

ارزیابی اثر عنصر بور بر رفتار خوردگی روکش سخت کامپوزیتی FeCr/B₄C اعمال شده روی فولاد ساده کربنی به روش جوشکاری قوس تنگستن

امیرحسین گمرک چی زاده، کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد

اداره بازرسی فنی و خوردگی فلزات مناطق نفت خیز جنوب

خلیل الله قیصری*، استاد، عضو هیئت علمی رشته مهندسی مواد

سید محمد لاری بقال، استادیار، عضو هیئت علمی رشته مهندسی مواد

محمد رضا توکلی شوشتری، استادیار، عضو هیئت علمی رشته مهندسی مواد

گروه مهندسی مواد دانشکده شهید چمران اهواز

*E-mail: khgheisari@scu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، اثر افزودن بور بر روکش سخت کامپوزیتی FeCr/B₄C اعمال شده به روش جوشکاری قوس تنگستن با گاز خنثی بر روی فولاد ساده کربنی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور روکش کاری، ابتدا الکترودهای مصرفی به روش توپودری از ورق های نازک فولادی ساده و پودرهای آهن، کروم و B₄C با درصد متغیر نیکل صفر تا ۹ درصد وزنی و افزودن ۵ درصد وزنی B₄C استفاده گردید. نتایج ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری، حضور عنصر بور در ترکیب، تشکیل تیغه های فاز پرویوتکتیک Fe₂B به همراه فاز یوتکتیک بین تیغه ها را تایید می نماید، که با افزایش درصد وزنی عنصر نیکل روکش، درصد فاز پرویوتکتیک Fe₂B کاهش و درصد فاز آستنیت زمینه افزایش یافته است.

واژه های کلیدی: کاربرد بور، پوشش سخت کامپوزیتی، خوردگی، جوشکاری قوس تنگستنی

۱ - مقدمه

روکش های سطحی در سال های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است و روش های جدید سعی در بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی آن ها داشته است. روکش کامپوزیتی به طور کلی شامل یک زمینه فلزی و تقویت کننده هایی مانند ذرات فلزات سخت می باشد. از روکش های کامپوزیت سخت، به عنوان یکی از روش های اصلاح سطح و بهبود مقاومت در برابر سایش، با روش هایی همچون پاشش حرارتی، جوشکاری، روکش کاری سطح با استفاده از لیزر و پلاسما استفاده می گردد [۱]. آلیاژهای سخت بر پایه آهن، با غلظت قابل توجهی از C، Cr و یک ریزساختار متشکل از حجم زیادی از کاربیدهای سخت، به دلیل مقاومتی که در برابر سایش و فرسایش دارند و نیز هزینه کمتر نسبت به آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت، اغلب برای روکش کردن سطوح اجزا استفاده می شوند. سیستم آلیاژی Fe-Cr-C به طور موثری در محیط های تهاجمی که در معرض سایش و فرسایش توام با خوردگی قرار دارند، مقاومت مطلوبی از خود نشان داده است [۲].

در سال های گذشته مطالعات فراوانی پیرامون روکش های سرامیک فلز صورت گرفته است که عمدتاً بر پوشش های فلزی شامل ذرات تقویت کننده SiC، Al₂O₃، WC، TiC متمرکز بوده است [۳ و ۴]. همچنین استفاده از عنصر بور به دلیل ایجاد ترکیب های بین فلزی سخت که منجر به افزایش سختی و مقاومت به سایش روکش ها می گردد، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۵-۷]. در برخی از این

پژوهش ها، اثر ترکیبی ایجاد فازهای سخت ناشی از بور و حضور یک ذره تقویت کننده سرامیکی نظیر SiC مورد توجه قرار گرفته است [۵ و ۷]. با وجود این، توجه کمتری به نقش فلز زمینه و تاثیر عناصر آلیاژ در آن بر روی رفتار خوردگی و سایش روکش های کامپوزینی صورت گرفته است. اعمال لایه روکش سخت به روش های متعددی می تواند انجام گیرد. در این میان، روکش های اعمال شده به روش جوشکاری به علت صرفه اقتصادی و در دسترس بودن و دستیابی به ضخامت مطلوب روکش نسبت به سایر روش ها ارجحیت دارند [۸ و ۹].

