



## نیترورژن دهی پلاسمایی و پیرسازی هم زمان فولاد پیرسخت شونده مارتنزیتی ۱۷-۴PH

حمیدرضا ریاضی<sup>۱</sup>، فخرالدین اشرفی زاده<sup>۲</sup>، سید رحمان حسینی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>. دانشگاه صنعتی اصفهان (دانشجوی دکتری)

<sup>۲</sup>. دانشگاه صنعتی اصفهان (استاد)

<sup>۳</sup>. دانشگاه صنعتی مالک اشتر (استادیار)

### چکیده

فولاد زنگ نزن رسوب سخت شونده ۱۷-۴PH خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی خوبی دارد اما مقاومت به سایش این آلیاژ برای کاربردهای سایشی مناسب نیست. از روش های بهبود مقاومت سایشی، فرایند نیترورژن دهی است که دمای آن را می توان در محدوده عملیات پیرسازی آلیاژ انتخاب نمود. در پژوهش حاضر رفتار پیرشدن این فولاد با عملیات حرارتی بررسی شد و برای رسیدن به بیشینه سختی و اصلاح سطح از نیترورژن دهی پلاسمایی استفاده شد. با افزایش دمای پیرسازی، کاهش بیشینه سختی و کاهش زمان رسیدن به آن مشاهده شد. با افزایش دمای نیترورژن دهی، ضخامت و سختی لایه نیتروره و همچنین سختی مغز نمونه بیش تر شد، اما سختی مرکز نمونه نسبت به حالت بیشینه افت اندکی داشت. در ادامه، نیترورژن دهی و پیرسازی به طور هم زمان انجام گرفت که علاوه بر حذف مرحله پیرسازی بطور جداگانه، سطح و مغز قطعه به مقدار سختی بیشینه رسیدند.

**واژه های کلیدی:** نیترورژن دهی پلاسمایی، پیرسازی، فولاد زنگ نزن، ۱۷-۴PH.

<sup>۱</sup>. H.riazi@ma.iut.ac.ir

## مقدمه

فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH پرکاربردترین فولاد در دسته فولادهای زنگ‌نزن رسوب سخت شونده است. به سبب برخورداری از استحکام و انعطاف‌پذیری خوب و مقاومت به خوردگی عالی، در صنایع متعدد و حساسی نظیر شیمیایی، نفت و گاز، هسته‌ای و نظامی کاربرد دارد [۱-۴]. فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH آلیاژی مارتنزیتی است که دارای تقریباً ۳٪ وزنی مس است و با رسوب ذرات غنی از مس در زمینه مارتنزیت می‌تواند به بیشینه سختی و استحکام برسد. پس از انجام عملیات حرارتی آنیل انحلالی در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  به مدت نیم ساعت و سرد شدن در روغن یا هوا، زمینه مارتنزیت از مس فوق‌اشباع می‌شود و با پیرسازی بین  $350^{\circ}\text{C}$  تا  $600^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱ تا ۴ ساعت رسوبات غنی از مس در زمینه ظاهر می‌شوند که ابعاد آنها در حد نانوذرات است. این رسوبات در دمای کم دارای ساختار bcc هستند و با زمینه هم‌خوانی دارند اما در دماهای بیش‌تر به fcc تبدیل می‌شوند و کاهش سختی را سبب می‌شوند [۳-۷].

بسیاری از کاربردهای ذکر شده این فولاد در شرایط سایشی است [۸]. یکی از راه‌های افزایش سختی سطح و به دنبال آن افزایش مقاومت سایشی، نیتروژن‌دهی است [۹]. نیتروژن‌دهی پلاسمایی به علت دمای کم‌تر و عدم رسوب نیتريد کروم از یک سو و وجود پراکنش برای برداشتن لایه سطحی اکسید کروم از سوی دیگر، برای فولادهای زنگ‌نزن مناسب است [۱۰-۱۲].

