



تأثیر حضور لایه میانی فولاد زنگ نزن آستنیتی 309 بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد ساده کربنی St52 روکش کاری شده با الکتروود پر کروم-کربن به روش جوش کاری ذوبی

محسن برمکی¹، کامران امینی^{1,2*}

1- کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

* اصفهان، صندوق پستی 8514143131، k.amini@pmt.iaun.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 5 اسفند 1396

پذیرش: 31 اردیبهشت 1397

ارائه در سایت: شهریور 1397

کلیدواژه‌ها:

الکتروود پر کروم-کربن

فولاد ساده کربنی St52

لایه میانی فولاد زنگ نزن 309

سخت کاری سطحی

سایش

چکیده

در این پژوهش به بررسی ساختار میکروسکوپی، فاز شناسی، سختی و رفتار سایشی فولاد ساده کربنی St52 روکش کاری شده با الکتروود پر کروم-کربن با و بدون استفاده از لایه میانی فولاد زنگ نزن آستنیتی 309 پرداخته شده است. برای روکش کاری از روش جوش کاری قوسی فلز روپوش دار (SMAW) و روش جوش کاری قوسی تنگستن گاز (GTAW) استفاده شده است. برای بررسی ریز ساختار از میکروسکوپ نوری، الکترونی و آنالیز EDS و جهت بررسی سختی و مقاومت سایشی از آزمون ریزسختی سنجی ویکرز و سایش به روش رفت و برگشتی استفاده گردید. یافته‌های پژوهش نشان داد که ساختار در سطح نمونه‌های روکش کاری شده متشکل از کاربیدهای M_7C_3 و زمینه یوتکتیک $\gamma+M_7C_3$ است. همچنین در نمونه روکش کاری شده با لایه میانی 309 در مقایسه با نمونه‌ی یک پاس کسر حجمی کاربیدها افزایش یافته است. دلیل این موضوع در ارتباط با کاهش رقت آهن و افزایش رقت کروم در نمونه با لایه میانی 309 و به طبع آن افزایش مقاومت به سایش در مقایسه با نمونه‌ی یک پاس می‌گردد، به نحوی که سختی سطح و کاهش وزن در آزمون سایش از 780HV و 3.7mg در نمونه بدون لایه میانی (یک پاس) به 945HV و 2mg در نمونه با لایه میانی 309 می‌رسد. با بررسی سطوح سایش یافته نمونه‌ها، مشخص گردید که مکانیزم سایش از نوع چسبان می‌باشد. هم چنین با افزایش سختی در نمونه با لایه میانی از میزان سایش چسبان کاسته شده است.

The effect of the presence of the middle layer of 309-stainless steel on microstructure and mechanical properties of St-52 carbon steel clad by high chromium-carbon electrode produced by fusion welding

Mohsen Barmaki¹, Kamran Amini^{1,2*}

1- Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

* P.O.B. 8514143131 Isfahan, Iran, k.amini@pmt.iaun.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 24 February 2018
Accepted 21 May 2018
Available Online September 2018

Keywords

High Chromium-Carbon Electrode
St-52 Carbon Steel
Middle Layer of 309-Stainless Steel
Hardfacing
Wear

Abstract

In this research, the microstructure, phase-analysis, hardness and wear behavior of clad carbon steel of St-52 by a high chromium-carbon electrode with or without using 309-stainless steel as a middle layer are investigated. Cladding process is performed by shield-metal arc welding (SMAW) and gas-tungsten arc welding (GTAW) methods. In order to evaluate of microstructure, the optical and scanning electron microscopies along with EDS analyses are used. In addition, hardness measurement and wear behavior are conducted by micro-Vickers hardness and dry-sliding wear test, respectively. The research findings show that the microstructure of clad samples are consisted of M_7C_3 carbides into the eutectoid matrix of $\gamma+M_7C_3$. Additionally, the volume fraction of carbides are increased at the clad sample with middle layer of 309-stainless steel as opposed to other samples. Increasing of carbides percentage at the clad samples with middle layer are caused to enhanced of hardness and wear resistance with comparing to other samples. In this case, the surface hardness and weight loss of wear test are achieved from 780HV and 3.7mg to 945HV and 2mg at the clad sample without and with middle layer of 309-stainless steel, respectively. Moreover, examining the wear surfaces indicated the occurrence of an adhesive wear mechanism in the specimens. Also, by increasing the hardness in middle layer sample the amount of adhesive wear decreased.

1- مقدمه

مصرفی (سیم جوش، الکتروود، پودر و ...) بر روی فلز پایه به فرایند سخت کاری سطحی به معنای جوش کاری یک ماده منظور افزایش مقاومت در برابر سایش و خوردگی است که هدف

Please cite this article using:

M. Barmaki, K. Amini, The effect of the presence of the middle layer of 309-stainless steel on microstructure and mechanical properties of St-52 carbon steel clad by high chromium-carbon electrode produced by fusion welding, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 34-42, 2018 (in Persian)

آهن حتی از نمونه با سه پاس استلایت کمتر و سختی بیشترین مقدار است [8]. در تحقیقی که توسط میرشکاری و همکارانش بر روی تأثیر لایه‌های میانی بر ریزساختار و مقاومت سایشی روکش استلایت 6 رسوب داده شده بر روی فولاد زنگ نزن 420 توسط فرایند GTAW انجام گرفت، مشخص شد که اعمال لایه‌های میانی اثرات قابل توجهی بر رقت دارد که باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی پوشش‌ها می‌شود [9].

Lin و همکارانش روکش کاری آلیاژ پر کربن پایه کروم توسط فرایند GTAW را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که بهبود مقاومت در برابر سایش ناشی از کسر حجمی بالای کاربیدهای مقاوم در برابر سایش $(Cr,Fe)_7C_3$ می‌باشد [10].

Chang و همکارانش به بررسی تأثیر روکش کاری هایپر یونکتیک Fe-Cr-C با مقادیر مختلف کربن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش مقدار کربن روکش، مکان‌های جوانه زنی کاربیدهای اولیه $(Cr,Fe)_7C_3$ افزایش یافته و کسر سطحی کاربیدها افزایش می‌یابد و ساختار کاربیدهای اولیه $(Cr,Fe)_7C_3$ نیز از حالت تیغه‌ای به حالت میله‌ای تغییر می‌کند [11].

Tang و همکارانش در تحقیقی نشان دادند که با افزایش مقدار کربن، کسر حجمی کاربیدهای اولیه M_7C_3 افزایش و مقاومت سایشی بهبود می‌یابد [12].