در این پژوهش، از زمینه فلزی FeCr جهت ایجاد فاز زمینه روکش استفاده شده است. از عنصر کروم به منظور بهره گیری از مقاومت به خوردگی بهره گرفته شده است. از B₄C به عنوان فاز تقویت کننده به دلیل تشکیل فازهای کاربیدی و بورایدی پس از تجزیه B₄C، همچنین بهبود قابل توجه سیالیت مذاب جهت پوشش بهتر سطح و سهولت جوشکاری استفاده گردیده است. با ذکر این مقدمه، هدف این پژوهش بهینه سازی رفتار خوردگی از طریق افزودن عنصر نیکل به جای آهن در فاز زمینه است. همچنین نیکل به منظور کاهش حساسیت به ترک خوردگی ناشی از وجود ذرات سخت کاربیدی و بورایدی دارد مورد توجه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، از فولاد ساده کربنی (St-37) به قطر ۲۵ میلی متر و ضخامت ۱۰ میلی متر به عنوان فلز زیرلایه استفاده شد. به منظور روکش کاری، ابتدا الکترودهای توپودریاز عناصر Fe, Cr, Mn, Si و B₄C مطابق جدول ۱ استفاده گردید. به منظور آماده سازی الکترودها، استوانه ای توخالی از جنس فولاد ساده کربنی (St37)، با ضخامت ۱ میلی متر و با قطر ۵ میلی متر تهیه گردید و قبل از پرکردن آن با پودرهای تهیه شده، استوانه خالی وزن گردید، سپس متناسب با درصد وزنی ذکر شده در جدول ۱، وزن هرکدام از پودرها به طور دقیق اندازه گیری شد و الکترودها با ذرات پودر پر شدند. به منظور ایجاد استحکام نسبی الکترود و کاهش خلل و فرج بین ذرات پودری، الکترودها تحت فرآیند پرس کردن قرار گرفتند. در شکل ۱ تصاویر الکترودهای تهیه شده نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی پودر روکش در الکترودهای تهیه شده

کد نمونه	ترکیب شیمیایی پودر روکش (Wt.%)					
	Fe	Cr	Mn	Si	Ni	B ₄ C
FeCr-Ni ₀ -(B ₄ C) ₅	۷۳	۲۰	۱	۱	۰	۵
FeCr-Ni ₃ -(B ₄ C) ₅	۷۰	۲۰	۱	۱	۳	۵
FeCr-Ni ₆ -(B ₄ C) ₅	۶۷	۲۰	۱	۱	۶	۵
FeCr-Ni ₉ -(B ₄ C) ₅	۶۴	۲۰	۱	۱	۹	۵



شکل ۱. تصویر الکترودهای تهیه شده در این پژوهش.

پس از آماده سازی سطحی فلز زیرلایه و ساخت الکترودها، اقدام به جوشکاری نمونه ها به روش قوس تنگستن با گاز خنثی گردید. در فرآیند جوشکاری، از جریان ۹۰ آمپر DC، ولتاژ ۱۴ ولت، گاز آرگون با جریان ۱۰ فوت مکعب بر ساعت و حرارت ورودی ۷۵۶ ژول بر میلی متر و زمان تقریبی جوشکاری هر نمونه در حدود ۱ الی ۲ دقیقه بهره گرفته شد. جوش ها نیز به صورت حلقوی و در ۳ پاس بر روی سطح فلز زیرلایه اعمال شد.

پس از اعمال پوشش مناسب توسط جوشکاری، آماده سازی سطحی جهت انجام آزمون ها و بررسی ریزساختاری صورت گرفت. لذا ابتدا سطح جوشکاری شده جهت به دست آوردن سطح مقطع مطلوب سنگ زده شد. سپس به سمباده زنی نمونه ها به ترتیب سمباده های ۶۰ تا ۳۰۰۰ پرداخته شد و پس از حصول سطح کاملاً صیقلی، به پولیش سطحی با استفاده از نمد پرداخته شد. پس از آن نیز، با استفاده از محلول اچانت نایتال، سطح نمونه ها اچ گردید.

