

ارزیابی رفتار سایشی و خوردگی پوشش‌های بوراید و بوروکروماید ایجاد شده بر سطح فولاد زنگ‌زن آستنیتی ۳۱۶L

وحید صمدی و علی حبیب‌اله‌زاده

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان

چکیده

در این تحقیق اثر پوشش‌های بوراید و بوروکروماید بر میکروسختی، خواص سایشی و مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌زن آستنیتی کم کربن (AISI 316L) مورد مطالعه قرار گرفت. پوشش‌دهی با استفاده از روش سماتاسیون جامد انجام شد. برای ارزیابی رفتار سایشی نمونه‌ها از آزمایش سایش پین روی دیسک در دو نیروی ۷۵ و ۱۱۵ نیوتن استفاده شد. آزمون خوردگی به روش غوطه‌وری در محلول‌های ۱۰ درصد حجمی از اسید کلریدریک و اسید سولفوریک بر روی نمونه‌های خام، بورونایز و بوروکروماید شده صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهند که نمونه با پوشش بوروکروماید سختی سطحی بالاتر و رفتار سایشی مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌های خام و نمونه‌های با پوشش بوراید دارد. همچنین سایش خستگی - اکسایشی به عنوان مکانیزم اصلی در تخریب لایه‌های سطحی در نمونه‌های پوشش‌دار شناخته شد. نمونه با پوشش بوروکروماید از مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به نمونه با پوشش بوراید برخوردار بوده ولی از این لحاظ تا حدودی شبیه نمونه خام می‌باشد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L، بوردهی، بور-کروم‌دهی، میکروسختی، خواص سایشی، مقاومت به خوردگی

Evaluation of wear and corrosion behaviors of boride and borochromized coatings formed on 316L austenitic stainless steel

Vahid Samadi and Ali Habibolahzade

Materials Engineering Department, Faculty of Engineering, Semnan University

Abstract: Effect of boriding and borochromizing treatments on microhardness, wear properties and corrosion resistance of austenitic low carbon stainless steel (AISI 316L) has been studied. Coating was applied by using of pack cementation method. The pin on disk test was employed at two loads of 75 and 115N to evaluate the wear behavior of the samples. Corrosion test was performed by using of immersion method in (10 vol.%)HCl and (10 vol.%)H₂SO₄ acid solutions on uncoated, borided and borochromized specimens.

The results reveals that specimen with borochromized coating provides higher surface hardness and more desirable wear behavior in respect to uncoated and borided specimens. Fatigue-oxidation wear mechanism is also found as the main deterioration mechanisms of surface layers in coated specimens. Borochromized specimen has Also higher corrosion resistance in comparison with the borided specimen, although, it has, in some extend, similar corrosion behavior to that of the substrate.

Keywords: 316L stainless steel, boriding, borochromizing, microhardness, wear properties, corrosion resistance.

E-mail of corresponding author (s): vahid_samadi62@yahoo.com, Ahabibolahzadeh@Semnan.ac.ir

مقدمه

یکی از مؤثرترین روش‌ها برای پیش‌گیری از بروز آسیب‌های سطحی زودرس، انجام عملیات سطحی و یا اعمال پوشش‌های مناسب بر سطح مواد می‌باشد به نحوی که بتوان ضمن حفظ خواص مکانیکی قطعات در حد قابل قبول، مجموعه‌ای از خواص نظیر مقاومت سایشی، مقاومت حرارتی، مقاومت خستگی و حتی مقاومت خوردگی را به طور هم‌زمان در سطح قطعه فراهم نمود [۱ و ۲]. یکی از چنین فرایندهای پوشش‌دهی سطحی، بوردهی است. این فرایند صرفاً پس از ابداع روش بوردهی پودری توانست در صنعت توسعه پیدا کند [۳ و ۴]. در این فرایند اتم‌های بور به سطح قطعه نفوذ کرده و موجب تشکیل لایه‌های بوراید آهن تا ضخامت ۱۵۰ میکرومتر می‌شوند. البته این ضخامت متأثر از حضور عناصر آلیاژی در فولاد نیز می‌باشد به نحوی که با افزایش درصد عناصر آلیاژی ضخامت لایه‌های بوراید کاهش می‌یابد [۵ و ۶]. لایه‌های بوراید به دلیل داشتن سختی بالا در حد ۳۰۰۰-۲۰۰۰ ویکرز، می‌توانند مقاومت به سایش را تا چند برابر بهبود دهند [۷]. در این راستا جهت بهبود هرچه بیشتر خصوصیات لایه‌های بوراید از فرایندهای دمرحله‌ای شامل بوردهی و نفوذ یک عنصر دیگر نظیر کروم، تیتانیم و یا وانادیم نیز می‌توان بهره برد. چنین فرایندهایی موسوم به عملیات دوگانه پوشش‌دهی سطحی می‌باشند [۸].

از طرف دیگر عموماً فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را نمی‌توان با عملیات‌های حرارتی مرسوم سخت نمود تا بتوان از این طریق مقاومت به سایش آنها را افزایش داد، به همین علت نیز این فولادها صرفاً در کاربردهای نیازمند به مقاومت خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. با این وجود، برخی اوقات هر دو خاصیت مقاومت خوردگی و مقاومت سایشی در این فولادها، نظیر سیلندرها و قالب‌های تزریق پلاستیک، صفحات نازل توربین بخار، سری انژکتور مشعل‌های فولادی مورد استفاده در صنایع شیمیایی و ... ضروری می‌باشد [۵ و ۱۰]. با توجه به این موضوع، در تحقیق حاضر به بررسی اثر فرایند بوردهی

پودری و نیز اثر عملیات دوگانه بور-کروم‌دهی پودری بر سختی سطح و مقاومت به سایش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L پرداخته شده است. ضمن این که با عنایت به خاصیت اصلی این فولادها یعنی مقاومت به خوردگی، اثر این نوع پوشش‌ها بر رفتار خوردگی این فولاد در دو محیط اسید کلریدریک و اسید سولفوریک نیز بررسی شده است.

