

بررسی اثر اعمال جریان الکتریکی حین کروم‌دهی پودری فولاد AISI 1045

عماد جان نثاری، رضا سلطانی، محمود حیدرزاده سهی

دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۲/۱۲ - پذیرش مقاله: ۹۷/۰۴/۲۷)

چکیده

در این تحقیق، فولاد AISI 1045 به روش سماتاسیون پودری در دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶hr تحت عملیات کروم‌دهی قرار گرفت. همچنین در کنار این نمونه‌ها، نمونه‌های دیگری با بهره‌گیری از اثر جریان الکتریکی (با شدت جریان ۴/۵ آمپر و ولتاژ ۲۰ ولت) کروم‌دهی شدند. ریز ساختار لایه‌های کروم‌دهی شده توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی و پاش سنجی پرتو X مورد بررسی قرار گرفتند و به کمک آن‌ها تفاوت‌های به وجود آمده در هنگام به کارگیری جریان الکتریکی حین پوشش‌دهی نمایان شد. در ادامه ریزسنجی سنجی تحت بار ۲۵ گرم نیرو انجام شد. نتایج نشان داد که با استفاده از جریان الکتریکی در هنگام پوشش‌دهی، ضخامت، یکنواختی و سختی لایه کروم‌دهی شده بیشتر می‌شود، تا جایی که در دمای ۱۱۰۰°C متوسط ضخامت از حدود ۲۸μm به ۳۲μm و سختی لایه از حدود ۸۱۲ به ۸۷۹ ویکرز رسید.

واژه‌های کلیدی: فولاد AISI 1045، سماتاسیون پودری، کروم‌دهی، جریان الکتریکی، سختی.

Effect of Direct Current Field on Powder-Pack Chromizing of AISI 1045

Emad Jannesary, Reza Soltani, Mahmoud Heydarzadeh Sohi

School of Metallurgy and Materials, College of Engineering, University of Tehran

(Received 22 April 2017, accepted 18 July 2017)

Abstract

AISI 1045 steel substrate was pack-chromized for 6hr at 900, 1000 and 1100°C. Pack chromizing was also carried out by applying direct current field between the treated sample and the powder agents (current of 4.5 A and voltage of 20 V). The treated layers were studied by optical and scanning electron microscopes as well as X-ray diffraction technique. Subsequently, in order to evaluate the hardness of the layer, Vickers micro hardness tests were carried out under an applied load of 25 gF. The results showed that by applying direct current field during chromizing, thickness and uniformity of the treated layers are increased. The hardness of the coatings was also increased from 812 to 879 Vickers.

Keywords: carbon steel, electric current, pack chromizing, hardness.

E-mail of Corresponding author: emad_jannesary@ut.ac.ir.

مقدمه

این‌که پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در برخی موارد جریان الکتریکی تأثیرات مطلوبی روی ساختار پوشش داشته است. هدف پژوهش حاضر مطالعه اثر جریان الکتریکی در حین کروم‌دهی پودری فولاد AISI 1045 روی ضخامت و سایر ویژگی‌های لایه ایجاد شده به این روش است.

روش انجام آزمایش

ابتدا نمونه‌هایی از جنس فولاد AISI 1045 در ابعاد $24 \times 14 \times 5$ mm تهیه شدند. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آمده است. بمنظور آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از پوشش‌دهی، سطح آن‌ها با استفاده از ورق‌های سنباده ۸۰ تا ۲۰۰۰ صیقل شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی زیرلایه فولادی.

عنصر	Fe	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C
درصد وزنی	بایه	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۰۲۸	۰/۰۲۳	۰/۵۷	۰/۲۱	۰/۴۸

عملیات کروم‌دهی به مدت ۶ ساعت در دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و به روش سمانتاسیون پودری انجام شد. برای این منظور نمونه‌ها در داخل جعبه سمانتاسیون حاوی مخلوط پودری شامل ۶۹٪ پودر آلومینا (بعنوان پرکننده)، ۶٪ NH_4Cl (بعنوان فعال‌کننده) و ۲۵٪ $FeCr$ با متوسط اندازه ذرات زیر $90 \mu m$ (برای آزاد کردن کروم) قرار گرفت و سپس درپوش جعبه با استفاده از چسب درزگیر آب‌بندی شد. در کنار این نمونه‌ها، سه نمونه فولادی در شرایط مشابه تحت کروم‌دهی همراه با اعمال جریان الکتریکی (با شدت جریان ۴/۵ آمپر و ولتاژ ۲۰ ولت) قرار گرفت. شکل ۱ شماتیکی از اجزای سیستم را نشان می‌دهد.