۳- آزمون ها

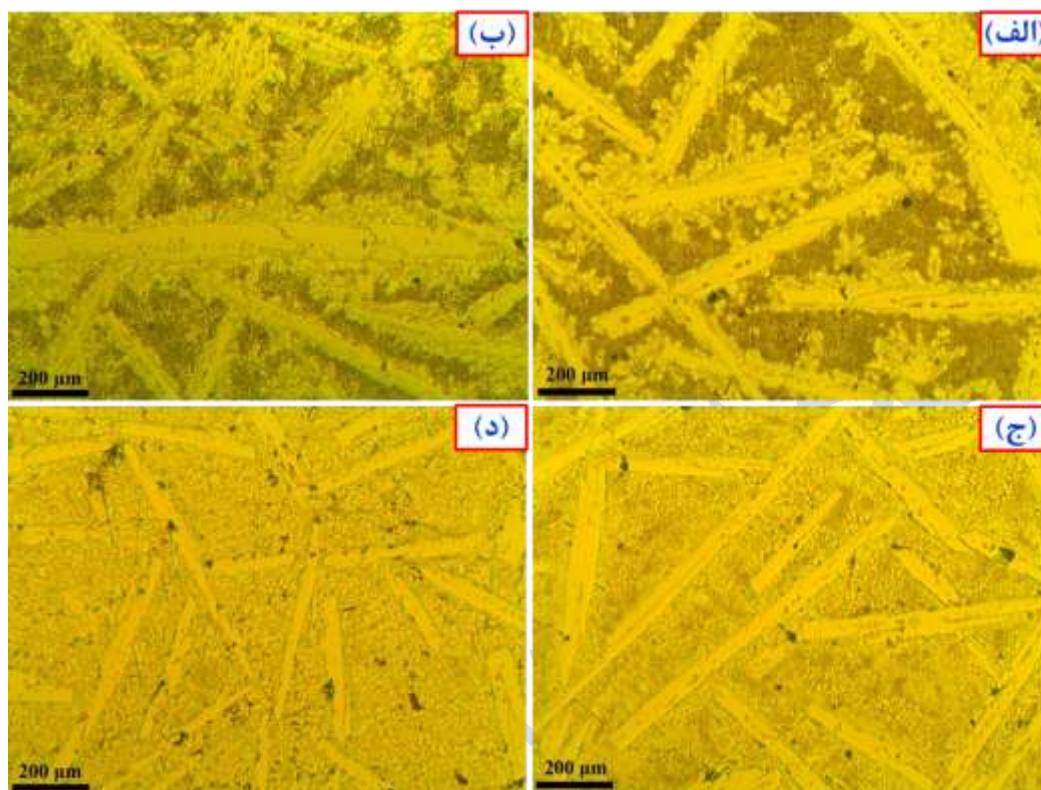
به منظور بررسی ریزساختاری، از میکروسکوپ نوری استفاده شد. آنالیز فازی به کمک روش پراش پرتو ایکس (XRD) با طول موج تابشی ۱/۵۴۲ آنگستروم استفاده شد و داده های به دست آمده به کمک نرم افزار Xpert تحلیل گردید.

جهت ارزیابی رفتار خوردگی پوشش، از آزمون های طیفسنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۱ مولار حاوی ۳/۵ درصد وزنی NaCl استفاده گردید. به این منظور از دستگاه پتانسیواستات مدل Autolab، و یک سیستم الکتروشیمیایی سه الکترودی شامل الکتروود مرجع نقره/کلرید نقره، الکتروود کمکی از جنس پلاتین و الکتروود کاری که همان نمونه های مورد مطالعه است استفاده گردید.

