

بررسی و مقایسه ویژگیهای سایشی سطح فولاد به سه روش کرم سخت، نیتراسیون گازی و

نیتراسیون سطح کرم شده

علی حسن آبادی^۱، محمد زارعی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۲/۸

چکیده

در این پژوهش به منظور کنترل عوامل فرسایش دهنده بر روی فولاد ۱/۷۷۶۵ که کاربردهای فراوانی در محیطهای گازی خورنده با فشار و دمای بالا دارد، اثر عملیات پوشش کرم سخت، نیتروژن دهی گازی و نیتراسیون نمونه‌های کرم شده مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه نمونه‌ها برای هر سه روش برای بررسی انواع مختلف مشخصه‌ها با روشی مشابه، به کمک میکروسکپ نوری، دستگاه ریز سختی سنج، دستگاه XRD، تست سایش با روش پین بر روی دیسک و نهایتاً "آزمایش اکسیداسیون مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ریز ساختار نمونه‌های کرم- نیتريد شده، شامل نیتريد کرم عمدتاً Cr N در سطح و لایه کرم می‌باشد که علاوه بر بالا بردن مقدار و عمق سختی، مقاومت به سایش و مقاومت اکسیداسیونی را نیز افزایش می‌دهند. در ادامه، بررسی مقایسه‌ای، حکایت از عدم تغییر ضریب اصطکاکی نمونه‌های کرم- نیتريد شده نسبت به نمونه‌های خام دارد.

کلمات کلیدی: کرم سخت، نیتراسیون گازی، کرم، نیتراسیون، مقاومت سایشی، مقاومت اکسیداسیونی.

۱- مقدمه

قرار دارد. بنابراین در کاربردهای مختلف بسته به حضور این عوامل می‌توان مکانیزم‌های فرسایش سطح را به صورت شیمیایی، حرارتی و مکانیکی تقسیم‌بندی نمود. این تقسیم‌بندی نسبتاً قرار دادی است زیرا که این تقسیم‌بندی‌ها، شدیداً به یکدیگر پیوسته‌اند و دارای عملکرد هماهنگی می‌باشند. فرآیندهای شیمیایی با واکنش‌های کربورایزینگ و اکسیدایزینگ، منجر به ساییدگی سطح می‌گردند. همچنین نفوذ گازهای موجود به داخل فولاد، واکنش‌های زیر سطحی به همراه دارد که باعث تسریع در فرسایش می‌شوند. مکانیزم‌های حرارتی شامل تغییرات مرحله‌ای دمای سطح باعث نرم شدن و ذوب شدن و ترک خوردگی سطح به علت انبساط و انقباض، می‌شوند.

تخریب تدریجی سطوح و در نتیجه از اندازه خارج شدن آنها باعث افت کارایی قطعات می‌شود. این حالت بسته به شدت فرسایش می‌تواند بسیار زودتر از عمر تخمینی قطعه بر مبنای سایر معیارهای طراحی نظیر خستگی اتفاق بیفتد [۱]. فشار زیاد گازهای گرم، علاوه بر اثرات مذکور می‌تواند سطح داخلی فلز را به صورت ورقه‌های شکننده تغییرشکل دهد. اگر عبور گازها به صورت ضربانی باشد، تغییرشکل ورقه‌های شکننده صورت می‌گیرد.

سطوح فولادی قطعات مثلاً لوله سلاح در معرض عوامل فرسایشی نظیر درجه حرارت بالا و فشار بالا، واکنش شیمیایی گازهای پيشرانه و فرسایش ناشی از حرکت مرمی در داخل لوله

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک- دانشگاه تهران، E-mail: ali.hasanabadi@gmail.com

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک- دانشگاه مالک اشتر

به دلیل وجود تنش‌های پسماند کششی در سطح، ایجاد می‌شود و در نتیجه استحکام خستگی و مقاومت خوردگی آن افت پیدا می‌کند. نیتروژن‌دهی پلاسمایی این پوشش‌ها می‌تواند راه‌حلی در رفع این مشکل باشد. نیتروژن دهی عبارت است از اشباع سطح فولاد از نیتروژن. عمل نیتروژن دهی با مقیاس وسیعی بر روی محورهای ماشین‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری، سیلندرهای موتورهای قوی مانند چکش‌های بادی، دنده‌های حلزونی، محور ژنراتورها، رینگ و پیستون، میل لنگ و امثال آنها انجام می‌شود [۹]. در نیتروژن‌دهی پلاسمایی پوشش آبرکاری کروم سخت روی فولاد C45، در دماهای بالا و زمان‌های طولانی ریز ترک‌ها به علت تشکیل لایه نیتروژنی رفته رفته ناپدید شده‌اند. آنالیز تفرق اشعه ایکس، حضور فازهای Cr_2N و CrN را در آن‌ها نشان داده است، همچنین در اثر افزایش حجم ناشی از تشکیل نیتروژن‌دهی، ترک‌ها کمی بسته می‌شوند [۷]. نیتروژن‌دهی انواع مختلف جامد، مایع، گازی و پلاسمایی دارد که در این پژوهش نیتروژن‌دهی در گاز آمونیاک مورد بررسی می‌باشد.