پس از انجام عملیات پوشش‌دهی به روش سمانتاسیون در دو شرایط بدون اعمال جریان و همراه با اعمال جریان الکتریکی، مقطع عرضی نمونه‌ها تا سنباده ۳۰۰۰ صیقل

در بین روش‌های مقاوم‌سازی سطوح قطعات فولادی، پوشش‌دهی نفوذی از طریق سمانتاسیون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بوسیله آن می‌توان مقاومت به سایش، خوردگی و اکسایش را بهبود بخشید. در این میان، می‌توان به کروم‌دهی به روش سمانتاسون پودری اشاره کرد. ایجاد لایه حاوی کروم روی فولاد ساده کربنی بوسیله فرآیند سمانتاسیون پودری یکی از روش‌های پرکاربرد در صنعت است [۲۰].

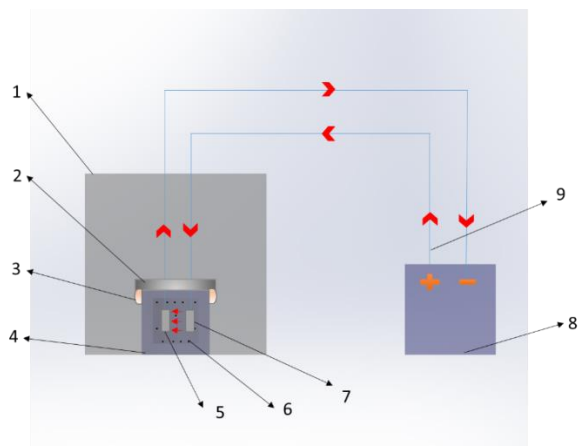
بطور کلی روش پوشش‌دهی نفوذی از طریق سمانتاسیون با توجه به سادگی طراحی و اجرا، کیفیت مناسب سطح قطعات، ضریب اطمینان بالا و همچنین صرفه اقتصادی نسبت به برخی روش‌های پوشش‌دهی، همواره مورد توجه صنعتگران بوده است. در عین حال این تکنیک با محدودیت‌هایی روبرو است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به بالا بودن دمای کاری، کند بودن نرخ نفوذ و سینتیک واکنش‌ها و در نتیجه طولانی بودن مدت زمان مورد نیاز برای پوشش‌دهی اشاره کرد [۳].

یکی از راه‌هایی که در سال‌های اخیر در خصوص توسعه روش سمانتاسیون توسط پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است، بکارگیری میدان الکتریکی مناسب (شامل جریان مستقیم و متناوب) جهت تسریع در فرآیند نفوذ است. در این تحقیقات اثر پارامترهای مختلف میدان الکتریکی (از جمله توزیع، ولتاژ و شدت جریان) بر پوشش‌های ایجاد شده از طریق سمانتاسیون بررسی و همچنین نفوذ اتم‌های مورد نظر در دما و زمان‌های اعمالی متفاوت مطالعه شده است. در همین راستا، تاکنون تحقیقات متعددی روی فرآیندهای نفوذی بوردهی [۴]، آلومینیوم‌دهی [۵] و سیلیسیم‌دهی [۶] به روش سمانتاسیون صورت گرفته است و بر اساس نتایج حاصل شده از این تحقیقات می‌توان نتیجه گرفت که از طریق اعمال جریان الکتریکی ضخامت لایه نفوذی افزایش می‌یابد. ضمن

و بعنوان یک مانع در برابر نفوذ و به دنبال آن رشد پوشش مورد نظر عمل می‌کند [۸ و ۷]. در شکل ۲-ب به نظر می‌رسد که ناحیه نزدیک به سطح یک ناحیه فریتی تهی از کربن است که به دلیل نفوذ کربن به سمت سطح و تشکیل لایه کابیدی (لایه تیره رنگ) در اثر انجام عملیات حرارتی در دمای بالا به مدت نسبتاً طولانی ایجاد شده است.

