

نیتروزنده فولاد در محیط پلاسمای بررسی لایه سخت شده

مسعود مرادشاهی و داود ایرجی

چکیده: در این طرح پس از ساخت سیستم مناسب برای ایجاد پلاسمای برای تخلیه تابان و تهیه نمونه‌ها و انجام تحلیل‌های سختی سنجی و PIXE، طی مراحل مختلف، فرآیند نیتروزنده فولاد در شرایط متفاوت انجام شد. پس از پایان نیتروزنده نمونه‌ها، تحلیل‌های سختی سنجی و PIXE به همراه تحلیل‌های آنگستروم، نشان می‌دهد. نتایج قطعات انجام شد. نتایج به دست آمده در مورد فولادهای ۳۰۴، ۳۱۶ و RBS و XRD، SEM، GDS به وضوح افزایش سختی حداقل ۴۵۰ درصد را در بازده مورد مطالعه، نشان می‌دهد. البته سایر تحلیل‌های انجام گرفته بروز تغییرات محسوس در ساختار لایه سطحی نمونه‌ها را تا عمق حداقل ۱۷۰۰۰ آنگستروم، نشان می‌دهد. نمودارهای ارایه شده با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل‌های بالا رسم شده‌اند. نتایج تحلیل XRD تبدیل فازهای α و γ را به فاز N در نمونه‌های پرتو دیده نشان می‌دهد. همین‌طور تحلیل PIXE کاهش غلظت آهن در لایه سطحی و جایگزینی نیتروزن را نشان می‌دهد البته این فرآیند در مورد فولاد ۳۱۶ که برخلاف دو فولاد دیگر دارای عنصر Mo است، کندتر رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سختکاری فولاد، نیتروزنده، پلاسمای تخلیه تابان، Steels Hardening, Plasma Nitriding, Glow Discharge

حمام نمک، گازدهی در کوره آمونیاک، کاشت یونی و نیتروزنده

در محیط پلاسمای

در روش نیتروزنده بیهوده و سیلیکات پلاسمای، با ایجاد پلاسمای گاز نیتروزن، محیط مناسب برای تجزیه مولکول ها به اتم‌ها و یون‌ها فراهم می‌شود. یون‌های تولید شده با کسب انرژی از میدان الکتریکی اعمال شده به پلاسمای می‌توانند انرژی لازم برای نفوذ در ساختار شبکه‌ای فولاد را کسب کنند. فولاد یکی از آلیاژهای مهم آهن است و بر حسب اینکه ساختار شبکه بلوری آن چگونه است و به اصطلاح چه فازی دارد، دسته بندی می‌شود. فولادهای قابل سختکاری به روش نیتروزنده اغلب دارای دو فاز α و γ هستند که فاز α دارای ساختار $b.c.c$ و فاز γ دارای شبکه بلوری $f.c.c$ است. فولادهایی که فاز غالب آنها در دمای محیط فاز γ است، فولادهای آستنیتی نامیده می‌شوند [۱]. نمونه‌های انتخاب شده در این تحقیق نیز جز این گروه هستند. فولادهای آستنیتی که به سری ۳۰۰ نیز معروف هستند، از گروه فولادهای نسبتاً نرم محسوب می‌شوند و در صنعت ساخت قطعات فولادی کاربرد وسیعی دارند. سختی این فولادها در حدود ۳۰۰-۲۰۰ و بکرز است لذا سخت کردن قطعات ساخته شده از این فولادها الزامی است. پس از نیتروزنده این فولادها فاز γ به فاز N تبدیل می‌شود. این فاز از نوع محلول نیتروزن در فاز γ و شبکه بلوری آن $f.c.c$ می‌باشد و تا دمای بیش از ۶۰۰ سانتیگراد پایدار می‌ماند [۱]. اگر سطح قطعه ساخته شده دارای فاز α باشد، در حین نیتروزنده ابتدا فاز α به فاز γ تبدیل می‌شود و پس از پایان این مرحله گذار فاز γ به فاز N آغاز می‌گردد لذا وجود

۱. مقدمه

امروز یکی از پر مصرف ترین فلزات که نقش اساسی در پیشرفت صنایع کشورها دارد، آهن است. بسته به نیاز، با افزودن عنصر ناخالصی به این فلز می‌توان آلیاژهای بسیار متنوعی به دست آورد که یکی از مهمترین آنها فولاد است. فولادها را بر حسب نوع و غلظت عنصر ناخالصی آن می‌توان در گروه‌های متنوعی دسته بندی نمود. از بین فولادهای فولادهای ضدزنگ به خاطر مقاومت بالا در برابر عوامل اکسید کننده، در صنایع کاربرد وسیعی دارند. به منظور ساخت قطعاتی با ابعاد دقیق - در حد میکرومتر - استفاده از فولادهای نسبتاً نرم ضروری است به همین دلیل پس از ساخته شدن قطعه، برای افزایش طول عمر آن انجام فرآیندهایی خاص به منظور افزایش سختی و استحکام سطحی الزامی است. از بین مجموعه فرآیندهای سختکاری که به عملیات حرارتی معروف است، سختکاری از طریق نیتروزنده سطحی، یکی از رایج ترین روش‌ها است. در این روش که هدف اصلی آن وارد کردن عنصر نیتروزن در لایه سطحی قطعه و افزایش سختی آن در اثر تشکیل ترکیبات نیتروزن دار و تغییر ساختار بلوری سطح است، از فرآیندهای متنوعی استفاده می‌شود [۱]. تعدادی از این روش‌ها عبارتند از:

این مقاله در تاریخ ۱۸/۳/۸۲ دریافت و در تاریخ ۲۵/۳/۸۲ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر مسعود مرادشاهی، عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات گداخت هسته‌ای mmoradshahi@aeoi.org.ir
داود ایرجی، کارشناس فیزیک سازمان انرژی اتمی ایران،

نمونه‌ها از فولادهای ۳۱۶، ۳۰۴ و ۳۲۱ در ابعاد تقریبی mm ۴×۲۰×۲۰ تهیه شد. سپس نمونه‌ها پس از شستشو با مواد شوینده، به ترتیب با کاغذ سمبادهای شماره ۱۰۰۰، ۸۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۲۰۰ در حضور مداوم جریان آب - به طوری که سایش در هر مرحله عمود بر خطوط سایش مرحله قبل باشد - صیقل داده شدند. سپس با استفاده از پودر Al_2O_3 ۵ میکرونی و نمد مخصوص، سطح نمونه‌ها تا حد آینه‌ای شدن صیقل داده شدند.

