

Effect of Number of Passes and Interface Layer on the Microstructure and Wear Resistance of the AISI 410 Martensitic Stainless Steel Clad by SMAW on Plane Carbon Steel Plates

*Hamed Sabet¹, Farhad Abdi², Mohammad Atarha²

1- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2- MSc Student of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Citation: Sabet H, Abdi F, Atarha M. Effect of Number of Passes and Interface Layer on the Microstructure and Wear Resistance of the AISI 410 Martensitic Stainless Steel Clad by SMAW on Plane Carbon Steel Plates. Metallurgical Engineering 2020; 22(4): 267-280 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.109603.1249>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.109603.1249>

ABSTRACT

In the present study, ASTM A516-Grade 70 steel sheets were coated using E410 and E309 electrodes via Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process in different number of welding passes. To evaluate the microstructure and properties of the clad layer, metallographic examinations, hardness test, wear test and scanning electron microscope (SEM) from the worn surfaces were used. Microstructural examinations revealed that, all the samples contain ferrite and martensite in the microstructure with different volume fraction. The results showed that, the volume fraction of martensite increased by increasing the number of welding passes. Also, the results of hardness test revealed an increase in the hardness by increasing the number of the number of welding passes. Wear test results showed that, for some samples with higher hardness value, wear resistance was decreased. Evaluation of the worn surfaces revealed that, in the case of the sample welded using E410 electrode without interlayer, abrasive and oxidative wear mechanisms were dominated. In the case of the sample welded using E309 electrode interlayer and E410 overlay, abrasive, oxidative and galling were observed.

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

Received: 14 June 2019

Accepted: 3 March 2020

■ ■

* **Corresponding Author:**

Hamed Sabet, PhD

Address: Department of Materials Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

Tel: +98 (9123472612)

E-mail: h-sabet@kiaui.ac.ir

اثر تعداد پاس و لایه واسط جوشکاری SMAW بر ریزساختار و مقاومت به سایش فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 بر روی فولاد ساده کربنی

* حامد ثابت^۱، فرهاد عبدی^۲، محمد عطارها^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

چکیده

در تحقیق حاضر ورق‌های فولاد ساده کربنی از جنس ASTM A516-Gr70 با استفاده از دو الکتروود فولادزنگ نزن E309 و E410 توسط فرآیند جوشکاری قوس الکتریک با الکتروود روکش دار (SMAW)، با تعداد پاس‌های مختلف جوشکاری، روکش کاری شد. به منظور بررسی کیفیت روکش ایجاد شده، آزمون‌های متالوگرافی، سختی، سایش و بررسی سطح سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. نتایج آزمون متالوگرافی نشان داد که همه نمونه‌ها از فازهای مارتنزیت و فریت تشکیل شده اما درصد این فازها در نمونه‌های مختلف متفاوت بود. همچنین مشخص شد که نمونه‌های روکش داده شده با تعداد پاس‌های بیشتر، درصد فاز مارتنزیت بیشتری داشتند. نتایج آزمون سختی نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌های روکش، سختی افزایش یافت. نتایج آزمون سایش نشان داد که بر خلاف انتظار، برخی از نمونه‌هایی که سختی بیشتری داشتند، مقاومت به سایش کمتری از خود نشان دادند. بررسی سطوح سایش نشان داد که مکانیزم سایش نمونه‌های روکش کاری شده بدون لایه واسط و با الکتروود E410، خراشان به همراه اکسیداسیون بوده است. همچنین مکانیزم سایش نمونه‌های روکش کاری شده با لایه واسط الکتروود E309 و سپس الکتروود E410، خراشان به همراه اکسیداسیون و کندگی بوده است.

واژه‌های کلیدی: روکش کاری، فولاد زنگ نزن مارتنزیتی، ریزساختار، مقاومت به سایش، SMAW.

دریافت: ۱۳۹۸/۳/۲۴ | پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳

۱. مقدمه

ترین فرآیندهای ایجاد این لایه می‌باشد. استفاده از الکتروود و دستور العمل مناسب برای جلوگیری از ایجاد ترک در فلز پایه و همچنین لایه روکش ضروری می‌باشد. نکته مهمی که در این مورد باید به آن توجه داشت کنترل متغیرها در این روش است که می‌تواند هم بر روی پوشش ایجاد شده و هم فلز پایه تاثیرگذار باشد [۳].

فولادهای مارتنزیتی از جمله فولادهایی هستند که با سختی زیاد ۴۵ تا ۶۰ راکول c در صنعت جهت کاربردهای سایش همراه با خوردگی استفاده می‌شود. کاربرد عمده این دسته از روکش‌ها در شرایط سایشی و لغزشی فلز با فلز قطعات روانکاری نشده مانند قطعات تحت بار تراکتورها، اجزا ماشین آلات، غلتک‌های نورد سرد راه آهن و صنعت حمل و نقل می‌باشد. این دسته از فولادها مقاومت به ضربه کمتری در مقایسه با فولادهای آستنیتی داشته اما سختی و مقاومت به سایش بالاتری دارند [۴].

روکش کاری یکی از روش‌های نوین جوشکاری سطحی می‌باشد که در آن یک لایه از فلز با ترکیبات مورد نظر توسط جوشکاری روی سطح قطعات مورد نظر انباشته می‌شود. خواص لایه‌های روکش تابعی از ترکیب شیمیایی، درصد رقت، شرایط انجماد، سرعت سرد شدن (بعد از انجماد)، ریزساختار، نوع، شکل و نحوه توزیع فازها است [۱ و ۲].

گستره وسیعی از کاربرد فولادهای زنگ نزن در صنعت مانند مخازن و اجزای لوله‌ها تعریف شده است. اما از آنجا که اختلاف قیمت فولادهای زنگ نزن در مقایسه با فولادهای ساده کربنی قابل ملاحظه است، معمولاً طراحان روکش‌های زنگ نزن بر روی فلز پایه را پیشنهاد می‌کنند. به این صورت که سطح خارجی توسط لایه‌ای از فولاد زنگ نزن پوشیده می‌شود. استفاده از فرآیندهای جوشکاری ذوبی از اصلی

* نویسنده مسئول:

دکتر حامد ثابت

نشانی: کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرج، گروه مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: (۹۱۲۳۴۷۲۶۱۲) +۹۸

پست الکترونیکی: h-sabet@kiau.ac.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فلز پایه و الکترودهای مصرفی.

عنصر آلیاژی	C%	Si%	Mn%	P%	S%	N%	Cr%	Ni%	V%
فولاد A516*	۰/۲۸۰	۰/۱۴۰	۰/۶۰۰	۰/۰۳۰	۰/۰۳۰	۰/۰۱۰	-	-	-
الکتروود E309**	۰/۰۴۱	۰/۵۲۱	۱/۷۱۰	-	-	۰/۰۱۰	۲۴/۰۰۰	۱۳/۰۰۰	-
الکتروود E410***	۰/۰۶۱	۰/۲۲۱	-	-	-	۰/۰۱۰	۱۳/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۱۴۰

* با استفاده از آزمون اسپکتروسکوپی نشر نوری (Optical Emission Spectroscopy).

** و *** [۸]

۲. مواد و روش تحقیق

برای انجام این تحقیق از نمونه‌های ورق‌های فولاد ساده کربنی ASTM A516-Gr70 به ابعاد ۱۵×۱۵×۲۰۰ میلی متری به عنوان فلز پایه و الکتروود پر کننده مارتنزیتی E410 به عنوان لایه اصلی و الکتروود E۳۰۹ به عنوان لایه میانی (لایه واسط) استفاده شد. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فلز پایه و دو الکتروود E309 و E410 را ارائه می‌دهد.

پس از برش ورق‌ها عملیات ماشین کاری بر روی آنها انجام شد. پس از آن سطح نمونه‌ها توسط سنباده از اکسیدهای سطحی پاک شدند و سپس برای از بین بردن چربی‌ها و سایر آلودگی‌ها عملیات تمیز کاری توسط محلول استون صورت گرفت. در مرحله بعدی ۱۲ نمونه با مشخصات و پارامترهای روکش کاری در جدول ۲ تهیه شدند و عملیات جوشکاری به صورت لایه دهی^۱ روی آنها انجام شد. روکش کاری به روش جوشکاری قوس الکتریک با الکتروود روکش‌دار (SMAW)^۲ توسط جوشکار ماهر مطابق استاندارد ASME SEC9-QW216 انجام شد.