مواد و روش تحقیق

از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI ۳۱۶L، با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱، به عنوان ماده پایه برای انجام آزمایشات پوشش‌دهی استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای از این فولاد با قطر ۲۸ mm و ضخامت ۶ mm برش خورده و سطوح آنها تا سنباده ۱۲۰۰ آماده‌سازی شدند. سپس نمونه‌ها توسط اتیلن‌گلیکول تمیز شده و در هوا خشک شدند. از روش سمانتاسیون جامد برای عملیات بوردهی و نیز عملیات بور-کروم‌دهی استفاده شد. برای انجام عملیات بوردهی از ترکیب پودری شامل B_4C (۱۰ wt %)، KBF_4 (۱۰ wt %) و SiC (۸۰ wt %) و برای عملیات کروم‌دهی از ترکیب پودری شامل Cr (۲۵ wt %)، NH_4Cl (۶ wt %) و Al_2O_3 (۶۹ wt %) استفاده شد. عملیات بوردهی بر روی نمونه‌های خام در دمای $1000^\circ C$ به مدت ۶ ساعت [۱۱] انجام شد. در طی عملیات دوگانه بور-کروم‌دهی، ابتدا نمونه‌های خام به مدت ۴ ساعت در $1050^\circ C$ تحت اتمسفر آرگون در مخلوط پودر کروم‌دهی قرار گرفته [۱۱] و سپس به مدت ۶ ساعت در $1000^\circ C$ در مخلوط بوردهی قرار داده شدند. پس از پوشش‌دهی، متالوگرافی سطح مقطع لایه سخت شده نمونه‌ها با برش و مانت گرم و با استفاده از محلول ۲٪ نایتال انجام شد. مورفولوژی فصل مشترک پوشش و زیرلایه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفت و تغییرات سختی نمونه‌ها از سطح تا عمق ۱۹۰ میکرومتر، توسط میکروسختی سنج ویکرز تحت بار ۵۰ گرم تعیین شد.

برای تعیین مقاومت سایشی از دستگاه سایش پین روی دیسک، مطابق با استاندارد ASTM G99-04، استفاده

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (درصد وزنی)

steel	%C	%Cr	%Ni	%Si	%Mn	%Mo	%S	%P
AISI 316L	≤۰/۰۳	۱۶/۱۹	۸/۹	۰/۳۳۱	۱/۰۵	۱/۹۸	۰/۰۱۸	۰/۰۳۷

لایه سوم قابل توجه است که به حضور یک ناحیه نفوذ مرزخانه‌ای (ناحیه چهارم) در این نمونه اشاره می‌کند. سختی بالاتر در لایه‌های سطحی به دلیل نفوذ بور و یا بور و کروم در سطح و به تبع آن تشکیل لایه بوراید و یا لایه بوروکروماید در آن نواحی است. دلیل سختی کمتر در سطح نمونه‌های بورونایز شده به ناحیه‌ای با ضخامت کم در سطح پوشش‌های بوراید که دارای ساختار بلوری نامنظم هستند، نسبت داده شده است [۱۲]. با توجه به منحنی‌های سختی در شکل ۲ می‌توان به دو نکته اشاره نمود؛ اولاً این که، با فرض سختی ۵۵۰ ویکرز به عنوان معیاری برای عمق سخت شده، عمق سخت شده در نمونه بوروکروماید شده حدود ۳۵ میکرون بوده که کمتر از عمق سخت شده در نمونه بورونایز شده (۷۰ میکرون) است. کم بودن عمق سخت شده در نمونه بوروکروماید شده مرتبط با افزایش درصد کروم سطحی در طی مرحله اول پوشش‌دهی یعنی عملیات کروم‌دهی می‌باشد که در مرحله بعدی بوردهی، سرعت نفوذ بور به داخل سطح ماده پایه را کاهش می‌دهد [۱۳]. این موضوع را با دقت در ضخامت کمتر دو لایه اول نمونه بوروکروماید شده در مقایسه با نمونه بورونایز شده در شکل ۱ نیز می‌توان دریافت. ثانیاً مشاهده می‌شود که بیشینه سختی پوشش در نمونه بوروکروماید شده (۲۰۱۲ ویکرز) در مقایسه با نمونه بوردهی شده (۱۶۴۸ ویکرز) بالاتر می‌باشد که این مطلب در تطابق با نتایج دیگر محققین [۱۴] نیز می‌باشد. این موضوع به مقادیر بیشتر فاز CrB سخت تشکیل شده روی سطح نمونه بوروکروماید شده، به علت میزان کروم بیشتر حاصل از عملیات قبلی، برمی‌گردد.