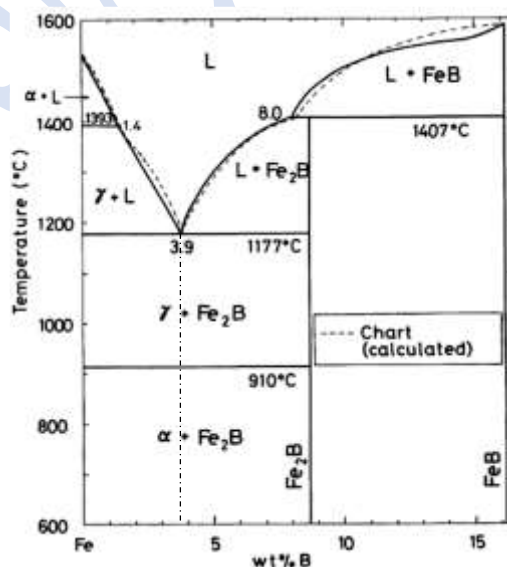
۴- نتایج و بحث

در شکل ۲، تصاویر ریزساختاری گرفته شده با استفاده از میکروسکوپ نوری از روکش های تولید شده با الکتروود حاوی ۵ درصد B₄C در مقادیر نیکل مختلف ۰ تا ۹ درصد وزنی نیکل نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در ریزساختار پوشش حاوی ۵ درصد وزنی B₄C، دانه های ستونی طویلی مشاهده می گردد که بین این دانه ها یک ریزساختار یونکتیک قرار گرفته است. به منظور تحلیل این ریزساختار، نمودار دوتایی آهن - بور مورد استفاده قرار می گیرد که در شکل ۳ نشان داده شده است. با فرض سیستم ساده آهن-بور و با فرض عدم اتلاف بور و با تبدیل درصد اتمی به درصد وزنی، ترکیب ما بایستی حاوی ۳/۹٪ وزنی B باشد. بنابراین انتظار می رود که به صورت کاملاً یونکتیک منجمد گردد. اما شباهت مورفولوژی فاز اولیه ایجاد شده قبل از دمای ۱۱۷۷ درجه سانتی گراد به فاز Fe₂B و همچنین با توجه به شناسایی این فاز در الگوهای پراش که در ادامه خواهد آمد، به نظر می رسد که با

توجه به سرعت شدن بالاتر و غیرتعادلی و نیز حضور کربن، ترکیب یوتکتیک کمی به سمت چپ انتقال یافته و منجر به ایجاد فاز اولیه پرویوتکتیک Fe₂B در ریزساختار گردیده است. بنابراین عملاً، آلیاژ در رده هایدرویتکتیک قرار می گیرد. با توجه به عدم سرد کردن تعادلی نمونه ها و ایجاد جدایش عنصری در طی انجماد پس از جوشکاری، به دانه های ستونی Fe₂B، دانه هایی عمود بر جهت محور آن ها نیز رشد کرده است که احتمالاً ترکیب و ساختار متفاوتی را دارا است.



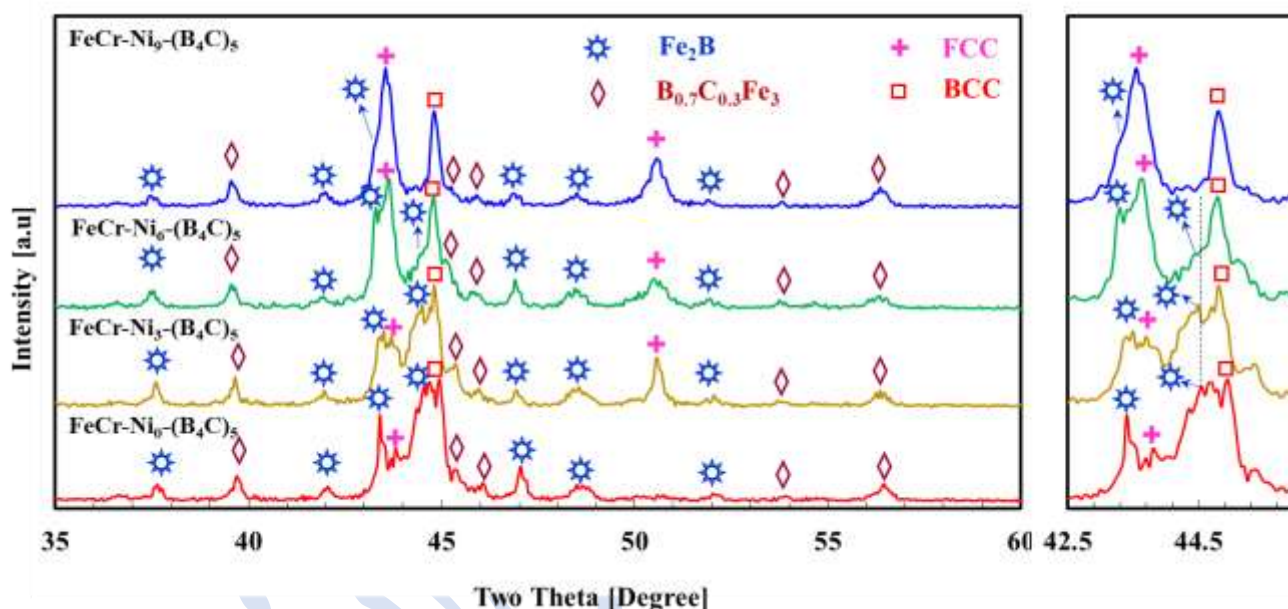
شکل ۲. تصویر میکروسکوپ نوری روکش FeCr/B₄C حاوی (الف) ۰ درصد وزنی نیکل، (ب) ۳ درصد وزنی نیکل، (ج) ۶ درصد وزنی نیکل و (د) ۹ درصد وزنی نیکل.



