‌های سطحی شده با رشد و اتصال آنها به هم، موجب کندگی سطح می‌شود. لازم به ذکر است عمق و پهنای شیارها و میزان کندگی در سطح سائیده شده نمونه Cr-M بزرگتر و بیشتر از کندگی‌ها در سطح نمونه Cr-H می‌باشد که در همخوانی با سختی کمتر نمونه Cr-M نسبت به نمونه Cr-H می‌باشد.

وجود شیارهای پهن و عمیق در سطح سائیده شده Cr-L بیانگر یک حالت شخم زدگی از سطح می‌باشد. از دلایل اصلی آن می‌توان به پایین بودن سختی روکش اشاره کرد که با نفوذ زیاد پین منجر به ایجاد شیارهای پهن و عمیق در سطح روکش گردید. مکانیزم اصلی سایس در این نمونه مکانیزم سایس ورقه‌ای می‌باشد.

در همخوانی با میزان سختی این نمونه می‌باشد. کاهش وزن اندازه‌گیری شده در نمونه Cr-M بعد از طی مسافت ۱۰۰۰ m در حدود ۳/۲ mg تعیین شد.

همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود شیب کاهش وزن نمونه‌های Cr-M و Cr-H در مسیرهای ابتدایی، بیشتر از مسیرهای پایانی می‌باشد. علت این تغییرات در رفتار سایسی این نمونه‌ها را می‌توان ناشی از افزایش سختی به دلیل مکانیزم کار سختی و افزایش دانسیته نایجایی‌ها در سطح روکش بیان کرد. توضیح آنکه آستنیت موجود در زمینه روکش‌های Cr-H و Cr-M در نتیجه کار مکانیکی ایجاد شده حین آزمون سایس به مارتنزیت تبدیل شده و موجب افزایش سختی سطح و افزایش مقاومت به سایس و کاهش شیب سایس در حین آزمون سایس می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار کاهش وزن نمونه‌ها بعد از طی مسافت ۱۰۰۰ m.

تاثیر ترکیب شیمیایی روکش بر تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت پیموده حین آزمون سایس در شکل ۱۱ ارائه شده است. از عوامل موثر در ضریب اصطکاک می‌توان به سطح تماس واقعی بین پین و سطح روکش اشاره نمود. توضیح آنکه افزایش سختی و کاهش زبری سطوح تماس موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود [۲۴ و ۲۵]. بنابراین سختی بالای روکش Cr-H موجب ایجاد کمترین میزان ضریب اصطکاک (میانگین ۴۰/۴۰) شده است. برعکس سختی کمتر نمونه‌ی Cr-L موجب نفوذ بیشتر پین در سطح روکش مذکور شده و تماس بیشتری بین پین و سطح روکش Cr-L موجب افزایش ضریب اصطکاک این نمونه شده به طوری که بعد از طی تنها ۳۰۰ متر، میانگین ضریب اصطکاک این نمونه به ۰/۹۰ می‌رسد. روند یکنواخت ضریب اصطکاک حین سایس در نمونه Cr-L را می‌توان به ثابت باقی ماندن مکانیزم غالب سایس در طول مسیر برای این نمونه نسبت داد. در مقابل نوسانات ضریب اصطکاک مربوط به روکش نمونه‌های Cr-M و Cr-H حین آزمون سایس، در نتیجه تغییرات مکانیزم غالب سایس می‌باشد. توضیح آنکه میزان ضریب اصطکاک در این نمونه‌ها در ابتدای مسیر بالا بوده و در ادامه کاهش می‌یابد. این را

۳. افزایش کروم تا حدود ۱۳ wt% در لایه روکش موجب بهبود چشمگیر مقاومت به سایش نمونه‌های روکش کاری شده (کاهش ۸۰% ضریب اصطکاک و کاهش ۹۰% مقدار وزن از دست داده شده حین سایش) نسبت به رفتار سایشی زیرلایه می‌شود.