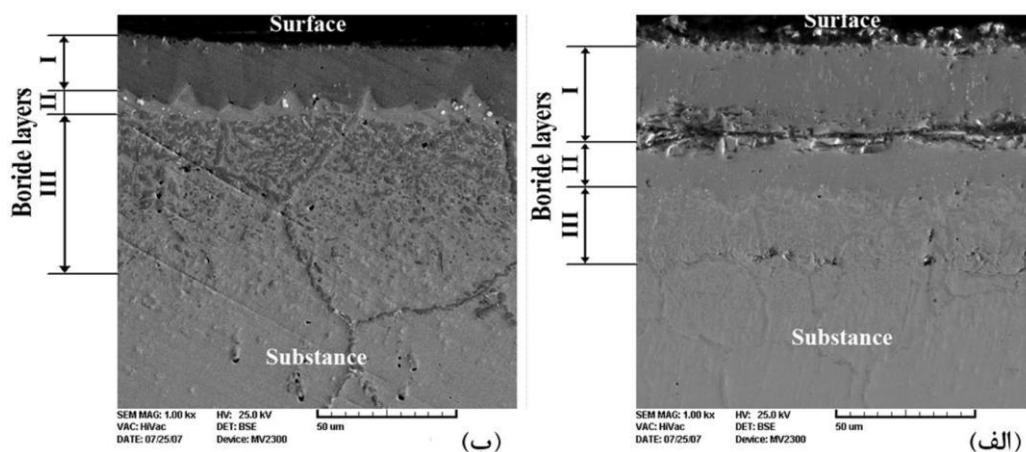
به علاوه بر اساس گزارشات موجود [۱۵] کروم سختی لایه بوراید را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، نتایج بررسی‌های دیگر محققین [۱۰] نشان می‌دهد که با افزایش میزان عنصر آلیاژی کروم نسبت فاز سخت تر FeB به Fe₂B در پوشش‌های بوراید افزایش می‌یابد.

شد. پین مورد استفاده از جنس فولاد AISI ۵۲۱۰۰ به شکل استوانه‌ای با قطر ۵ میلی‌متر با سختی RC ۶۴ ($\cong 800$ ویکرز) بود. مسافت سایش برابر با ۱۰۰۰ متر انتخاب شد و کاهش وزن پس از هر ۱۰۰ متر توسط ترازویی با دقت 1×10^{-4} گرم اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها با سرعت خطی متوسط 0.1 m/s (100 rpm) در دمای محیط و رطوبت ۳۵-۳۰٪ و تحت بارهای ۷۵ و ۱۱۵ نیوتن انجام شد. مورفولوژی شیار سایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت و برای تعیین ترکیب شیمیایی در سطح سایش از دستگاه آنالیز EDS استفاده شد.

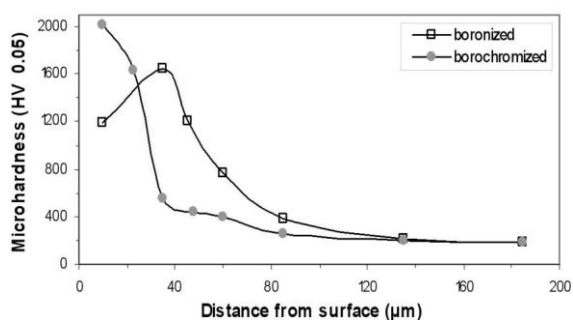
آزمون خوردگی به روش غوطه‌وری و بر اساس استاندارد ASTM G31-72 انجام شد. محلول‌های اسیدی مورد استفاده در این تحقیق محلول‌های ۱۰ درصد حجمی از اسید کلریدریک و اسید سولفوریک بودند. آزمایشات در دمای محیط و به مدت ۹۶ ساعت (۴ روز) انجام شدند. در هر ۲۴ ساعت قطعه‌ها از محلول بیرون آورده شده و پس از شستشو با آب مقطر و خشک کردن، بدون هرگونه عملیات اضافی، وزن شدند.

یافته‌ها و بحث

میکروگراف‌های مقطع عرضی از فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L بورونایز و بوروکروماید شده با سه لایه مجزا در شکل ۱ نشان داده شده است. با دقت در نحوه تغییرات میکروسختی با افزایش فاصله از سطح این نمونه‌ها (شکل ۲) مشاهده می‌شود که بیشترین میزان سختی اندازه‌گیری شده در هر دو نمونه مربوط به لایه‌های اول و دوم می‌باشد و با افزایش فاصله از سطح به سمت ماده پایه (در لایه سوم) به سرعت از این میزان کاسته می‌شود. بنابراین لایه سوم یک لایه نفوذی است که ترکیب آن به تدریج به ترکیب ماده پایه تغییر می‌یابد. به علاوه برخی رسوب‌ها در مرزخانه‌های نمونه بوروکروماید شده در زیر



شکل ۱- پروفیل‌های میکروسختی اندازه‌گیری شده روی سطح مقطع نمونه‌های پوشش داده شده.

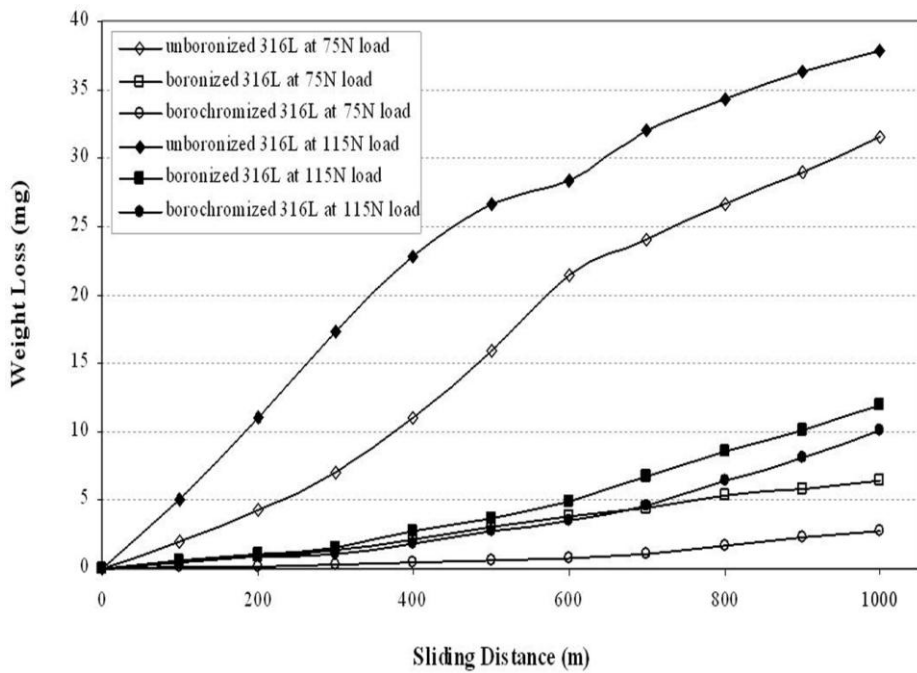


شکل ۲- نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت حاصل از آزمون سایش نمونه‌ها در دو نیروی اعمالی ۷۵ و ۱۱۵ نیوتن.