جهت تعیین ترکیب شیمیایی لایه روکش، آزمون آنالیز شیمیایی از سطح روکش (بعد از سنگ زنی مغناطیسی به مقدار یک میلی متر) به روش اسپکتروسکوپی نشر نوری^۳ (OES) با دستگاه مدل Foundry Master UV طبق استاندارد ASTM E1068 انجام شد. جهت بررسی اولیه ریزساختار فلز روکش از دیگرام شفلر استفاده شد. مقدار کروم معادل و نیکل معادل از روابط ۱ و ۲ محاسبه گردیدند [۹]:

رابطه ۱

$$\text{Cr} + \text{Mo} + \frac{1}{10}(\text{Si}) + \frac{1}{5}(\text{Nb}) = \text{درصد کروم معادل}$$

رابطه ۲

$$\text{Ni} + (30 \times \text{C}) + (0.5 \times \text{Mn}) = \text{درصد نیکل معادل}$$

Rathod و همکاران [۵] در مورد تاثیر ترکیب شیمیایی

و ریزساختار روکش بر مقاومت به سایش لایه‌های روکش سخت فولاد زنگ نزن مارتنزیتی بر روی فولاد ساده کربنی مطالعاتی انجام دادند. آنها دریافتند که با افزایش فاصله از سطح لایه پوشش، عناصر آلیاژی موجود در لایه روکش کاهش یافت. ریزساختار نیز حاوی فاز مارتنزیت در نواحی روکش و فصل مشترک ناحیه روکش با فلز پایه بود. با افزایش فاصله از سطح روکش به سمت فلز پایه، مقدار سختی کاهش یافت. همچنین تغییر در مقدار سختی و کاهش وزن در اثر سایش نشان دهنده تغییر ترکیب شیمیایی و مورفولوژی فاز مارتنزیت بود.

دشت بزرگی و همکاران [۶] در خصوص تاثیر میزان کربن بر ریزساختار روکش ایجاد شده از فولاد مارتنزیتی AISI420 بر روی فولاد ساده کربنی مطالعاتی انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش کربن سیم جوش به بیش از ۰/۳ درصد، ریزساختار فلز جوش از مارتنزیت به آستنیت تغییر کرد. همچنین با افزایش میزان کربن، سختی نمونه‌ها افزایش یافت. به علت کاهش اثرات رقت در لایه‌های نزدیک به سطح، مقدار سختی از مرز لایه روکش شده، به سمت سطح افزایش یافت.

نوری پور و همکاران [۷] در خصوص ریزساختار و سختی لایه روکش سخت فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI414 بر روی غلتک‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری زیرپودری مطالعاتی انجام دادند. آنها دریافتند که ریزساختار حاوی زمینه مارتنزیت، فریت دلتای باقیمانده در مناطق بین دندریتی، آستنیت باقیمانده، مقادیر کمی کاربید آلیاژی و آخال بود. نتایج آزمون پراش اشعه ایکس از لایه روکش نیز نشان داد که آستنیت نیز در ریزساختار وجود داشت.

از آنجایی که ترکیب شیمیایی و ریزساختار میکروسکوپی لایه روکش بر مقاومت به سایش موثر است، لذا در این تحقیق به اثر تعداد پاس‌ها و لایه واسط بر ریزساختار و مقاومت به سایش فولاد زنگ نزن مارتنزیتی روکش کاری شده بر روی فولاد ساده کربنی پرداخته شده است.

1. Bead on Plate

2. Shielded Metal Arc Welding

3. Optical Emission Spectroscopy

جدول ۲. نحوه شماره گذاری نمونه‌های مختلف.

کد نمونه	قطر الکتروود (میلی متر)	نوع الکتروود	جریان (آمپر)	تعداد پاس
۱	۲/۵	E410	۵۵-۶۰	۱
۲	۲/۵	E410	۵۵-۶۰	۲
۳	۲/۵	E410	۵۵-۶۰	۳
۴	۴	E410	۱۵۵-۱۶۰	۱
۵	۴	E410	۱۵۵-۱۶۰	۲
۶	۴	E410	۱۵۵-۱۶۰	۳
۷	۲/۵	E309	۵۵-۶۰	۱
	۲/۵	E410	۵۵-۶۰	۱
۸	۲/۵	E309	۵۵-۶۰	۱
	۲/۵	E410	۵۵-۶۰	۲
۹	۲/۵	E309	۵۵-۶۰	۱
	۲/۵	E410	۵۵-۶۰	۳
۱۰	۲/۵	E309	۵۵-۶۰	۱
	۴	E410	۱۵۵-۱۶۰	۱
۱۱	۲/۵	E309	۵۵-۶۰	۱
	۴	E410	۱۵۵-۱۶۰	۲
۱۲	۲/۵	E309	۵۵-۶۰	۱
	۴	E410	۱۵۵-۱۶۰	۳

آزمون سایش به روش پین بر روی دیسک^۹ مطابق با استاندارد ASTM G99 انجام گردید. جهت انجام آزمون از دستگاه مدل FN-060 ساخت شرکت TANAM استفاده شد. نمونه‌های روکش شده در ابعاد ۱۰×۱۰ میلی متر برای سایش مورد استفاده قرار گرفتند و به عنوان پین بر روی دیسک سخت که به عنوان جزء ساینده مورد استفاده قرار گرفت به کار برده شدند. دیسک سخت مورد استفاده از جنس فولاد AISI4340 به قطر ۱۸ سانتی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر با سختی ۶۰ راکول سی بود. آزمون با نیروی ۱۰ نیوتن و در مسافت ۱۰۰۰ متر انجام گردید و اختلاف وزن توسط یک عدد ترازوی دیجیتال مدل ANDHL 100 با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین شد.

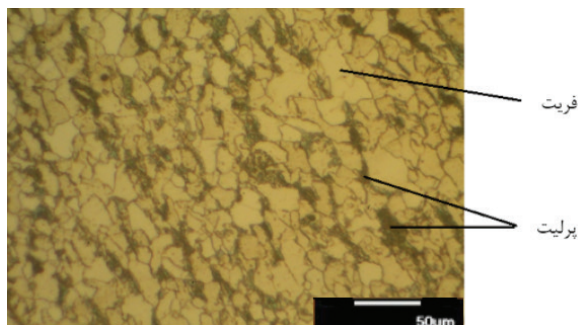
برای محاسبه نرخ سایش، از رابطه ۳ استفاده گردید [۱۰]:

رابطه ۳

$$\text{مقدار کاهش وزن} \times 100 = \frac{\text{مقدار لغزش}}{\text{مسافت لغزش}} \times \text{نرخ سایش}$$

۳. نتایج و بحث

فلز پایه از نوع فولاد ساده کربنی حاوی ۰/۲۸ درصد کربن بوده که دارای ریزساختاری متشکل از فریت و پرلیت (با ۶۵ درصد فریت و ۳۵ درصد پرلیت) بود. شکل ۱ ریزساختار فلز پایه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی نوری فلز پایه محلول اج نایتال ۵ درصد.

جدول ۳ نتایج آزمون ترکیب شیمیایی، میزان کروم معادل و نیکل معادل را ارائه می‌دهد.

همانطور که از جدول ۳ مشخص است، با افزایش تعداد پاس‌ها مقدار کروم معادل و نیکل معادل تغییر چشمگیری نکرده است. اما با افزایش قطر الکتروود، درصد نیکل معادل و کروم معادل کاهش پیدا کرده است که علت این امر را می‌توان تغییرات رقت این دو عنصر دانست [۱۱]. به عنوان مثال نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ (نمونه‌های جوشکاری شده با قطر الکتروود ۲/۵ میلی متر) تفاوت قابل توجهی در مقدار

آزمون متالوگرافی طبق استاندارد ASTM E3 انجام شد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌هایی از سطح قطعات روکش کاری شده برش خوردند. عملیات آماده‌سازی با سنباده‌های ۸۰ تا ۲۰۰۰ و پولیش نهایی با ذرات آلومینا با اندازه دانه ۱ میکرون انجام گردید. جهت حکاکی از محلول ماربل و نایتال ۵ درصد استفاده شد و سپس نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری (OM) مدل Meiji مجهز به سیستم تصویربرداری و آنالیز تصویری مورد بررسی قرار گرفتند.

جهت بررسی سطوح سایش و تعیین مکانیزم سایش از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ (SEM) مدل SEM-Seron Tech AIS2300C با ولتاژ کاری ۳۰ کیلو ولت و حالت^۶ تصویربرداری الکترون ثانویه^۷ استفاده شد.

آزمون سختی سنجی راکول C با بار ۱۰۰ کیلوگرم نیرو و مطابق با استاندارد ASTM E18 به وسیله دستگاه سختی‌سنج کوپا^۸ مدل UV1 از ناحیه سطح روکش انجام شد. برای این منظور از هر نمونه حداقل ۳ نقطه تحت آزمون سختی قرار گرفته شد که متوسط نتایج آن‌ها معیار سختی لایه روکش در نظر گرفته شد.

4. Optical Microscope

5. Scanning Electron Microscope

6. Mode

7. Secondary Electron

8. Koopa

9. Pin on Disk

جدول ۳. نتایج آزمون ترکیب شیمیایی نمونه‌های مختلف با استفاده از روش اسپکتروسکوپی نشر نوری (OES).

