E-ISSN: 2676-6787 | P-ISSN: 2476-583X

Journal of
Welding Science and Technology of Iran
jwsti.iut.ac.ir

Volume 10, Number 2, 2025

Overlaying of colmonoy 6 on plain carbon steel by plasma transfer arc welding and tungsten inert gas welding: comparison of microstructure and wear behavior

Kh. Ranjbar*[1], A. Firoozi[1], F. Shahriari Nogoorani[2], S. F. Ziaee[1]

1-Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Received 12 November 2024 ; Accepted 25 December 2024

Abstract

Plain carbon steels are widely utilized in various industrial applications primarily due to their low cost. However, these steels often fall short in terms of mechanical properties and wear resistance. The deposition of hard and wear-resistant coatings on these steels significantly enhances their performance and extends their range of applications. Colomonoy 6, is a nickel-based superalloy, enhance hardness, erosion resistance, wear resistance, and corrosion resistance on the applied surfaces. The study investigated the application of weld overlay using colomonoy 6 on a plain carbon steel, aimed to create a hard and wear-resistant surface. The overlaying processes were performed using plasma transfer arc welding and gas tungsten arc welding under identical conditions. Microstructural characteristics were examined through optical and electron microscopy, and Phase analysis was performed using X-ray diffraction technique. The wear behavior of the weld overlays was evaluated using pin-on-disc wear testing at three different temperatures: 25 °C, 300 °C, and 600 °C, using an alumina pin. The microstructural investigation revealed the formation of dendritic nickel-rich solid solutions and interdendritic carbide and boride phases within the overlays, contributing to improved hardness and wear properties. Results demonstrated that in both overlaying methods, the wear mechanism at room temperature was mild abrasive, whereas at 600 °C, it was plastic deformation, exhibiting a wear track depth of approximately 33-35 µm, and 50-55 µm, respectively. In both overlayed metals, an approximate Vickers hardness number of 600 was measured a 4-fold increase in hardness of substrate. This finding suggests that factors other than hardness, such as microstructural stability and phase distribution at elevated temperatures, play significant roles in wear performance.

Keywords: Overlaying, Colomonoy 6, Plasma transfer arc welding, Gas tungsten arc welding, Wear behavior, Boride and carbide phases.

*Corresponding Author Kh. Ranjbar, k_ranjbar@scu.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

شاپا: 2476-583X | شاپا الکترونیکی: 2676-6787

نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران

jwsti.iut.ac.ir

سال دهم، شماره2، پاییز و زمستان 1403

روکش‌کاری کلمونوی 6 بر روی فولاد ساده کربنی با جوشکاری قوس انتقالی پلاسما و قوس تنگستن: مقایسه ریز ساختار و خواص سایشی

خلیل رنجبر[1*]، علیرضا فیروزی[1]، فرهاد شهریاری نوگورانی[2]، سیده فاطمه ضیائی[1]

1- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

2- گروه مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

دریافت مقاله: 1403/08/22 ؛ پذیرش مقاله: 1403/10/05

چکیده

فولادهای ساده کربنی با توجه به ارزان بودن آن‌ها کاربردهای مختلفی در صنعت دارند ولی خواص مکانیکی و مقاومت سایشی مطلوبی ندارند. اعمال پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش کارایی و حوضه کاربرد آن‌ها را افزایش می‌دهد. پوشش کلمونوی6 (Colmonoy6) از جنس سوپر آلیاژهای پایه نیکل می‌باشد که باعث افزایش سختی و مقاومت در برابر سایش، فرسایش و خوردگی سطح می‌شود. هدف این پژوهش بررسی خواص سایشی روکش سخت و مقاوم به سایش کلمونوی6 بر روی زیرلایه فولاد ساده کربنی می‌باشد. در این تحقیق روکش کلمونوی6 با استفاده از فرایند جوشکاری به دو روش قوس انتقالی پلاسما وقوس تنگستن و در شرایط یکسان انجام شد. خصوصیات ریزساختاری و رفتار سایشی نمونه‌ها در دماهای مختلف باهم مقایسه شدند. بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، و آنالیزهای فازی توسط آنالیز پراش پرتو ایکس صورت گرفت. آزمون سایش پین بر روی دیسک در سه دمای 25، 300 و 600 درجه سانتی‌گراد و با استفاده از پین سرامیکی آلومینایی انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری روکش، تشکیل محلول جامد غنی از نیکل دندریتی، وترکیبات بورایدی و کاربیدی بین دندریتی در روکش‌ها که موجب افزایش سختی و بهبود مقاومت سایشی می‌شوند را تایید کردند. نتایج نشان داد که در هر دو روش روکش‌کاری، مکانیزم سایش در دمای اتاق از نوع سایش خراشان ملایم، در حالی‌که در دمای 600 درجه، مکانیزم سایش از نوع تغییر شکل پلاستیکی است که بترتیب دارای عمق شیار سایشی در حدود 35-33 میکرون، و 55-50 میکرون می باشند. در هر دو روش، سختی روکش تقریبا عدد 600 ویکرز را نشان داد که افزایش چند برابری نسبت به زیرلایه دارد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که عواملی به غیر از سختی در تعیین رفتار سایشی نقش بازی می‌کنند که از آن جمله می‌توان به پایداری ریزساختاری و توزیع فازها در دمای بالا اشاره کرد.

کلمات کلیدی: روکش‌کاری، کلمونوی6، جوشکاری قوس انتقالی پلاسما، جوشکاری قوس تنگستن، رفتار سایش، ترکیبات بورایدی و کاربیدی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: خلیل رنجبر، k_ranjbar@scu.ac.ir

1- مقدمه

به دلیل اینکه بسیاری از شکست و آسیب‌ها معمولا از سطح قطعات رخ می‌دهد، حفاظت و مقاوم سازی سطحی آن‌ها در برابر سایش، اکسیداسیون و خوردگی، مسئله بسیار مهم و تعیین کننده است. این امر نه تنها در کیفیت و طول عمر تاثیرگذار است بلکه کاهش هزینه‌ها را به همراه دارد [1]. جوش قوس تنگستن به دلیل سهولت و تنوع در عملکرد و ظاهر خوبی که برای فلزجوش به وجود می‌آورد، بیشترین کاربرد را توانسته در

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

صنعت به خود اختصاص دهد [2]. جوش قوس پلاسما نیز یکی از تکنیک‌های سخت کردن سطحی است که در مقایسه با فرایندهای جوشکاری (به‌جز جوشکاری زیر پودری) دارای نرخ رسوب بالا و رقت نسبتاً پایینی می‌باشد. به دلیل اینکه در جوش قوس پلاسما، مواد مصرفی به صورت پودر می‌باشد، طیف گسترده‌ای از پوشش‌های فلزی و کامپوزیتی امکان رسوب گذاری دارند [3].