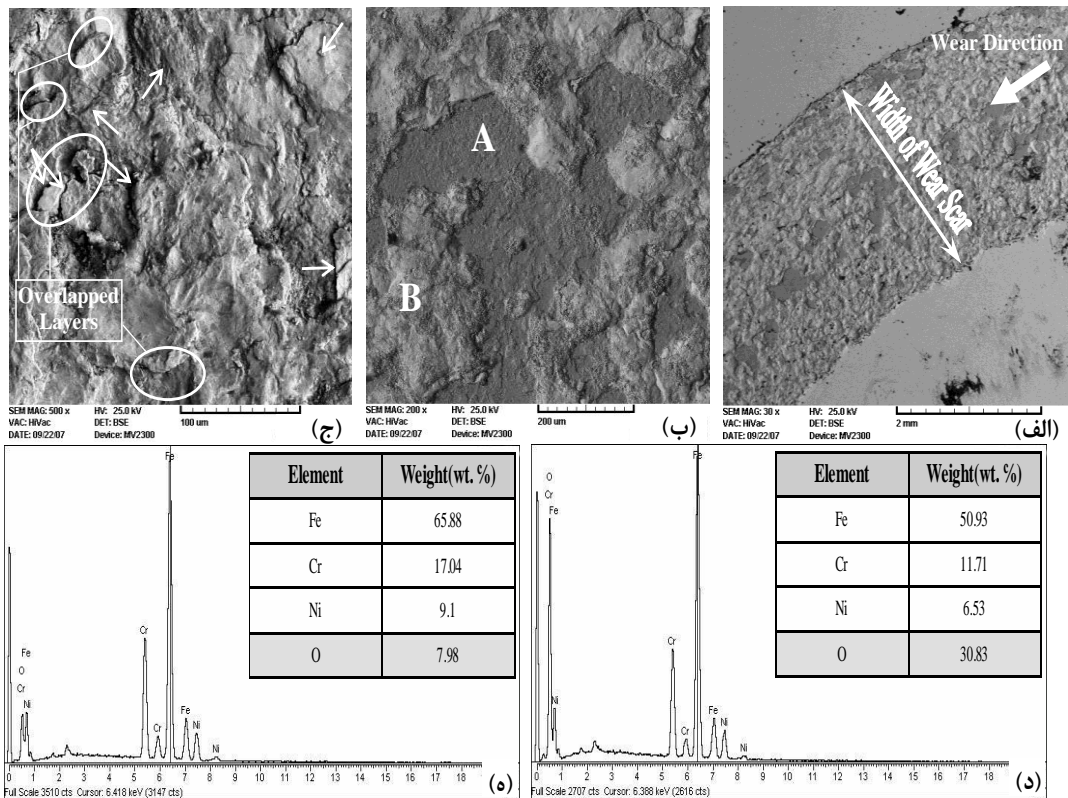
نکته قابل توجه در شکل ۳، منحنی مربوط به نمونه خام می‌باشد که شیب کاهش وزن آن در اوایل آزمون سایش زیاد بوده و سپس کاهش می‌یابد که این موضوع در نمونه‌های پوشش‌دار مشاهده نمی‌شود. با عنایت به سختی بالاتر پین نسبت به نمونه خام، این پدیده به بروز کارسختی حاصل از تغییرشکل مومسان در سطح فولاد نسبت داده می‌شود که مخصوصاً بروز آن در فولادهای آستنیتی قابل انتظار است. به نحوی که در اثر تداوم تغییر شکل، سطح نمونه خام به مرور کارسخت شده و سختی سطح آن افزایش می‌یابد و بدین ترتیب در اواخر آزمون از میزان کاهش وزن آن کاسته می‌شود. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده نمونه خام را پس از انجام آزمون سایش در نیروی ۱۱۵ نیوتن نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ج مشاهده می‌شود در بار اعمالی ۱۱۵ نیوتن شدت آسیب‌های سطحی باعث روی

با توجه به نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت حاصل از انجام آزمون‌های سایش بر روی نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دهی شده (شکل ۳)، مشاهده می‌شود که در اثر افزایش سختی سطحی، از میزان سایش نمونه‌ها کاسته می‌شود. علاوه بر این، نتایج آزمون‌های سایش نشان می‌دهند که با افزایش نیروی اعمالی از ۷۵ به ۱۱۵ نیوتن میزان کاهش وزن نمونه‌ها افزایش یافته است که این امر ناشی از افزایش سطوح درگیر میان نمونه (دیسک) و پین در اثر افزایش نیروی اعمالی و نیز تولید حرارت بیشتر در اثر افزایش درگیری میان سطوح نمونه و پین است. واضح است که بالارفتن موضعی دما در حین سایش، امکان تشکیل و گسترش فیلم‌های اکسیدی را در سطح تماس پین و نمونه فراهم می‌نماید (بروز این موضوع با توجه به نتایج EDS نشان داده خواهد شد) و در ادامه فرایند این لایه‌های اکسیدی در اثر تنش‌های تماسی ترک خورده و از سطح جدا می‌شوند که نتیجه آن تشدید تخریب‌های سطحی در بار اعمالی بالاتر می‌باشد.