Kang و همکارانش به بهبود مقاومت سایشی بیل ماشین شخم زنی توسط سخت کاری سطحی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که سختی از زیرلایه به سمت سطح روکش با افزایش مقدار کروم، افزایش می‌یابد [13].

در تحقیق حاضر، تأثیر حضور لایه میانی فولاد زنگ نزن آستنیتی 309 بر ریزساختار، سختی و رفتار سایشی فولاد St52 که با استفاده از روش‌های SMAW و GTAW با الکتروود پر کروم-کربن جوش کاری شده است، بررسی می‌گردد. بدین منظور از آزمون‌های سختی سنجی، سایش رفت و برگشتی و بررسی ریزساختار توسط OM و SEM استفاده می‌گردد.

2- مواد و روش انجام تحقیق

در این پژوهش از فولاد ساده کربنی St52 با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ mm به تعداد 2 عدد به عنوان فلز پایه استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1، ارائه شده است. برای انجام روکش کاری از الکتروود پر کروم-کربن E10-UM-60R مطابق با استاندارد DIN 8555-1 [14] با قطر $3/25$ mm که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1، ارائه شده است، استفاده گردید. با توجه به اینکه در این پژوهش تأثیر لایه میانی بررسی شده است، از

از این فرایند افزایش طول عمر ماده مورد نظر می‌باشد. در این فرایند یک لایه نسبتاً ضخیم از فلز با ترکیبات فلزی سخت مانند کاربیدها توسط روش‌های مختلفی نظیر پاشش پلاسما، روکش کاری لیزری، روش‌های جوش کاری و پاشش حرارتی روی سطح قطعات مورد نظر انباشته می‌شود [1]. سخت کاری سطحی توسط جوشکاری در ابزارآلات کشاورزی، حفاری، صنایع نیشکر، معادن و دیگر صنایع برای افزایش سختی و مقاومت به سایش خراشان توأم با ضربه اجزاء استفاده می‌گردد. آلیاژهای مورد استفاده جهت ایجاد لایه مقاوم به سایش بر روی فلزات پایه آهنی (فولاد کربنی و کم آلیاژ) به دو دسته عمده آلیاژهای آهنی و آلیاژهای غیر آهنی تقسیم بندی می‌شوند. آلیاژهای آهنی به کار رفته برای این منظور در دو دسته عمده زیر قرار دارند [2]:

1- آلیاژهای پایه Fe-Cr-C

2- آلیاژهای پایه Fe-C-X (X عنصر کاربیدزا)

آلیاژهای غیر آهنی مورد استفاده نیز دو دسته‌اند که عبارتند از [2]:

1- آلیاژهای پایه کبالت 2- آلیاژهای پایه نیکل.

آلیاژهای پایه آهنی به علت قیمت مناسب و مقاومت به سایش بالاتر نسبت به آلیاژهای غیر آهنی بیشتر مورد توجه مهندسان و صنعتگران بوده‌اند [3].

در سیستم‌های آلیاژی حاوی کاربید، حضور کربن و عناصر کاربیدزا، الزامی می‌باشد. در این نوع سیستم‌های آلیاژی، ساختار، ترکیب و چسبندگی کاربید با زمینه و توزیع کاربیدها نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر خواص سایشی آلیاژ دارد [4]. آلیاژ هایپر یونکتیک Fe-Cr-C به دلیل مقاومت بسیار خوب در برابر سایش، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این آلیاژها غالباً کاربید M_7C_3 به وجود می‌آید. کاربیدهای اولیه M_7C_3 در یک غلظت بالایی از کربن تشکیل می‌شوند. این نوع از ریزساختارها خواص مقاومت به سایش خوبی دارند [5,6].

کاربیدهای M_7C_3 به دلیل ترکیبی عالی از سختی بالا، مقاومت در برابر سایش عالی و همچنین مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون خوب به طور گسترده به عنوان فاز تقویت کننده در پوشش‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود [7].

یک عمل استاندارد جهت به حداقل رساندن درجه رقت، جوش کاری لایه‌های واسط و یا چند لایه از آلیاژ رویه سختی است [8]. احمد پور و همکارانش به بررسی روکش کاری با استلایت 6 بر روی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی با و بدون حضور لایه میانی فولاد زنگ نزن آستنیتی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با اعمال لایه میانی فولاد زنگ نزن آستنیتی 309، رقت

می‌باشد که یک فولاد هیپوپوتکتوئید است. در شکل 1 ریزساختار فلز پایه که شامل فریت و پرلیت می‌باشد، ارائه شده است. در شکل 1 نواحی تیره، پرلیت و نواحی روشن فریت می‌باشد [18].

3-2- ریزساختار منطقه دندریتی نمونه‌های روکش کاری شده
 شکل 2 منطقه دندریتی نمونه‌های روکش کاری شده را نشان می‌دهد. با فاصله گرفتن از فلز پایه به سمت روکش، غلظت عناصر آلیاژی در جلوی جبهه انجماد بیشتر شده و گرادیان دمایی کاهش یافته و می‌توان نتیجه گرفت که تحت انجماد ترکیبی غالب بر تحت انجماد حرارتی می‌شود و شرایط را برای تشکیل کاربیدهای دندریتی ستونی و سپس کاربیدهای دندریتی هم محور فراهم می‌سازد [19].

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد St52، الکتروود و سیم جوش مورد استفاده در تحقیق (درصد وزنی)

Table 1 chemical composition of St-52 carbon steel, electrode and filler metal in the current study (wt%)

Fe	Ni	Mn	Cr	Si	C	
پایه	---	1/60	---	0/55	0/20	فولاد ساده کربنی St52
پایه	---	---	35/0	---	4/30	الکتروود E10-UM-60R
پایه	13/5	1/8	23/5	0/8	0/08	سیم جوش ER 309L

جدول 2 پارامترهای جوش کاری استفاده شده در این تحقیق

Table 2 welding parameters in the current study

GTAW	SMAW	فرایند
2/4	3/25	قطر الکتروود (mm)
3	3	طول قوس (mm)
10	10	ولتاژ (V)
1	۲۱	تعداد پاس
145	133	شدت جریان (A)
1/1	1/4	سرعت جوش کاری (mm/s)
DCEN	DCEP	قطبیت
آرگون	-	گاز محافظ
تنگستن-2درصد توریم	-	الکتروود تنگستنی
31/63	22/8	حرارت ورودی هر پاس (kJ/mm)

جدول 3 پارامترهای آزمون سایش

Table 3 wear test parameters

160N	نیرو
فولاد بلبرینگ 100Cr6	نوع پین سایش
65 HRC	سختی پین سایش
0/15 m/s	سرعت حرکت پین
1000m	مسافت سایش

سیم جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی ER309L با قطر 2/4mm که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 آمده است، استفاده شد. انتخاب این لایه میانی به دلیل داشتن میزان کروم بالا و نزدیک به میزان کروم موجود در الکتروود بوده است. پیش از روکش کاری، به منظور حذف لایه‌های اکسیدی، نمونه‌ها سنگ زنی شده و در محلول استون قرار داده شدند. همچنین الکتروودها به مدت 2 ساعت در دمای 300 درجه سانتی‌گراد در کوره خشک گردید تا رطوبت موجود در آن‌ها از بین برود. نمونه‌ها قبل از جوش کاری تا دمای 250 درجه سانتی‌گراد پیشگرم شدند [15].