نمونه‌ها پس از آماده شدن و قبل از نیتروژن دهی در داخل محفظه، در حضور گاز آرگون در فشار ۲۰۰ میلی تور و ولتاژ ۲۰۰۰ ولت به مدت ۱۵ دقیقه تحت تابش پلاسمای آرگون قرار گرفتند تا سطح آنها کاملاً تمیز شود این امر در بهبود سرعت فرآیند نیتروژن دهی تاثیر مثبت دارد.^[۵]

در این طرح از رژیم تخلیه تابان پلاسما استفاده شد. در رژیم تخلیه تابان برخورد الکترون‌های پر انرژی با گونه‌های اتمی و مولکولی موجود در پلاسما منجر به یونیزه شدن یا تحریک آنها می‌گردد. همزمان با این فرآیند، ترکیب مجدد یونها با الکترونها و باز گشت گونه‌های تحریک شده به حالت اولیه نیز صورت می‌گیرد که در اثر این فرآیند انرژی مازاد گونه‌های مذکور بصورت فوتون آزاد شده سبب نورانی شدن پلاسما می‌شود.^[۶]

در این رژیم جریان گذرنده از پلاسما بین ۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌آمپر تغییر می‌کند که بسته به فشارهای مختلف می‌توان با اعمال اختلاف پتانسیل‌های متفاوت، به این رژیم دست یافت. در سیستم ساخته شده در بازه ولتاژ ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت، رژیم تخلیه تابان به دست می‌آید.^[۷]

در طی نیتروژن دهی اختلاف پتانسیل ۷۰۰ ولت برای همه مراحل حفظ شد. در مورد دمای نمونه‌ها نیز - که در بازه دمایی بین ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد می‌توان فاز سخت شده γN را به دست آورد - دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد در تمام مراحل نیتروژن دهی حفظ شد. در مورد ترکیب گازهای استفاده شده با معرفی نسبت k که برابر است با نسبت حجمی هیدروژن به نیتروژن، بهترین نتیجه برای ترکیب ۲۰٪ هیدروژن با ۸۰٪ نیتروژن به دست می‌آید.^[۸] در این پژوهش مقادیر زیر برای k انتخاب شد.

$$k=0.20, 0.25, 0.33$$

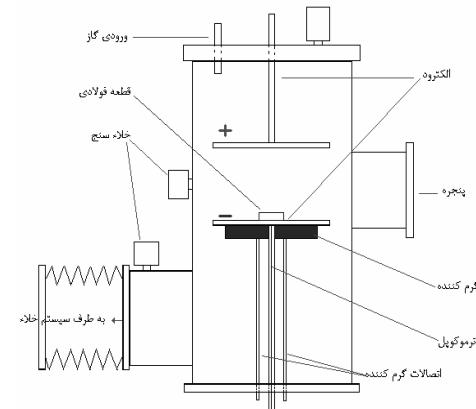
فشار محفظه در این طرح در بازه ۳۰۰ الی ۱۰۰۰ میلی تور متغیر بوده است، البته پس از به دست آمدن نتایج سختی سنجی، نمونه‌ها توسط سایر تحلیل‌ها بررسی شدند.

افزایش سختی در مورد نمونه‌هایی که در فشارهای ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی تور نیتروژن دهی شده بودند، به قدری ناچیز بود که با توجه به خطاها اندازه گیری غیرمفید تشخیص داده شد. نتایج تحلیل‌های سختی سنجی، PIXE، XRD GDS و RBS به ترتیب به این شرح است.

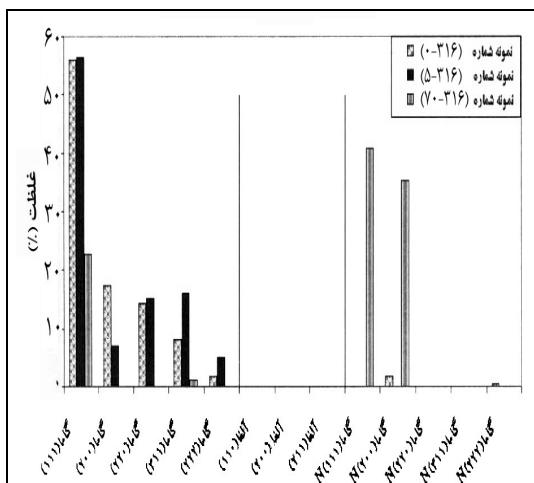
فاز α در سطح باعث افزایش زمان نیاز برای دستیابی به سختی سطحی می‌شود.^[۲]

۲. روش تحقیق و آزمایش

برای این طرح محفظه‌ای آلومینیومی انتخاب شد که شعاع آن ۳۰ و ارتفاع آن ۸۰ cm به شکل استوانه بود. نمودار طرح وار محفظه در شکل (۱) مشخص است. برای مشاهده پلاسمای در حال محفظه در شکل (۱) مشخص است. برای استفاده از جنس پیرکس استفاده شد. ورودی گاز در کار از یک پنجره از جنس پیرکس استفاده شد. ورودی گاز در قسمت بالای محفظه قرار دارد و از طرف پایین به سیستم خلا متصل می‌شود. برای کاهش ارتعاش‌های ناشی از پمپ‌ها در قسمت اتصال محفظه به سیستم خلا، از اتصالات لرزه گیر استفاده شد. در زیر کاتد یک المنت گرم کننده ۱۰۰۰۰۰ اواتی تعبیه شده است که دمای نمونه‌ها را روی درجه دلخواه نگه می‌دارد البته این سیستم گرم کننده در بازه دمایی ۳۰۰-۵۰۰ درجه سانتیگراد می‌تواند کاربرد داشته باشد زیرا خود پلاسما می‌تواند در حین کار، دمای نمونه‌ها را تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد بالا ببرد و سیستم گرم کننده تنها می‌تواند دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد را تنظیم کند. این سیستم شامل یک ترموکوپل است که در زیر کاتد کار گذاشته شده است و با استفاده از مدارهای الکترونیکی، جریان گرم کننده را قطع و وصل می‌کند. خطای سیستم گرم کننده در حدود ۵ درجه سانتیگراد است. برای گازدهی محفظه از کپسول گازهای مورد نظر با خلوص ۹۹/۹۹۹ استفاده می‌شود. فشار این کپسول‌ها ۲۰۰ bar بوده و با استفاده از شیرهای کنترل مخصوص هر گاز، مقدار گاز ورودی برای به دست آوردن ترکیب مناسب گاز در داخل محفظه تنظیم می‌شود. برای اعمال ولتاژ مورد نظر بین الکتروودها از یک منبع تغذیه DC که می‌تواند جریان مستقیمی تا حداقل ۵ kv و جریان حداقل ۱/۵A را تأمین کند، استفاده شد.