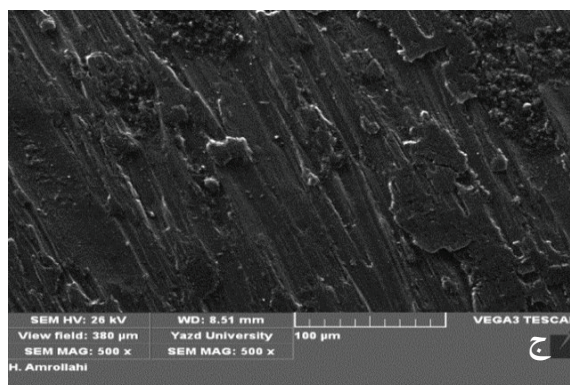
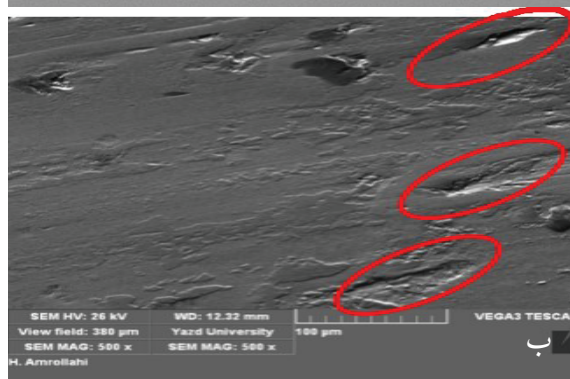
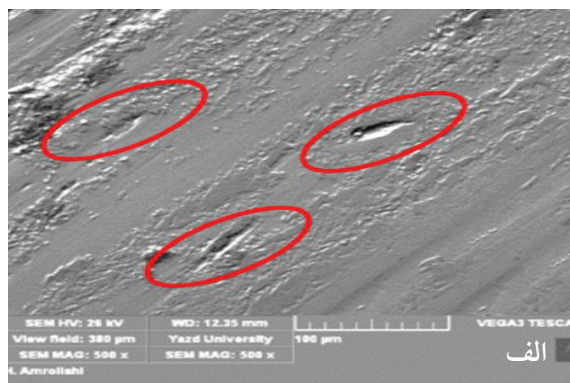
۴. حضور کروم در لایه روکش موجب تغییر مکانیزم سایش حین آزمون سایش می‌شود. علت را می‌توان به وقوع پدیده کار سختی و استحاله زمینه آستنیتی به مارتنزیت نسبت داد.

### ۵. تشکر و قدر دانی

از مدیریت محترم شرکت الکترو دیزل و دیگر اعضای محترم پژوهشی و تولید شرکت الکترو دیزل که در ساخت الکترودها و انجام جوشکاری با نویسندگان این مقاله همکاری داشتند، نهایت سپاسگزاری و قدردانی را داریم.

### References

- [1] Sapate, S. G., and A. V. RamaRao. "Erosive wear behaviour of weld hardfacing high chromium cast irons: effect of erodent particles." *Tribology International*, vol. 39.3, pp. 206-212, 2006.
- [2] Karadeniz, Erdal, Ugur Ozsarac, and Ceyhan Yildiz. "The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding." *Materials & design*, vol. 28.2, pp. 649-656, 2007.
- [3] Ji-Liang, Doong, Chi Jing-Ming, and Tan Yen-Hung. "Fracture toughness behaviour in AISI 4130 steel of electron beam welding." *Engineering fracture mechanics*, vol. 36.6, pp. 999-1006, 1990.
- [4] Romo, S. A., et al. "Cavitation and high-velocity slurry erosion resistance of welded Stellite 6 alloy." *Tribology International*, vol. 47, pp. 16-24, 2012.
- [5] I. Hutchings and P. Shipway, "Tribology: friction and wear of engineering materials", 2nd Edition, Butterworth-Heinemann publication, 2017.
- [6] Eroglu, Mehmet. "Boride coatings on steel using shielded metal arc welding Microstructure and hardness." *Surface & Coatings Technology*, vol. 203.16, pp. 2229-2235, 2009.
- [7] Pradeep, G. R. C., A. Ramesh, and B. Durga Prasad. "A review paper on hardfacing processes and materials." *Engineering Science and Technology*, vol. 2.11, pp. 6507-6510, 2010.
- [8] de Melo, Anderson CA. "Some observations on wear and damages in cemented carbide tools." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 28.3, pp. 269-277, 2006.
- [9] Mendez, Patricio F., et al. "Welding processes for wear resistant overlays." *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 16.1, pp. 4-25, 2014.
- [10] Buchanan, V., P. H. Shipway, McCartney. "Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry." *Wear*, vol. 263, pp. 99-110, 2007.