در ابتدا روکش کاری به صورت یک پاس به روش SMAW توسط الکتروود E10-UM-60R مطابق با پارامترهای ارائه شده در جدول 2، بر روی نمونه‌ی بدون لایه میانی (یک پاس) انجام شد. همچنین به منظور بررسی تأثیر لایه میانی 309، ابتدا بر روی نمونه‌ای از فلز پایه، یک پاس فولاد زنگ نزن آستنیتی 309 به روش GTAW مطابق با پارامترهای ارائه شده در جدول 2 جوش کاری شد و سپس یک پاس الکتروود E10-UM-60R به روش SMAW بر روی آن اعمال شد. پس از عملیات جوش کاری، نمونه‌هایی از قطعات جوش کاری شده، جهت بررسی ریزساختار، آزمون سختی سنجی و سایش تهیه گردید. جهت بررسی ریزساختار، پس از سنباده زنی و پولیش، نمونه‌ها توسط محلول کلروفوریک الکل به مدت 40 ثانیه حکاکی گردیدند. برای بررسی ریزساختار از میکروسکوپ نوری Nikon استفاده شد. همچنین برای بررسی میزان رقت آهن موجود در روکش از آنالیز نقطه‌ای (EDS) استفاده گردید. به منظور تعیین و تایید فازهای موجود در ساختار از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Philips X Pert-MPD System و پرتو K_{α} مس با $\lambda = 1.5404 \text{ \AA}$ استفاده گردید. آزمون ریزسختی سنجی ویکرز مطابق با استاندارد ASTM E384-16 [16] با نیروی 50g توسط دستگاه Leitz بر مقطع عرضی نمونه‌ها از روکش به سمت زیر لایه انجام شد. پس از انجام آزمون سایش، بر روی مسیر سایش نمونه‌ها نیز ریزسختی سنجی ویکرز انجام گرفت. آزمون سایش بر اساس استاندارد ASTM G133-05 [17] (سایش رفت و برگشتی) مطابق با پارامترهای جدول 3 انجام شد و در انتها سطوح سایش با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل ZEISS مورد بررسی قرار گرفتند.

3- نتایج و بحث

3-1- ریزساختار فلز پایه

فلز پایه مورد استفاده در این پژوهش فولاد ساده کربنی St52

می‌باشد؛ در نتیجه در نمونه با لایه میانی 309، نسبت به نمونه بدون لایه میانی (یک پاس)، غلظت عناصر آلیاژی کروم و کربن در جلوی جبهه انجماد بیشتر شده و حجم کاربیدهای دندریتی تشکیل شده بیشتر شده است.

3-3- ریزساختار سطح پوشش نمونه‌ها پس از عملیات جوش کاری
در شکل 3 ریزساختار سطح نمونه‌ها در حالت بدون لایه میانی (یک پاس) و با لایه میانی 309 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد ساختار نمونه‌ها شامل کاربیدهای M_7C_3 و زمینه یونکتیک $\gamma + M_7C_3$ است. همچنین بررسی تصاویر حاکی از آن است که در نمونه با لایه میانی 309 نسبت به نمونه بدون لایه میانی (یک پاس)، حجم کاربیدهای M_7C_3 تشکیل شده افزایش یافته است.

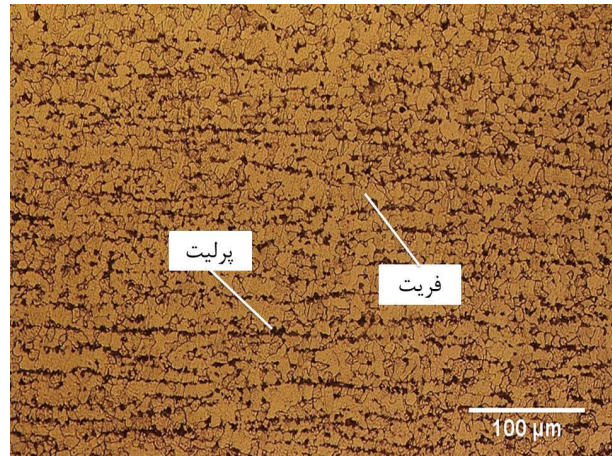
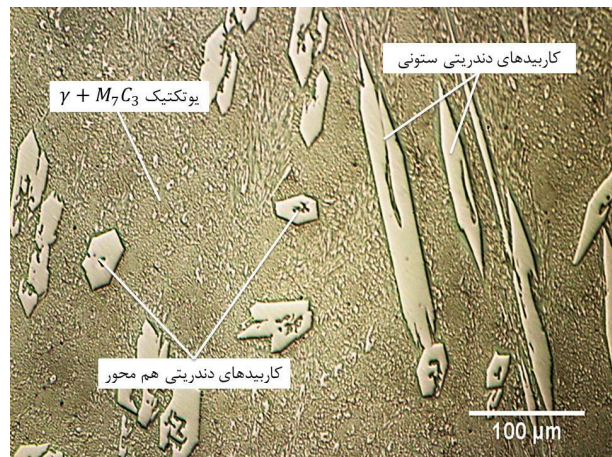
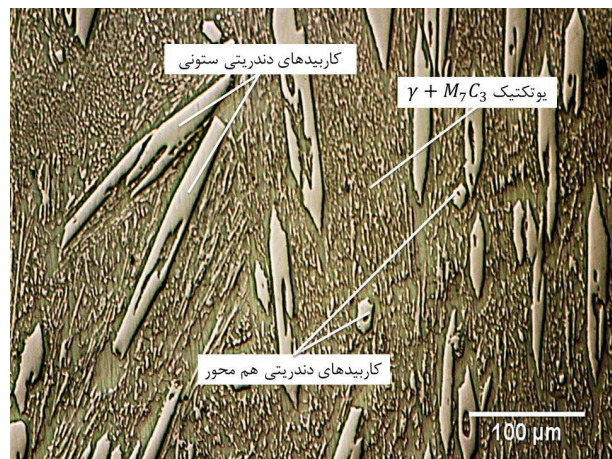