نکته قابل توجه تفاوت در ساختار نمونه قبل و بعد از عملیات کروم‌دهی است. در شکل ۲-الف که مربوط به نمونه فولادی قبل از عملیات نفوذی است، ساختار ظریف‌تری ملاحظه می‌شود. این تفاوت بیشتر در نزدیکی سطح نمونه مشاهده می‌شود. میانگین اندازه دانه تخمین زده شده برای نمونه خام حدود $28 \mu\text{m}$ بوده است، که بعد از عملیات حرارتی اندازه دانه‌ها به حدود $70 \mu\text{m}$ می‌رسد. این موضوع نمایانگر پدیده رشد دانه‌های آستنیت در اثر قرارگرفتن فولاد در دمای بالا برای مدت زمان نسبتاً طولانی است؛ که یکی از نقاط ضعف عملیات کروم‌دهی فولاد به روش سمانتاسیون پودری به حساب می‌آید. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی فولاد AISI 1045 کروم‌دهی شده تحت دو شرایط بدون اعمال جریان و همراه با اعمال جریان در شکل ۳ نشان داده شده است. میکروساختار این پوشش شامل چند لایه است از مقایسه تصاویر بدست آمده در دو شرایط بدون اعمال جریان و همراه با اعمال جریان در دمای 900°C (شکل ۳-الف و ۳-د) این گونه بر می‌آید که در این دما تشکیل لایه حاوی کروم تنها در صورت استفاده از جریان الکتریکی امکان‌پذیر است. بر اساس تصاویر میکروسکوپی، نمونه‌های کروم‌دهی شده تحت اعمال جریان دارای لایه پیوسته، یکنواخت و نسبتاً ضخیم‌تری هستند، بنحوی که میانگین ضخامت در دمای 1100°C از حدود $28 \mu\text{m}$ به $32 \mu\text{m}$ رسیده است.

شدند. سپس بوسیله پودر آلومینا پولیش و در نهایت با محلول نایتال ۲٪ اچ و توسط میکروسکوپ نوری تصویر برداری شدند. همچنین بمنظور بررسی دقیق‌تر لایه‌ها و تشخیص فازهای تشکیل شده، آزمایش‌های XRD و SEM به ترتیب توسط دستگاه‌های X'Pert Philips و Cam Scan-MV2300 انجام شد. در نهایت بمنظور تعیین سختی لایه‌های تشکیل شده از دستگاه میکروسختی سنج تحت بار ۲۵ گرم نیرو استفاده شد.



شکل ۱. شماتیک سیستم کروم‌دهی: (۱) کوره عملیات حرارتی، (درپوش محفظه، (۳) درزگیر، (۴) محفظه سمانتاسیون، (۵) نمونه {کاتد}، (۶) مخلوط پودری، (۷) الکتروود {آند}، (۸) منبع تغذیه DC، (۹) سیم نسوز رسانا.

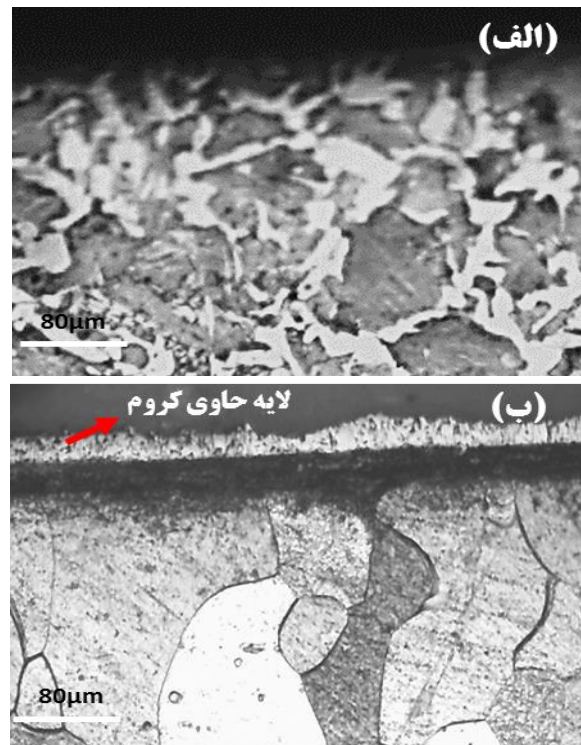
نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی نوری (OM) از سطح مقطع نمونه فولادی قبل و بعد از عملیات پوشش‌دهی در دمای 1000°C به مدت ۶ ساعت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشخص است، ریزساختار نمونه فولادی حاوی پرلیت و فریت است، که پس از انجام عملیات سمانتاسیون یک لایه سفید رنگ که احتمالاً غنی از کروم است روی سطح تشکیل شده است (شکل ۲-ب). این لایه به شکل یکنواخت و پیوسته سرتاسر زیرلایه را در بر می‌گیرد. در زیرلایه سفید رنگ، یک لایه تیره رنگ نیز مشاهده می‌شود محققین بر این باورند که این لایه کابیدی