در وضعیت کرم-نیتراسیون ابتدا سطح در معرض کرم‌دهی قرار گرفته و سپس نیتروژن‌دهی می‌شود. مقایسه خواص حاصله نشان می‌دهد که نفوذ نیتروژن به داخل سطح پوشش کرم سخت، باعث کاهش تخریب سطح فولاد می‌شود.

۳- روش تحقیق

۳-۱- جنس نمونه‌ها و نحوه دسته‌بندی

فولاد مورد استفاده در این تحقیق دارای درصد عناصر به ترتیب $C-Si-Mn-P-S-Cr-Mo-V$ برابر با $0.07-0.03-0.01-0.025-0.006-0.035-0.035$ می‌باشد که توسط روش آنالیز کوانتومتری به دست آمده است و مطابق با کلید فولاد [۱۰] دارای تطابق کامل با فولاد با شماره استاندارد ۱.۷۷۶۵ با سمبل ۱۲ ۱۰ $Cr Mo V 32$ می‌باشد. این فولاد آلیاژی بوده و از فولادهای با کیفیت بالا محسوب می‌شود.

به منظور انجام آزمایشات لازم نتایج نمونه‌ها در چهار گروه مورد نیاز می‌باشد:

گروه A: نمونه‌های آزمایشگاهی از جنس فولاد خام ۱.۷۷۶۵.

گروه B: نمونه‌های آزمایشگاهی کرم سخت شده فولاد ۱.۷۷۶۵.

فرسایش مکانیکی نیز به علت عبور ذرات و سایش مکانیکی سطوح ایجاد می‌شود.

برای بهبود مقاومت سایشی از روشهای گوناگونی استفاده می‌شود که از تغییر در خواص گازها و مواد منفجره شروع شده و تا پوشش‌دهی سطح داخل لوله ادامه می‌یابد که از جمله‌ی مهمترین آنها کرم سخت می‌باشد [۲] که کاربرد آن در سطوح صنعتی و نظامی دارای قدمتی دیرینه می‌باشد. اما ریز ترک‌های تولید شده در طی آبرکاری کرم و نداشتن استحکام خستگی مناسب [۲]، و ترد و شکننده بودن آن نقاط ضعف این روش می‌باشند [۳و۴] و طبق بررسی‌های به عمل آمده این ماده سرطان‌زا می‌باشد. لذا به منظور بهبود این خواص و رفع معایب آن همواره پژوهشهایی در حال انجام است. از آنجا که پوشش کرم سخت حاصله دارای ترکهای ذاتی می‌باشد در بعضی روشها سعی شده است با کنترل پارامترهای مربوطه نظیر دما، دانسیته جریان و شرایط فرایند آبرکاری، این نقاط ضعف برطرف شود [۴]. روشهای دیگر مبتنی بر پیدا کردن جایگزین مناسب برای روش کرم‌دهی می‌باشد [۱]. یکی از این روشها استفاده از روش نیتراسیون گازی می‌باشد که توسط زارعی و دیگران [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه پژوهش فوق روش کرم-نیتريد کردن و مزایا و معایب آن به نحوی که قابل مقایسه با پژوهشهای قبلی باشد با همان شرایط و آزمایشها، انجام شده و نتایج آنها با همدیگر مقایسه شده‌اند.