شکل ۱۲. تصویر SEM از مسیر سائیده شده در (الف) نمونه Cr-H، (ب) نمونه Cr-M و (د) نمونه Cr-L. نواحی مشخص شده کندگی در سطوح سایش می‌باشد.

### ۴. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تاثیر عنصر کاربیدزای کروم بر ریزساختار، سختی و خواص سایشی روکش جوشی راسب شده بر زیرلایه DIN-25CrMo4 مورد پژوهش واقع شد. از مهمترین دستاوردهای این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

۱. مطالعات میکروسکوپی و آزمون پراش XRD حاکی از ایجاد کاربید کروم به صورت  $Cr_7C_3$  در یک زمینه آستنیتی با افزودن عنصر کروم (۱۳-۹ wt%) در روکش می‌باشد.
۲. با افزایش عنصر کروم (۱۳.۵ wt%) در لایه روکش، سختی زیرلایه از  $200 \pm 5$  HV به مقادیر حدود  $875 \pm 5$  HV افزایش یافت.



- [11] Selvi, S., S. P. Sankaran, and R. Srivatsavan. using MMAW process." *Journal materials Processing technology*, vol. 207, pp. 356-362, 2008.
- [۱۲] ق. عظیمی، م. شمعیان، "روکش کاری فولاد ساده کربنی با الکترودهای پرکروم، ارزیابی ریزساختار و رفتار سایشی روکش" نشریه علوم مهندسی سطح، شماره ۴، ص ۸۶-۷۵، سال 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*, vol. 42.5 pp.745-749, 2009.
- [14] Wang, X. H., et al. "Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings." *Materials Science Engineering: A*, vol. 489, pp. 193-200, 2008.
- [15] Correa, E. O., et al. "The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process." *Surface and Coatings Technology*, vol. 276 pp. 479-484, 2015.
- [16] Sawant, Mayur S., and N. K. Jain. "Investigations on wear characteristics of Stellite coating by micro-plasma transferred arc powder deposition process." *Wear*, vol. 378, pp. 155-164, 2017.
- [17] Jankauskas, Vytenis, et al. "Effect of WC grain size and content on low stress abrasive wear of manual arc welded hardfacings with low-carbon or stainless steel matrix." *Wear*, vol. 328, vol. 378-390, 2015.
- [18] Amushahi, M. H., F. Ashrafizadeh, and M. Shamanian. "Characterization boride-rich hardfacing on carbon steel by arc spray and GMAW processes." *Surface and Coatings Technology*, vol. 204.16, pp. 2723-2728, 2010.
- [19] Yang, Jian, et al. "Microstructure and wear resistance of the hypereutectic Fe-Cr-C alloy hardfacing metals with different La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> additives." *Applied Surface Science*, vol. 289, pp. 437-444, 2014.
- [20] Zener, C. S. "Grains, phases and interfaces: an interpretation of microstructure." *Trans. AIME*, vol. 175, pp. 15-51, 1984.
- [21] Evans, G. M. "The Effect of Carbon on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld Metal Deposits." *Weld Res Abroad*, vol. 19.1, pp. 13-24, 1983.
- [22] Wei, Shizhong, et al. "Effects of carbon on microstructures and properties of high vanadium high-speed steel." *Materials & design*, vol. 27.1, pp 58-63, 2006.
- [23] Chandrashekharaiah, T. M., and S. A. Kori. "Effect of grain refinement and modification on the dry sliding wear behaviour of eutectic Al-Si alloys." *Tribology international* 42.1 59-65, 2009.
- [24] Kirchgäßner, M., E. Badisch, and F. Franek. "Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact." *Wear*, vol. 265.5, pp. 772-779, 2008.
- [25] Gualco, Agustín, et al. "Effect of welding procedure on wear behaviour of a modified martensitic tool steel hardfacing deposit." *Materials & Design* 31.9 pp. 4165-4173, 2010.