از جمله پرکاربردترین مواد در سخت‌کاری سطحی برای بهبود رفتار سایشی و مقاومت خوردگی، آلیاژهای پایه نیکل هستند که از مهمترین آن‌ها می‌توان به آلیاژ کلمونوی6 اشاره کرد. مقاومت سایشی خوب این آلیاژ ناشی از تشکیل ترکیبات بورایدی و کاربیدی گزارش شده که به عنوان رسوبات اصلی در زمینه نیکل پراکنده هستند [9-4]. با توجه به مقاومت سایشی فوق العاده این روکش‌ها، کاربرد آن‌ها در انواع مبدل‌های حرارتی، بویلرهای ذغال سنگ، انواع ابزارهای سنبه و ماتریس، و غلتک‌های شکل‌دهی گزارش شده است [10].

هدف اصلی سخت‌کاری با استفاده از لایه نشانی آلیاژهای پایه نیکل، افزایش مقاومت در برابر سایش و بالا بردن سختی سطح است. در حقیقت به دلیل تغییرات ریزساختاری، خواص سایشی این آلیاژها تحت تأثیر قرار می‌گیرد [11]. گورمورثی و همکاران [12] گزارش کردند که اعمال آلیاژ کلمونوی6 بر روی زیرلایه فولادی با استفاده از روش قوس پلاسما منجر به ایجاد ریزساختاری متشکل از محلول جامد نیکل، کاربیدهای کروم و بوراید می‌شود که مقاومت به سایش خوبی را نشان می‌دهد. چی‌چان و همکاران [13] روکش‌کاری آلیاژ کلمونوی 56 بر روی فولاد ساده به روش قوس انتقالی پلاسما را انجام دادند و رفتار سایشی روکش را بررسی کردند. همتی و همکاران [14] روکش‌کاری کلمونوی به روش لیزر را بر روی فولاد ساده کربنی امتحان کردند و تاثیر رقت از سمت زیرلایه فولادی به سمت روکش را بررسی نمودند. نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد که رقت آهن تا حدود 25 درصد موجب تشکیل بورید کروم شده در حالی‌که رقت بیشتر آهن از تشکیل این ترکیب جلوگیری کرده و در نتیجه سختی کاهش می‌یابد. سوانت و همکاران [15] کلمونوی 5 را بر روی فولاد ساده کربنی با روش لیزر پوشش دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین رفتار فرسایشی روکش را می‌توان تحت قدرت لیزر کم و سرعت روبش بالاتر بدست آورد. همچنین ژانگ و همکاران [16] با اعمال لایه آلیاژ کلمونوی6 بر روی فولاد 316L زنگ نزن با استفاده جوش لیزر مشاهده کردند که مقاومت به سایش فولاد تا 53 برابر افزایش می‌یابد. داس و همکاران [17] نشان دادند که سختی بالای رسوبات آلیاژ Ni-Cr-Si-B با روش قوس تنگستن بر روی زیرلایه فولاد 316LN به دلیل تشکیل بورایدها و کاربیدهای کروم می‌باشد. در مطالعه مشابهی، جیانگ و همکاران [18] لایه نشانه بر روی فولاد ساده با ترکیبات Ni-Cr-Si-B را اعمال کردند. بررسی‌های ریزساختاری آن‌ها نشان داد که لایه روکش دارای دانه‌های فرعی، کاربیدهای $M_{23}C_6$ و سیلیسیدهای γ'-نیکل در زمینه آستنیت است. ونایی وهمکاران [19] سایش ناحیه جوش غیرمتشابه فولاد ساده کربنی به آلیاژ مقاوم به سایش w400 را بررسی کردند و مکانیزم اصلی سایش در فولاد مقاوم به سایش، از نوع چسبان و خراشان ارزیابی گردید. همچنین شایان فر و همکاران [20] روکش سوپرآلیاژ 526 را بر روی فولاد کوئنچ و تمپر ASTM A592 را اعمال کردند و مشاهده کردند که در حرارت ورودی کمتر، ساختار دندریتی روکش ریزتر و خواص مکانیکی بهتری را ایجاد کرد.

بررسی‌های پیشین در خصوص لایه نشانی آلیاژ کلمونوی بر روی زیرلایه فولادی ساده و یا زنگ نزن نشان می‌دهد که سختی و مقاومت سایشی و مقاومت خوردگی تابع فرایند لایه نشانی و همچنین تابع ویژگی‌های ریزساختاری چه در سطح رویی لایه و چه در فصل‌مشترک با فلز پایه است. کاشانی و همکاران [21] روکش کلمونوی را بر روی ابزار قالب آهنگری اعمال و رفتار سایشی روکش را در دمای اتاق و دماهای بالا بررسی کردند و نتیجه گرفتند که روکش در دمای بالا بخاطر تشکیل لایه اکسیدی رفتار بهتری نسبت به دمای اتاق دارد. در تحقیق دیگری کساوان و همکاران [22] رفتار سایشی روکش کلمونوی را بر روی فولاد 316 کم کربن بررسی نموده و تقریبا

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

نتایج مشابهی گرفتند. در این پژوهش دو فرایند مختلف لایه نشانی جوشکاری قوس تنگستنی و جوشکاری قوس پلاسمایی برای لایه نشانی آلیاژ کلمونوی6 بر روی زیرلایه فولاد ساده کربنی استفاده شده و ریزساختار لایه و همچنین فصل‌مشترک با زیرلایه بررسی گردید. رفتار سایشی آن‌ها نیز در دمای اتاق و دمای بالا نیز بررسی و مقایسه گردید.

2- مواد و روش انجام آزمایش

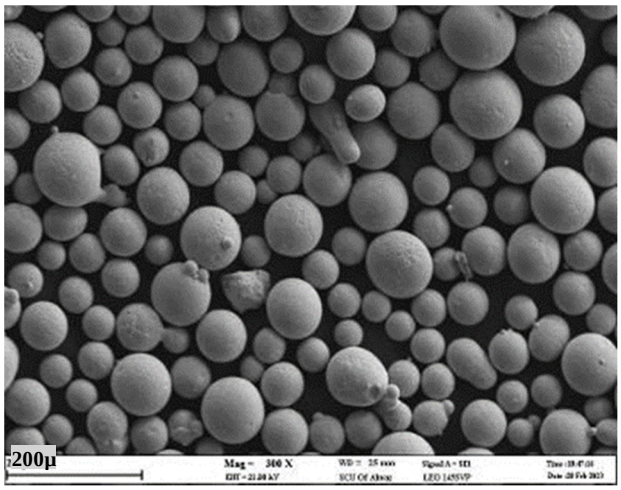
در این تحقیق از فولاد St37 به عنوان زیرلایه برای انجام فرایند سخت‌کاری استفاده شده است. ضخامت ورق زیرلایه 20 میلی‌متر و قطر آن 150 میلی‌متر انتخاب گردید. قبل از لایه نشانی، سطح نمونه با سنباده‌کشی و تمیزکاری با استون اکسیدزدایی و چربی‌زدایی شد. ترکیب شیمیایی زیرلایه، پودر و سیم‌جوش سوپرآلیاژ پایه نیکل با نام تجاری کلمونوی6 برای روکش‌کاری در جدول(1) آورده شده است. همچنین مورفولوژی پودر کلمونوی در شکل(1) نشان داده شده است.