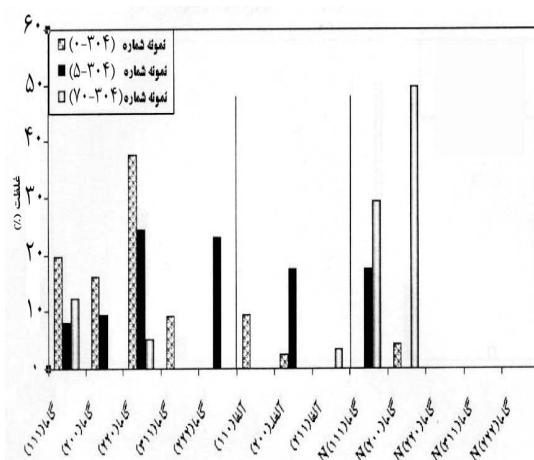
شکل ۱. طرح کلی دستگاه



نمودار ۴-۱. توزیع فازهای فولاد

٤. نتائج تحلیل XRD

در این تحلیل فازهای ایجاد شده در سطح نمونه ها مشخص می شوند. مطابق نتایج به دست آمده از طرح پراش پرتو X نمونه ها، نوع فاز موجود در سطح آنها بر حسب درصد و به تفکیک برای صفحات مختلف بلوری به صورت نمودارهای مقایسه ای (۱-۴)، (۲-۴)، (۳-۴)، قابل مشاهده است [۶ و ۹]. هر یک از نمودارها شامل نحوه توزیع فازها، به ترتیب برای نمونه پرتو نیدده، ۵ و ۷۰ ساعت پرتو دیده است. در هر سه نمونه فرآیند تبدیل فاز α و γ به βN به خوبی قابل تشخیص است. البته بیشترین میزان تبدیل مربوط به نمونه ۳۲۱ و کمترین متعلق به فولاد ۳۱۶ است. همان طور که از نمودارهای مقایسه ای (۱-۴)، (۲-۴)، (۳-۴) مشخص است، برای هر یک از فولادهای ۳۰۴، ۳۰۶ و ۳۲۱ با افزایش زمان نیتروژن دهی فاز غالب سطح، فاز γN است. البته مطابق با تحلیل های قبل، غلظت فاز γN در نمونه ۳۲۱ پس از پرتو دهی بیشتر از دو نمونه دیگر است. قابل ذکر است که تمام نمونه هایی که تحت تحلیل XRD قرار گرفته اند در شرایط فشار ۱۰۰۰ میلی تور، دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد برای نمونه ها و ترکیب گاز متانظر با $K = ۰.۳۳$ پرتو دهی شده اند.

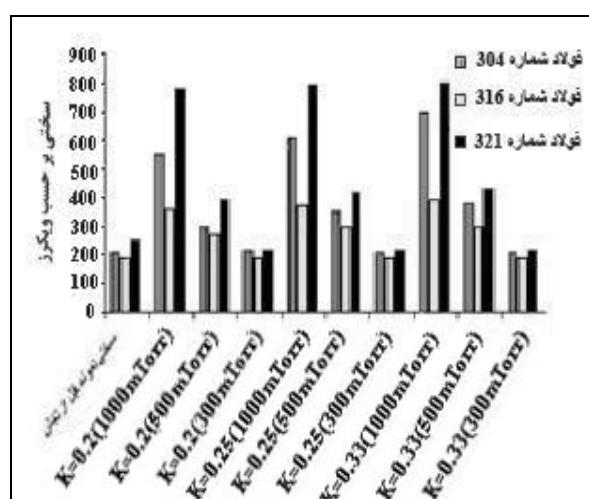


نمودار ۴-۲. توزیع فازهای فولاد

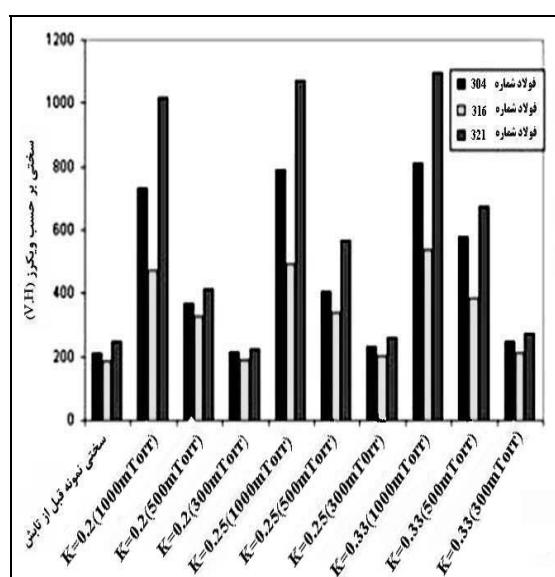
۳. نتایج سختی سنجدی

نتیاجی که به صورت نمودارهای مقایسه‌ای مشاهده می‌شود نتیجه میانگین‌گیری حداقل سه اندازه گیری در نقاط مختلف سطح نمونه‌ها است.