شکل ۳. دیاگرام فازی آهن-بور.

با توجه به دیاگرام فازی شکل ۳، با انجام فرایند انجماد، باتوجه به درصد بور و آهن موجود در آلیاژ، ابتدا خط انجماد از منطقه دو فازی L+Fe₂B عبور کرده و با ادامه انجماد، فاز مذاب باقی مانده به ترکیب یوتکتیک (γ -Fe₂B) دگرگون گردیده است. با توجه به اینکه فاز γ در دمای ۹۱۰ درجه سانتی گراد در طی یک دگرگونی فازی آلترویی به فاز α دگرگون شده و این دما بسیار بالاتر از دمای دگرگونی پرلیتی در دیاگرام آهن-کربن است؛ بنابراین احتمال دگرگونی یوتکتویدی با وجود درصد کربن بالا، اندک است. بنابراین پیش‌بینی می‌گردد که عنصر کربن در ترکیب ترکیب‌های بین‌فلزی آهن-بور مشارکت نماید و یا ممکن است به صورت ترکیب کاربیدی (Fe₃C) بر روی جوانه‌های اولیه ترکیب بورایدی جوانه‌زنی نماید.

افزایش نیکل، تیغه‌های Fe₂B نازک تر و درصد فاز یوتکتیک بیشتر شده است. به عبارت دیگر، ترکیب آلیاژ به ترکیب نقطه یوتکتیک نزدیک تر گردیده است. بنابراین درصد فاز اولیه پرویوتکتیک Fe₂B کاهش یافته است. از طرف نیکل پایدار کننده آستنیت است. بنابراین محدوده پایداری فاز آستنیت را کاهش می‌دهد و با توجه به سرعت سرد شدن بالای فرایند، ممکن است آستنیت باقیمانده در ریزساختار ایجاد شده باشد. الگوهای پراش به خوبی این موضوع را تایید می‌کند.



شکل ۴. الگوهای پراش پرتو ایکس روکش‌های کامپوزینی تهیه شده در این پژوهش.

در شکل ۴، الگوی پراش پرتو ایکس روکش‌های تولید شده با الکتروود حاوی ۵ درصد B₄C در مقادیر نیکل مختلف ۰ تا ۹ درصد وزنی نیکل نشان داده شده است. با توجه به الگو ۴ فاز BCC، FCC باقی‌مانده و ترکیبات بین‌فلزی Fe₂B و Fe₃C_{0.3}B_{0.7} ظاهر گردیده است. همچنین، با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نیکل، نوع فازها تغییر نمی‌کند اما درصد نسبی آنها تغییر می‌یابد. به طور مشخص فاز FCC با افزایش درصد نیکل افزایش و فاز پرویوتکتیک Fe₂B و فاز BCC کاهش می‌یابد. این تغییرات سازگار با تحلیل ارائه شده ریزساختاری است.