Fig. 1 Optical microscopy image of base metal

شکل 1 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز پایه



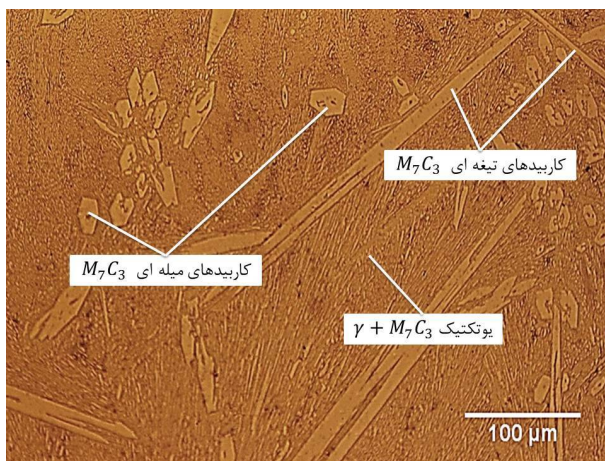
(الف، ا)



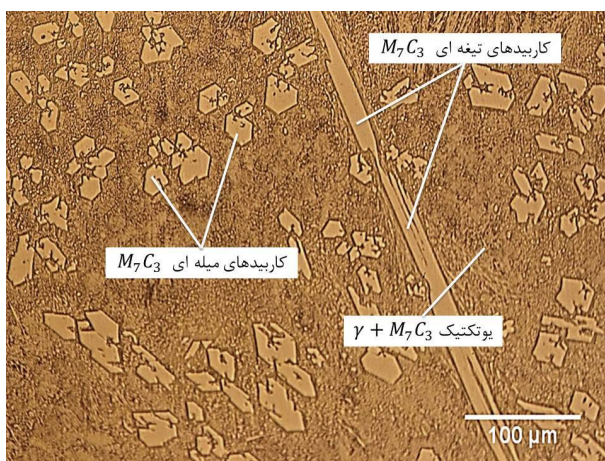
(ب، ب)

Fig. 2 optical microscopy image of the dendritic region of the samples: a) one-pass and b) with the middle layer 309

شکل 2 تصویر میکروسکوپ نوری از منطقه دندریتی نمونه‌ها: (الف) یک پاس (ب) با لایه میانی 309



(الف، ا)



(ب، ب)

Fig. 3 Optical microscopy image of the surface after the welding: a) one-pass and b) with the middle layer 309

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌ها پس از عملیات جوش کاری: (الف) یک پاس (ب) با لایه میانی 309

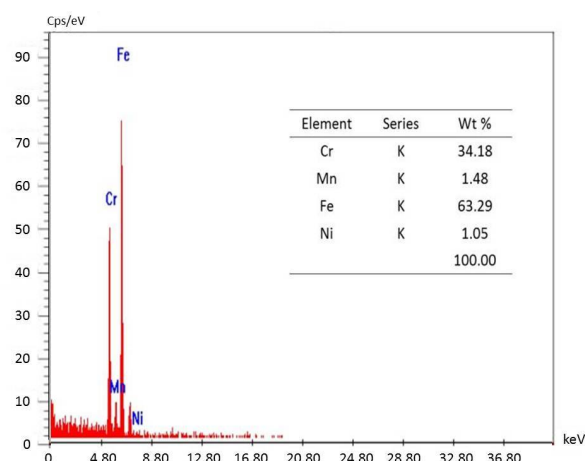
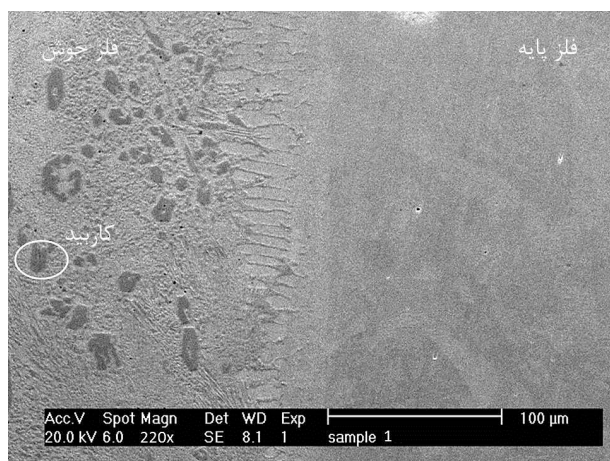
در اثر پس زدن عناصر آلیاژی در مناطق بین دندریتی، غلظت کربن و کروم زیاد شده و شرایط برای تشکیل یونکتیک

نمونه با لایه میانی 309 حاوی کروم زیادی می‌باشد و الکتروود مورد استفاده نیز دارای مقدار کربن بالایی می‌باشد؛ در نتیجه کربن از الکتروود با کروم لایه میانی 309 ترکیب شده و کاربید کروم بیشتری در مقایسه با نمونه یک پاس تشکیل می‌شود. لذا حجم کاربید کروم ایجاد شده در روکش حاصل از نمونه با لایه میانی 309 بیشتر از نمونه بدون لایه میانی (یک پاس) می‌باشد. همچنین در نمونه با لایه میانی 309، ساختار کاربیده‌ها بیشتر از نوع میله‌ای است. دلیل این موضوع وابسته به کاهش رقت آهن است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. تحقیقات قبلی نشان داده است که کاربیده‌های اولیه M_7C_3 توسط دو ساختار میله‌ای و تیغه‌ای به وجود می‌آیند. همچنین با افزایش درصد کربن، ساختار کاربیده‌های M_7C_3 از تیغه‌ای به میله‌ای افزایش می‌یابد [11].