۲- کرم سخت، نیتراسیون گازی و کرم نیتراسیون سطحی

پوشش‌های آبرکاری کروم به علت سختی بالا، مقاومت سایشی و مقاومت به خوردگی مناسب و ضریب اصطکاک کم به‌طور وسیعی کاربرد دارند. پوشش کروم دارای رنگ سفید مایل به آبی می‌باشد و به خاطر خواص مطلوب آن، به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار گرفته شده است. پوشش کرم انواع مختلف دارد که از میان آنها پوشش کرم سخت به دلیل ضخیم بودن، خواص مکانیکی (سختی و مقاومت به سایش) فوق‌العاده‌ای داشته و در کارهای صنعتی نیز استفاده می‌گردد [۶-۸]. مشکل بزرگ این پوشش‌ها، کاهش استحکام خستگی و مقاومت به خوردگی به علت وجود ترک‌های سطحی در آنها است که

گروه C: نمونه‌های آزمایشگاهی نیتراسیون گازی شده فولاد ۱/۷۷۶۵.
 گروه D: نمونه‌های آزمایشگاهی کرم- نیتراسیون گازی فولاد ۱/۷۷۶۵.
 با توجه به داده‌های داده‌شده در مرجع [۵] نتایج حاصل از گروه‌های A، B و C تهیه شده‌اند. برای انجام پژوهش نمونه‌های مورد نیاز برای گروه D نیز با ابعاد نهایی نمونه‌ها پس از عملیات سنباده‌کاری، به صورت قطر ۵۰mm و ضخامت ۴mm، تهیه شدند.

۳-۲- شرایط کرم‌دهی، نیتراسیون گازی و کرم- نیتراسیون

کرم دهی نمونه‌های گروه D برای انجام مرحله‌ی کرم‌دهی، با شرایط محلول کرم با ترکیب ۱۸۰ gr/lit اکسید کرم و اسید سولفوریک ۱٪ وزنی در دمای ۶۰°C به مدت یک ساعت و ده دقیقه با دانسیته جریان ۴۰ A/dm^۲ مطابق با [۵] انجام شده است. هم چنین به منظور انجام عملیات نیتراسیون گازی ۱۲ ساعته و ۲۴ ساعته، جعبه از جنس ورق توری تهیه شد و نمونه‌های کرم- دهی شده‌ی D، در مرحله‌ی قبل، داخل جعبه کاملاً ثابت گردیدند. سپس عملیات نیتراسیون گازی تحت شرایط زیر مطابق با [۵] انجام گردید:
 دما: ۵۲۵°C، زمان: با دو زمان ۱۲ و ۲۴ ساعت، فشار محفظه کوره: در حد چند میلی بار، ترکیب گاز: NH₃ + CO₂.

۳-۳- انجام آزمایشات

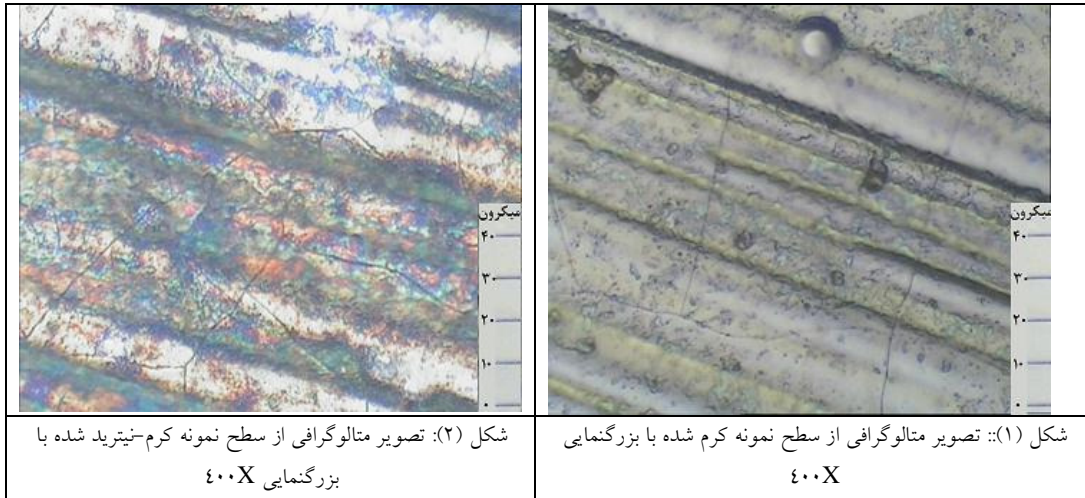
پس از انجام عملیات کرم‌دهی و سپس نیتراسیون گازی ۱۲ ساعته و ۲۴ به منظور انجام عملیات متالوگرافی، نمونه‌های تهیه شده، مانع و پس از اچ شدن در محلول نایتال ۰/۲٪ توسط میکروسکپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰ و ۴۰۰ متالوگرافی گردیدند. عملیات آنالیز سطحی کلیه نمونه‌ها توسط دستگاه تفرق اشعه ایکس در محدوده زوایای ۸۰-۴=۲θ درجه با آند مسی (CuKα) با طول موج ۱/۵۴۰۴ Å همراه با ولتاژ ۴۰kV و جریان ۳۰mA انجام گردید. میکروسختی نمونه‌ها در فواصل مختلف از سطح تحت بار ۲۰۰ گرم نیرو توسط دستگاه ریز سختی سنج اندازه‌گیری گردید.