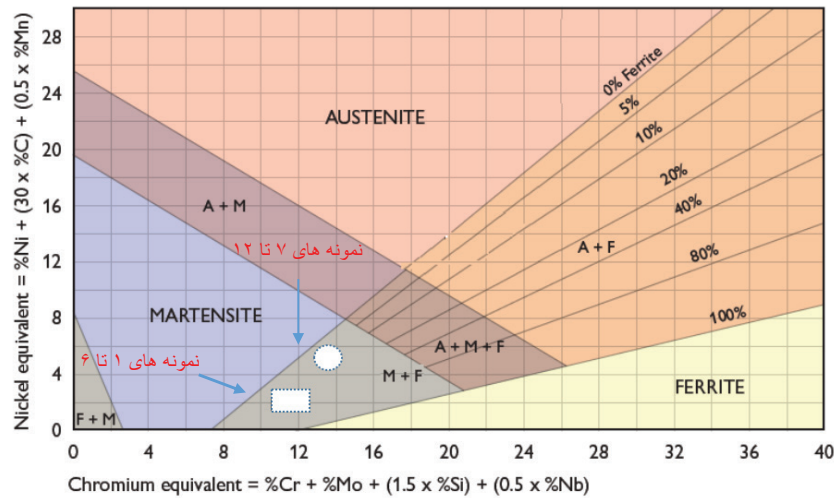
شماره نمونه	نوع و قطر الکتروود	تعداد پاس	درصد وزنی							نیکل معادل	کروم معادل
			C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Fe		
۱	E 410 2.5mm	۱	۰/۰۹۴	۰/۵۵۰	۰/۴۱۰	۱۱/۴۲۰	۰/۰۶۰	۰/۲۴۰	پایه	۳/۲۶۵	۱۲/۳۰۵
۲	E 410 2.5mm	۲	۰/۰۹۰	۰/۵۰۰	۰/۴۴۰	۱۱/۵۱۰	۰/۰۴۰	۰/۲۹۰	پایه	۳/۲۱	۱۲/۳
۳	E 410 2.5mm	۳	۰/۰۸۶	۰/۵۳۰	۰/۴۵۰	۱۱/۵۵۰	۰/۰۳۰	۰/۳۲۰	پایه	۳/۱۲۵	۱۲/۳۸۵
۴	E 410 4mm	۱	۰/۰۶۶	۰/۵۱۰	۰/۴۴۰	۱۰/۴۲۰	۰/۰۳۰	۰/۲۹۰	پایه	۲/۴۹	۱۱/۲۱۵
۵	E 410 4mm	۲	۰/۰۶۱	۰/۵۲۰	۰/۴۲۰	۱۰/۵۲۰	۰/۰۵۰	۰/۳۳۰	پایه	۲/۳۷	۱۱/۳۵
۶	E 410 4mm	۳	۰/۰۵۹	۰/۵۶۰	۰/۴۵۰	۱۰/۶۲۰	۰/۰۶۰	۰/۳۴۰	پایه	۲/۳۳۵	۱۱/۵۲۸۵
۷	E 309- 2.5mm E 410- 2.5mm	۱	۰/۰۷۲	۰/۵۳۰	۰/۴۳۰	۱۲/۰۲۰	۰/۰۴۰	۲/۲۱۰	پایه	۴/۵۸۵	۱۲/۸۵۵
		۱									
۸	E 309- 2.5mm E 410- 2.5mm	۱	۰/۰۷۰	۰/۵۶۰	۰/۴۲۰	۱۲/۶۱۰	۰/۰۵۰	۲/۳۴۰	پایه	۴/۶۵۰	۱۳/۵۰۰
		۲									
۹	E 309- 2.5mm E 410- 2.5mm	۱	۰/۰۶۸	۰/۵۳۰	۰/۵۲۰	۱۲/۴۵۰	۰/۰۶۰	۲/۷۹۰	پایه	۵/۰۹۰	۱۳/۳۱۲
		۳									
۱۰	E 309- 2.5mm E 410- 4mm	۱	۰/۰۹۴	۰/۵۱۰	۰/۴۵۰	۱۲/۴۲۰	۰/۰۵۰	۲/۰۰۰	پایه	۵/۰۴۵	۱۳/۲۳۵
		۱									
۱۱	E 309- 2.5mm E 410- 4mm	۱	۰/۰۹۰	۰/۵۰۰	۰/۴۴۰	۱۲/۵۳۰	۰/۰۶۰	۲/۱۱۰	پایه	۵/۰۳۰	۱۳/۳۴۰
		۲									
۱۲	E 309- 2.5mm E 410- 4mm	۱	۰/۰۸۸	۰/۵۸۰	۰/۴۵۰	۱۲/۶۲۰	۰/۰۸۰	۲/۲۲۰	پایه	۵/۰۸۵	۱۳/۵۷۸
		۳									

دارای ساختار مارتنزیتی-فریتی بوده و تنها تفاوت آنها در میزان درصد فازهای مارتنزیت و فریت می‌باشد. بررسی تصاویر میکروسکوپی نوری نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس‌ها و کاهش درصد رقت فاز مارتنزیت در لایه روکش افزایش می‌یابد. شکل ۴ ریزساختار نمونه‌های روکش کاری شده با الکتروود E309 (لایه واسط) و سپس الکتروود E410 (نمونه‌های شماره ۷ تا ۱۲) را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل ۴ مشخص است ساختار میکروسکوپی تمامی نمونه‌ها حاوی فاز مارتنزیت و فریت می‌باشد. بررسی ریزساختار نمونه‌های ۷ الی ۱۲ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس E410) و مقایسه آن با نمونه‌های ۱ الی ۶ (روکش کاری شده با الکتروود E410) مشخص می‌نماید که درصد حجمی فاز مارتنزیت نمونه‌ها کمی با یکدیگر متفاوت می‌باشد که علت آن ناشی از اثر تغییر ترکیب شیمیایی لایه روکش (بعلت رقت) می‌باشد [۱۲]. در نمونه‌های روکش کاری شده با الکتروود E309 (بعنوان لایه واسط) نیز مانند نمونه‌های بدون لایه واسط، ساختار مارتنزیتی-فریتی تشکیل شده است ولی بعلت تغییر موقعیت در دیاگرام شفلر (که ناشی از تغییرات ترکیب شیمیایی لایه روکش است)، به مقدار جزئی میزان فاز مارتنزیت نسبت به حالت مشابه بدون لایه واسط (نمونه‌های ۱ تا ۶) با افزایش روبرو شده است. در این نمونه‌ها نیز با افزایش تعداد پاس