جدول1- آنالیز ترکیب شیمیایی فلزپایه، پودر و سیم‌جوش روکش مورد استفاده برحسب درصد وزنی

عنصر	Fe	Si	Cr	C	Mn	B	Ni
فولاد St37	مانده	0/19	-	0/12	0/9	-	-
پودر کلمونوی 6	3/63	4/23	11/75	-	-	2/5	مانده
سیم‌جوش کلمونوی6	1/97	4/42	17/2	-	-	-	58/62

2-1- انجام عملیات روکش‌کاری با جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ

فرایند روکش‌کاری توسط روش‌های قوس پلاسما (با استفاده از پودرکلمونوی 6) و قوس تنگستنی گاز آرگون با سیم‌جوش مربوطه بر روی نمونه فولاد ساده کربنی بعنوان زیر لایه انجام شد. نمونه‌ها قبل از روکش‌کاری تا دمای 200 درجه سانتی‌گراد پیش‌گرم شدند. پارامترهای جوشکاری در جدول(2) و شکل ظاهری روکش‌های ایجاد شده با دو روش یاد شده در شکل(2) نشان داده شده است.



شکل 1- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر کلمونوی6 مورد استفاده در فرایند قوس پلاسما

2-2- بررسی‌های ریزساختاری و فازی

برای ارزیابی ریزساختار لایه روکش و سطح مقطع نمونه، پس از برشکاری و آماده سازی نمونه‌ها، عملیات صیقل‌کاری با کاغذ سنباده و پودر پالیش آلومینا استفاده و با محلول (Super Kalling) اچ شدند. سپس از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) دارای قابلیت آنالیز عنصری طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) استفاده شد. برای شناسایی فازهای موجود در پوشش‌ها از آنالیز پراش اشعه پرتو ایکس (XRD) و برای تجزیه و تحلیل پیک‌های الگوی پراش از نرم افزار X´pert High Score plus استفاده گردید.

2-3- آزمون سختی سنجی و سایش

اندازه‌گیری سختی پوشش‌ها و زیرلایه توسط دستگاه ریزسختی سنج شرکت INNOVATEST مدل NEXUS با فرو رونده هرم الماسی ویکرز و با نیروی 500 نیوتن صورت گرفت. به منظور بررسی خواص سایشی نمونه‌های روکش‌کاری شده، آزمون سایش پین‌بر روی‌دیسک طبق استاندارد ISO-1997 انجام در سه دمای 25، 300 و 600 درجه‌سانتی‌گراد صورت گرفت. پین مورد استفاده از جنس آلومینا تحت بار 20 نیوتن با مسافت

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

1000 متر و سرعت چرخش 150 دور بر دقیقه شد. وزن نمونه ها قبل و بعد از انجام آزمون سایش با استفاده از ترازوی دقیق با دقت 0/0001 اندازه گیری شد.

جدول 2- پارامترهای روکش‌کاری مورد استفاده در این تحقیق

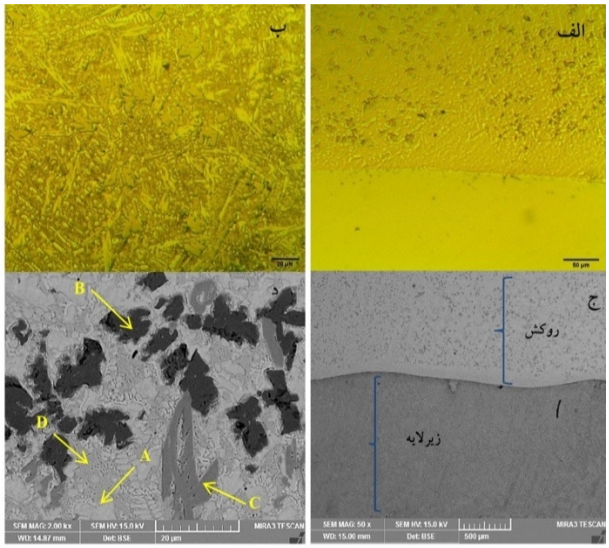
پارامترها	قوس انتقالی پلاسما	قوس تنگستن (TIG)
نوع پودر مصرفی و یا الکترود	پودر کلمونوی 6	الکترود غیرمصرفی تنگستنی
گاز محافظ	90 درصد آرگون و 10 درصد هیدروژن	با جریان 13 لیتر در دقیقه
جریان مصرفی	70 آمپر	60 آمپر
سرعت جوشکاری	9 سانتی‌متر در دقیقه	حداکثر 8 سانتی‌متر در دقیقه
همپوشانی لایه‌ها	-	تقریبا 1/3
عرض جوش	10 میلی‌متر	-
جریان گاز پلاسما	1 لیتر دردقیقه	-
قطر سیم پرکننده	-	2/4 میلی‌متر

شکل 2- وضع ظاهری روکش‌های ایجاد شده: الف - اعمال پوشش کلمونوی به روش قوس تنگستن ب- اعمال پوشش کلمونوی به روش قوس پلاسما

3- بحث و نتایج

3-1- بررسی روکش کلمونوی 6 جوشکاری شده به روش قوس پلاسما

ریزساختار روکش کلمونوی از مطقع رویی و در فصل‌مشترک با میکروسکوپ نوری (3-الف و3-ب) و الکترونی (شکل3-ج و 3-د) نشان داده شده است. اساسا ریزساختار کلمونوی شامل ساختار دندریتی محلول جامد نیکل و فازهای بین دندریتی ترکیبات یوتکتیکی بورایدی، کاربیدی و سیلیسایدی است [23].



شکل 3- تصویر میکروسکوپی نوری و الکترونی از سطح رویی روکش پلاسمایی و فصل‌مشترک پوشش آلیاژ کلمونوی: الف وب- تصاویر میکروسکوپ نوری ، ج و د- تصاویر میکروسکوپ الکترونی