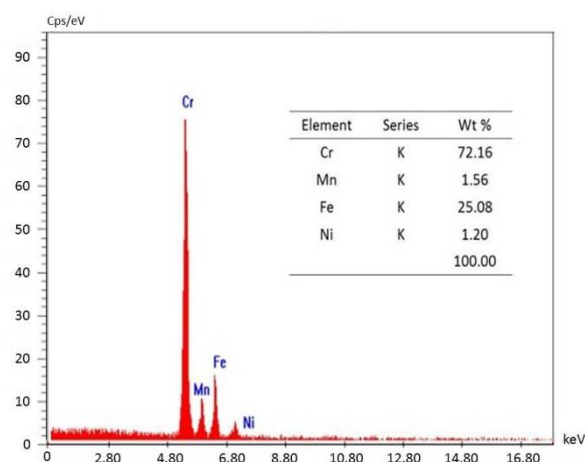
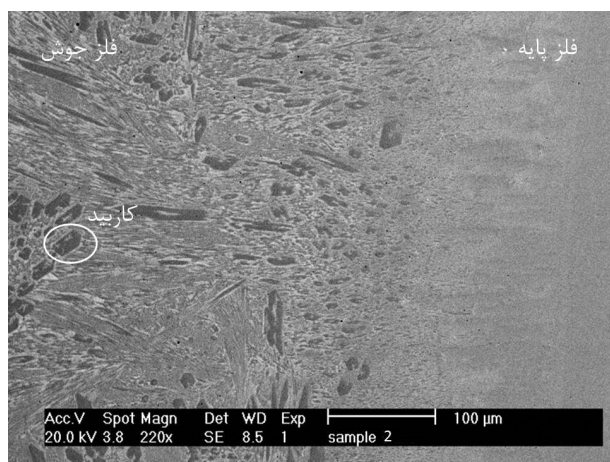
در شکل 4 آنالیز EDS از سطح نمونه‌های بدون لایه میانی (یک پاس) و نمونه با لایه میانی 309 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کاربیده‌های M_7C_3 در زمینه آستنیتی قابل مشاهده است.

در شکل 5 آنالیز پراش پرتو ایکس از سطح نمونه با لایه میانی 309 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کاربیده‌های M_7C_3 در زمینه آستنیتی قابل مشاهده است.

در شکل 4 آنالیز EDS از سطح نمونه‌های بدون لایه میانی (یک پاس) و نمونه با لایه میانی 309 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کاربیده‌های M_7C_3 در زمینه آستنیتی قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

Fig. 4 SEM micrographs and EDS analysis on the surfaces of specimens: a) one-pass and b) with the middle layer 309

شکل 4 تصویر میکروسکوپ الکترونی به همراه آنالیز EDS از سطح نمونه‌ها: (الف) یک پاس (ب) با لایه میانی 309

جدول 4 نتایج ریز سختی سنجی (HV) از سطح نمونه‌های روکش کاری شده

Table 4 Micro-hardness (HV) results from the surface of coated specimens

میانگین	سختی 3	سختی 2	سختی 1	نمونه
780	778	787	775	یک پاس
945	947	940	948	با لایه میانی 309

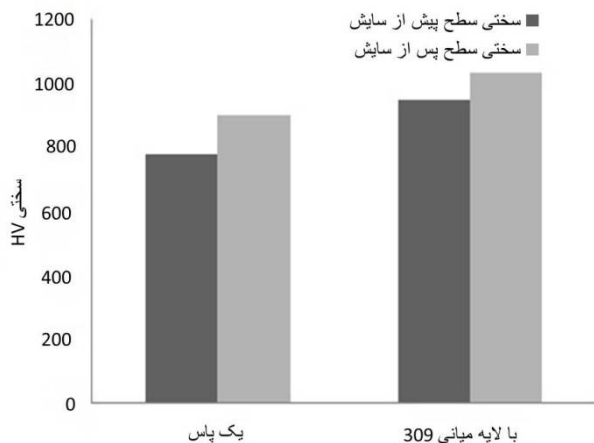


Fig. 6 The hardness (Vickers) results on the surface of specimens before and after the wear test.

شکل 6 نتایج سختی سنجی ویکرز از سطح نمونه‌ها پیش و پس از آزمون سایش

3-5- مقاومت سایشی نمونه‌ها

شکل 7 نمودار کاهش وزن نمونه‌های روکش کاری شده در مسافت 1000 متر به روش سایش رفت و برگشتی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در نمونه روکش کاری شده با لایه میانی 309 در مقایسه با نمونه بدون لایه میانی (یک پاس)، کاهش وزن کمتری مشاهده می‌گردد. دلیل این موضوع کاهش رقت آهن در نمونه با لایه میانی 309 نسبت به نمونه یک پاس است، لذا کاربردهای کروم M_7C_3 بیشتری تولید شده و سختی و به طبع آن مقاومت سایشی نمونه با لایه میانی 309 نسبت به نمونه بدون لایه میانی (یک پاس) بهبود یافته است. آزمون سایش بر روی فلز پایه St52 نیز انجام شد و با توجه به اینکه فلز پایه دارای سختی پایینی (155HV) می‌باشد لذا در آزمون سایش طی مسافت 200 متر کاهش وزن فلز پایه 50mg شد که در مقایسه با نمونه های روکش کاری شده کاهش وزن فلز پایه بسیار زیاد می‌باشد. بنابراین فلز پایه St52 برای مصارف صنعتی که نیاز به مقاومت سایشی خوبی دارند، مناسب نمی‌باشد و به یک عملیات سخت کاری سطح جهت بهبود مقاومت سایشی آن نیاز می‌باشد.