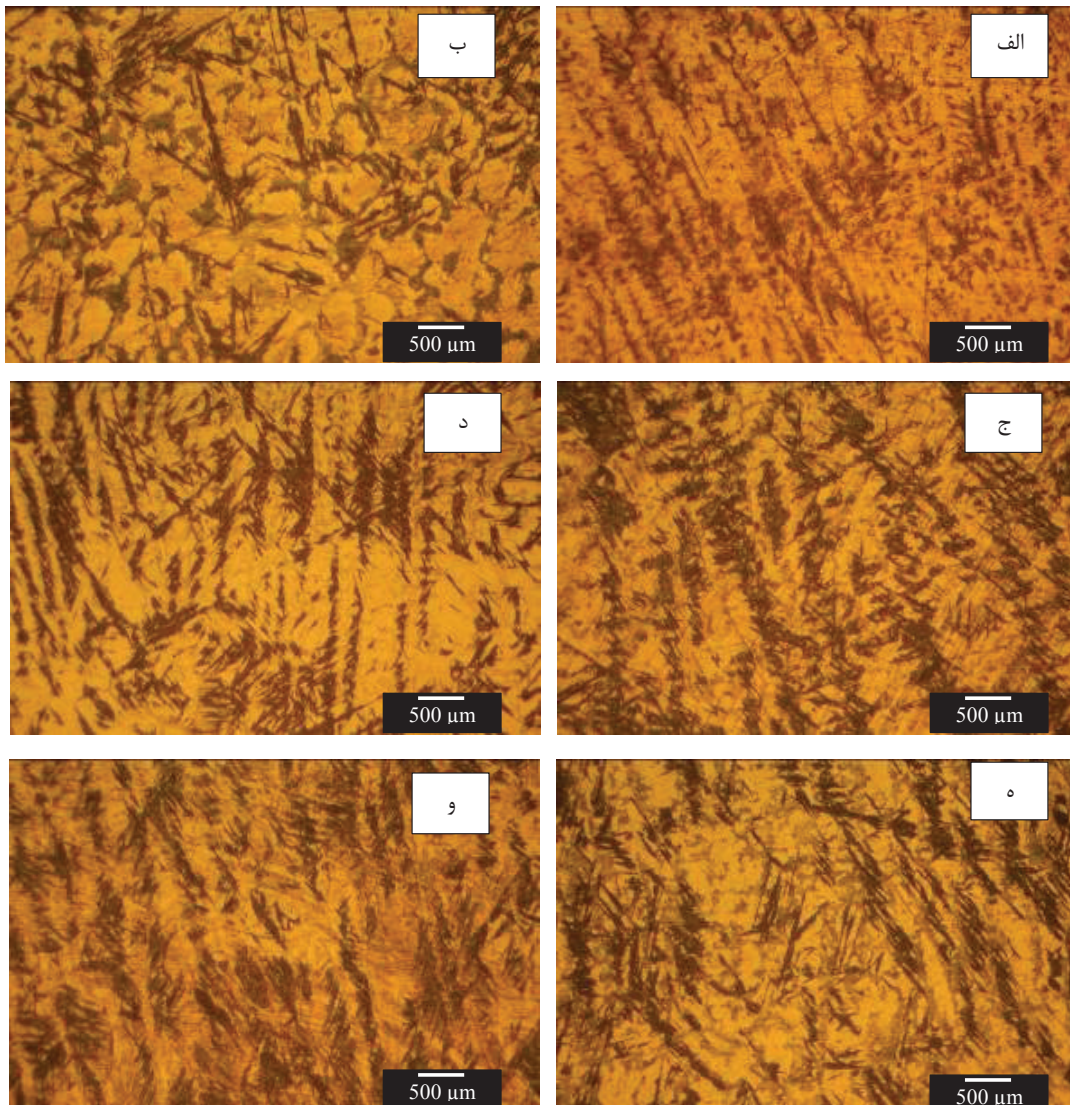
کروم معادل و نیکل معادل ندارند. اما این گروه از نمونه‌ها با نمونه‌های شماره ۴، ۵ و ۶ (نمونه‌های جوشکاری شده با قطر الکتروود ۴ میلی متر) اختلاف قابل توجهی در میزان کروم معادل و نیکل معادل دارند که علت آن تفاوت در رقت دو عنصر کروم و نیکل می‌باشد. نمونه‌های ۷ تا ۱۲ مربوط به نمونه‌های روکش کاری شده با دو الکتروود E309 و E410 است. مهمترین تفاوت این نمونه‌ها افزایش مقدار نیکل نسبت به نمونه‌های روکش شده با الکتروود E410 می‌باشد که این تغییرات، جایگاه آلیاژ را در دیاگرام شفلر جابجا می‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده، ناحیه جوش نمونه‌های روکش شده با الکتروود E410 در دیاگرام شفلر در پایین ناحیه مارتنزیت-فریت قرار می‌گیرد و این درحالی است که ناحیه جوش نمونه‌های روکش شده با الکتروود E309 و E410 در بالای منطقه مارتنزیت-فریت قرار دارد.

در شکل ۲، موقعیت نمونه‌های روکش شده با الکتروود E410 (نمونه‌های ۱ تا ۶) با مستطیل توخالی و موقعیت نمونه‌های روکش شده با دو الکتروود E309 (لایه واسط) و E410 (نمونه‌های ۷ تا ۱۲) با دایره توخالی نشان داده شده است. شکل ۳ ریزساختار نمونه‌های روکش کاری شده با الکتروود E410 و فاقد لایه واسط (نمونه‌های شماره ۱ تا ۶) را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، تمامی نمونه‌ها

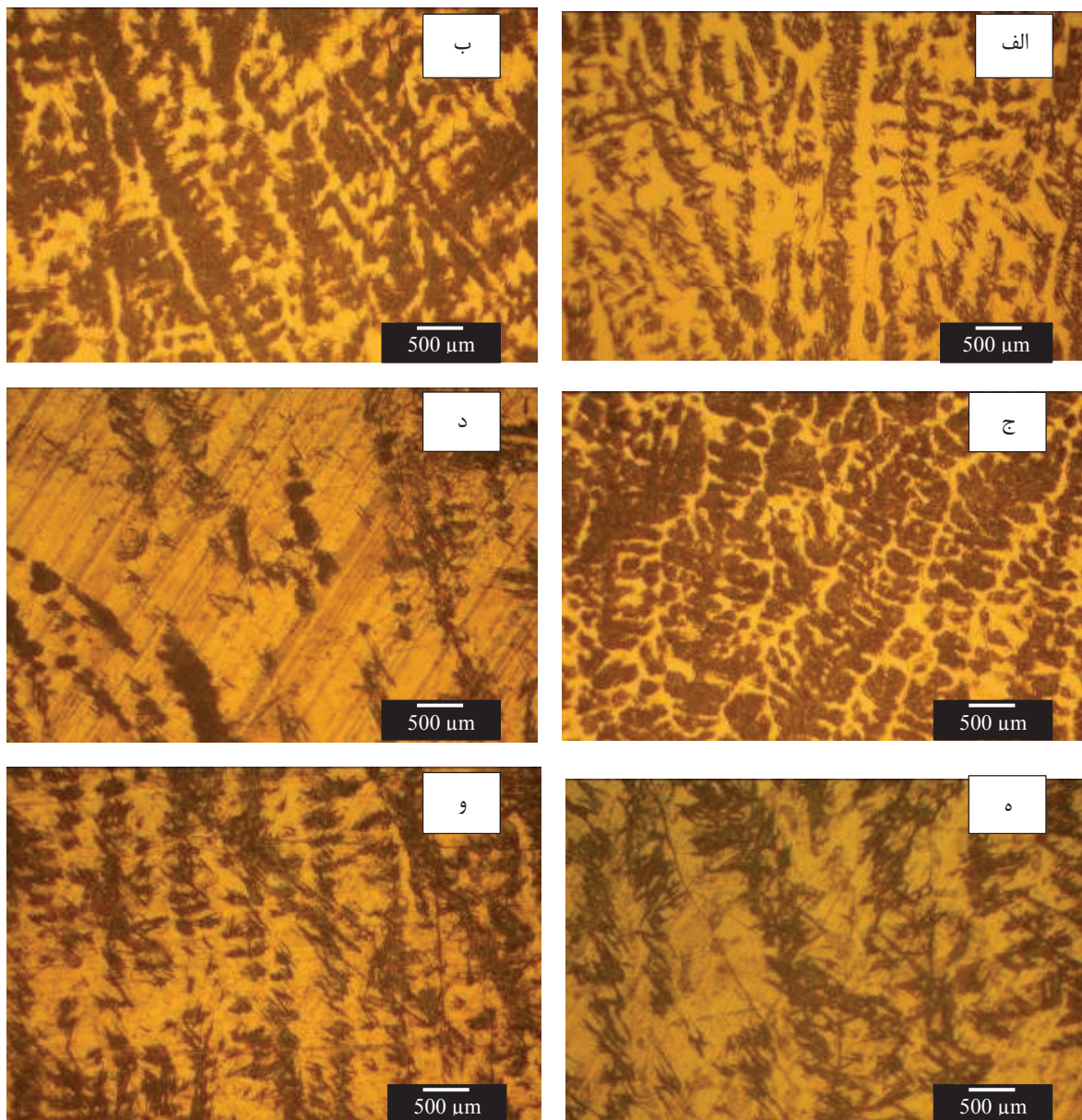
Schaeffler diagram



شکل ۲. محل قرار گیری نمونه‌ها در دیاگرام شفلر.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی نوری لایه‌های مختلف روکش، محلول اچ ماربل نمونه‌های الف- ۱-ب- ۲-ج- ۳-د- ۴-ه- ۵-و- ۶ (روکش کاری شده با الکتروود E410).



شکل ۴. تصویر میکروسکوپی نوری لایه‌های مختلف روکش، محلول اچ ماربل نمونه‌های الف-۷ ب-۸ ج-۹ د-۱۰ ه-۱۱ و-۱۲ (روکشکاری شده با الکتروود E309 و E410).

الکتروود E309 بوده اند، به طور کامل قابل مشاهده است. به طور مثال نمونه شماره ۳ با سه پاس جوشکاری، افزایش ۲۳ درصدی مقدار سختی را نسبت به نمونه شماره ۱ (جوشکاری شده با یک پاس) نشان می‌دهد. علت افزایش سختی با افزایش تعداد لایه روکش کاری، ناشی از تغییر درصد فازها (مارتنزیت و فریت) در ریز ساختار می‌باشد [۱۱-۱۳]. نمونه‌های ۷ تا ۱۲ که با لایه واسط الکتروود E309 روکش کاری شده‌اند نیز با افزایش تعداد لایه‌های روکش، با افزایش سختی روبه رو شده‌اند. بررسی نتایج آزمون سختی مشخص می‌نماید که نرخ افزایش سختی در نمونه‌های روکش کاری شده با لایه واسط E309 (نمونه‌های ۷ تا ۱۲) کمتر از نمونه‌های روکش کاری

ها، افزایش درصد فاز مارتنزیت در ریزساختار مشاهده می‌شود. تغییرات درصد فازهای مارتنزیت و فریت در نمونه‌های ۱ تا ۱۲ در جدول ۴ ارائه شده است.