اضافی را برای اتم‌ها و مولکول‌های مخلوط پودری تأمین می‌کند و موجب ارتعاش شدیدتر اتم‌های موجود در سیستم می‌شود. بنابراین تجزیه ذرات و واکنش‌های شیمیایی بین اجزای سیستم تقویت می‌شود و تحت این شرایط، اکتیویته و غلظت ترکیبات حاوی کروم فعال افزایش می‌یابد، لذا از این طریق سرعت توزیع و رشد لایه‌ی نفوذی افزایش می‌یابد [۴].

اثر میدان الکترومغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی باعث ارتعاش حرارتی اتم‌های نمونه فولادی و جابجایی الکترون‌های اطراف اتم می‌گردد. این نوع اثر می‌تواند در تولید جاهای خالی (عیوبی که برای نفوذ کروم در نمونه مناسب است) مؤثر باشد. اوساكا - کومار^۱ و همکارانش [۹] شواهد مستقیمی را در مورد افزایش غلظت جای خالی، بعنوان یک نتیجه در حین اعمال جریان الکتریکی، در یک سیستم Al-Cu ارائه دادند. بسته به فاکتورهای مانند شدت جریان الکتریکی و دمای اعمالی، میزان تولید جای خالی بطور قابل توجهی متغیر بوده که فاکتور نفوذ کروم را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی از سطح مقطع نمونه‌ها نشان می‌دهد که تعداد حفره‌های ریز در زیرلایه نمونه‌های کروم‌دهی شده تحت اعمال جریان الکتریکی (شکل‌های ۳-د، ه و و) بیشتر از نمونه‌های پوشش داده شده به روش متداول (شکل‌های ۳-الف، ب و ج) است. برخی از این حفره‌های ریز و میکروتخلخل‌ها با علامت پیکان روی تصاویر مشخص شده‌اند. دلیل این رخداد را می‌توان به اثر مهاجرت الکتریکی^۲ و فرآیند تشدید حرارتی ناشی از اعمال جریان الکتریکی ارتباط داد. مهاجرت الکتریکی زمانی رخ می‌دهد که مقداری مومنتوم از یک الکترون متحرک به یک یون فعال مجاور خود انتقال پیدا کند. این موضوع باعث حرکت یون از جایگاه اصلی خود می‌گردد. با گذشت زمان، این نیرو باعث تغییر مکان تعداد قابل



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی نوری از سطح مقطع نمونه فولادی: الف) قبل از عملیات کروم‌دهی و ب) بعد از عملیات کروم‌دهی در دمای 1100°C به مدت ۶ ساعت.

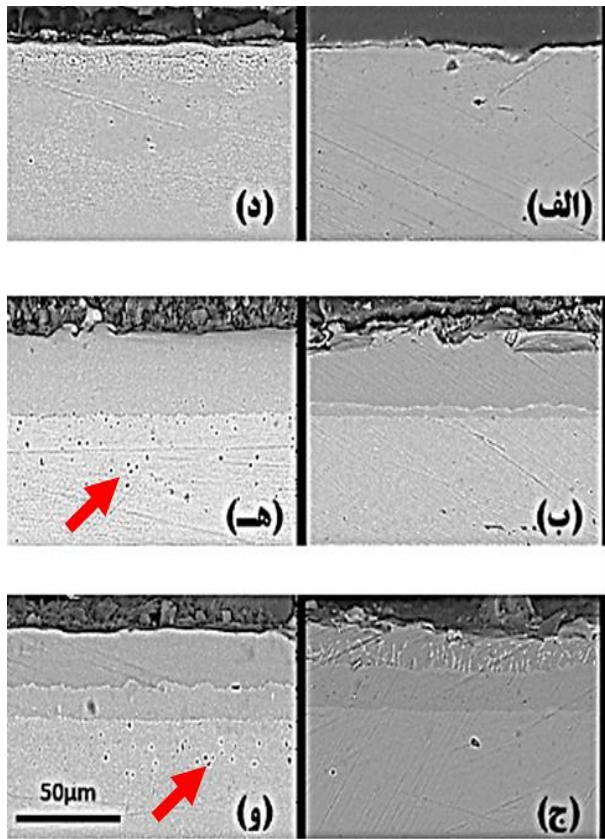
جدول ۲ میانگین ضخامت لایه‌های ایجاد شده در دماهای مختلف تحت دو شرایط همراه با اعمال جریان الکتریکی و بدون اعمال جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اعمال جریان الکتریکی به افزایش ضخامت لایه کروم‌دهی شده منجر می‌شود. بعلاوه دمای لازم برای تشکیل لایه از ۱۰۰۰ به ۹۰۰ درجه سانتیگراد تقلیل می‌یابد.