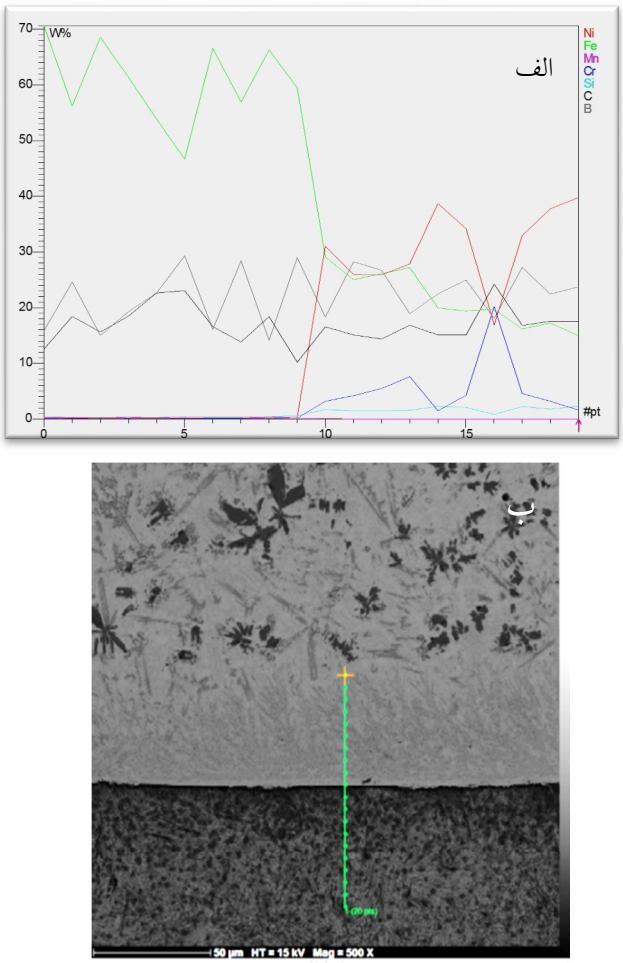
در فصل‌مشترک روکش، روکش سالم و عاری از هرگونه عیب ظاهری است. در میکروگراف نوری ساختار دندریتی زمینه نیکلی که محلول جامد غنی از عناصر کروم-سیلیسیم- بور- آهن است نشان داده شده و در تصویر الکترونی فازهای مختلف شناسایی و آنالیز شده‌اند. فازهای مختلف با رنگ‌های تیره، روشن و خاکستری در شکل(3) د شناسایی شده و عناصر تشکیل دهنده آن‌ها در جدول (3) آورده شده است. آنالیزها نشان می‌دهد که ریزساختار رویی روکش متشکل از فاز زمینه که محلول جامد نیکل (نقاط A و D) و کاربید کروم و بوراید کروم بترتیب (نقاط B وC) می‌باشد. ریز ساختار مشاهده شده با ریزساختار گزارش شده در مرجع [1] مطابقت دارد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

جدول 3- آنالیز عنصری نقطه‌ای روکش کلمونوی جوشکاری شده به روش قوس پلاسما برحسب درصد وزنی

نقطه/عنصر	A	B	C	D
Si	2/54	0/64	0/7	4/21
Cr	1/01	93/43	72/42	0/8
Fe	3/25	4/18	14/52	2/6
Ni	41/6	1/75	12/36	20/64

شکل(4) آنالیز خطی از زیرلایه تا روکش پلاسمایی را نشان می‌دهد. عنصر آهن از زیرلایه به سمت پوشش با یک شیب ملایم در حال کاهش است. اما عنصر نیکل و کروم با شیب کم در حال افزایش هستند. در قسمتی از نمودار فرورفتگی‌ها و قله‌هایی در خطوط عنصر نیکل و کروم دیده می‌شود که نشان دهنده تشکیل فازهای غنی از کروم و نیکل است. از طرفی عنصر بور بصورت سینوسی افزایش و کاهش می‌یابد. کربن به دلیل اینکه در زیرلایه و پوشش وجود دارد تقریبا به صورت خطی پیش می‌رود. با توجه به اینکه سه پاس روکش اعمال گردید. از نقش رقت در سطح رویی صرف نظر گردید. مطالعات پیشین توسط همتی و همکاران [14] در خصوص رقت آهن از لایه به سمت روکش نشان می‌دهد که در ناحیه مجاور فصل‌مشترک رقت آهن زیاد بوده و با فاصله گرفتن از این ناحیه رقت آهن کاهش چشم‌گیری دارد. رقت آهن بیشتر، بر تشکیل بورید کروم که از عوامل ایجاد کننده سختی است تاثیرگذار بوده و در نتیجه با رقت بیشتر، بورید کروم کمتری تشکیل می‌شود. درفاصله کمتر از 0/8 میلی‌متر از فصل‌مشترک، بیشترین سختی با حدود 5 درصد رقت و کمترین سختی با حدود 35 درصد رقت بترتیب800 و 500 ویکرز گزارش شده است. لذا انتظار می‌رود رقت در سطح رویی روکش با سه پاس (با فیلر 2/4 میلی‌مترقطر) بسیار ناچیز باشد. این مهم در شکل(4) هم دیده می‌شود طوری که رقت آهن (منحنی سبز رنگ) بعد از یک فاصله تقریبا ثابت می‌ماند و فقط در لایه مجاور فصل‌مشترک شیب تندی دارد. همین قضیه برای تشکیل فازهای سخت کننده نیز صادق بوده و در شکل(4) فازهای گل بوته‌ای شکل در سطح رویی تشکیل شده اند.



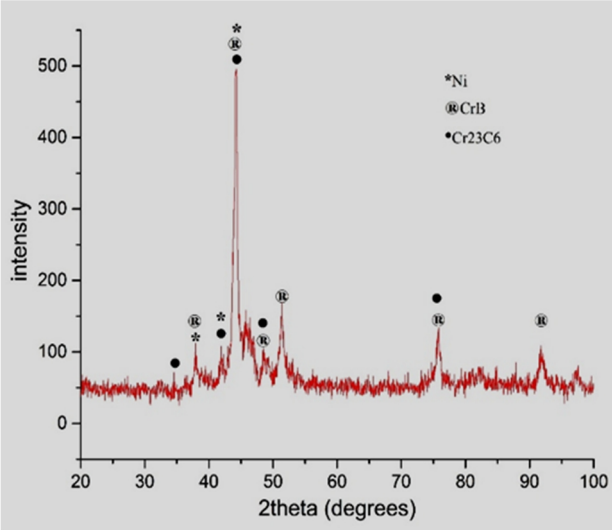
شکل 4- آنالیز خطی از مقطع روکش آلیاژ کلمونوی جوشکاری شده به روش قوس پلاسما: الف- نفوذ عناصر در فصل‌مشترک و ب- فصل‌مشترک.

الگوی پراش پرتو ایکس روکش کلمونوی به روش قوس پلاسما در شکل(5) وجود فاز غنی از نیکل (Ni) که همان محلول جامد نیکل بوده و بوراید کروم (CrB) و کاربید کروم ($Cr_{23}C_6$) را تایید می‌کند.

3- 2- بررسی روکش کلمونوی به روش قوس تنگستن

همانطور که در شکل(6-الف) مشاهده می‌شود روکش بر روی زیرلایه بدرستی صورت گرفته و عیب ظاهری مثل ترک، ناپیوستگی و حفره در فصل‌مشترک روکش با زیر لایه دیده نمی‌شود. فازهای تیغه‌ای شکل در پوشش در نزدیک فصل‌مشترک به صورت متراکم رشد کرده‌اند که دلیل آن را می‌توان سرعت سرمایش بالا در آن منطقه و انجماد جهت‌دار (ستونی) به سمت زیرلایه دانست.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