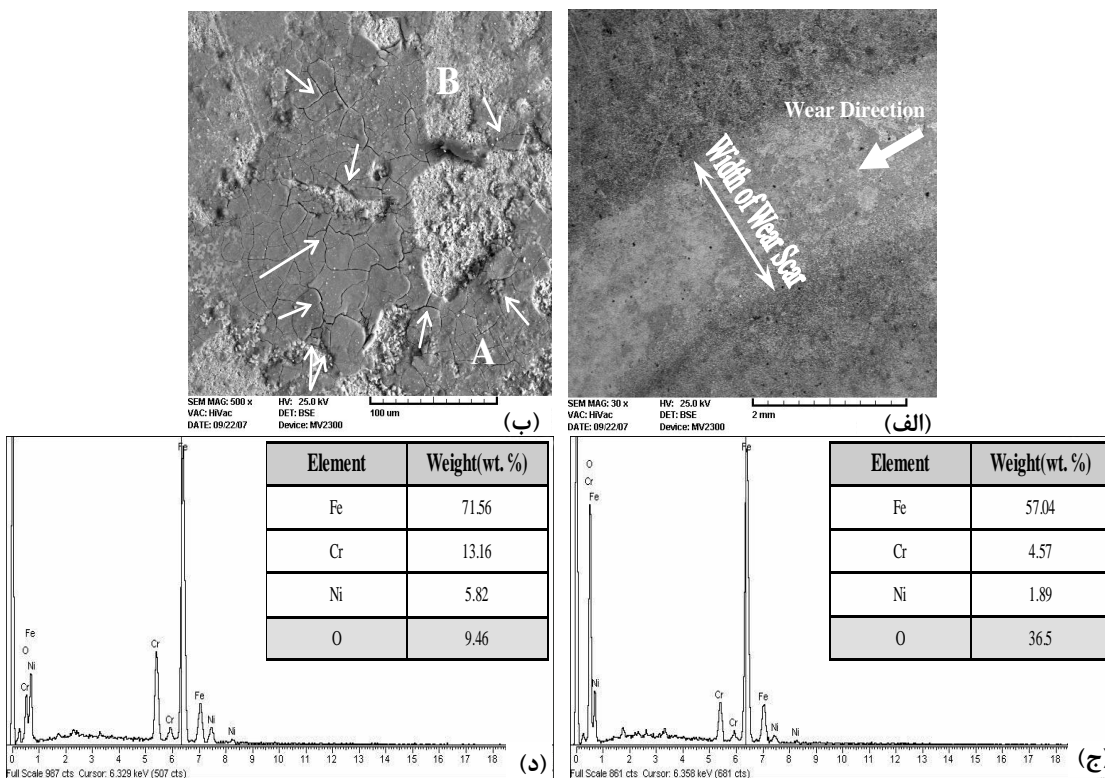
کمترین کاهش وزن مشاهده شده در آزمون سایش، در هر دو نیروی اعمالی، مربوط به نمونه بوروکروماید شده می‌باشد. دلیل مقاومت سایشی بالاتر این نمونه در مقایسه با نمونه بوروناید شده می‌تواند مرتبط با سختی بالاتر آن (شکل ۲)، تردی بیشتر نمونه بورایدی [۱۴] و همچنین چسبندگی بهتر پوشش بوروکروماید به زیرلایه باشد.



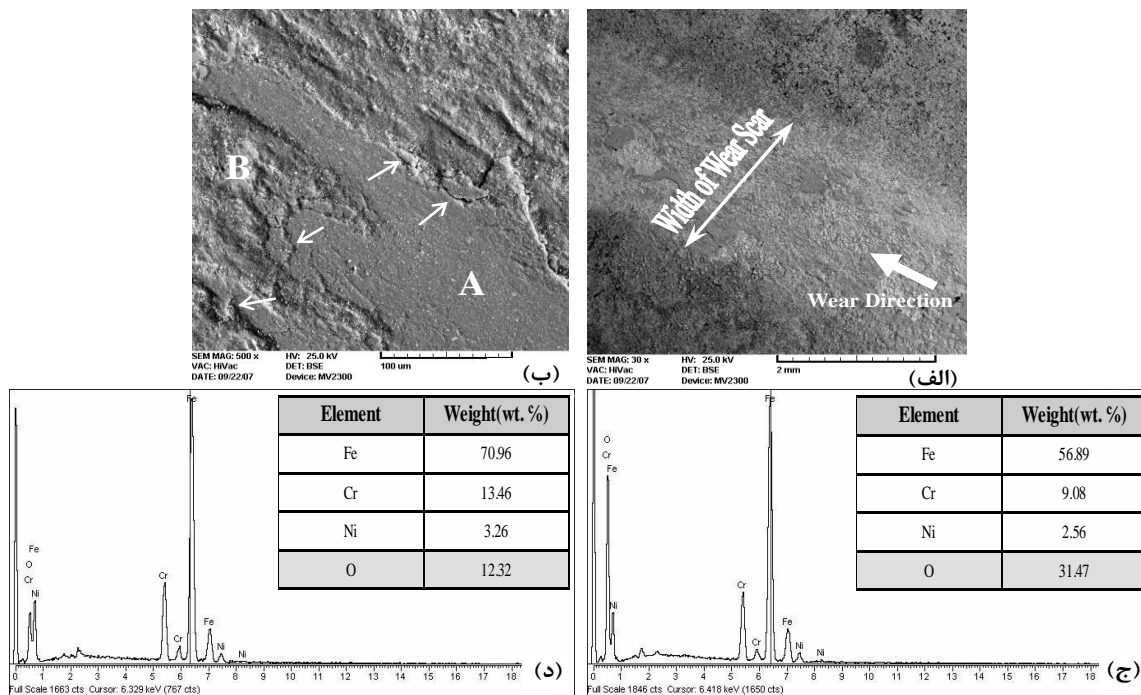
شکل ۳- نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت حاصل از آزمون سایش نمونه‌ها در دو نیروی اعمالی ۷۵ و ۱۱۵ نیوتن.