اعمال جریان الکتریکی مستقیم (DC) منجر به گرم شدن نمونه می‌گردد، لذا از این طریق ضریب نفوذ کروم در نمونه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر اثر حرارتی (یا پتانسیل حرارتی) ناشی از اعمال جریان مستقیم دمای مخلوط پودری اطراف نمونه را نیز افزایش می‌دهد. بالا رفتن دمای ناحیه اطراف نمونه موجب تقویت واکنش‌های شیمیایی در مخلوط پودری یا محیط حاوی عناصر نفوذ کننده و افزایش انرژی گرمایی سیستم می‌شود. همچنین میدان الکتریکی ناشی از اعمال جریان مستقیم، یک انرژی

¹ Asoka-Kumar

² Electromigration effect

شده بدون اعمال جریان حاصل شد. نکته قابل ذکر در نتایج XRD این است که در نمونه کروم‌دهی شده تحت اعمال جریان الکتریکی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد ترکیبی مانند نیتريد کروم (Cr_2N) تشخیص داده شده است. وجود نیتريد کروم در ساختار می‌تواند باعث بالا رفتن سختی پوشش شود.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی نمونه‌های کروم‌دهی شده به مدت ۶ ساعت تحت دو شرایط بدون اعمال جریان در دماهای: الف) $900^{\circ}C$ ، ب) $1100^{\circ}C$ و ج) $1100^{\circ}C$ و همراه با اعمال جریان: د) $900^{\circ}C$ ، ه) $1100^{\circ}C$ و و) $1100^{\circ}C$.

توجهی از اتم‌ها نسبت به مواضع اصلی خود می‌شود [۱۰ و ۱۱].

هنگامی که الکترون‌ها درون فلز هدایت می‌شوند، آن‌ها با نقص‌های داخل شبکه در تعامل قرار می‌گیرند و پراکنده می‌شوند. در واقع پراکندگی و تفرق هنگامی رخ می‌دهد که یک اتم به هر دلیلی از مکان خود خارج شود. انرژی گرمایی تولید شده از تفرق موجب ارتعاش اتم‌ها می‌گردد. این فرآیند، منشأ ایجاد مقاومت در فلزات می‌شود. دمای بالاتر به خروج اتم‌های بیشتر از مکان اصلی منجر می‌شود و در نتیجه شدت تفرق بالاتر و مقاومت ماده بیشتر خواهد شد [۱۲]. فرآیند تشدید حرارتی به روند افزایشی اثر مهاجرت الکتریکی و افزایش موضعی درجه حرارت اشاره دارد. هنگامی که در اثر مهاجرت الکتریکی یک حفره ایجاد شود، با توجه به کاهش سطح مقطع نمونه، چگالی جریان الکتریکی در محدوده اطراف آن افزایش می‌یابد. افزایش موضعی چگالی جریان الکتریکی بعنوان اثر ازدحام جریان معرفی می‌شود. اثر ازدحام جریان به اثرایش موضعی دما در اطراف حفره و فضای خالی منجر شده و تحت این شرایط حفره رشد کرده و مقدار آن در واحد سطح افزایش می‌یابد [۱۲].