به منظور بررسی خواص سایشی نمونه‌ها، از دستگاه آزمایش سایش پین روی دیسک (Pin on disk) استفاده گردید. کلیه

وزن نمونه‌ها و پین‌ها قبل و پس از سایش استفاده گردید. به منظور انجام آزمایش مقاومت اکسیداسیونی، کلیه نمونه‌ها پس از آماده سازی و تمیزکاری اولیه توسط ترازوی دیجیتال در دو مرحله وزن شدند. سپس نمونه‌ها در داخل کوره تحت دمای ۸۵۰°C و زمان حدود ۹ ساعت قرار گرفتند. پس از خروج نمونه‌ها از داخل کوره و رسیدن دمای آنها به دمای محیط مجدداً توسط ترازوی دیجیتال وزن شدند.

۴- نتایج آزمایشات و بحث

با مشاهده تصویر ارائه شده از متالوگرافی سطح مقطع نمونه کرم سخت شده در شکل ۱ چنین بر می‌آید که پوشش‌های کرم سخت دارای تعداد زیادی ترک می‌باشند که هیچ گونه ارتباطی با ساختمان کریستالی ندارند. در آبکاری کرم سخت به علت آنکه شدت رسوب‌گذاری در لبه ترک بالاتر است ترک‌ها به طور مداوم تولید شده و سپس از بین می‌روند. اما با اعمال تنش، دمای بالا و شرایط خورنده در حین کار، ترک‌های ریز رشد کرده و با عبور از لایه کرم به زیر لایه فولاد می‌رسند. بر این اساس فرآیند از بین رفتن پوشش کرم پس از این مرحله، شامل کنده شدن تکه‌های کوچک از پوشش در مجاورت فصل مشترک و سپس نفوذ مواد خورنده و گازها به سطح فلز و تخریب زیر لایه می‌باشد که این مساله یکی از معایب پوشش‌های کرم سخت در سطح داخلی لوله به شمار می‌آید. در شکل ۲ تصویر متالوگرافی از سطح مقطع نمونه کرم-نیتريد شده با بزرگنمایی ۴۰۰x نمایش داده شده است. نیتريد کردن لایه کرم امکان کاربرد این پوشش را در دمای بالا برای فولاد ۱/۷۷۶۵ ایجاد می‌نماید [۱]. همان گونه که مشهود است، ترک‌ها در این حالت بهبود یافته و وضعیت مناسبتری یافته‌اند.