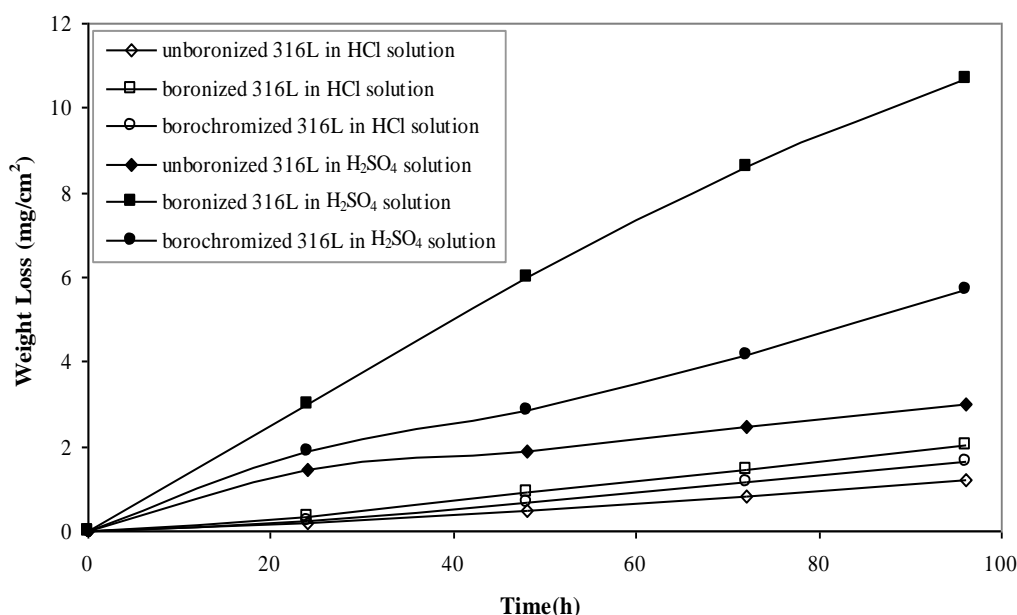
شکل ۴- (الف، ب و ج) تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده نمونه خام (فولاد زنگ نزن آستنیتی 316L) در نیروی ۱۱۵ نیوتن در سه بزرگنمایی مختلف. (د و ه) نتیجه آنالیز شیمیایی از نقاط تیره (مشخص شده با A) و روشن (مشخص شده با B) در سطح سایش. پیکان‌ها در شکل (ج) مشخص‌کننده میکروتکرها می‌باشند.



شکل ۵- (الف و ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده نمونه بوراید در نیروی ۱۱۵ نیوتن در دو بزرگنمایی مختلف، (ج و د) نتیجه آنالیز شیمیایی از نقاط تیره (مشخص شده با A) و روشن (مشخص شده با B) در سطح سایش. پیکان‌ها در شکل (ب) مشخص‌کننده میکروتکرک‌ها می‌باشند.



شکل ۶- (الف و ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده نمونه بوروکروماید شده در نیروی ۱۱۵ نیوتن در دو بزرگنمایی مختلف، (ج و د) نتیجه آنالیز شیمیایی از نقاط تیره (مشخص شده با A) و روشن (مشخص شده با B) در سطح سایش. پیکان‌ها در شکل (ب) مشخص‌کننده میکروتکرک‌ها می‌باشند.



شکل ۷- نمودارهای کاهش وزن حاصل از آزمون خوردگی به روش غوطه‌وری نمونه‌های خام و پوشش داده شده در دو محلول اسیدی H_2SO_4 (۱۰٪vol.) و HCl (۱۰٪vol.).

دست آمده بود. پهنای بیشتر شیار سایش در نمونه خام نسبت به نمونه‌های پوشش‌دار نیز مؤید دیگری بر این موضوع می‌باشد (شکل‌های ۴الف، ۵الف و ۶الف). با دقت در تصاویر SEM نشان داده شده در شکل‌های ۴ تا ۶، نواحی تیره (A) و روشنی (B) در مسیر سایش نمونه‌ها قابل مشاهده است که ترکیب شیمیایی این نواحی نیز در همان شکل‌ها ارائه شده است. با مقایسه ترکیب این نواحی با یکدیگر می‌توان حدس زد که نواحی روشن B با میزان اکسیژن کمتر، به مرور زمان (با افزایش مسافت در حین سایش) به نواحی تیره‌تر A با میزان بالای اکسیژن تبدیل یافته و به عبارتی لایه‌های تیره‌رنگ را تشکیل داده‌اند. با توجه به ترک‌های مشاهده شده در لایه‌های تیره‌رنگ، می‌توان دریافت که مقداری از تلفات سایش در تمامی نمونه‌ها (خام و پوشش‌دار) ناشی از بروز سایش اکسیدی می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به تصاویر سطوح سایشی مشاهده می‌شود که در نمونه بورونیز شده میزان ترک خوردگی سطحی بیشتر از سایر نمونه‌ها است که می‌تواند مبین تردتر بودن لایه سطحی نسبت به لایه بوروکروماید باشد. پژوهش‌گران دیگری [۱۴] نیز در بررسی‌های خود به همین نتیجه رسیده‌اند. این ترک‌ها ناشی از تماس طولانی مدت پین با سطح نمونه در حین آزمون سایش