۲-۳. رفتار خوردگی

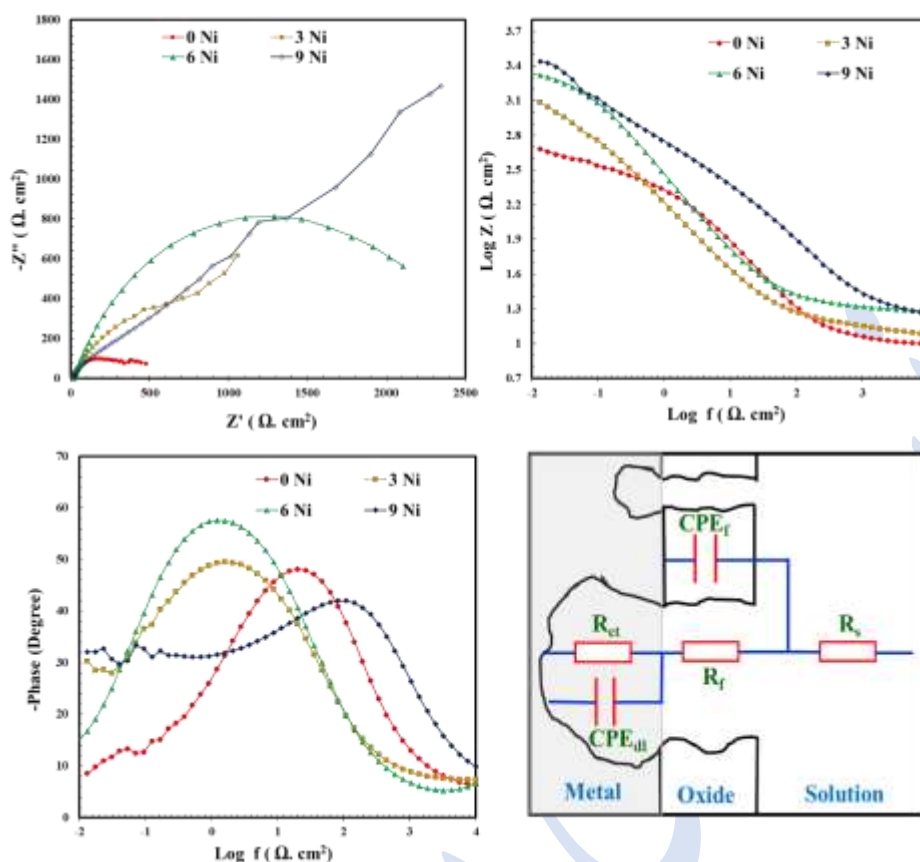
یکی از آزمون‌های مدنظر جهت بررسی خواص خوردگی پوشش‌های اعمالی بر روی نمونه‌ها، آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی می‌باشد که، داده‌های حاصل از این آزمون توسط نرم افزار ZView تحلیل گردید و در قالب نمودارهای نایکوئیست، بد و فاز نمایش داده شده است. همچنین مدار معادل با توجه به حضور دو ثابت زمانی که به طور مشخص در برخی از نمونه‌ها هم در

منحنی فاز و هم نایکوئیست وجود دارد (به غیر از نمونه حاوی ۳ درصد وزنی نیکل که تک ثابت زمانی می باشد)، انتخاب گردید. نمودارهای نایکوئیست، بد و فاز و مدار معادل در شکل ۵ رسم و داده های خوردگی پس از فرایند انطباق سازی بر پایه مدار معادل انتخابی در جدول ۲ آمده است.