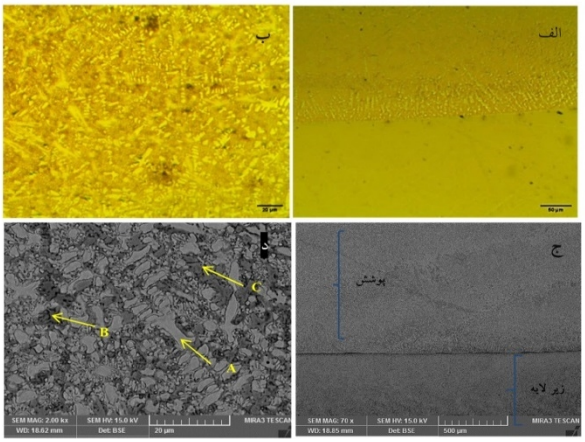


شکل5- الگوی پراش پرتو ایکس پوشش کلمونوی به روش قوس پلاسما

در شکل(6-ب) فازهای تیغه‌ای با فاصله گرفتن از فصل‌مشترک از حالت متراکم خارج و توزیع مناسبی پیدا می‌کنند. فصل‌مشترک روکش درشکل(6-ج) هم سالم و بدون عیب ظاهری است. در شکل(6-د)، همانند روکش پلاسمایی، فازهای روکش با آنالیز نقطه‌ای شناسایی شده‌اند و نتایج در جدول(4) آورده شده است. آنالیز شیمیایی EDS از منطقه روشن فازآستنیت "A"، کاربیدکروم به رنگ خاکستری روشن "C" و فاز بوراید کروم با رنگ خاکستری تیره "B" را مشخص کرد. مطابق انتظار فاز A غنی از نیکل و فازهای B وC رسوبات غنی از کروم هستند. همچنین اختلاف عدد اتمی فاز بوراید کروم را با رنگ خاکستری تیره و بصورت پراکنده در کنار تیغه‌های کاربید کروم خاکستری روشن در مرکز دانه‌های نیکل نشان می‌دهد.

آستنیت نیکل (فاز سفید رنگ) بصورت دندریتی (استخوان‌مانند) با بیشترین مقدار در سطح دیده می‌شود. کاربید کروم و بوراید کروم به صورت گل بوته‌ای بین فاز زمینه نیکل تشکیل شده‌اند.

مورفولوژی رسوبات نسبت به روش PTA تفاوت چشمگیری نشان می‌دهد. باتوجه به سرعت سرد شدن بیشتر در روش قوس تنگستن نسبت به روش قوس پلاسما، فرصت نفوذ کاهش یافته و دانه‌ها و فازهای تشکیل شده ریزتر و مرز بیشتری تشکیل گردیده است.



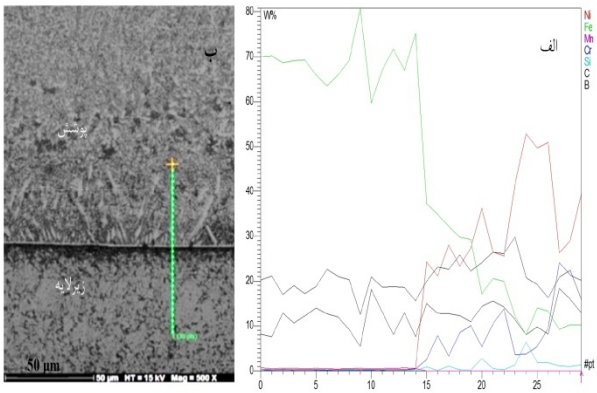
شکل 6- تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی از سطح رویی روکش قوس تنگستن و فصل‌مشترک پوشش آلیاژ کلمونوی: الف وب- تصاویر میکروسکوپ نوری ، ج و د- تصاویر میکروسکوپ الکترونی.

جدول 4- آنالیز عنصری نقطه‌ای روکش کلمونوی به روش قوس تنگستن (نقاط در شکل 6-د با پیکان نشان داده شده اند)، برحسب درصد وزنی

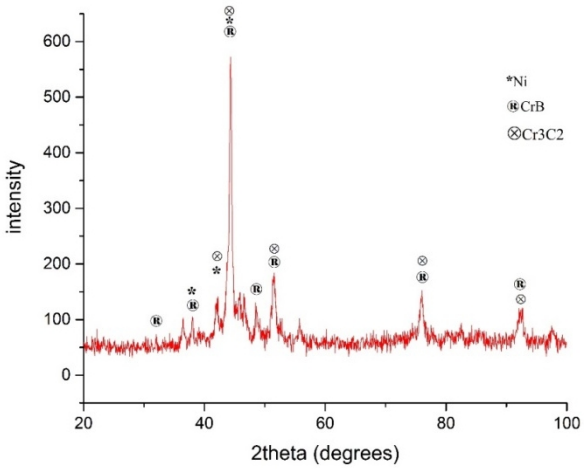
نقطه/عنصر	A	B	C
Si	7/18	2/34	1/41
Cr	9/37	77/98	73/16
Fe	77/99	5/05	6/62
Ni	46/75	13/74	18/40

شکل(7) آنالیز خطی از زیرلایه تا پوشش را نشان می‌دهد. با پیشروی از زیرلایه به سمت پوشش میزان آهن بسیار کاهش می‌یابد، اما در عوض نیکل و کروم افزایشی هستند. بور تقریبا بصورت خطی و کربن افزایشی می‌باشد. همچنین در روش قوس تنگستن رقت بسیار اندک است. در الگوی پراش پرتو ایکس (شکل8) روکش کلمونوی به روش قوس تنگستن نیز می‌توان فازهای تشریح شده در شکل(7) را مشاهده نمود. درجوشکاری انجام شده به روش قوس تنگستن فاز کاربید کروم (Cr_3C_2) با ترکیب شیمیایی متفاوت نسبت به روش قوس پلاسما تشکیل شد که براساس بررسی‌های پیشین [24] می‌توان گفت که سخت‌ترین و متداول‌ترین کاربید تشکیل شده می‌باشد و سختی بیشتری نسبت به کاربید کروم ($Cr_{23}C_6$) در روش قوس پلاسما دارد. همچنین این نوع کاربید مانع از درشت‌دانگی می‌شود. بورایدکروم (CrB) و فاز غنی نیکل (Ni) همانند روش قوس پلاسما مشاهده گردید.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]



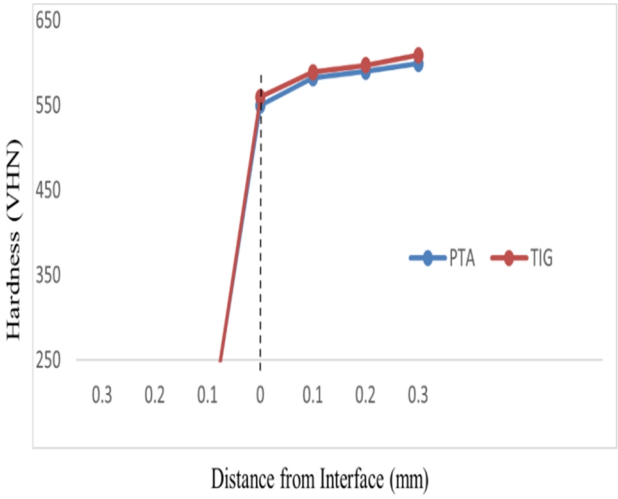
شکل 7- آنالیز خطی از مقطع روکش آلیاژ کلمونوی جوشکاری شده به روش قوس تنگستنی، الف- نفوذ عناصر در فصل‌مشترک و ب- فصل‌مشترک روکش



شکل 8- الگوی پراش پرتو ایکس روکش کلمونوی به روش قوس تنگستن

3-3- مقایسه ریز سختی در روکش‌ها

مقادیر میانگین ریز سختی روکش‌ها و زیرلایه در شکل(9) ترسیم شده است. پیداست که در هر دو روش روکش‌کاری سختی میانگین در روکش، میزان یکسان و هم اندازه‌ای را نشان می‌دهد و هر دو نسبت به زیرلایه تفاوت محسوسی دارند. تشکیل ترکیبات بورایدی و کاربیدی و همچنین محلول جامد غنی از نیکل در روکش کلمونوی علت اصلی بالا بودن سختی در روکش است. مقایسه اعداد سختی روکش (حدود 600) افزایش تقریبا چهار برابری را نسبت به زیرلایه (حدود 150) نشان می‌دهد.