بمنظور بررسی دقیق لایه‌های تشکیل شده از مقطع نمونه‌ها، پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) انجام شد. الگوی پراش نمونه‌ها در شکل ۴ دیده می‌شود. الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه کروم‌دهی شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد بدون اعمال جریان الکتریکی نشان می‌دهد که هیچ فاز حاوی کروم روی سطح حاصل نشده است، اما در نمونه کروم‌دهی شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد همراه با اعمال جریان الکتریکی پیک‌های مربوط به فاز کاربید کروم ($Cr_{23}C_6$) رویت می‌شوند. همان‌طور که مشخص است فازها و ترکیباتی مانند کاربید آهن (Fe_2C)، کاربید کروم (Cr_2C و $Cr_{23}C_6$)، نیتريد آهن ($Fe_2N_{0.94}$) و نیتريد کروم - آهن ($(Fe,Cr)_2N_{1-x}$) برای پوشش‌های به وجود آمده در نمونه‌های کروم‌دهی

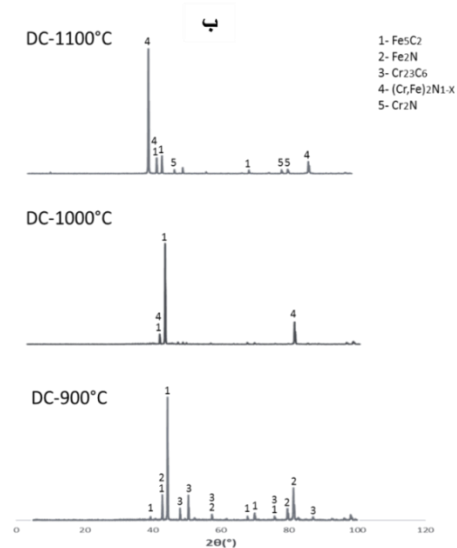
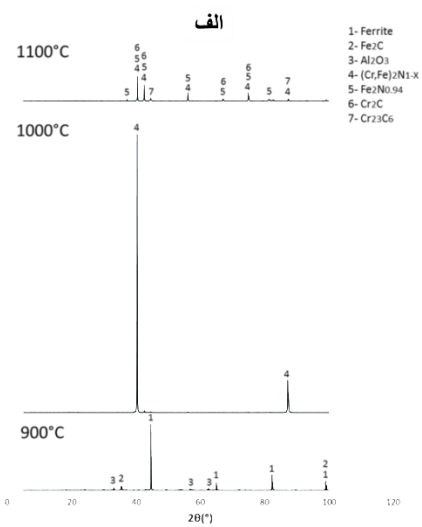
جدول ۲. میانگین ضخامت پوشش ایجاد شده ناشی از فرآیند کروم‌دهی.

کد نمونه	دما (°C)	جریان (A)	ضخامت لایه (µm)
C1	۹۰۰	-	-
C2	۱۰۰۰	-	۲۶±۷
C3	۱۱۰۰	-	۲۸±۴
DC1	۹۰۰	۴/۵	۵±۱
DC2	۱۰۰۰	۴/۵	۳۳±۱
DC3	۱۱۰۰	۴/۵	۳۲±۲

جدول ۳ تغییرات سختی در سطح نمونه‌های کروم‌دهی شده در دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است سختی سطح نمونه‌های کروم‌دهی شده در دمای بالاتر از ۹۰۰°C بیش از چهار برابر سختی زیر لایه اولیه است. برای مثال سختی لایه حاصل در دمای ۱۱۰۰°C حدود ۸۱۲ و در حالت تحت جریان ۸۷۹ ویکرز است. اما سختی فولاد اولیه در دمای محیط حدود ۱۸۰ ویکرز است. این افزایش سختی ناشی از وجود ترکیبات حاوی نیتريد و کاربید کروم در لایه تشکیل شده روی سطح است. زیرا سختی کاربید کروم و نیتريد کروم (بسته به ترکیب فاز و ساختار کریستالی) به ترتیب در محدوده ۹۵۰-۲۲۰۰ و ۱۵۰۰-۲۱۰۰ ویکرز قرار دارد [۱۳ و ۱۴]. همچنین سختی سطح مربوط به نمونه‌های کروم‌دهی شده تحت اعمال جریان الکتریکی کمی بالاتر از نمودار سختی نمونه‌های کروم‌دهی شده بدون اعمال جریان است (برای نمونه‌های قرار گرفته در دمای ۹۰۰°C تفاوت سختی کاملاً محسوس است)، که با توجه به یکنواختی و ضخامت بیشتر پوشش در نمونه‌های تحت اعمال جریان این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۳. متوسط سختی سطح و زیرلایه نمونه‌های کروم‌دهی شده در دماهای مختلف تحت دو شرایط بدون اعمال جریان و همراه با اعمال جریان الکتریکی.