هم افتادن ورقه‌های شدیداً تغییرشکل یافته در مسیر سایشی، به عبارتی چروک خوردگی سطح، می‌شود. با توجه به ریزترک‌های مشاهده شده (مشخص شده با پیکان) در بین لایه‌ها، می‌توان پیش‌بینی نمود که در ادامه سایش، در اثر تغییرشکل شدید و کارسخت شدن لایه‌های سطحی، این ترک‌های ریز به هم متصل شده و با آزاد شدن ذرات ریز از سطح ماده، سایش تداوم خواهد یافت. بنابراین می‌توان مکانیزم بروز تغییرشکل مومسان را یکی از عوامل تخریب در نمونه خام در اثر سایش دانست. همچنین با حضور اکسیژن قابل توجه در نتایج آنالیز EDS (شکل ۴د و ه) از سطح نمونه خام، می‌توان به وجود لایه‌های اکسیدی (به خصوص در مناطق تیره‌رنگ) در مسیر سایش پی برد، بدین معنی که مکانیزم سایش نمونه خام توأم با بروز اکسایش نیز می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح ساییده شده نمونه‌های پوشش‌دار پس از انجام آزمون سایش در نیروی ۱۱۵ نیوتن در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با مقایسه این شکل‌ها با شکل ۴ تخریب‌های شدیدتری در سطح نمونه‌ی بدون پوشش در مقایسه با نمونه‌های پوشش‌دار مشاهده می‌شود، چنین نتیجه‌ای پیش از این از شکل ۳ نیز به

می‌باشد که در اثر آن به دلیل تردی پوشش بوراید و بروز سایش خستگی، در لایه‌های سطحی ترک ایجاد شده و موجبات تخریب نمونه را فراهم آورده است. بدین ترتیب مکانیزم خستگی - اکسایشی به عنوان مکانیزم سایش در نمونه‌های با پوشش بوراید تشخیص داده می‌شود.

در نمونه با پوشش بوروکروماید به دلیل سختی بالاتر این پوشش نسبت به پین، می‌توان بروز پدیده خستگی و شکسته شدن پستی بلندی‌های سطح را از عوامل تخریب سطحی به حساب آورد و با توجه به حضور لایه‌های اکسیدی در سطح سایش (شکل ۶ ج و د)، مکانیزم سایش در نمونه بوروکروماید شده نیز همان مکانیزم خستگی - اکسایش است. البته ترک‌های خستگی مشابه با آنچه در پوشش بوراید مشاهده شد به خوبی در این پوشش قابل رؤیت نمی‌باشد که شاید علت آن چسبندگی و انعطاف‌پذیری بالاتر این پوشش نسبت به پوشش بوراید باشد. در همین خصوص با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که مقدار اختلاف موجود در میزان سایش در نمونه‌های پوشش‌دار در نیروی ۱۱۵ نیوتن، در مقایسه با این اختلاف در نیروی ۷۵ نیوتنی، کاهش یافته است که علت آن شاید تا حدودی مرتبط با افزایش انعطاف‌پذیری پوشش بوراید در دماهای بالاتر باشد، زیرا همان‌طور که گفته شد در اثر افزایش بار اعمالی از نیروی ۷۵ به ۱۱۵ نیوتن، دما میان سطوح درگیر افزایش بیشتری می‌یابد. این عامل، علاوه بر اثر سایر عوامل نظیر کاهش استحکام چسبندگی هر دو پوشش در اثر افزایش دمای سطوح درگیر، می‌باشد که نهایتاً رفتار سایشی پوشش‌ها را در بارهای بالاتر تعیین می‌کند.

شکل ۷ مقادیر کاهش وزن بر حسب زمان غوطه‌وری نمونه‌های خام و پوشش‌دار را در دو محلول اسیدی ۱۰ درصد حجمی از اسید کلریدریک و اسید سولفوریک تا مدت زمان ۹۶ ساعت نشان می‌دهد. این نمودارها بر اساس مقادیر کاهش وزن ثبت شده برای نمونه‌ها در طی آزمون خوردگی ترسیم شده‌اند. با توجه به این نمودارها می‌توان دریافت که اولاً با افزایش مدت زمان غوطه‌وری در هر دو محلول

اسیدی، میزان خوردگی در نمونه‌های پوشش‌دار نسبت به نمونه خام، افزایش می‌یابد. ثانیاً مقاومت به خوردگی تمامی نمونه‌ها در محلول حاوی یون‌های کلر بیش از این مقاومت در محلول حاوی یون‌های سولفاتی است. علاوه بر این، میزان مقاومت به خوردگی تمامی نمونه‌ها در اسید کلریدریک دارای اختلاف کمی بوده و این اختلاف در اسید سولفوریک نسبتاً بیشتر است. در تمامی موارد میزان مقاومت به خوردگی مربوط به نمونه خام بالاتر از نمونه‌های پوشش‌دار بوده و پس از آن نمونه بوروکروماید شده نزدیک‌ترین رفتار خوردگی را نسبت به نمونه خام از خود نشان می‌دهد و به عبارتی نمونه با پوشش بوروکروماید نسبت به پوشش بوراید مقاومت به خوردگی برتری را ارائه می‌نماید و سرعت خوردگی آن کمی بیشتر از نمونه خام می‌باشد. به طور کلی خواص مقاومت به خوردگی در فولاد زنگ‌نزن به لایه اکسید کروم چسبنده، چگال و غیرفعال تشکیل‌شده بر روی سطح آن مربوط می‌شود. البته مقاومت به خوردگی در این فولادها وقتی به بالاترین حد خود نائل می‌شود که تمام کروم موجود در فولاد به صورت محلول جامد بوده و فولاد دارای ساختمان تک‌فازی باشد [۱۶]. بنابراین کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌های بورونایز شده نسبت به نمونه خام، مربوط به تشکیل ترکیبات بورایدی در سطح ماده می‌باشد. بدین صورت که در اثر نفوذ بور به سمت ماده پایه، این عنصر با کروم ماده پایه تشکیل ترکیب بوراید کروم [۱۱] داده و از میزان کروم محلول در سطح فولاد کاسته می‌شود. این موضوع از شکل‌گیری لایه اکسید پیوسته و چگال روی سطح در حین آزمون خوردگی جلوگیری می‌کند و از مقاومت به خوردگی فولاد زنگ‌نزن با پوشش بوراید می‌کاهد. از سوی دیگر وجود کروم بیشتر در لایه سطحی نمونه بوروکروماید شده را می‌توان به عنوان دلیلی برای مقاومت به خوردگی بالاتر آن نسبت به نمونه بورونایز شده بیان نمود. همچنین وجود عیوب سطحی نظیر تخلخل‌های موجود در لایه‌های سطحی، اثر عمده‌ای بر مقاومت به خوردگی ماده دارند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته [۱۱]، در این مورد نیز حفره‌های بیشتر موجود در لایه‌های بوراید در مقایسه با لایه بوروکروماید (شکل ۱)،