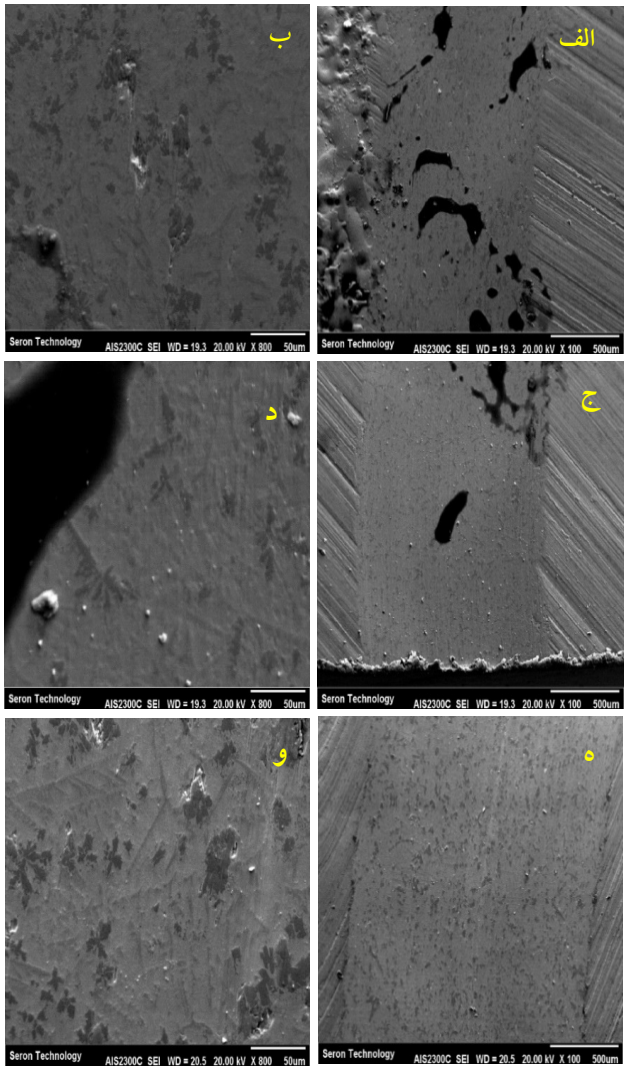
شکل 9- پروفیل سختی میانگین روکش کلمونوی به دو روش قوس پلاسما و قوس تنگستن

3-4- مقاومت به سایش روکش‌ها

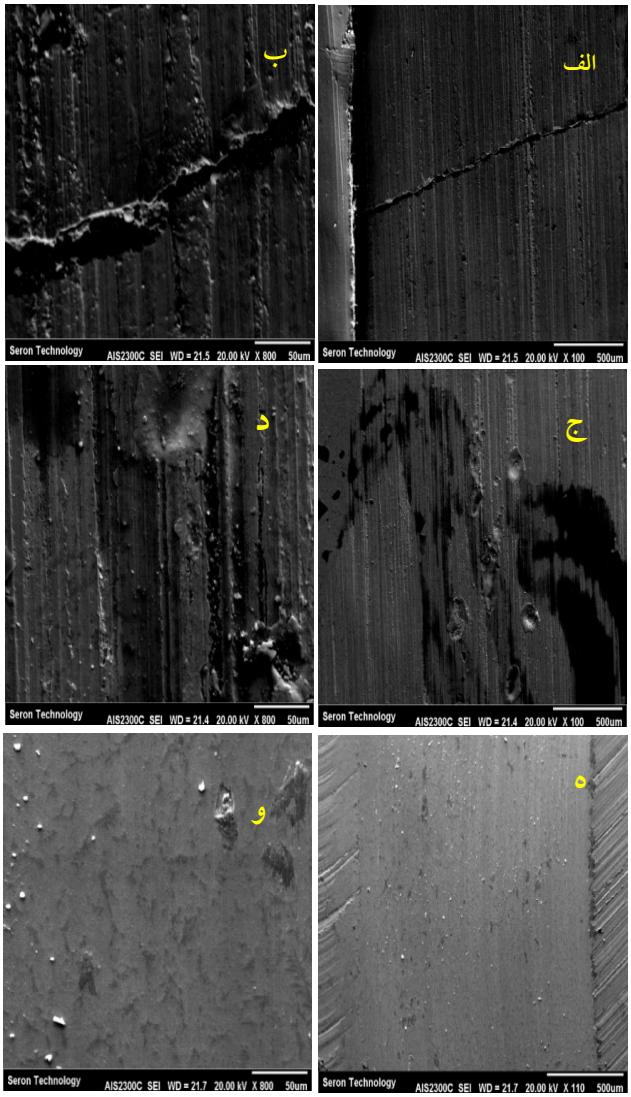
روکش‌کاری کلمونوی بخاطر ویژگی‌های خوب سایشی آن‌ها بر روی آلیاژهای دیگر بسیار گزارش شده است [24-27]. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح نمونه روکش داده شده به روش قوس پلاسما پس از انجام آزمون سایش در سه دمای محیط 25، 300 و 600 درجه سانتی‌گراد در دو بزرگنمایی مختلف در شکل(10) نشان داده شده است.