از آنجایی که درصد فریت و مارتنزیت در ریزساختار لایه روکش نمونه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت بود، مقدار سختی و در نتیجه مقاومت به سایش آنها نیز متفاوت بود. جدول ۵ مقدار سختی نمونه‌های مختلف را ارائه می‌دهد. همچنین شکل ۵ نمودار سختی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد پاس ها، مقدار سختی لایه روکش افزایش یافته است. این موضوع در رابطه با نمونه‌های ۱ تا ۶ که فاقد لایه واسط

جدول ۴. تغییرات درصد فازهای مارتنزیت و فریت نمونه‌های مختلف.

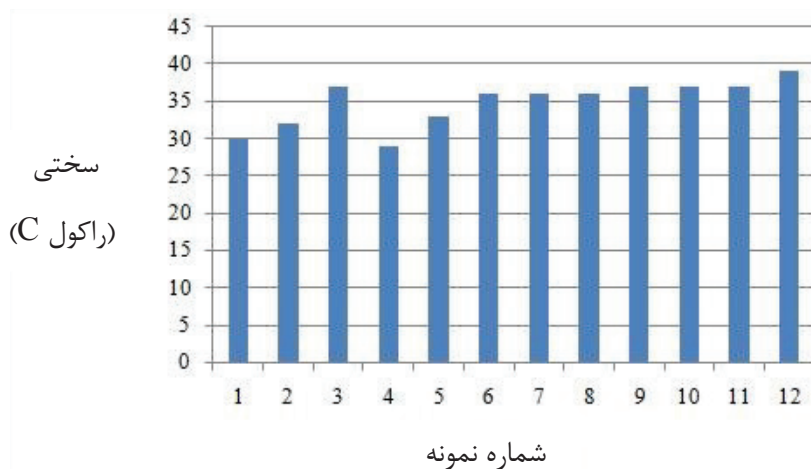
کد نمونه	شرایط جوشکاری			درصد فاز فریت	درصد فاز مارتنزیت
	قطر الکتروود (میلی متر)	نوع الکتروود	تعداد پاس		
۱	۲/۵	E410	۱	۴۰	۶۰
۲	۲/۵	E410	۲	۳۳	۶۷
۳	۲/۵	E410	۳	۲۸	۷۲
۴	۴	E410	۱	۳۸	۶۲
۵	۴	E410	۲	۳۰	۷۰
۶	۴	E410	۳	۲۴	۷۶
۷	۲/۵	E309	۱	۴۰	۶۰
	۲/۵	E410	۱		
۸	۲/۵	E309	۱	۳۱	۶۹
	۲/۵	E410	۲		
۹	۲/۵	E309	۱	۲۰	۸۰
	۲/۵	E410	۳		
۱۰	۲/۵	E309	۱	۳۸	۶۲
	۴	E410	۱		
۱۱	۲/۵	E309	۱	۳۰	۷۰
	۴	E410	۲		
۱۲	۲/۵	E309	۱	۱۹	۸۱
	۴	E410	۳		

جدول ۵. سختی نمونه‌های مختلف.

کد نمونه	شرایط جوشکاری			سختی سطح (راکول c)
	قطر الکتروود (میلی متر)	نوع الکتروود	تعداد پاس	
فلز پایه	-	-	-	۱۵
۱	۲/۵	E410	۱	۳۰
۲	۲/۵	E410	۲	۳۲
۳	۲/۵	E410	۳	۳۷
۴	۴	E410	۱	۲۹
۵	۴	E410	۲	۳۳
۶	۴	E410	۳	۳۶
۷	۲/۵	E309	۱	۳۶
	۲/۵	E410	۱	
۸	۲/۵	E309	۱	۳۶
	۲/۵	E410	۲	
۹	۲/۵	E309	۱	۳۷
	۲/۵	E410	۳	
۱۰	۲/۵	E309	۱	۳۷
	۴	E410	۱	
۱۱	۲/۵	E309	۱	۳۷
	۴	E410	۲	
۱۲	۲/۵	E309	۱	۳۹
	۴	E410	۳	

جدول ۶. نتایج کاهش وزن و نرخ سایش نمونه‌های مختلف در آزمون سایش.

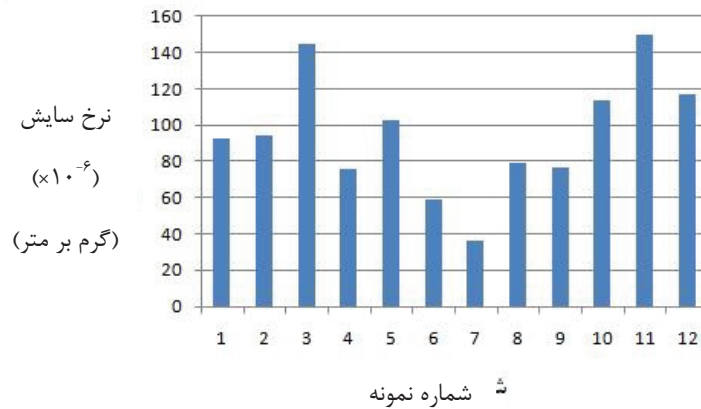
نمونه	شرایط جوشکاری			وزن (گرم)		کاهش وزن (گرم)	نرخ سایش ($\times 10^{-6}$) (گرم بر متر)
	تعداد پاس	نوع الکتروود	قطر الکتروود (میلی متر)	قبل از سایش	بعد از سایش		
۱	۱	E410	۲/۵	۷/۸۶۷	۷/۷۷۴	-۰/۰۹۳	۹۳
۲	۲	E410	۲/۵	۹/۲۱	۹/۱۱۶	-۰/۰۹۴	۹۴
۳	۳	E410	۲/۵	۹/۶۴	۹/۴۹۵	-۰/۱۴۵	۱۴۵
۴	۱	E410	۴	۷/۸۵۹	۷/۷۸۳	-۰/۰۷۶	۷۶
۵	۲	E410	۴	۷/۹۲	۷/۸۱۷	-۰/۱۰۳	۱۰۳
۶	۳	E410	۴	۹/۲۲۲	۹/۱۶۳	-۰/۰۵۹	۵۹
۷	۱	E309	۲/۵	۹/۴۱۳	۹/۳۷۷	-۰/۰۳۶	۳۶
	۱	E410	۲/۵				
۸	۱	E309	۲/۵	۸/۷۵۴	۸/۶۷۵	-۰/۰۷۹	۷۹
	۲	E410	۲/۵				
۹	۱	E309	۲/۵	۸/۶۶۱	۸/۵۸۴	-۰/۰۷۷	۷۷
	۳	E410	۲/۵				
۱۰	۱	E309	۲/۵	۸/۹۲۲	۸/۸۰۸	-۰/۱۱۴	۱۱۴
	۱	E410	۴				
۱۱	۱	E309	۲/۵	۹/۲۸۸	۹/۱۳۸	-۰/۱۵۰	۱۵۰
	۲	E410	۴				
۱۲	۱	E309	۲/۵	۹/۹۷۸	۸/۸۶۱	-۰/۱۱۷	۱۱۷
	۳	E410	۴				