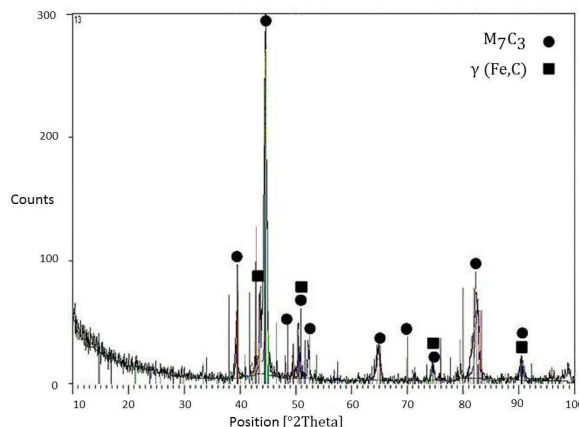


Fig. 5 XRD patterns of the surface of specimen with the middle layer 309

شکل 5 نمودار پراش پرتو ایکس در سطح نمونه با لایه میانی 309

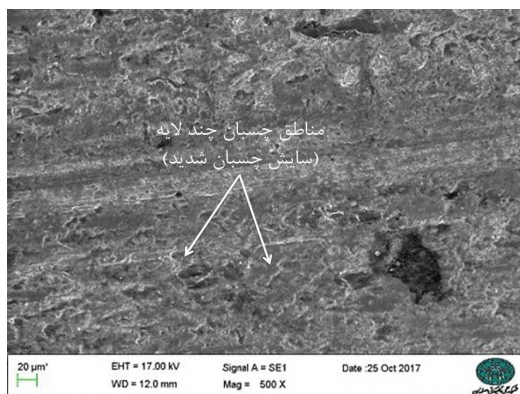
3-4- بررسی نتایج سختی

جدول 4، نتایج ریزسختی سنجی ویکرز از سطح نمونه‌های روکش کاری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از اعداد مربوط به سختی مشخص است، سختی نمونه بدون لایه میانی (یک پاس) و نمونه با لایه میانی 309 به ترتیب 780 و 945 ویکرز می‌باشد. همان‌طور که می‌دانید، ریزساختار تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی از جمله سختی می‌گذارد. با اعمال لایه میانی 309، مقدار ریز سختی در مقایسه با نمونه یک پاس افزایش یافته است. در تحقیقی که توسط Fan و همکارانش بر روی روکش کاری فولاد ASTM A36 توسط آلیاژ سخت کاری سطحی پر کروم Fe-Cr-C انجام شد، آن‌ها نشان دادند که با افزایش کاربید $(Fe,Cr)_{23}C_6$ ، سختی افزایش می‌یابد [20]. در تحقیقات قبلی مشاهده شده است که سختی با کاهش رقت آهن به صورت خطی افزایش می‌یابد و سختی از فصل مشترک فلز پایه با فلز جوش به سمت سطح روکش افزایش می‌یابد [21]. بنابراین در تحقیق حاضر، با توجه به افزایش کاربردها در نمونه با لایه میانی، سختی افزایش یافته است.

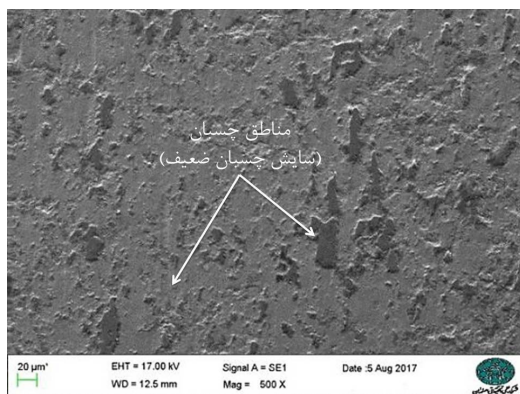
در شکل 6 نتایج سختی سنجی از سطح نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون سایش ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد سختی نمونه‌ها پس از آزمون سایش افزایش یافته است که به دلیل استحاله آستنیت به مارتنزیت و وقوع کارسختی در سطح در حین آزمون سایش می‌باشد که تطابق خوبی با نتایج سایر محققان دارد [22، 23]. در تحقیقی که توسط Kulishenko و همکارانش انجام شد، این محققان علت افزایش سختی پس از آزمون سایش را ناشی از استحاله آستنیت به مارتنزیت در اثر کارسختی موضعی در حین سایش دانسته اند [22].

سختی، عامل بهبود مقاومت سایشی در نمونه با لایه میانی 309 در مقایسه با نمونه‌ی بدون لایه میانی (تک پاس) است. در مطالعاتی که توسط Fontalvo و همکارانش بر روی فولادهای ابزار انجام پذیرفت، افزایش کسرحجمی و کاهش فاصله بین کاربیدها باعث کاهش سایش چسبان شده است [25]. همچنین سایش چسبان دارای تناسب مستقیم با نیروی اعمالی و تناسب عکس با سختی است [26]. یانگ و همکارانش افزایش سختی در سطح فولاد را عامل اصلی در مقاومت به سایش چسبان دانسته‌اند [27]. بنابراین در تحقیق حاضر به سبب افزایش کسرحجمی کاربیدها و افزایش سختی، مقاومت به سایش بهبود می‌یابد و لذا سایش چسبان کمتری در نمونه با لایه میانی 309 مشاهده می‌گردد.

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی همراه با آنالیز طیف سنجی توزیع انرژی (EDS) را برای ذرات پودر سایش نمونه یک پاس (بیشترین کاهش وزن در آزمون سایش) و نمونه با لایه میانی 309 (کمترین کاهش وزن در آزمون سایش) نشان می‌دهد.



(الف، ا)



(ب، ب)

Fig.8 SEM micrographs of worn -out surfaces of specimens: a) one-pass and b) with the middle layer 309

شکل 8 تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نمونه‌ها: الف) یک پاس

ب) با لایه میانی 309

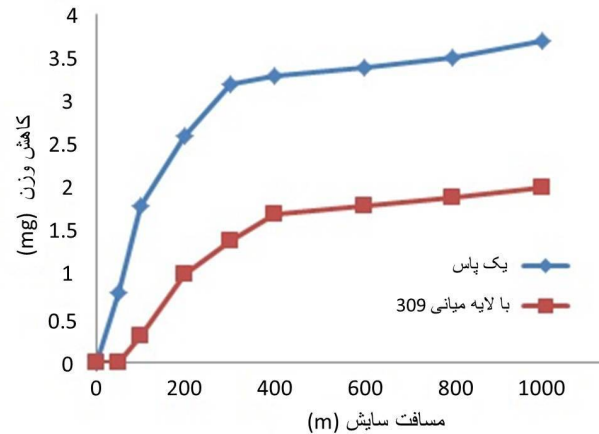


Fig.7 Variation of the mass loss of coated specimens as a function of wear distance.

شکل 7 منحنی کاهش وزن بر حسب مسافت سایش برای نمونه‌های روکش کاری شده

در تحقیقی که توسط لین و همکارانش بر روی روکش کاری آلیاژ پر کربن پایه کروم توسط فرایند GTAW انجام شد، نتایج این محققین نشان داد که با افزایش درصد کربن روکش از 2.3% به 5.9%، مقاومت سایشی به دلیل افزایش کسرحجمی کاربیدهای M_7C_3 موجود در روکش بهبود یافت [10].

در تحقیقی دیگر که توسط کورونادو و همکارانش انجام شد، آنها نیز گزارش دادند که افزایش کسرحجمی کاربیدها، مقاومت در برابر سایش را بهبود می‌بخشد [24].