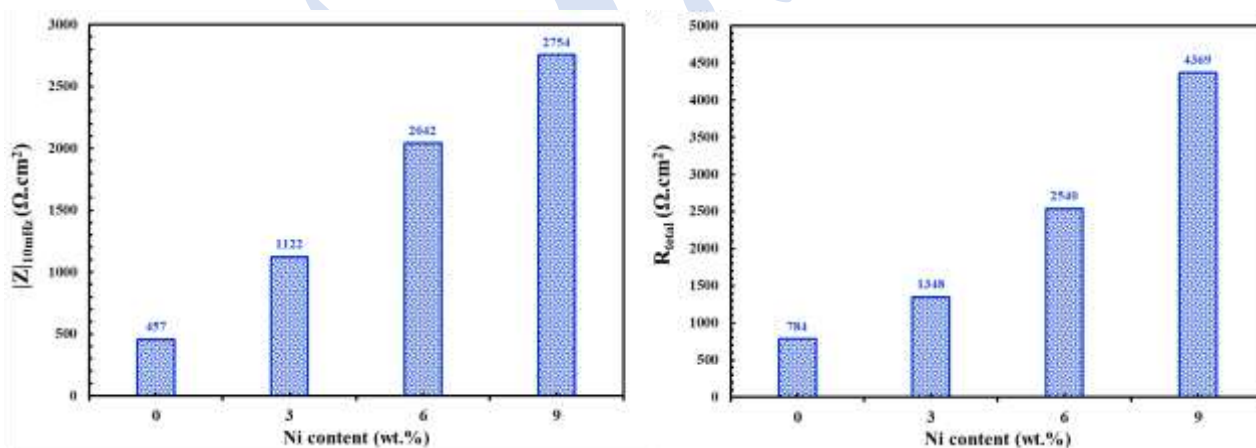
مطابق با نتایج آشکار است که با افزایش درصد وزنی Ni، شعاع حلقه نایکوئیست بیشتر می شود. این امر می تواند نشان دهنده بهبود رفتار خوردگی باشد. به منظور مقایسه کمی مقاومت به خوردگی، از دو شاخص مقاومت کل و اندازه امپدانس در بسامد ۱۰ هرتز استفاده شد. مقاومت کل از داده های شبیه سازی شده بر پایه مدار معادل به دست آمد که از مجموع مقاومت خوردگی (پلاریزاسیون) و مقاومت لایه محافظ اکسیدی به دست می آید. اندازه امپدانس در بسامد ۱۰ هرتز نیز از منحنی بد به دست می آید. هر دو شاخص در شکل ۶ بر حسب درصد نیکل رسم شده است. مشخص است که افزایش نیکل تا ۹ درصد وزنی به بهبود رفتار خوردگی تا میزان ۶ برابرنسبت به نمونه فاقد نیکل انجامیده است. بهبود رفتار خوردگی در اثر افزایش نیکل، می تواند به دلیل پایداری فاز آستنیت در ریزساختار نسبت داده شود. همچنین این بهبود می تواند متأثر از حضور مثبت نیکل در ایجاد رویینگی یا بهبود رفتار رویینگی است.

جدول ۲. پارامترهای الکتروشیمیایی استخراج شده از نمودار امپدانس.

نمونه	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Q_{dl}	n_{dl}	R_f ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	Q_f	n_f	$\text{Log} Z _{10\text{mHz}}$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_t ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
FeCr-Ni ₀ -(B ₄ C) ₅	۴۶۹/۵	۰/۰۰۱۹۳	۰/۶۸۱۱۷	۳۱۵/۲	۰/۰۰۰۸۸۹	۰/۷۵۴۷۲	۲/۶۶	۷۸۴/۷
FeCr-Ni ₃ -(B ₄ C) ₅	۱۳۴۸	۰/۰۰۱۸۰	۰/۶۴۹۶۶	-	-	-	۳/۰۵	۱۳۴۸
FeCr-Ni ₆ -(B ₄ C) ₅	۲۵۱۹	۰/۰۰۰۸۴۱	۰/۷۴۱۲۴	۲۱/۸۲	۰/۰۰۰۱۷	۰/۳۵۴۵۹	۳/۳۱	۲۵۴۰/۸
FeCr-Ni ₉ -(B ₄ C) ₅	۴۰۶۲	۰/۰۰۰۸۵۲	۰/۶۱۱۷۴	۳۰۷/۶	۰/۰۰۰۲۷۹	۰/۶۶۵۶۶	۳/۴۴	۴۳۶۹/۶



شکل ۵. منحنی نایکوئیست، بد و فاز روکش‌ها به همراه مدار معادل استفاده شده در این پژوهش



شکل ۶. نحوه تغییر مقاومت کل و امپدانس در بسامد ۱۰ میلی هرتز بر حسب درصد وزنی نیکل

۵ - نتیجه‌گیری

۱. حضور عنصر بور در ترکیب منجر به تشکیل تیغه‌های فاز پرویوتکتیک Fe_2B گردید. که حضور این تیغه‌ها یکی از دلایل دستیابی به سختی‌های بالا در نمونه‌های با نیکل کم می‌باشد.

۲. با افزایش درصد وزنی عنصر نیکلروکش، درصد فاز پرویوتکتیک Fe_2B کاهش و درصد فاز آستنیت زمینه افزایش یافته است.
۳. با افزایش درصد وزنی عنصر نیکل، مقاومت در برابر خوردگی با افزایش قابل توجه همراه بوده است؛ به طوری که با تفسیر داده‌های آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، افزایش ۶ برابری مقاومت به خوردگی نمونه‌ها مشاهده گردید. بر پایه مقدار امپدانس، مقاومت به خوردگی از $784 \Omega \cdot cm^2$ به $4369 \Omega \cdot cm^2$ پس از اضافه نمودن ۹ درصد وزنی نیکل، افزایش یافته است.