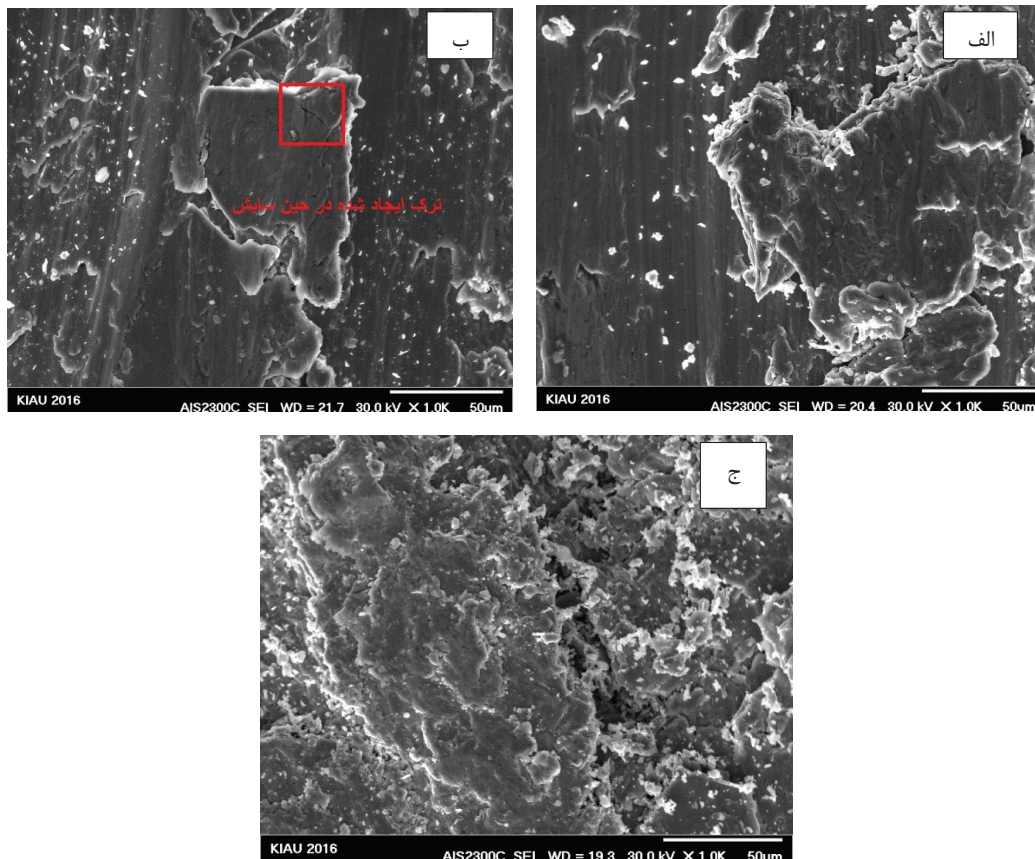
شکل ۵. مقایسه سختی نمونه‌های مختلف.

کاری شده را در اثر آزمون سایش و شکل ۶ مقدار کاهش وزن نمونه‌های مختلف را در اثر سایش در مسافت ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهند. به طور معمول در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی با افزایش میزان سختی، مقدار سایش کاهش یافته و مقاومت به سایش افزایش می‌یابد [۵]. همانطور که در جدول ۶ مشخص است، در سه نمونه اول، با افزایش مقدار سختی، نرخ سایش

شده بدون لایه واسط (نمونه‌های ۱ تا ۶) بوده است. به عنوان مثال سختی نمونه ۹ (جوشکاری شده با یک پاس الکتروود E309 و سه پاس الکتروود E410)، با افزایش ۳ درصدی نسبت به سختی نمونه شماره ۷ (جوشکاری شده با یک پاس الکتروود E309 و یک پاس الکتروود E410) مواجه بوده است. جدول ۶ نتایج کاهش وزن نمونه‌های مختلف روکش



شکل ۶. نرخ سایش نمونه‌های مختلف در اثر سایش در مسافت ۱۰۰۰ متر.



شکل ۷. تصویر SEM سطح سایش برای الف- نمونه ۱، ب- نمونه ۲ و ج- نمونه ۳.

است. کاهش نرخ سایش در نمونه ۴ مانند نمونه ۱ می‌تواند ناشی از بیشتر بودن تغییر شکل پلاستیک باشد. از طرفی کاهش نرخ سایش در نمونه ۶ می‌تواند ناشی از افزایش سختی و افزایش مقدار مارتنزیت باشد.

بررسی میزان سختی نمونه‌های ۷ تا ۱۲ در جدول ۵ نشان می‌دهد میزان سختی در این نمونه‌ها تفاوت چشمگیری نداشته است. به عبارت دیگر نمونه‌هایی که با الکتروود لایه واسط E۳۰۹ روکش کاری و پس از آن با الکتروود E۴۱۰ روکش

بر خلاف انتظار افزایش یافته است. دلیل این امر کم بودن میزان مارتنزیت در نمونه شماره ۱ بوده است. به عبارت دیگر کم بودن میزان مارتنزیت در نمونه شماره ۱ باعث شده تا این نمونه با وجود سختی کمتر، تغییر شکل پلاستیک بیشتری داشته باشد و این تغییر شکل پلاستیک بیشتر، سبب کندگی کمتر ذرات از سطح نمونه شده است. در نمونه‌های ۴ تا ۶، مقدار سختی با افزایش تعداد پاس افزایش یافته است و نرخ سایش در این سری نمونه‌ها، از روند خاصی پیروی نکرده

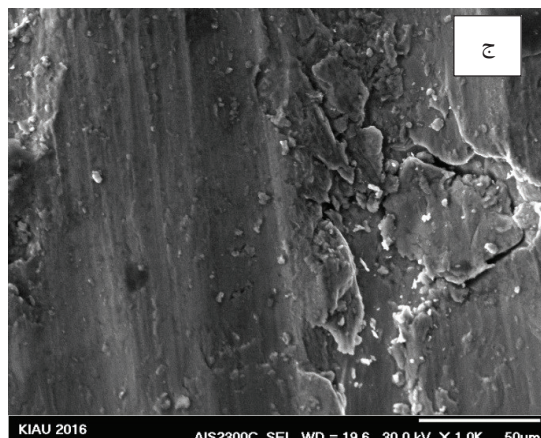
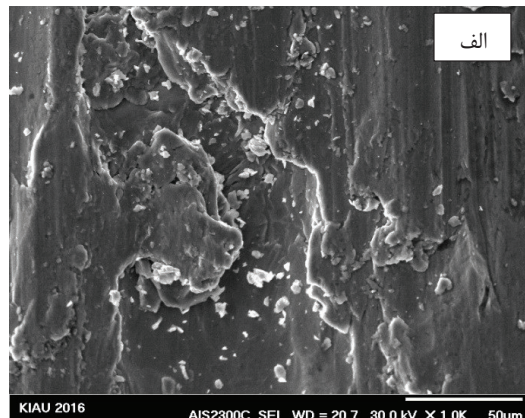
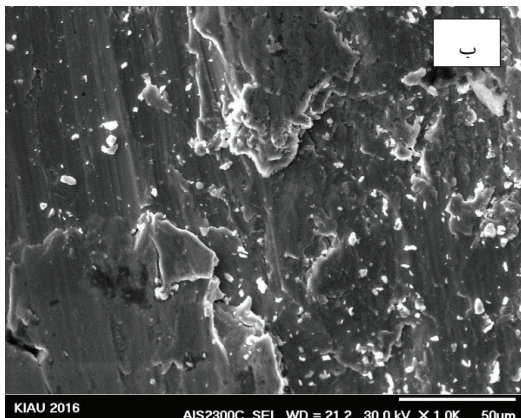
لایه سطحی و در نهایت جدایش فلز در اثر تنش‌های برشی در حین سایش شود [۱۴]. آثار کنده شدن فلز که در شکل ۷ الف مشاهده می‌شود در اثر تشکیل لایه‌های اکسیدی و سپس جدایش این لایه‌ها از سطح بوده است. تشکیل لایه‌های اکسیدی در سطح سایش به صورت ذرات ریز سفید رنگ تأیید می‌شود [۱۵]. از آنجا که جدا شدن ذرات اکسیدی از سطح و قرار گرفتن در فصل مشترک بین پین و دیسک باعث ایجاد سایش خراشان در قطعه می‌شود، لذا مکانیزم سایش نمونه‌های ۱ الی ۳ از نوع سایش خراشان به همراه اکسیداسیون می‌باشد.

شکل ۸ تصویر SEM سطح سایش نمونه‌های روکش کاری شده با الکتروود E۴۱۰ با قطر ۴ میلی متر (نمونه‌های ۴ تا ۶) را نشان می‌دهد. در این سری از نمونه‌ها، حجم ذرات سفید اکسیدی کمتر از نمونه‌های ۱ تا ۳ می‌باشد. آثار کنده شدن فلز که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، ناشی از تشکیل لایه‌های اکسیدی و سپس جدایش این لایه‌ها از سطح می‌باشد. لذا با بررسی تصاویر سطح سایش نمونه‌های ۴ الی ۶ مشخص می‌گردد که مکانیزم سایش از نوع خراشان به همراه اکسیداسیون می‌باشد.