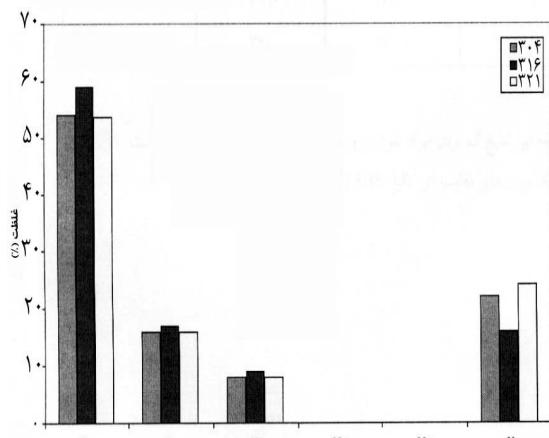
افزایش محسوس سختی در گستره ۵ تا ۷۰ ساعت به دست می‌آید. از نمودارهای (۱-۳) و (۲-۳) که به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۵ و ۷۰ ساعت پرتو دیده می‌باشد، به وضوح افزایش سختی سطحی نمونه‌ها به خصوص در نمونه ۳۲۱ که در فشار ۱۰۰۰ میلی تور و با ترکیب گاز K_{33} به مدت ۷۰ ساعت پرتو دیده، مشاهده می‌شود. در مورد نمونه‌های ۳۰۴ و ۳۱۶ نیز افزایش سختی محسوس است و در این نمونه‌ها هم در شرایط بالا نتیجه بهتری به دست آمده است.



نمودار ۳-۱. نتایج سختی سنجی پس از ۵ ساعت پر توده‌ی



نمودار ۳-۲. نتایج سختی سنگی پس از ۷۰ ساعت پر توده‌ی



نمودار ۳-۵. غلظت عناصر در نمونه ها بعد از ۷۰ ساعت پرتودهی

با توجه به این نمودارها می‌توان به عنوان یک فرض، وجود عنصر Mo در ساختار آلیاژی فولاد ۳۱۶ را به منزله عاملی با تاثیر منفی در فرآیند نیتروژن‌دهی فولاد ذکر کرد.

۶. نتایج تحلیل RBS

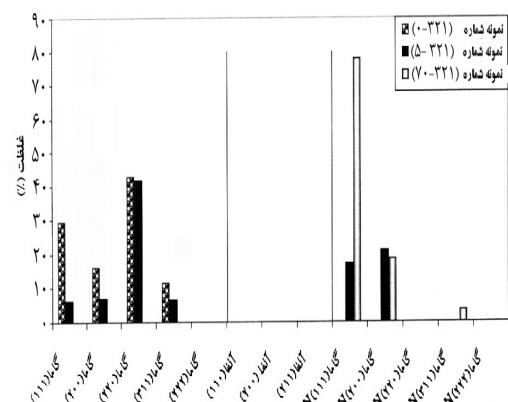
از تحلیل RBS برای تشخیص تقریبی عمق لایه نیتروژن داده شده استفاده شد و برای این منظور نمونه‌هایی که در شرایط: فشار ۱۰۰۰ میلی تور و به مدت ۷۰ ساعت در دو نوع ترکیب متناظر به ۳۳٪ K=۰.۲۵، نیتروژن‌دهی شده بودند، انتخاب شدند.

نتایج این تحلیل نیز در قالب نمودارهای (۱-۶) و (۲-۶) ارایه شده است. نمودار (۱-۶) مربوط به نمونه هایی است که در ترکیب گاز متناظر با K=۰.۲۵ پرتودهی شده‌اند و نمودار (۲-۶) مربوط به ترکیب گاز متناظر با K=۰.۳۳ است. مطابق نتایج به دست آمده از RBS ضخامت لایه نفوذ نیتروژن در نمونه های پرتودهی شده به شرح زیر است.

جدول ۱.

K=۰.۲۲		K=۰.۲۵	
(d)	فولاد	(d)	فولاد
۱۲۰۰۰	۳۰۴	۱۰۰۰۰	۳۰۴
۱۰۰۰۰	۳۱۶	۱۰۰۰۰	۳۱۶
۱۷۰۰۰	۳۲۱	۱۵۰۰۰	۳۲۱

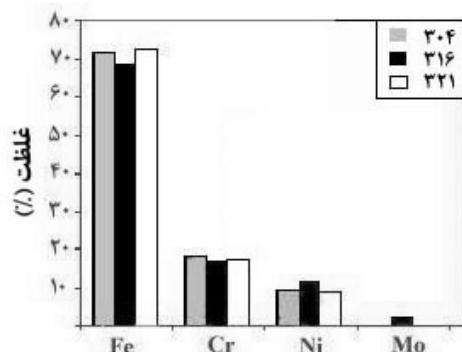
با مقایسه این نتایج، کم بودن میزان نفوذ نیتروژن در فولاد ۳۱۶ به وضوح مشخص است. در ادامه نمودارهای مقایسه‌ای تحلیل RBS قابل مشاهده است.



نمودار ۳-۶. توزیع فازهای فولاد ۳۲۱

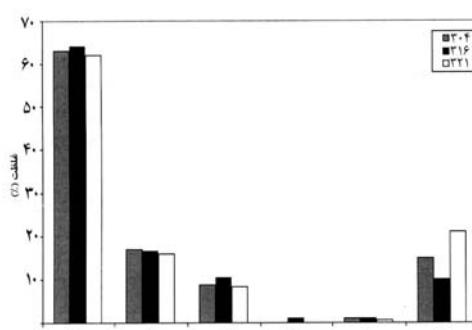
۵. نتایج تحلیل PIXE

با مشاهده نمودارهای مقایسه‌ای، نحوه تغییرات غلظت عناصر مختلف در سطح نمونه ها به دست می‌آید. نمودار (۱-۵) مربوط به نتایج تحلیل PIXE سه نوع فولاد، قبل از پرتودهی است و نمودار (۲-۵) و (۳-۵) به ترتیب مربوط به تحلیل PIXE نمونه‌ها پس از ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی در شرایط: فشار ۱۰۰۰ میلی تور و K=۰.۳۳ است.