شکل (۲): تصویر متالوگرافی از سطح نمونه کرم-نیتريد شده با بزرگنمایی $400\times$

شکل (۱): تصویر متالوگرافی از سطح نمونه کرم شده با بزرگنمایی $400\times$

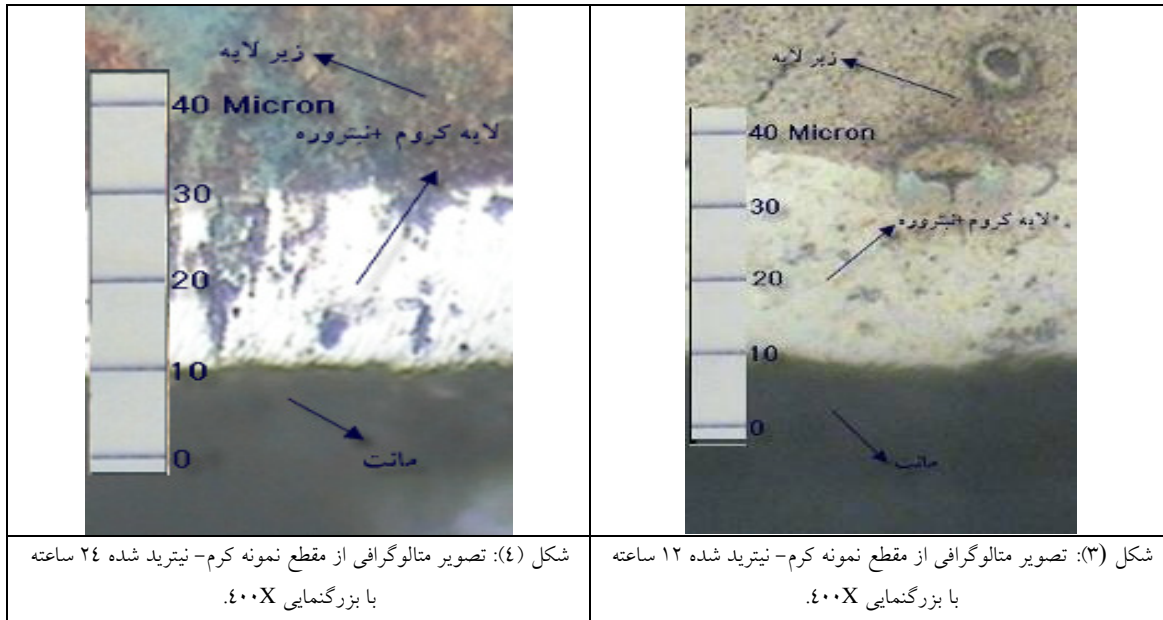
کرم- نیتريد شده حاکی از آن است که زمان نیتروژن دهی بر سختی نمونه‌ها، تاثیر دارد و این امر موجب بالا رفتن سختی سطح در نمونه‌هایی که با زمان بیشتری تحت عملیات نیتراسیون گازی قرار گرفته‌اند می‌شود ولی به تدریج با دور شدن از سطح مقدار تفاوت دو نمونه کاهش می‌یابد.

همچنین بررسی منحنی سختی نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های کرم- نیتريد شده تا فاصله ۵۰ میکرونی از سطح سختی بالای خود را حفظ می‌کنند. در مقابل، نمونه‌های کرم شده بسیار سریع، در فاصله ۱۰ میکرونی سطح، سختی خود را از دست می‌دهند.

نتایج آزمایش تفرق اشعه ایکس که به منظور تشخیص فازهای تشکیل شده بر روی سطح نمونه‌ها استفاده گردیده است، حاکی از آنست که در نمونه خام، فاز پایه آهن قابل تشخیص می‌باشد. در نمونه کرم شده وجود فاز پایه کرم را می‌توان مشاهده نمود. در نمونه نیتريد شده دو فاز Fe_3N و Fe_4N تشکیل می‌شود و نهایتاً در نمونه کرم- نیتريد شده (شکل ۶) فازهای Cr و CrN ، هر دو مشاهده می‌شوند.

در فرآیند نیتروژن دهی که نتیجه فعل و انفعال عناصر آلیاژی جانشین در آهن با نیتروژن محلول جامد بین نشینی می‌باشد در اثر نفوذ نیتروژن به سطح فولاد لایه نیتريدی در سطح قطعه تشکیل می‌شود که این لایه معمولاً "به یک منطقه ترکیبی (لایه سفید) نزدیک سطح و یک منطقه نفوذی (زیر لایه سفید) تقسیم می‌گردد. این لایه دارای سختی بالا، مقاومت به سایش زیاد و مقاومت مناسب در برابر کاهش سختی در دماهای بالا می‌باشد. در شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر متالوگرافی نمونه‌های کرم-نیتريد شده در دو مدت زمان ۱۲ و ۲۴ ساعت نمایش داده شده است. با بررسی این تصاویر معلوم می‌شود که مقدار لایه کرم-نیتريد با افزایش زمان نیتراسیون تغییر چندانی نداشته است ولی خواص آن با افزایش زمان دچار تغییراتی شده است که اثر آن در آزمایش اکسیداسیون و رفتار اکسیداسیونی ضعیف نمونه‌ی ۲۴ ساعته نمایان می‌شود.

نتایج حاصل از میکرو سختی سنجی نمونه‌های نمونه کرم شده و کرم- نیتريد شده به صورت شیب سختی نمونه‌ها در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. شیب سختی ترسیم شده برای نمونه‌های