در شکل 8 تصویر SEM از سطح سایش یافته نمونه‌ها ارائه شده است. سطوح مهندسی در مقیاس میکروسکوپی کاملاً ناصاف بوده و ناهمواری‌های میکرونی کل سطح را فراگرفته است. زمانی که این سطوح در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند و نیروی خارجی باعث فشردن شدن این سطوح گردد، با توجه به نسبت بسیار کم سطح واقعی در تماس نسبت به سطح کل، تنش بسیار زیادی بر روی ناهمواری‌های سطحی هر دو جسم درگیر اعمال می‌گردد. این تنش بالا با ایجاد اتصال مکانیکی و یا متالورژیکی منجر به ایجاد جوش خوردگی‌های موضعی بین ناهمواری‌های سطوح می‌گردد. بررسی تصاویر حاکی از وقوع مکانیزم سایش چسبان در نمونه‌ها است.

همان‌طور که مشخص است در نمونه تک پاس سایش چسبان شدید شامل مناطق چسبان چند لایه مشاهده می‌گردد (شکل 8- الف) ولی در نمونه با لایه میانی از میزان سایش چسبان کاسته شده است و در سطح سایش مناطق چسبان به صورت پراکنده مشاهده می‌شود (شکل 8- ب).

بنابراین افزایش کسرحجمی کاربیدها و به طبع آن افزایش

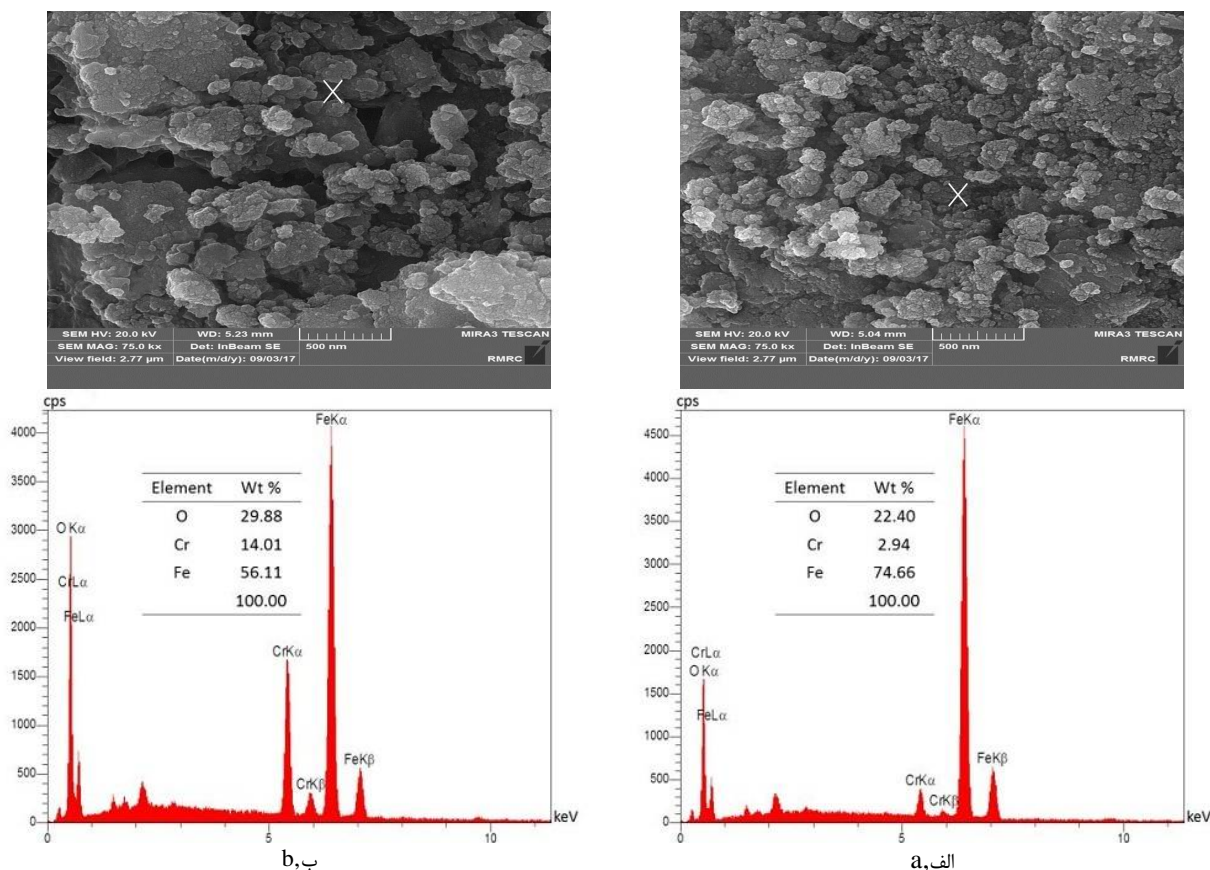


Fig. 9 SEM micrographs of wear debris and EDS analysis of wear debris: a) one pass; b) with the middle layer 309

شکل 9 تصویر میکروسکوپ الکترونی ذرات پودر سایش به همراه آنالیز EDS از پودر سایش: الف) یک پاس ب) بالایه میانی 309

موجود در نمونه افزایش می‌یابد که در نمونه با لایه میانی 309 بیشترین مقدار است. این موضوع باعث افزایش سختی و مقاومت سایشی در نمونه با لایه میانی 309 در مقایسه با نمونه‌ی بدون لایه میانی (یک پاس) می‌گردد، به نحوی که میزان سختی سطح نمونه‌های یک پاس و با لایه میانی به ترتیب 780 و 945 ویکرز و میزان کاهش وزن نمونه‌ها در آزمون سایش به ترتیب 3/7 و 2 میلی‌گرم در مسافت 1000 متر می‌باشد. بنابراین نمونه حاوی لایه میانی 309 دارای بالاترین سختی و مقاومت سایشی می‌باشد. - مکانیزم غالب در سایش نمونه‌ها، مکانیزم سایش چسبان است. در نمونه با لایه میانی 309، به سبب سختی بالاتر و افزایش کسر حجمی کاربیدها، سایش چسبان کاهش می‌یابد.

5- مراجع

- [1] K. Amini, A. Bahrami, H. Sabet, Evaluation of microstructure and wear behavior of iron-based hard-facing coatings on the Mo40 steel, *International Journal of ISSI*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-8, 2015.
- [2] J.R. Davis, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, ASM, p. 530, 2001.