تشکر و قدردانی

در پایان از همکاری اداره بازرسی فنی و خوردگی فلزات شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب آقای مهندس زیدی، آقای مهندس عظیمی، آقای مهندس بخیرزاده جهت فراهم آوردن مقدمات حضور در بیست و سومین گنکره ملی خوردگی و (آقای مهندس رضا کاظمی اسفه که در تدوین و نگارش این مقاله نقش بسزایی ایفا کرد) تشکر را دارم.

مراجع

- [1] Buytoz, S., 2006. Microstructural properties of SiC based hardfacing on low alloy steel. Surface and Coatings Technology, 200(12-13), pp.3734-3742.
- [2] Chen, J.H., Hsieh, C.C., Hua, P.S., Chang, C.M., Lin, C.M., Wu, P.T.Y. and Wu, W., 2013. Microstructure and abrasive wear properties of Fe-Cr-C hardfacing alloy cladding manufactured by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Metals and Materials International, 19, pp.93-98.
- [3] Herbst, S., Williams, S. and Ganguly, S., 2012. A Feasibility Study on Manufacturing of Functionally Graded Structures Using SiC Ceramic Powder in a Steel-Based Matrix by Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). steel research international, 83(6), pp.546-553.
- [4] Hochstrasser, S., Mueller, Y., Latkoczy, C., Virtanen, S. and Schmutz, P., 2007. Analytical characterization of the corrosion mechanisms of WC-Co by electrochemical methods and inductively coupled plasma mass spectroscopy. Corrosion Science, 49(4), pp.2002-2020.
- [5] Mogilevsky, P., Gotman, I., Gutmanas, E.Y. and Kaysser, W.A., 1993. Microstructure and thermal stability of coatings obtained by interaction of SiC and B4C with Cr and Ti powders. Materials Science and Engineering: A, 171(1-2), pp.271-279.
- [6] Öztürk, Z.T., 2021. Wear behavior and microstructure of Fe-C-Si-Cr-B-Ni hardfacing alloys. Materials Testing, 63(3), pp.231-234.
- [7] Mogilevsky, P., Gotman, I., Gutmanas, E.Y. and Kaysser, W.A., 1993. Microstructure and thermal stability of coatings obtained by interaction of SiC and B4C with Cr and Ti powders. Materials Science and Engineering: A, 171(1-2), pp.271-279.
- [8] Lin, H., Ying, L., Jun, L. and Binghong, L., 2014. Microstructure and mechanical properties for TIG welding joint of high boron Fe-Ti-B alloy. Rare Metal Materials and Engineering, 43(2), pp.283-286.
- [9] Correa, EO., Alcântara, NG., Valeriano, LC., Barbedo, ND., Chaves, RR., "The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process", Surface & Coatings Technology, Vol. 276, PP. 479-484, 2015

The Effect of Ni on the Corrosion Behavior of FeCr/B₄C Composite Hard Cladding Applied on Plain Carbon Steel by Gas Tungsten Arc Welding

A.H.GomrokchiZadeh, Kh.Gheisari*, M.LariBaghal, M.TavakoliShoshtari

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

*Email: khgheisari@scu.ac.ir

Abstract:

In this research, the effect of nickel addition on FeCr/B₄C composite hard cladding applied on plain carbon steel was investigated using inert gas tungsten arc welding. Consumable electrodes were prepared by filling the thin steel sheets with powders of iron, chromium, and B₄C with varying weight percentages of nickel from 0 to 9%. The microstructural analysis using an optical microscope confirmed the presence of Fe₂B proeutectic phase blades along with the eutectic phase between the blades. As the weight percentage of nickel increased from 0 to 9%, the corrosion resistance of the coating improved significantly, increasing from 784 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ to 4369 $\Omega \cdot \text{cm}^2$. Furthermore, as the Ni content of the cladded materials increases, the austenite phase increases and the Fe₂B proeutectic phase blades decrease.

Keywords:

Boron carbide, Composite hard cladding, Corrosion, Tungsten arc welding

نسخه‌ای پیش‌الکترونیک