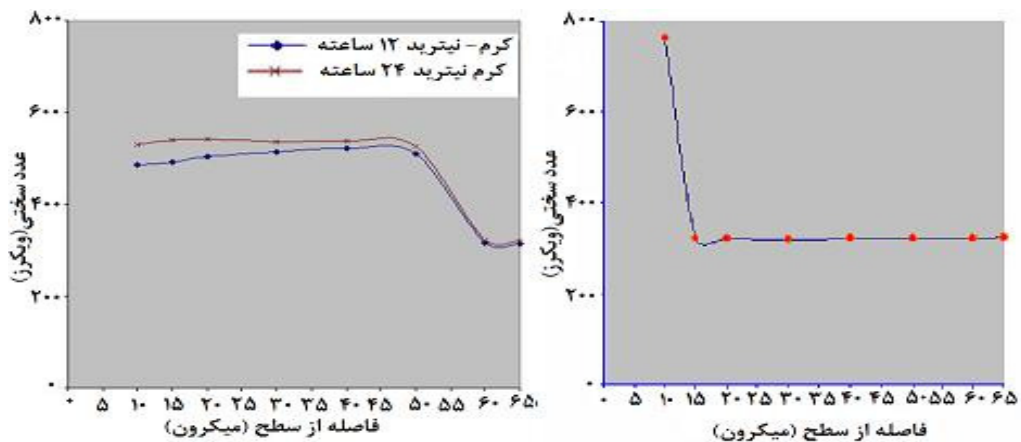


شکل (۴): تصویر متالوگرافی از مقطع نمونه کرم- نیترید شده ۲۴ ساعته با بزرگنمایی ۴۰۰X.

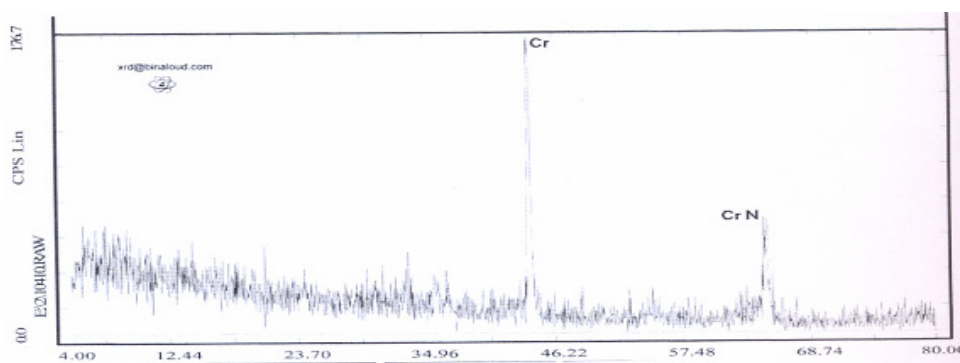
شکل (۳): تصویر متالوگرافی از مقطع نمونه کرم- نیترید شده ۱۲ ساعته با بزرگنمایی ۴۰۰X.

میانگین ضریب اصطکاک به دست آمده برای نمونه کرم-نیترید شده فرق چندانی با حالت خام آن ندارد (جدول ۱). با توجه در اعداد این جدول معلوم می‌شود بهترین حالت اصطکاک، حالت نیترید ۲۴ ساعته می‌باشد ($\mu = 0.057$).
 نتایج آزمایش مقاومت اکسیداسیونی نمونه‌ها (جدول ۲) حاکی از آن است که نمونه کرم- نیترید شده مقاومت اکسیداسیون بالایی دارد ولی به کیفیت نمونه کرم شده نمی‌رسد. با اینکه در نمونه نیتریده شده انتظار می‌رود به دلیل تشکیل لایه نیترید مقاومت بهتری صورت گیرد، مقاومت اکسیداسیونی آن حتی از نمونه خام نیز بدتر است (جدول ۲).