مراجع

1. K.H. Zum Gahr, *Microstructure and wear of materials*, Tribology Series, 10, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam (1987).
2. K. Holmberg, A. Matthews, *Coatings Tribology Properties, Techniques & Applications in Surface Engineering*, Tribology Series 28, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam (1994).
3. A. Kuper, *Plasma-assisted boronizing*, *Advanced Materials & Process*, 161(3) (2003) 20-22.
4. B.S. Mann, *Boronizing of cast martensitic chromium nickel stainless steel and its abrasion and cavitation-erosion behavior*, *Wear*, 208 (1997) 125-131.
5. A.K. Sinha, *Boriding*, Heat treating, Vol. 4, ASM Handbook, ASM International, (1991) 437-447.
6. M. Carbuicchio, G.P. Palombarini, *Effect of alloying elements on the growth of iron boride coatings*, *Journal of Materials Science Letters*, 6 (1987) 1147-1149.
7. J.R. Davis, *Surface engineering for corrosion and wear resistance*, ASM International, Materials Park, Ohio, (2001).
8. A. Pertek, M. Kulka, *Characterization of complex (B+C) diffusion layers formed on chromium and nickel-based low-carbon steel*, *Applied Surface Science*, 202 (2002) 252-260.
9. E. Melendez, I. Compas, E. Rocha, M.A. Barron, *Structural and strength characterization of steels subjected to boriding thermochemical process*, *Material Science and Engineering*, A234-236 (1997) 900-903.
10. S. Taktak, *Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels*, *Materials & Design*, 28(6) (2007) 1836-1843.
۱۱. وحید صمدی، بررسی ریزساختار و خواص سایشی پوشش‌های نئومرطه‌ای بورایدی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، ۱۳۸۶.
12. C. Martini, G. Palombarini, G. Poli, D. Prandstraller, *Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings*, *Wear*, 256 (2004) 608-613.
13. C.M Suh, S.H. Kim, J.H. Lee, N.S. Hwang, *Variation of boride layer characteristics by heating conditions and materials*, *International Journal of Modern Physics B*, 17(8 & 9) (2003) 1795-1800.

محل‌های تماس بیشتری را بین قطعه‌کار و محلول اسیدی به وجود می‌آورند که باعث افزایش سرعت خوردگی با مکانیزم خوردگی حفره‌ای می‌شوند.

با توجه به پژوهش حاضر می‌توان گفت که عملیات بوردهی با ایجاد یک لایه نفوذی مناسب سبب بهبود خواص مکانیکی (سختی و سایش) سطح فولاد زنگ‌نزن آستنیتی L۳۱۶ شده، علی‌رغم کاهش ناچیز مقاومت به خوردگی، و می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرایندهای سطحی متداول به کار گرفته شده بر روی سطح این فولادها باشد. همچنین با اعمال فرایند کروم‌دهی پیش از فرایند بوردهی، می‌توان علاوه بر بهبود خواص خوردگی، مقاومت به سایش پوشش‌های بوراید را نیز افزایش داد.

نتیجه‌گیری

با اعمال پوشش‌های بوراید و بوروکروماید بر سطح فولاد L۳۱۶ مشخص شد که:

۱. پوشش بوروکروماید دارای سختی بالاتر ولی عمق سخت‌شده کمتر نسبت به پوشش بوراید می‌باشد.
۲. بهترین رفتار سایشی در میان نمونه‌های بدون پوشش و پوشش‌دار مربوط به نمونه بوروکروماید شده می‌باشد.
۳. مکانیزم غالب در سایش نمونه‌های پوشش‌دار، مکانیزم خستگی-اکسایش سطح می‌باشد.
۴. پوشش‌های بوراید مقاومت به خوردگی فولاد L۳۱۶ را در محلول‌های اسید کلریدریک و اسید سولفوریک کاهش می‌دهند ولی با اعمال فرایند کروم‌دهی، پیش از فرایند بوردهی، می‌توان رفتار خوردگی این پوشش‌ها را تا حدودی بهبود بخشید.

14. S. Y. Lee, G.S. Kim, B.S. Kim, *Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 316L stainless steel by chromizing and boronizing treatment*, Surface and Coating technology, 177-178 (2004) 178-184.
15. C. Badini, C. Gianoglio, G. Pradelli, *The effect of carbon, chromium and nickel on the hardness of borided layers*, Surface and Coating Technology, 30(2) (1987) 157-170.
16. L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein, *Corrosion (Metal/Environment Reactions)*, Vol. 1, Butterworth-Heinemann, Oxford (2000).