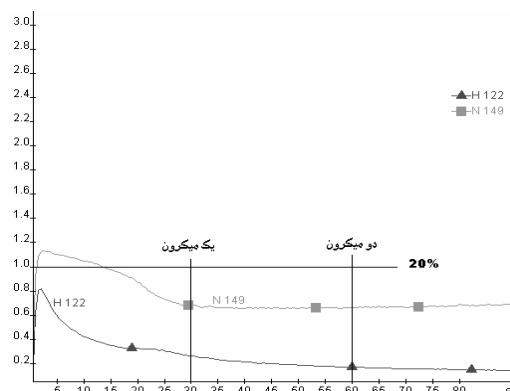


نمودار ۵-۱. غلظت عناصر در نمونه ها قبل از پرتودهی

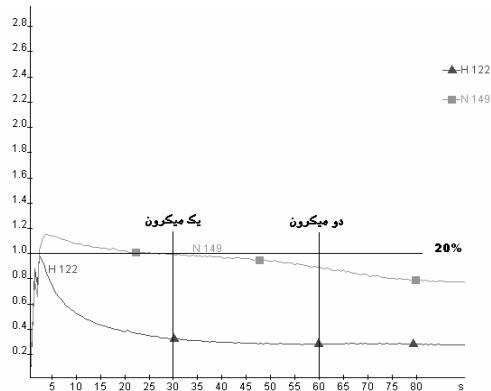
با توجه به نمودار (۱-۳) وجود عنصر Mo در فولاد ۳۱۶ - برخلاف دو فولاد دیگر - مشخص می‌شود. همین طور نمودار (۲-۳) وجود عنصر نیتروژن در لایه سطحی را تا حدود ۲۰٪ نشان می‌دهد. البته همچنان غلظت نیتروژن در فولاد نیتروژن داده شده است از ۳۱۶ کمتر از دو نوع فولاد نیتروژن داده دیگر است.



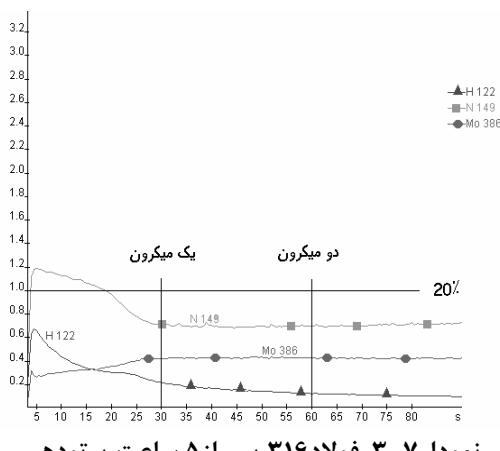
نمودار ۵-۲. غلظت عناصر در نمونه ها بعد از ۵ ساعت پرتودهی



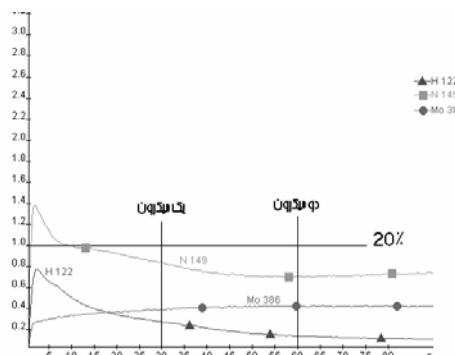
نمودار ۷-۱. فولاد ۳۰۴ پس از ۵ ساعت پرتودهی



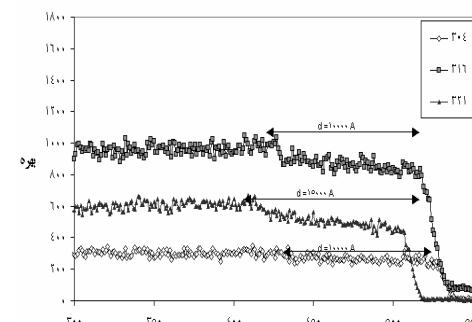
نمودار ۷-۲. فولاد ۳۰۴ پس از ۷۰ ساعت پرتودهی



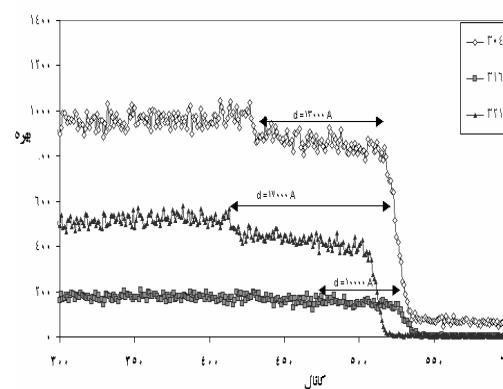
نمودار ۷-۳. فولاد ۳۱۶ پس از ۵ ساعت پرتودهی



نمودار ۷-۴. فولاد ۳۱۶ پس از ۷۰ ساعت پرتودهی



نمودار ۶-۱. تحلیل RBS نمونه ها در حالت K=۰/۲۵



نمودار ۶-۲. تحلیل RBS نمونه ها در حالت K=۰/۳۳

۷. نتایج تحلیل GDS

تحلیل GDS به عنوان یک روش کمکی برای تایید نتایج تحلیل RBS در مورد نمونه هایی که در فشار ۱۰۰۰ میلی تور و ترکیب گاز متناظر به $K=0/33$ ، به مدت ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی شده بودند، استفاده شد.

در این تحلیل میزان تغییرات طیف پلاسمایی که برای لایه برداری از سطح نمونه به کار می رود بر حسب زمان لایه برداری، به دست می آید.

جدول (۱): عمق نفوذ نیتروژن در نمونه ها، در مقادیر K مختلف نمودارهای به دست آمده به صورت کیفی و ضمنی تغییرات غلظت عناصر نیتروژن و هیدروژن را نشان می دهدند با مقایسه این نمودارها با نمودارهای PIXE و RBS می توان نحوه تغییرات غلظت عناصر مورد نظر را بر حسب عمق مشاهده کرد.