همانطورکه در شکل(10-الف تا 10-د) مشاهده می‌شود نمونه‌های قوس پلاسما در دمای پایین 25 درجه سانتی‌گراد و 300 درجه سانتی‌گراد یک سطح نسبتاً صاف همراه با کندگی‌هایی به شکل حفرات نسبتاً بزرگ نشان می‌دهد. این کندگی‌ها در نمونه ساییده شده در دمای 600 درجه سانتی‌گراد (شکل ه تا و) مشاهده نمی‌شود. همچنین عرض ناحیه سایشی با افزایش دما بیشتر شده است. این تفاوت را می‌توان به سختی و شکل‌پذیری نمونه در دمای پایین و دمای بالا نسبت داد که در دمای 600 درجه سازوکارهای نرم شدن فعال شده و سختی مانند دماهای پایین افزایش نمی‌یابد و یا به عبارتی شدت کارسختی کمتر است. نتیجه کار تولید زبره‌های سایشی کمتر و نهایتا کاهش وزن نسبی کمتری است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]



شکل 10- تصاویر شیار سایش روکش به روش قوس پلاسما بعد از سایش در دمای محیط (الف و ب)، بعد از سایش در دمای 300 درجه سانتی‌گراد (ج و د)و بعد از سایش در دمای 600 درجه سانتی‌گراد(ه و و)

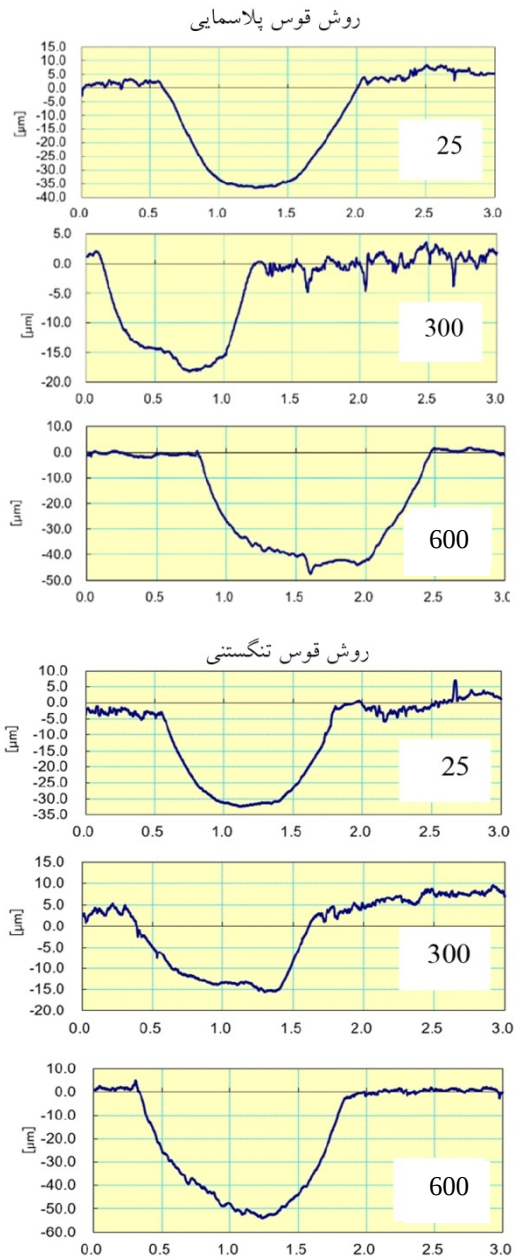


شکل 11- تصاویر شیار سایش روکش کلمونوی به روش قوس تنگستن بعد از سایش در دمای محیط (الف و ب) ، بعد از سایش در دمای 300 درجه (ج و د)و بعد از سایش در دمای 600 درجه (ه و و)

شکل(11)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح روکش در دو بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهد. همانند روش قوس پلاسما سایش در سه دمای محیط انجام شده است. در شکل(11-الف و11-ب)، شیارهای سایشی خراشان دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از ذرات کنده شده و خرد شده روکش باشد. در شکل(11-ج و 11-د) شیارها ناهموارتر و عمیق‌تر شده که ناشی از دمای نسبی بالاتر است. با افزایش دما به 600 درجه عرض ناحیه سایش افزایش بیشتری یافته و بخاطر شکل‌پذیری بهتر و بیشتر در این دما، سطح سایش هموارتر و یکنواخت‌تر شده است.

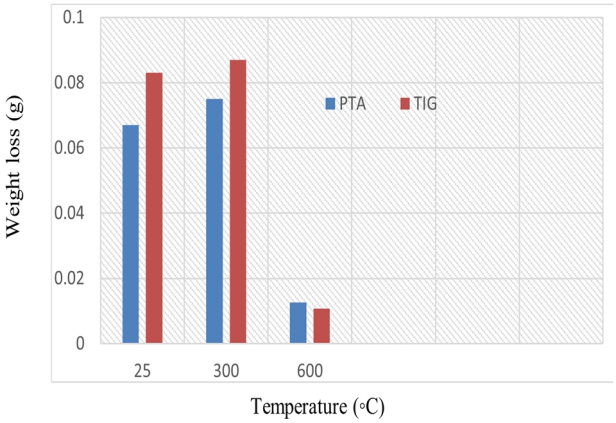
مقایسه عمق سطح سایش (یا تو رفتگی) در هر دو روش در شکل(12) و همچنین کاهش وزن نمونه‌ها در شکل(13) نمایش داده شده است. در هر دمای آزمایش هر دو روش روکش‌کاری، تقریبا رفتار یکسانی را از خود نشان داده‌اند. اما در این میان تاثیر دما نسبتا شدید بوده و کاهش وزن کمتری در دمای 600 درجه در مقایسه با دو دمای دیگر دیده می‌شود. در دمای اتاق در هر دو روش عمق سایش حدود 35-30 میکرون است در حالی‌که در دمای 600 درجه این عمق به حدود 50 میکرون می‌رسد. این رفتار حکایت از تغییر مکانیزم سایش دارد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]



شکل 12- بررسی عمق سایش در دو روش روکش کاری قوس تنگستن و قوس پلاسمایی در دماهای مختلف: دمای اتاق، دمای 300 و دمای 600 درجه. در دمای 600 درجه عمق ساییده شده به مراتب بیشتر است.

بررسی‌های میکروسکوپی سطح سایش نشان داد که در دمای پایین اثرات سایش خراشان در روکش دیده می‌شود در حالی‌که در دمای بالا مکانیزم اصلی سایش در هر دو روش روکش‌کاری تغییرشکل پلاستیکی است که اثر هرنوع خراش و ناهمواری را از بین برده است. لذا در دمای پایین کندگی و برداشتن زبره‌های سایش ایجاد می‌شود در حالی‌که دردمای بالا جابجایی مواد در سطح تماس بصورت تغییر شکل بوده و زبره حاصل نمی‌شود. به همین خاطر سطح سایش در دمای بالا صاف‌تر و هموار به نظر می‌رسد. نتایج به‌دست آمده از اشکال 10 الی 13 کاملا با هم همخوانی داشته و همدیگر را تأیید می‌کنند.



شکل 13- مقایسه کاهش جرم در روکش قوس تنگستن و قوس پلاسما در دماهای مختلف

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف بهبود سختی و مقاومت سایشی فولادساده، روکش آلیاژ کلمونوی6 توسط فرایند جوشکاری به دو روش قوس پلاسما و قوس تنگستن بر روی زیرلایه فولاد ساده کربنی (St37) اعمال شد. خلاصه‌ی نتایج به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- در هر دو روش روکش‌کاری، محلول جامد غنی نیکل بصورت دندریتی و ترکیبات بوراید کروم و کاربید کروم بصورت بین دندریتی در سطح رویی روکش شناسایی گردید. در فرایند جوشکاری به روش پلاسما، کاربید کروم با ترکیب $Cr_{23}C_6$ و در روش تنگستن، کاربید کروم (پایدار و سخت) با ترکیب Cr_3C_2 تشکیل شد و در نتیجه در هر دو روش روکش‌کاری، سختی روکش نسبت به زیرلایه تقریبا تا 4 برابر افزایش یافت.