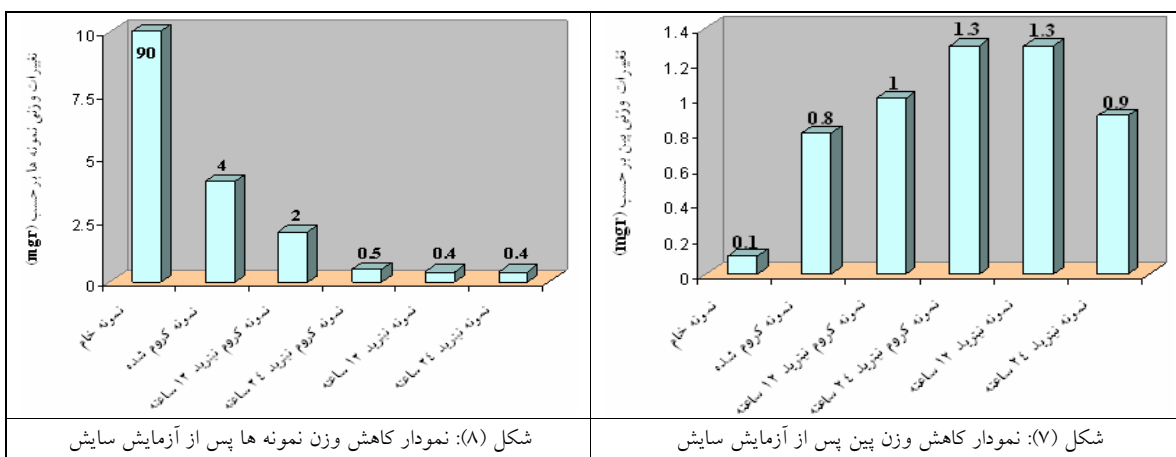
نتایج حاصل از آزمایش سایش (شکل ۷ و ۸) نشان می‌دهد که کاهش وزن نمونه‌های نیترید شده از همه‌ی نمونه‌ها کمتر بوده و این نشان از بهبود مقاومت به سایش مکانیکی این نمونه‌ها دارد. همچنین معلوم می‌شود با کرم نیتریده کردن نمونه‌ها، این خاصیت بهبود پیدا نمی‌کند. نمونه‌های کرم شده نیز نسبت به وضعیت خام، شرایط بسیار بهتری یافته‌اند. مقایسه دو شکل ۷ و ۸ هماهنگی کاهش وزن نمونه و افزایش وزن خوردگی پین را نشان می‌دهند. نمونه کرم- نیترید ۲۴ ساعته در این زمینه وضعیت بهتری نسبت به نمونه ۱۲ ساعته آن دارد.



شکل ۵- شیب سختی نمونه های کرم شده (سمت راست) و کرم نیترید شده (سمت چپ) (نیروی اعمالی در هر دو مورد ۲۰۰ گرم)



شکل (۶): تفرق اشعه ایکس نمونه کرم نیتريد ۱۲ ساعته



شکل (۸): نمودار کاهش وزن نمونه ها پس از آزمایش سایش

شکل (۷): نمودار کاهش وزن پین پس از آزمایش سایش

جدول (۱): دامنه و میانگین ضریب اصطکاک حاصل از آزمایش سایش نمونه ها

نمونه	حداقل	حداکثر	دامنه ضریب اصطکاک	میانگین ضریب اصطکاک
خام	۰.۰۹	۰.۱۱	۰.۰۲	۰.۱
کرم شده	۰.۰۵	۰.۰۷۵	۰.۰۲۵	۰.۰۶۲
نیتريد ۱۲ ساعته	۰.۰۷	۰.۰۹۹	۰.۰۲۹	۰.۰۸۴
نیتريد ۲۴ ساعته	۰.۰۴۵	۰.۰۷	۰.۰۲۵	۰.۰۵۷
کرم نیتريد ۱۲ ساعته	۰.۰۹۵	۰.۱۰۵	۰.۰۱	۰.۱
کرم نیتريد ۲۴ ساعته	۰.۱	۰.۱۲	۰.۰۲	۰.۱۱

جدول (۲): اختلاف وزن نمونه ها و میانگین تغییرات وزن هر نمونه در آزمایش اکسیداسیون

نمونه	اختلاف وزن اول	اختلاف وزن دوم	میانگین تغییرات وزنی هر نمونه
خام	۱.۵۲۲۷	۱.۵۲۲۷	۱.۵۲۲۷
کرم شده	۰.۶۲۵۲	۰.۶۲۵۲	۰.۶۲۵۲
نیتريد ۲۴ ساعته	۱.۹۱۹۶	۱.۹۱۹۴	۱.۹۱۹۵
کرم نیتريد ۱۲ ساعته	۰.۹۳۲۷	۰.۹۳۲۸	۰.۹۳۲۷

۵- نتیجه گیری

به حالت خام تغییر چندانی نداشته است.

۳) ریز شدن ترک ها در سطح نمونه کرم- نیتريد نسبت به سطح نمونه کرم شده در تصاویر متالوگرافی نشان دهنده نفوذ نیتروژن به سطح پوشش کرم سخت بوده که این امر باعث کاهش تخریب سطح فولاد می شود.

۴) نتایج حاصل از آزمایش XRD نمونه های نیتريد شده ۲۴ ساعته و کرم- نیتريد ۱۲ ساعته حاکی از آن است که در نمونه نیتريد شده ۲۴ ساعته فاز های Fe_3N و Fe_4N تشکیل یافته و در نمونه کرم- نیتريد ۱۲ ساعته فاز پایه کرم و لایه نیتريد کرم CrN موجود می باشد.