به ترتیب نمودارهای مربوط به نمونه های ۳۰۴، ۳۱۶ و ۳۲۱ در ادامه مشاهده می شود.

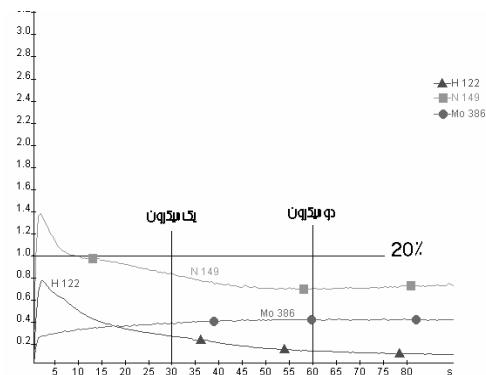
نمودارهای (۱)-(۷) و (۲)-(۷) مربوط به فولاد ۳۰۴، (به ترتیب ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی)،

نمودارهای (۳)-(۷) و (۴)-(۷) مربوط به فولاد ۳۱۶، (به ترتیب ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی) و

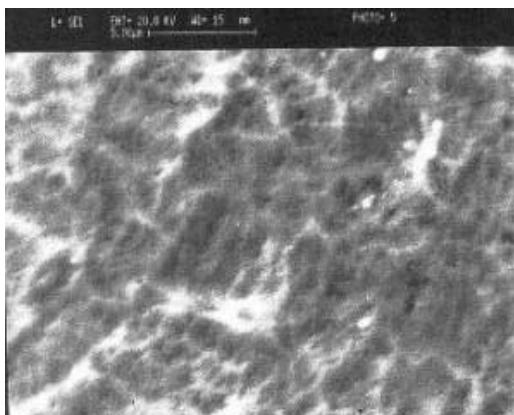
نمودارهای (۵)-(۷) و (۶)-(۷) مربوط به فولاد ۳۲۱، (به ترتیب ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی) هستند.



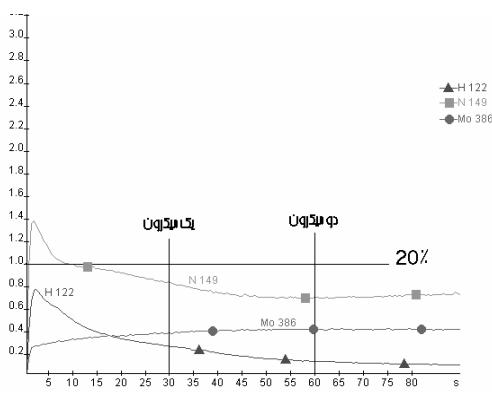
شکل ۸-۱. نمونه ۳۰۴ قبل از پرتودهی



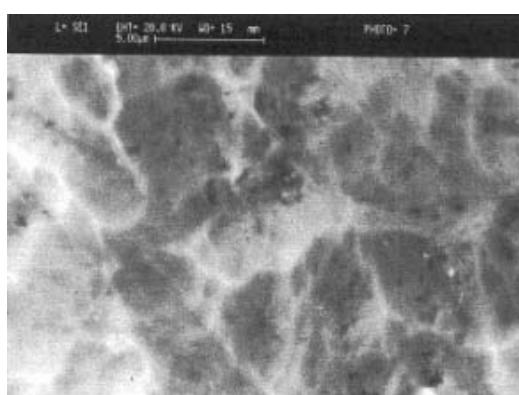
نمودار ۸-۵. فولاد ۳۲۱۵ پس از ۵ ساعت پرتودهی



شکل ۸-۲. نمونه ۳۰۴ ۵ ساعت پرتودهی



نمودار ۸-۶. فولاد ۳۲۱۵ پس از ۷۰ ساعت پرتودهی



شکل ۸-۳. نمونه ۳۰۴ ۷۰ ساعت پرتودهی



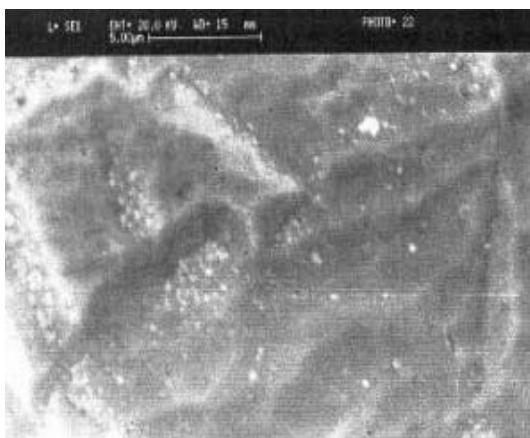
شکل ۸-۴. نمونه ۳۱۶: قبل از پرتودهی

۸. نتایج تصویربرداری SEM

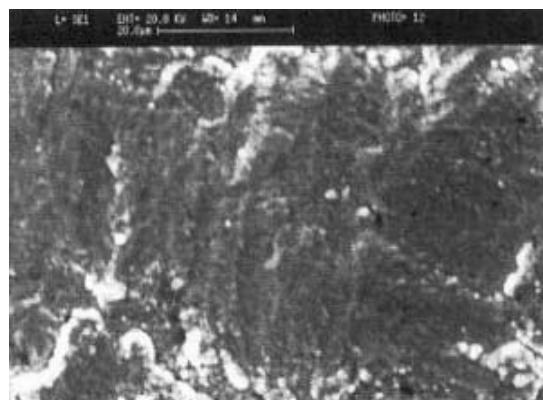
سرانجام برای مقایسه ظاهری سطح نمونه‌های پرتو دیده در شرایط: سشار ۱۰۰۰ میلی تور و ترکیب گاز متناظر با $K=0.33$ و زمان‌های ۵ و ۷۰ ساعت، از تصویربرداری SEM با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر استفاده شد.

تصاویر (۱-۸)، (۲-۸) و (۳-۸) به ترتیب مربوط به نمونه‌های فولاد ۳۰۴ قبل از پرتودهی، ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی شده، تصاویر (۴-۸)، (۵-۸) و (۶-۸) به ترتیب مربوط به نمونه‌های فولاد ۳۱۶ قبل از پرتودهی، ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی شده و تصاویر (۷-۸)، (۸-۸) و (۹-۸) به ترتیب مربوط به نمونه‌های فولاد ۳۲۱ قبل از پرتودهی، ۵ و ۷۰ ساعت پرتودهی شده هستند.