- آزمون سایش پین بر روی دیسک در سه دمای اتاق، 300 و600 درجه انجام شد. در هر دو روش عمق و عرض مسیر سایش با افزایش دما افزایش یافت. مقاومت به سایش روکش کلمونوی به روش پلاسمایی در دو دمای اتاق و 300 درجه عملکرد بهتری نسبت به روش قوس تنگستنی به نمایش

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]
[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

گذاشت. اما در دمای 600 درجه روکش کلمونوی با روش قوس تنگستنی مقاومت بهتری بروز داد.

- در هر دو روش روکش‌کاری، در دمای پایین مکانیزم سایش خراشان ملایم و در دمای بالا تغییرشکل پلاستیکی ارزیابی گردید.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز برای حمایت مالی تحقیقات از طریق اعطاء پژوهانه طی قرارداد پژوهانه SCU.EM1400.322 و همچنین از زحمات آقای مهندس رضا رفیعی در شرکت بهین کاران چهلستون در اجرای فرایند جوشکاری نمونه ها به روش قوس تنگستن و قوس پلاسمای انتقالی قدردانی و تشکر می گردد.

منابع

1-Reinaldo, P. R., & D'oliveira, A. S. C. M. (2013). NiCrSiB coatings deposited by plasma transferred arc on different steel substrates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *22*, 590-597.

2-Wu, X. (1999). In situ formation by laser cladding of a TiC composite coating with a gradient distribution. *Surface and Coatings Technology*, *115*(2-3), 111-115.

3-Harris, P., & Smith, B. L. (1983). Factorial techniques for weld quality prediction. *Metal Construction*, *15*(11), 661-666.

4-Ramasubbu, V., Chakraborty, G., Albert, S. K., & Bhaduri, A. K. (2011). Effect of dilution on GTAW Colmonoy 6 (AWS NiCr–C) hardface deposit made on 316LN stainless steel. *Materials Science and Technology*, *27*(2), 573-580.

5-Kaul, R., Ganesh, P., Albert, S. K., Jaiswal, A., Lalla, N. P., Gupta, A., Paul, C.P. & Nath, A. K. (2003). Laser cladding of austenitic stainless steel with hardfacing alloy nickel base. *Surface engineering*, *19*(4), 269-273.

6-Corchia, M., Delogu, P., Nenci, F., Belmondo, A., Corcoruto, S., & Stabielli, W. (1987). Microstructural aspects of wear-resistant stellite and colmonoy coatings by laser processing. *Wear*, *119*(2), 137-152.

7-Lim, L. C., Ming, Q., & Chen, Z. D. (1998). Microstructures of laser-clad nickel-based hardfacing alloys. *Surface and coatings technology*, *106*(2-3), 183-192.

8-Das, C. R., Albert, S. K., Bhaduri, A. K., & Kempulraj, G. (2003). A novel procedure for fabrication of wear-resistant bushes for high-temperature application. *Journal of Materials Processing Technology*, *141*(1), 60-66.

9-Ramachandran, C. S., Balasubramanian, V., Varahamoorthy, R., & Babu, S. (2009). Dry sliding wear behaviour of plasma transferred arc hardfaced colmonoy surface. *Surface Engineering*, *25*(6), 440-448.

10-ASM International. Handbook Committee (Ed.). (1992). *Friction, Lubrication, and Wear Technology* (Vol. 18). ASM International.

11-Balaguru, S., & Gupta, M. (2021). Hardfacing studies of Ni alloys: a critical review. *journal of materials research and technology*, *10*, 1210-1242.

12-Gurumoorthy, K., Kamaraj, M., Rao, K. P., Rao, A. S., & Venugopal, S. (2007). Microstructural aspects of plasma transferred arc surfaced Ni-based hardfacing alloy. *Materials Science and Engineering: A*, *456*(1-2), 11-19.

13- Hsieh, C. C., Chen, J. H., Huang, F. T., & Wu, W. (2013). Sliding wear performance of Fe-, Ni-and Co-based hardfacing alloys for PTA cladding. *International journal of materials research*, *104*(3), 293-300.

14-Hemmati, I., Ocelík, V., & De Hosson, J. T. M. (2012). Dilution effects in laser cladding of Ni–Cr–B–Si–C hardfacing alloys. *Materials Letters*, *84*, 69-72.

15-Savanth, T., Singh, J., & Gill, J. S. (2020). Laser power and scanning speed influence on the microstructure, hardness, and slurry erosion performance of Colmonoy-5 claddings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *234*(7), 947-961.

16-Zhang, H., Shi, Y., Kutsuna, M., & Xu, G. J. (2010). Laser cladding of Colmonoy 6 powder on AISI316L austenitic stainless steel. *Nuclear engineering and design*, *240*(10), 2691-2696.

17-Das, C. R., Albert, S. K., Bhaduri, A. K., Sudha, C., & Terrance, A. L. E. (2005). Characterisation of nickel based hardfacing deposits on austenitic stainless steel. *Surface engineering*, *21*(4), 290-296.

18-Jiang, M., Jiang, X. P., Huang, J. G., Sun, X. F., Zhang, J. S., Ge, Y. L., & Hu, Z. Q. (1989). Microstructures of laser cladded iron-, nickel-and cobalt-base coatings. *Materials Letters*, *7*(12), 453-455.

19-Vanaee, M., Ardestani, M., & Abbasi, A. (2019). Gas tungsten arc welding of direct quenched wear resistant steel to plain carbon steel and evaluation of its microstructure and wear properties. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, *4*(2), 13-22 (in Farsi).

20-Shayanfar, P., Daneshmanesh, H., & Janghorban,

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]

K. (2020). The effect of overlapping percent on microstructure and mechanical properties of laser cladding of Inconel 625 powder on ASTM A592 steel. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, *6*(1), 147-156 (in Farsi).

21- Kashani, H., Amadeh, A., & Ghasemi, H. M. (2007). Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies. *Wear*, *262*(7-8), 800-806.

22-Kesavan, D., & Kamaraj, M. (2010). The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating. *Surface and coatings technology*, *204*(24), 4034-4043.

23-Ming, Q., Lim, L. C., & Chen, Z. D. (1998). Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys. *Surface and coatings technology*, *106*(2-3), 174-182.

24-Navas, C., Colaço, R., De Damborenea, J., & Vilar, R. (2006). Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings. *Surface and Coatings Technology*, *200*(24), 6854-6862.

25-Li, Q., Zhang, D., Lei, T., Chen, C., & Chen, W. (2001). Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures. *Surface and coatings technology*, *137*(2-3), 122-135.

26-G.W. Stachowiak, (2007), Tribology Research in Australia, Tribol. Online 2, 14–18.

27-Kwok, C. T., Cheng, F. T., & Man, H. C. (2000). Laser surface modification of UNS S31603 stainless steel.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-02-16]

[DOI: 10.47176/JWSTI.2025.11]