نمونه	دما (°C)	جریان (A)	سختی لایه (HV)
زیرلایه	-	-	۱۸۰±۷
C1	۹۰۰	-	۱۵۰±۸
C2	۱۰۰۰	-	۸۴۴±۱۱
C3	۱۱۰۰	-	۸۱۲±۸۲
DC1	۹۰۰	۴/۵	۵۲۵±۴۳
DC2	۱۰۰۰	۴/۵	۸۶۱±۱۴
DC3	۱۱۰۰	۴/۵	۸۷۹±۹۷



شکل ۴. پراش پرتو ایکس از نمونه‌های کروم‌دهی شده به مدت ۶ ساعت در دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد: (الف) بدون و (ب) با استفاده از جریان الکتریکی.

6. Hu, Jing, *Direct Current Field Effect on Silicon Pack Cementation for 1045 Steel*, Advanced Materials Research, 189(2011).
7. YuM, Lakhtin., *Engineering Physical metallurgy and heat treatment*, Metalurgija Moskva, (1977).
8. Chen-Yi Wei, Fan-Shiong Chen. *Thermoreactive deposition/ diffusion coating of chromium carbide by contact-free method*, Materials Chemistry and Physics, (2005)192–199.
9. J. E. Garay, U. Anselmi-Tamburini, *Electric Current Enhanced Point Defect Mobility in Ni3Ti Intermetallic*, Applied Physics Letters, (2004).
10. Ho, Paul S., and Thomas Kwok. *Electromigration in metals*, Reports on Progress in Physics, 52.3 (1989) 301.
11. Takenaka, Chisato, and Kazuo Nakajima. *Effect of electric current on the LPE growth of InP*, Journal of crystal growth, 108.3-4(1991)519-524.
12. *Electromigration.*, Wikipedia :The Free Encyclopedia.
13. Chattopadhyay, Ramnarayan. *Surface wear: analysis, treatment, and prevention*. ASM international, (2001).
14. Bertrand, G., C. Savall, C. Meunier. *Structural characterisation (AFM and XRD) and hardness of sputtered CrxN_y coatings*, Surface engineering, 14.3(1998)246-249.

نتیجه‌گیری

۱. بکارگیری جریان الکتریکی باعث کاهش دمای کروم‌دهی به روش سمانتاسیون خواهد شد، بنحوی که با استفاده از جریان الکتریکی پوشش کروم در دمای ۹۰۰°C تشکیل خواهد شد.
۲. در اثر اعمال جریان الکتریکی به نمونه در حین انجام عملیات کروم‌دهی فولاد به روش سمانتاسیون پودری، ضخامت و یکنواختی لایه حاوی کروم بیشتر می‌شود.
۳. ایجاد لایه حاوی کروم به روش سمانتاسیون پودری روی سطح نمونه فولادی AISI 1045 در دمای بالاتر از ۹۰۰°C می‌تواند سختی سطح را نسبت به سختی زیرلایه افزایش دهد.
۴. سختی سطح مربوط به نمونه‌های کروم‌دهی شده تحت اعمال جریان الکتریکی بیشتر از سختی نمونه‌های کروم‌دهی شده بدون اعمال جریان الکتریکی است.

مراجع

1. RGI, Leferink, and H. Barten. *Chromium diffusion coatings on low-alloyed steels for corrosion protection under sulphidizing conditions*, VGB Kraftwerkstechnik, 73.3 (1993).
2. Meier, G. H., *Diffusion chromizing of ferrous alloys*, Surface and Coatings Technology, 39 (1989)53-64.
3. Xie, Fei, Li Sun, Jianwei Pan. *Characteristics and mechanisms of accelerating pack boriding by direct current field at low and moderate temperatures*, Surface and Coatings Technology, 206.11 (2012)2839-2844.
4. Xie, Fei, Qiu Hua Zhu, Jin Jun Lu., *Influence of direct current field on powder-pack boriding*, Solid State Phenomena, 118(2006).
5. Zhou, Zhenghua, Fei Xie, Jing Hu., *A novel powder aluminizing technology assisted by direct current field at low temperatures*, Surface and Coatings Technology, 203.1(2008) 23-27.