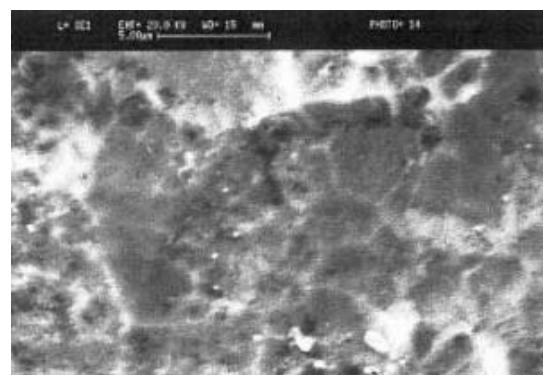
چنانچه از تصاویر مشخص است برای فولاد ۳۰۴ اندازه دانه‌های سطحی با افزایش زمان پرتودهی کوچکتر شده است. در نمونه ۳۱۶ دانه بندی سطح نمونه پس از ۵ ساعت پرتودهی به صورت نامنظم درآمده است ولی پس از ۷۰ ساعت پرتودهی ظاهری شبیه نمونه ۳۰۴ با ۵ ساعت پرتودهی، پیدا کرده است. نمونه ۳۲۱ ۳۰۴ میلی دارد از خود نشان می‌دهد و پس از پرتودهی به مدت ۷۰ ساعت - مطابق با آنچه که از تحلیل XRD به دست آمده - تنها دارای فاز γ است که تک رنگ بودن سطح آن می‌تواند نشانه‌ای از این مطلب باشد.



شکل ۸-۹. نمونه ۳۲۱ : ۷۰ ساعت پر توده‌ی



شکل ۸-۵. نمونه ۳۱۶ : ۵ ساعت پر توده‌ی



شکل ۸-۶. نمونه ۳۱۶ : ۷۰ ساعت پر توده‌ی

۹. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام شده و تحلیل‌های متفاوت، در شرایط کار:

فشار: ۳۰۰۰ الی ۱۰۰۰ میلی تور، دمای نمونه‌ها: ۳۵۰ درجه سانتیگراد، ولتاژ کار: ۷۰۰ ولت جریان مستقیم، مدت پر توده‌ی: ۵ و ۷۰ ساعت و نسبت هیدروژن به نیتروژن ($K = \frac{۳۳}{۲۵}, \frac{۲۰}{۲۵}, \frac{۲۰}{۳۳}$)، نتیجه‌های زیر به دست آمد:

(الف) حداقل فشار لازم برای دستیابی به نتیجه معقول در فرآیند نیتروژن دهی فولادهای بررسی شده در محیط پلاسما، ۱۰۰۰ میلی تور است.

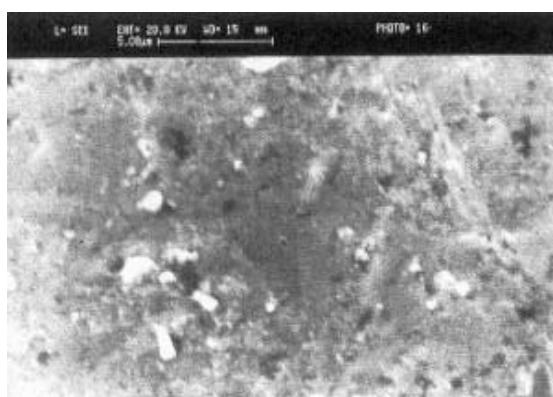
(ب) بهترین نتیجه در این تحقیق در ترکیب ۱ به ۳ هیدروژن به نیتروژن حاصل شد. ($K = \frac{۳۳}{۲۰}$)

(پ) با افزایش مدت پر توده‌ی عمق نفوذ نیتروژن نیز افزایش می‌یابد و لی غلظت نیتروژن در حدود ۲۰٪ ثابت می‌ماند.

(ت) حداقل مدت پر توده‌ی برای رسیدن به سختی مطلوب به نوع فولاد بستگی دارد به طوری که در مورد فولاد ۳۲۱ با ۵ ساعت پر توده‌ی می‌توان به افزایش سختی قابل توجهی به اندازه بیش از دو برابر دست یافت ولی برای فولاد ۳۱۶ در همین مدت تنها افزایش سختی در حدود ۳۰ درصد به دست می‌آید.

(ث) در میان فولادهای بررسی شده فولاد ۳۱۶ از نظر ترکیب آلیاژی تفاوت عمده‌ای با دو فولاد ۳۲۱ و ۴ دارد و دارای حدود ۲ درصد Mo است. به نظر می‌رسد عدم سخت شدن فولاد ۳۱۶ با این روش، به وجود عنصر Mo مربوط می‌شود. میزان عمق نفوذ و سختی سطحی در این فولاد - به روشنی - کمتر از دو نوع فولاد دیگر است.

دلیل این امر احتمالاً آن است که مولیبدن سطح فولاد در مجاورت با نیتروژن با آن ترکیب و لایه MoN را بر سطح فولاد تولید کرده است که باعث می‌شود نفوذ نیتروژن در لایه‌های زیرین به کندی



شکل ۸-۷. نمونه ۳۲۱ : قبل از پر توده‌ی



شکل ۸-۸. نمونه ۳۲۱ : ۵ ساعت پر توده‌ی

که شکل ظاهری هر سه نوع فولاد قبل از پرتو دهی بسیار شبیه هستند. این رفتار فولاد ۳۱۶ نیز مربوط به وجود عنصر Mo و تشکیل لایه MoN بر سطح آن است.