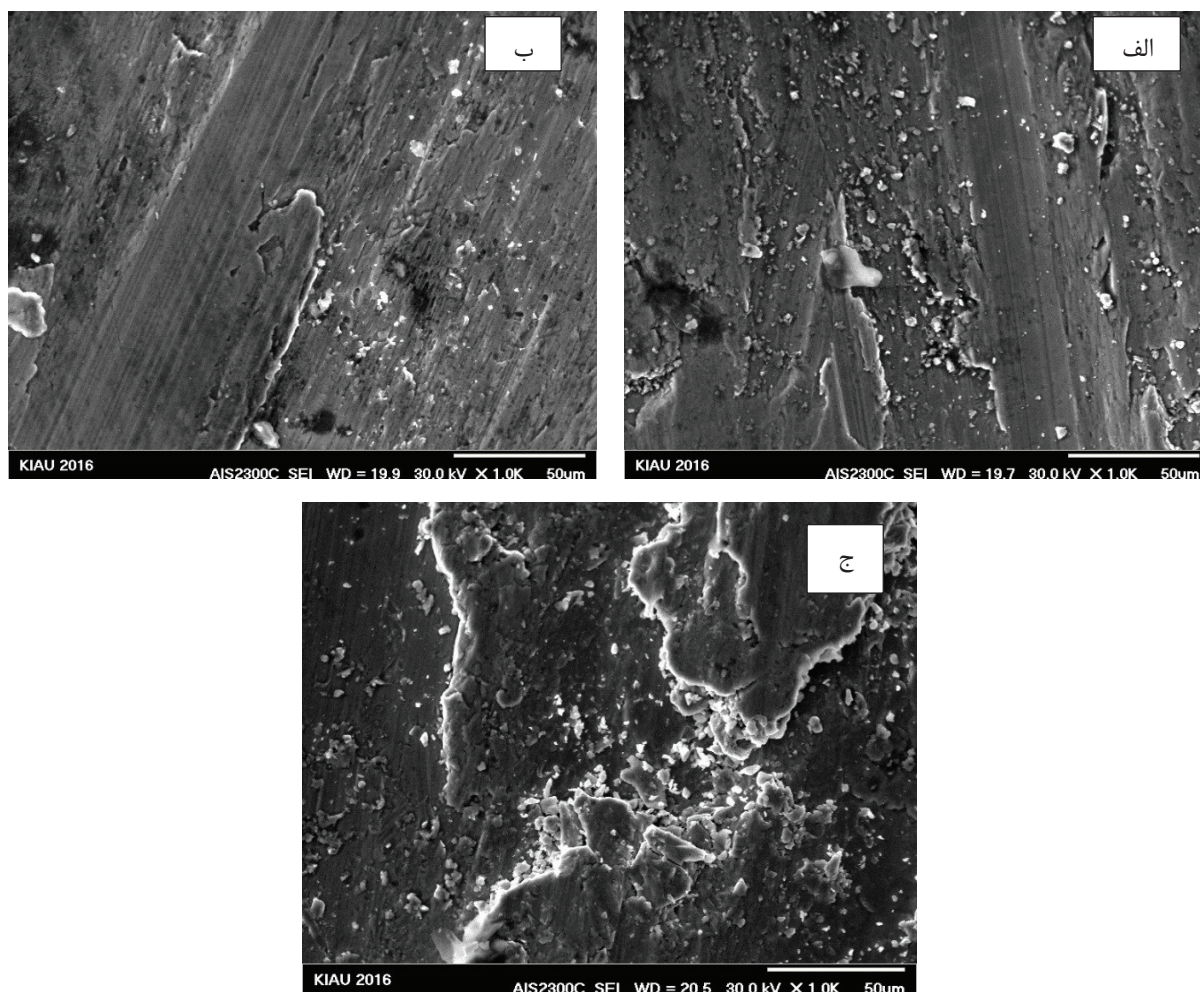
شکل ۹ تصویر SEM سطح سایش نمونه‌های روکش

کاری شده اند، به دلیل حضور لایه واسط در آنها که سبب کاهش میزان رقت شده است، اختلاف سختی کمی داشتند. بررسی نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که در بین نمونه‌های ۷ تا ۹، نمونه ۷ کمترین نرخ سایش را داشت. همچنین در میان نمونه‌های ۱۰ تا ۱۲، کمترین نرخ سایش مربوط به نمونه ۱۰ بود. علت کم بودن نرخ سایش در این نمونه‌ها، کم بودن فاز مارتنزیت و در نتیجه افزایش تغییر شکل پلاستیک بوده که سبب کمتر شدن نرخ سایش شده است.

شکل ۷ تصویر SEM سطح سایش مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود E۴۱۰ (قطر الکتروود ۲/۵ میلی متر و تعداد پاس‌ها از ۱ تا ۳ متغیر) را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد پاس‌ها و در نتیجه آن افزایش سختی، کندگی ذرات بیشتر شده است. علت این امر وجود مارتنزیت کمتر در نمونه ۱ بوده که سبب افزایش تغییر شکل پلاستیک شده و کاهش نرخ سایش را در پی داشته است. از سوی دیگر بررسی شکل ۷ الف (نمونه شماره ۱) که با یک پاس روکش کاری شده است مشخص می‌نماید که در نمونه‌ای که با یک پاس جوشکاری شده (نمونه ۱)، در اثر تنش وارد شده، در سطح سایش ترک‌های ریز ایجاد شده است. اتصال ترک‌ها به یکدیگر می‌تواند باعث سست شدن



شکل ۸. تصویر SEM سطح سایش برای الف- نمونه ۴ ب- نمونه ۵ و ج- نمونه ۶.



شکل ۹. تصویر SEM سطح سایش برای الف- نمونه ۷ ب- نمونه ۸ و ج- نمونه ۹.

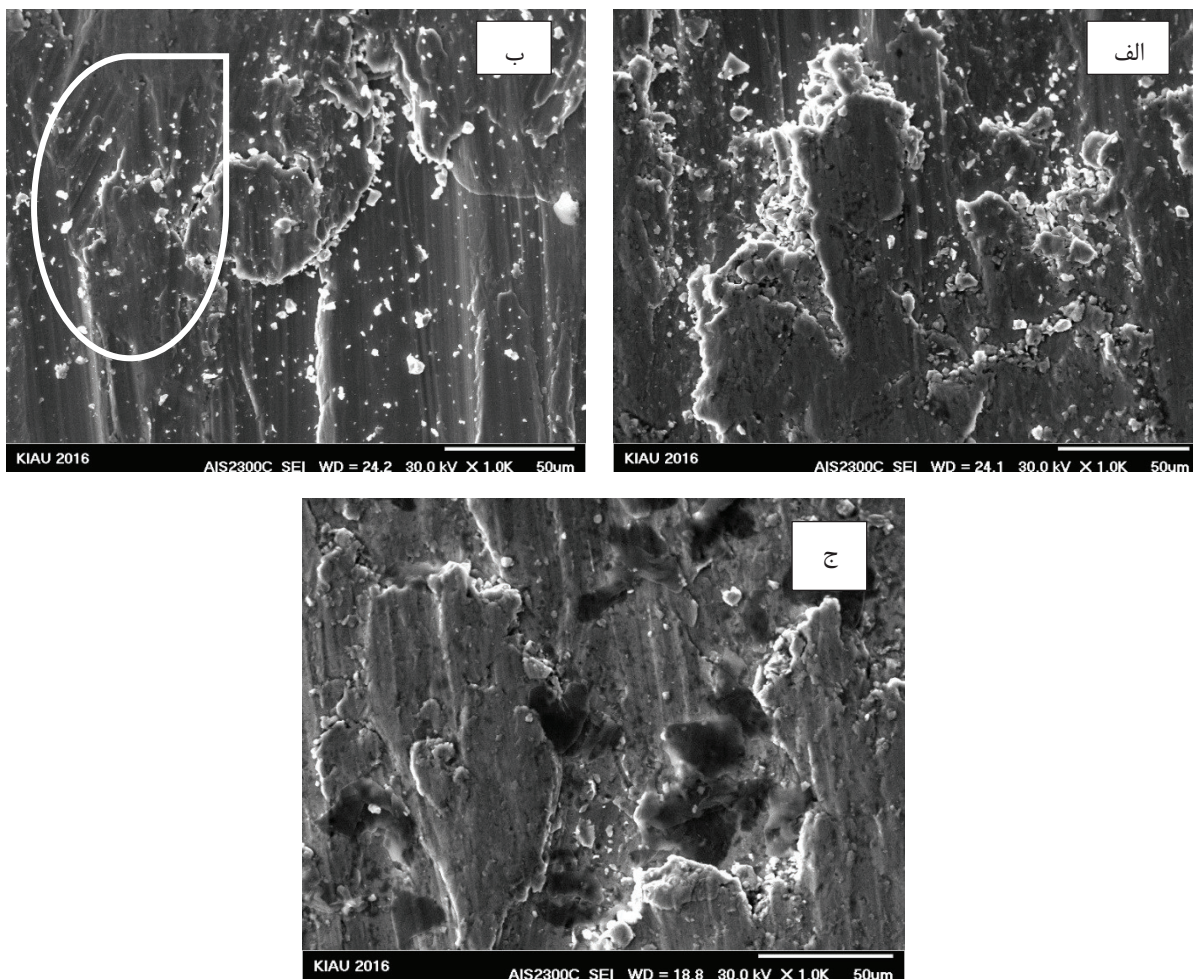
تا ۳) را نشان می‌دهد. در این حالت بر خلاف حالت قبلی کندگی‌های عمیق در سطح نمونه دیده می‌شود و خطوط سایش نیز بسیار عمیق است. افزایش سختی به قدری در این نمونه‌ها (نمونه‌های ۱۰ تا ۱۲) زیاد بوده است (جدول ۵) که نمونه از خود رفتار ترد نشان می‌دهد و در اثر کندگی، ذرات کنده شده به صورت ذرات ساییده عمل کرده و مقدار سایش را به شدت می‌افزاید (جدول ۶). بررسی سطح سایش نمونه‌های ۱۰ الی ۱۲ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس الکتروود E410) مشخص می‌نماید که مکانیزیم غالب سایش در این سری از نمونه‌ها از نوع خراشان به همراه اکسیداسیون و کندگی می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر تعداد پاس و لایه واسط جوشکاری SMAW بر ریزساختار و مقاومت به سایش فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 بر روی فولاد ساده کربنی بررسی و نتایج ذیل حاصل گردید:

کاری شده با الکتروود E309 (قطر ۲/۵ میلی متر) و الکتروود E410 (۲/۵ میلی متر و تعداد پاس‌های متغیر ۱ تا ۳) را نشان می‌دهد. بررسی شکل ۹ و مقایسه آن با سطح سایش نمونه‌های روکش کاری شده با الکتروود E410 مشخص می‌نماید که مشابه با نمونه‌های روکش شده قبلی (تصاویر شکل ۷ و ۸) در این سری از نمونه‌ها در سطح سایش، تشکیل لایه‌های اکسیدی و سپس جدایش این لایه‌ها از سطح قابل مشاهده است. بررسی سطح سایش نمونه‌های ۷ الی ۹ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس الکتروود E410) مشخص می‌نماید که مکانیزیم غالب سایش در این سری از نمونه‌ها از نوع خراشان به همراه اکسیداسیون می‌باشد. همچنین بررسی شکل ۹ الف مشخص می‌نماید که در سطح سایش نمونه شماره ۷، تغییر شکل پلاستیک بیشتر و کندگی کمتر دیده می‌شود که ناشی از کم بودن میزان مارتنزیت در این نمونه بوده است.

شکل ۱۰ تصویر SEM سطح سایش مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده با الکتروود E309 (قطر ۲/۵ میلی متر) و الکتروود E410 (قطر ۴ میلی متر و تعداد پاس‌های متغیر ۱



شکل ۱۰. تصویر SEM سطح سایش برای الف- نمونه ۱۰ ب-نمونه ۱۱ ج-نمونه ۱۲.

۱- با افزایش تعداد پاس‌ها مقدار کروم معادل و نیکل معادل تغییر چشمگیری نکرده است. اما با افزایش قطر الکتروود، درصد نیکل معادل و کروم معادل کاهش پیدا کرده است که علت این امر را می‌توان کاهش رقت این دو عنصر دانست.

۲- لایه روکش ایجاد شده در کلیه نمونه‌ها همگی دارای ساختار مارتنزیتی-فریتی بودند. با این تفاوت که نمونه‌های روکش کاری شده با الکتروود E309 به عنوان لایه واسط در قسمت بالاتری از نمودار شفلر قرار گرفتند.

۳- در کلیه نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه‌های روکش و کاهش رقت، سختی افزایش یافت. حداکثر سختی مربوط به نمونه ۱۲ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس سه پاس الکتروود E410 با قطر ۴ میلی متر) با مقدار ۳۹ راکول سی و حداقل سختی مربوط به نمونه ۴ (روکش کاری شده با یک پاس الکتروود E410 با قطر ۴ میلی متر) با مقدار ۲۹ راکول سی بود.

۴- کمترین نرخ سایش مربوط به نمونه شماره ۷ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس یک پاس الکتروود E410 با قطر ۲/۵ میلی متر) و بیشترین نرخ سایش مربوط به نمونه ۱۱ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس دو پاس الکتروود E410 با قطر ۴ میلی متر) بود.

۵- مکانیزم سایش نمونه‌های روکش کاری شده بدون لایه واسط و با الکتروود E410، خراشان به همراه اکسیداسیون بوده است.

۶- مکانیزم سایش نمونه‌های روکش کاری شده با لایه واسط الکتروود E309 و سپس الکتروود E410، خراشان به همراه اکسیداسیون و کندگی بوده است.

۷- نتایج حاصل از این پژوهش تایید می‌نماید که نمی‌توان مقاومت به سایش را تنها معیاری از سختی ماده در نظر گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر ریزساختار، چه تغییرات چشمگیری در مکانیزم‌های سایشی حاکم و مقاومت ماده در برابر سایش رخ می‌دهد.

۱- با افزایش تعداد پاس‌ها مقدار کروم معادل و نیکل معادل تغییر چشمگیری نکرده است. اما با افزایش قطر الکتروود، درصد نیکل معادل و کروم معادل کاهش پیدا کرده است که علت این امر را می‌توان کاهش رقت این دو عنصر دانست.

۲- لایه روکش ایجاد شده در کلیه نمونه‌ها همگی دارای ساختار مارتنزیتی-فریتی بودند. با این تفاوت که نمونه‌های روکش کاری شده با الکتروود E309 به عنوان لایه واسط در قسمت بالاتری از نمودار شفلر قرار گرفتند.

۳- در کلیه نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه‌های روکش و کاهش رقت، سختی افزایش یافت. حداکثر سختی مربوط به نمونه ۱۲ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس سه پاس الکتروود E410 با قطر ۴ میلی متر) با مقدار ۳۹ راکول سی و حداقل سختی مربوط به نمونه ۴ (روکش کاری شده با یک پاس الکتروود E410 با قطر ۴ میلی متر) با مقدار ۲۹ راکول سی بود.

۴- کمترین نرخ سایش مربوط به نمونه شماره ۷ (روکش کاری شده با الکتروود E309 و سپس یک پاس الکتروود

References

- [۱] ثابت، حامد، ۱۳۹۲، «بازسازی قطعات تحت سایش به روش جوشکاری»، نشر فنی امیر.
- [2] Bach, F. W., Möhwald, K., Laarmann, A., & Wenz, T., 2006, "Modern Surface Technology" John Wiley & Sons, pp. 11-23
- [3] Chotěborský, R., Hrabě, P., Müller, M., Savková, J., & Jirka, M., 2008, "Abrasive Wear of High Chromium Fe-Cr-C Hardfacing Alloys", Research in Agricultural Engineering, pp. 192-198.
- [4] Grainger S., & Blunt J., 1998, "Engineering Coatings: Design and Application" Elsevier, pp. 42-55.
- [5] Avishkar Rathod, Sanjay Sapate & Rajesh Khatirkar (2016) Effect of Composition and Microstructure on Slurry Abrasion Response of Hardfaced Martensitic Stainless Steel, Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces, pp:45-52.
- [۶] دشت بزرگی محمدعلی، هاشمی حمیدرضا، سلیمانی یزدی محمدرضا، امینیان مهرداد، ۱۳۸۹، تاثیر افزایش کربن بر انجماد و ریزساختار فولاد زنگ نزن مارتنزیتی در جوشکاری روکشی غلتک‌های خطوط نورد فولاد، مجله ریخته گری، سال بیست و نهم، شماره ۹۶.
- [۷] نوری پور محمدحسین، فرزادی علی، کلانتریان رضا، ۱۳۹۵، بررسی ریزساختار و سختی روکش سخت فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۴ به روش جوشکاری زیرپودری، دهمین همایش مشترک و پنجمین کنفرانس بین المللی انجمن مهندسی مواد و کتالورژی و انجمن علمی ریخته گران ایران.
- [8] Gregory E.N. and Bartle M., 1980, "Materials for Harfacing" The Welding Institute, Weld Surfacing and Harfacing, Cambridge, Abington, pp11-21.
- [9] Kang Amardeep Singh, Cheema Gurmeet Singh, Singla Shivali, 2014, Wear Behavior of Hardfacings on Rotary Tiller Blades, Bhai Gurdas Institute of Engineering & Technology, Sangrur148, Punjab, India.
- [10] Committee A. I. H., 1992, "ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology" ASM International, Institute of Materials, pp. 1429-1439.
- [11] Gregory E.N. and Bartle M., 1980, "Materials for Harfacing" The Welding Institute, Weld Surfacing and Harfacing, Cambridge, Abington, pp11-21.
- [12] Davis J.R., Davis and Associates, 1997, "Hardfacing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining", 10th ed., Vol.6, Metals Handbook, American Society for Metals, pp789-829.
- [۱۳] ثابت حامد، امیرآبادی زاده رضا، صادقی محمد، میرزا محمد نوید، ۱۳۸۸، بررسی ریزساختار و مقاومت به سایش لایه رویه سخت پایه Fe-C-Nb بر روی فولاد ساده کربنی، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال سوم، شماره سوم.
- [14] Ocken H., 2005, "The Galling Wear Resistance of New Iron - Base Hardfacing Alloys ", Surface and Coating Technology, Vol.76-77, pp456-461.