همان‌طور که در آنالیز EDS مشاهده می‌شود، میزان آهن نمونه با یک پاس بیشتر از نمونه با لایه میانی 309 می‌باشد. در نمونه با لایه میانی 309، به دلیل کاهش میزان رقت آهن در پوشش، میزان کروم پوشش و در نتیجه کاربیدهای کروم موجود در پوشش افزایش یافته است. لذا مقدار کروم موجود در پودر سایش نمونه با لایه میانی 309 از نمونه بدون لایه میانی (یک پاس) بیشتر می‌باشد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که کاربیدهای کروم موجود در پوشش از زمینه در برابر سایش محافظت کرده‌اند. هم چنین درصد بالای اکسیژن در دو نمونه پودر حاکی از آن است که در حین آزمون سایش به سبب بالارفتن دما، اکسیداسیون رخ داده است.

4- نتیجه‌گیری

- یافته‌های پژوهش نشان داد که ساختار در سطح نمونه‌های روکش کاری شده، متشکل از کاربیدهای M_7C_3 در زمینه یوتکتیک $\gamma+M_7C_3$ می‌باشد.
- با اعمال لایه میانی 309، میزان رقت آهن در روکش کاهش و رقت کروم افزایش می‌یابد. بنابراین درصد کاربیدهای کروم

- [15] F. Madadi, M. Shamanian, F. Ashrafzadeh, Cladding of stellite composite on carbon steel by gas tungsten arc welding (GTAW), *International journal of ISSI*, Vol. 6, No. 2, pp. 34-37, 2009.
- [16] ASTM E384-16, Standard test method for microindentation hardness of materials, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016.
- [17] ASTM G133-05(2016), Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2016.
- [18] M. A. Golozar, Principles and applications of heat treatment of steels, Isfahan: Isfahan University of Technology, 2012. (in Persian)
- [19] A. Monshi, A. Razavi, *Solidification of Welding*, Isfahan: Arkan Danesh, pp. 25-75, 2008. (in Persian فارسی)
- [20] C. Fan, M.C. Chen, C.M. Chang, W. Wu, Microstructure change caused by $(Fe, Cr)_{23}C_6$ carbides in high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys, *Surface and Coating Technology*, Vol. 201, No. 3-4, pp. 908-912, 2006.
- [21] I. Hajiannia, M. Shamanian, M. Kasiri, Microstructure and mechanical properties of AISI 347 stainless steel/A335 low alloy steel dissimilar joint produced by gas tungsten arc welding, *Materials and Design*, Vol. 50, pp. 566-573, 2013.
- [22] B. Kulishenko, A. Balin, M. Filippov, Electrodes for hardfacing components subjected to abrasive and impact-abrasive effects, *Welding International*, Vol. 19, No. 4, pp. 326-329, 2005.
- [23] K. Yildizli, M. Eroglu, M.B. Karamis, Microstructure and erosive behavior of weld deposits of high manganese electrode, *Surface & Coating Technology*, Vol. 201, No. 16-17, pp. 7166-7173, 2007.
- [24] J.J. Coronado, H.F. Caicedo, A.L. Gomez, The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits, *Tribology International*, Vol. 42, No. 5, pp. 745-749, 2009.
- [25] G.A. Fontalvo, R. Humer, C. Mitterer, K. Sammt, I. Schemmel, Microstructural aspects determining the adhesive wear of tool steels, *Wear*, Vol. 260, No. 9-10, pp. 1028-1034, 2006.
- [26] B. Bhushan, *Introduction to Tribology*, 1st edition, New York, NY, 2002.
- [27] J. Yang, Y. Liu, Z. Ye, D. Yang, S. He, Microstructural and tribological characterization of plasma- and gas-nitrided 2Cr13 steel in vacuum, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 2, pp. 808-814, 2011
- [3] A.D. Surker, *Wear of Metals*, 2ed Edition, Pergamon Press, p. 133, 1993.
- [4] A.S.C.M.D. Oliviera, J.J. Tigrinho, R.R. Takeyama, Coatings enrichment by carbide dissolution, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 19, pp. 4660-4665, 2008.
- [5] C.W. Kuo, C. Fan, S.H. Wu, W. Wu, Microstructure and wear characteristics of hypoeutectic, eutectic and hypereutectic $(Cr, Fe)_{23}C_6$ carbides in hardfacing alloys, *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 9, pp. 2324-2328, 2007.
- [6] S. Liu, Y. Zhou, X. Xing, J. Wang, Y. Yang, Q. Yang, Agglomeration model of $(Fe, Cr)_7C_3$ carbide in hypereutectic Fe-Cr-C alloy, *Materials Letters*, Vol. 183, pp. 272-276, 2016.
- [7] C.M. Chang, Y.C. Chen, W. Wu, Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy, *Tribology International*, Vol. 43, No. 5-6, pp. 929-934, 2010.
- [8] M. Ahmadpour, M. Shamanian, A. Saatchi, Hardfacing of stellite 6 on martensitic stainless steel and evaluation of microstructure and effect of austenitic stainless steel interlayer, *Science and surface engineering*, No. 8, pp. 49-58, 2010. (in Persian فارسی)
- [9] G.R. Mirshekari, S. Daei, S. Fatoureh Bonabi, M.R. Tavakoli, A. Shafyei, M. Safaei, Effect of interlayers on the microstructure and wear resistance of stellite 6 coatings deposited on AISI 420 stainless steel by GTAW technique, *Surfaces and Interfaces*, Vol. 9, pp. 79-92, 2017.
- [10] C.M. Lin, C.M. Chang, J.H. Chen, C.C. Hsieh, W. Wu, Microstructure and wear characteristics of high-carbon Cr-based alloy claddings formed by gas tungsten arc welding (GTAW), *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, No. 7, pp. 2590-2596, 2010.
- [11] C.M. Chang, L.H. Chen, C.M. Lin, J.H. Chen, C.M. Fan, W. Wu, Microstructure and wear characteristics of hypereutectic Fe-Cr-C cladding with various carbon contents, *surface & coatings technology*, Vol. 205, No. 2, pp. 245-250, 2010.
- [12] X.H. Tang, R. Chung, C.J. Pang, D.Y. Li, B. Hinckley, K. Dolman, Microstructure of high (45 wt.%) chromium cast irons and their resistances to wear and corrosion, *Wear*, Vol. 271, No. 9-10, pp. 1426-1431, 2011.
- [13] A.S. Kang, G. Sing, G.S. Cheema, Improving wear resistance via hardfacing of cultivator shovel, *Materials Today*, Vol. 4, pp. 7991-7999, 2017.
- [14] Din 8555-1, Standard for filler metals used for surfacing; filler wires, filler rods, wire electrodes, covered electrodes; designation; technical delivery conditions, German, 1983.