تشکر و قدردانی

در پایان پس از حمد و سپاس پروردگار متعال ، از کلیه عزیزانی که به شرح زیر در اجرای این طرح از آغاز تاکنون یاری کرده اند قدردانی می نماییم:

آقای دکتر نوحی و آقای مهندس سنگ به خاطر راهنمایی های ایشان در تهیه نمونه ها در بخش حالت جامد سازمان انرژی اتمی ایران، خانم جلالی به خاطر قبول زحمت انجام تحلیل سختی سنجی در بخش حالت جامد سازمان انرژی اتمی ایران، آقای مهندس دبیرزاده که در ساخت محفظه و اتصالات موردنیاز در بخش طراحی و ساخت سازمان انرژی اتمی ایران ما را یاری دادند. خانم وطن خواه در بخش واندوگراف سازمان انرژی اتمی ایران به خاطر انجام تحلیل های PIXE و RBS

آقای دکتر نوبن روز و آقای مهندس مالکیان و آقای مهندس صدری در بخش مواد هسته ای واحد کرج، به خاطر همکاری صمیمانه ایشان در انجام تحلیل های XRD و GDS

آقای دکتر کاشانی و آقای مهندس ابراهیمی در دانشکده متالورژی دانشگاه تهران به جهت تصویر برداری SEM

مراجع

- [۱] گلعدار، م.ع، کتاب "عملیات حرارتی و مهندسی سطح" ، انتشارات ارکان اصفهان، ۱۳۷۷.
- [۲] ربیعی، ا، کتاب "متالورژی فیزیکی" ، انتشارات فنی حسینیان، ۱۳۷۷.
- [۳] مرادشاهی، م، مینو، ح، ایرجی، د، کنفرانس فیزیک ایران، زنجان ۱۳۸۱]
- [4] Berg, M., Budtz-Jørgensen, C.V., Reitz, H., Schweitz, K.O., Chevallier, J., *Surf. Coat. Technol.*, 124, 2000.PP. 25-31.
- [5] Lei, M.K., Materials, J., Science 34, 1999, PP. 5975-5982.
- [6] Baranowska, J., Szczechinski, K., Wysiecki, M., *Surf Coat Technol.*, 151-152, 2002, PP. 534-539.
- [7] Camps, E., Becerril, F., *Superficies Vocio* 9, 290-293 december 1999.

انجام گیرد در نتیجه در لایه های زیرین فولاد ، نیتروژن کمتری نفوذ می کند و ضخامت لایه غنی شده از نیتروژن - همانند آنچه که نتایج تحلیل RBS نشان می دهد - کاهش می یابد. از طرفی چون سیستم سختی سنجی موجود در بخش حالت جامد سازمان انرژی اتمی ایران نمی تواند سختی لایه های با ضخامت کمتر از ۱ میکرون را به درستی اندازه بگیرد و سختی گزارش شده در این حالت متاثر از سختی زیر لایه است، لذا در مورد فولاد ۳۱۶ اگر هم لایه سختی در سطح تولید شده باشد به خاطر ضخامت کم، سختی آن قبل از اندازه گیری نبوده است.

(ج) با توجه به نتایج PIXE نیز می توان به این مطلب اشاره کرد که ساز و کار نفوذ نیتروژن در این سه فولاد بررسی شده، متفاوت است به طوری که نمودارهای PIXE نمودارهای ۳۰۴ و ۳۲۱ آهن در حدود ۷۰ دیده اند، نشان می دهد که در فولادهای ۳۰۴ و ۳۲۱، آهن در حدود ۱۸ درصد کاهش یافته و به اندازه بیش از ۲۰ درصد نیتروژن وارد ساختار بلور شده است که به روشنی رانده شدن اتمهای آهن از سطح فولاد - به احتمال زیاد به سمت داخل - را نشان می دهد. وی در مورد فولاد ۳۱۶ کاهش غلظت آهن در حدود ۷ تا ۸ درصد بوده است و میزان غلظت نیتروژن نفوذی در حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد است. برخلاف فولادهای ۳۰۴ و ۳۲۱ که آهن تقریباً به همان میزان نفوذ نیتروژن از سطح رانده شده است، در فولاد ۳۱۶ این رانده شدگی تنها به اندازه نصف میزان نفوذ نیتروژن است.

این امر می تواند بر این نکته دلالت کند که در این فولاد نیتروژن به خاطر مانع MoN نتوانسته تا حد اشباع در فولاد نفوذ کند و همچنین بیشتر به صورت بین نشینی در فضاهای خالی شبکه ای قرار گرفته است.

البته همین ساز و کار هم در مورد فولادهای ۳۰۴ و ۳۲۱ می تواند رخ داده باشد ولی به خاطر سرعت نفوذ بیشتر نیتروژن در این فولادها پدیده اشباع نیتروژن در فضاهای خالی شبکه ای رخ داده و از آن پس فرآیند جانشینی با آهن آغاز شده است. از طرفی XRD نیز به روشنی تبدیل فازهای سطحی اولیه α و γ را به فاز γ که بک فاز غنی شده از نیتروژن بوده و سختی بالایی دارد، نشان می دهد. البته با توجه به نتایج سایر تحلیل ها میزان تبدیل فازهای اولیه به فاز γ در فولاد ۳۲۱ تقریباً به طور ۱۰۰ درصد انجام شده ولی در مورد دو فولاد دیگر خصوصاً در فولاد ۳۱۶ - به خاطر وجود Mo - این فرآیند در مدت زمان پرتو دهی به طور ناقص انجام شده است.

(ج) تصاویر SEM مربوط به سطح نمونه ها در شرط مختلف ، به وضوح بروز تغییرات اساسی ظاهری در شکل دانه بندی سطح فولادهای پرتو دیده را نشان می دهد.

در فولاد ۳۲۱ پس از ۷۰ ساعت پرتو هی اندازه دانه بندیها به کوچکترین حد در میان سایر نمونه ها رسیده است در مورد فولاد ۳۱۶ پس از پرتو دهی حتی به مدت ۵ ساعت نیز تفاوت عمده ای از نظر ظاهری نسبت به دو نوع فولاد دیگر مشاهده می شود در حالی

[8] Yu, Z., Xu, X., Wang, L., Qiang, J., Hei, Z., Surf Coat TechnoL, 153, 2002, PP.125-130.

[9] PHYSICS of IONIZED GASES, B.M. Smirnov, 2001.john Wiley Sons.Inc.