۵) نتایج حاصل از آزمایش اکسیداسیون حاکی از آن است که نمونه خام و نمونه نیتريد شده ۲۴ ساعته رفتار اکسیداسیونی ضعیفی را از خود نشان می دهند در صورتیکه در نمونه نیتريد شده انتظار می رود به دلیل تشکیل لایه نیتريد مقاومت بهتری صورت گیرد. همچنین در نمونه کرم شده کمترین تغییرات وزنی و بیشترین مقاومت اکسیداسیون مشاهده می شود که این موضوع بیانگر تاثیر قابل ملاحظه پوشش کرم بر رفتار اکسیداسیونی نمونه ها در دمای بالا می باشد. همچنین با دقت در نتایج معلوم می شود مقاومت اکسیداسیونی در حالت کرم- نیتريد، از حالت کرم تنها کمتر و از حالت نیتريد شده بیشتر می باشد.

۱) مقایسه اعداد سختی بدست آمده از ریز سختی سنجی نمونه خام با سختی ۳۲۰HV و نمونه کرم شده با سختی ۷۶۳HV حاکی از آن است که پوشش کرم، سختی سطح را به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. همچنین با دقت در منحنی به دست آمده، مشخص می شود با فاصله گرفتن از سطح در نمونه کرم شده سختی به سرعت افت می کند اما در نمونه های کرم نیتريد شده، تا فاصله ای ۵۰ میکرونی مقدار سختی، تقریباً ثابت باقی می ماند. همچنین مقایسه ی منحنی ها نشان می دهد متوسط عدد سختی نمونه نیتريد ۱۲ ساعته، ۹۰۴HV بوده در حالی که این عدد برای نمونه کرم- نیتريد ۱۲ ساعته ۵۰۸HV می باشد ولی عمق لایه ی سخت شده در نمونه کرم- نیتريد شده بیشتر می باشد. همچنین شیب سختی نمونه های نیتريد شده ۱۲ ساعته و ۲۴ ساعته نشان دهنده آن است که زمان نیتروژن دهی در افزایش سختی نمونه ها تاثیر بسزایی دارد.

۲) ضریب اصطکاک بدست آمده از آزمایش سایش برای نمونه خام برابر $\mu = 0.11$ بوده در حالی که ضریب اصطکاک نمونه نیتريد ۲۴ ساعته برابر $\mu = 0.057$ و از همه بهتر می باشد. همچنین کاهش ضریب اصطکاک در نمونه کرم شده حاکی از بهبود مقاومت به سایش فولاد ۱/۷۷۶۵ می باشد. بررسی بیشتر نشان می دهد که ضریب اصطکاک نمونه های کرم- نیتريد نسبت

مراجع

- 1- Burlew, J.S. (Ed.), "Hypervelocity Gun and control of gun Erosion," Summary Tech. Rep. of National Defense Research Committee Div. 1, Office of the Scientific Research and Development, Washington, D.C. 1980.
- ۲- گروه مهندسی متالورژی، آبکاری کروم سخت، جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، ۱۳۷۱.
- 3- A. Brenner, P. Burkhead & G. Jennig "physical properties of electrodeposited chromium", woodhead pub, England, 1970, pp. 32-73.
- ۴- ع. ا. کاشی، م. حیدرزاده سهی، س. م. م. هادوی، "تاثیر پارامترهای دما و دانسیته جریان برای ایجاد پوشش کرم عاری از ترک با استفاده از جریان مستقیم"، چهارمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید، ۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۷۷.
- ۵- زارعی، م. حسن آبادی، ع. " بررسی ویژگیهای سایشی سطح فولاد به روش نیتراسیون گازی و مقایسه آن با پوشش کرم سخت"، دهمین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، ۱۲-۱۵ اسفند ۱۳۸۸.
- 6- Lowenhime F. A., "Modern Electroplating", 3rd Ed., 1. Wiley & Sons Inc., 1974.
- 7- Chessin, Fernald, "Hard chromium plating", ASM Metals Handbook. Vol 5, 9th Ed, 1994.
- 8- Metals Handbook, ASM, "Surface Engineering", Vol. 5, 9th Ed, pp. 174-200, 1994.
- ۹- م. ع. گلگذار، " عملیات حرارتی و مهندسی سطح" نشر ارکان، ۱۳۷۷.
- 10- C.W. Wegst, "STAHLSCHLUSSEL", Germany, 1986, p.404.