در پژوهش‌های پیشین [۱۳] نمونه‌ها قبل از عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی پیر شده‌اند و مغز نمونه به سختی مورد نظر رسیده است؛ و یا دما و زمان نیتروژن‌دهی بدون در نظر گرفتن دما و زمان لازم برای رسیدن به بهینه خواص مکانیکی مرکز نمونه انتخاب شده است [۱۴-۱۶]. در نتیجه، سختی مغز قطعه پس از نیتروژن‌دهی پلاسمایی از مقدار بیشینه افت کرده است و مغز قطعه در حالت بهینه پیرسازی قرار ندارد. در این پژوهش با بررسی نیتروژن‌دهی این فولاد، قصد بر این است که همراه با عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی، پیر شدن هم‌زمان مغز قطعه نیز ارزیابی شود.

## مواد و روش تحقیق

ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی ۱۷-۴PH خریداری شده در جدول ۱ آمده است. فولاد خریداری شده با قطر  $9/8$  میلی‌متر و طول یک متر بود که به نمونه‌هایی با همان قطر و طول ۲ cm بریده شد. نمونه‌ها در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  به مدت نیم ساعت تحت عملیات حرارتی آنیل انحلالی قرار گرفتند و سپس در روغن سرد شدند تا ساختار مارتنزیت اشباع در آنها تشکیل شود.

تعدادی نمونه برای اندازه‌گیری سختی در دماهای  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $420^{\circ}\text{C}$ ،  $440^{\circ}\text{C}$ ،  $460^{\circ}\text{C}$ ،  $480^{\circ}\text{C}$  و  $500^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های معین پیر شدند. برای بررسی نمودار تنش- کرنش در مراحل پیرسازی، سه نمونه کشش طبق استاندارد ASTM E8 تهیه شدند که عبارت‌اند از کونچ شده، نیم ساعت عملیات پیرسازی در دمای  $480^{\circ}\text{C}$  و دو ساعت عملیات پیرسازی در دمای  $480^{\circ}\text{C}$ . علت انتخاب دمای  $480^{\circ}\text{C}$  این بود که شرایط پیرسازی در این دما شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین عملیات پیرسازی برای این فولاد است که با نام تجاری H۹۰۰ شناخته می‌شود.

سختی سنجی نمونه‌های پیر شده با دستگاه سختی سنج به روش راکول سی (۱۵۰ کیلوگرم) انجام شد. نتایج به دست آمده از سختی سنجی نمونه‌های پیر شده توسط نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup>، رسم و برازش شد تا زمان رسیدن به بیشینه سختی به دست آید. برای کشش نمونه‌ها و تهیه نمودار تنش- کرنش از دستگاه هانسفیلد<sup>۲</sup> مدل H50ks با نرخ کشش ۱ mm/min استفاده شد.

یک طرف سطح مقطع تعدادی از نمونه‌های استوانه‌ای به ترتیب با سنباده‌های ۸۰، ۱۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ پولیش شدند تا برای عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی شرایط سطحی یکسانی داشته باشند. سپس نمونه‌ها توسط استون شسته شدند و با آلتراسونیک درون استون، چربی و آلودگی‌های احتمالی روی نمونه‌ها زدوده شد. تمامی نمونه‌ها برای جلوگیری از اثر لبه درون نگه‌دارنده‌ای فولادی نصب شدند (شکل ۱). با این ترتیب لایه نیتروژن در تمام نقاط سطح یکنواخت تشکیل شد. یک سوراخ برای تعبیه ترموکوپل در نگه‌دارنده ایجاد شد تا از صحت دمای نمونه‌ها اطمینان حاصل شود.

برای انجام فرایند نیتروژن‌دهی پلاسمایی از دستگاه نیتروژن‌دهی پلاسمایی جریان مستقیم پالسی (ساخت شرکت فن‌آور امین)<sup>۱</sup> استفاده شد. قبل از شروع عملیات نیتروژن‌دهی، طی پراکنش پلاسمایی در دمای ۱۲۰ °C و زمان ۹۰ دقیقه و فشار ۰/۳ Torr، سطح نمونه‌ها توسط ترکیب گاز آرگون و نیتروژن با نسبت ۲ بمباران شد تا لایه اکسیدی کروم روی سطح فولاد زنگ‌نزن برداشته شود. برای مقایسه نمونه‌های پیر شده و نیتروژن‌دهی شده، سه دمای نیتروژن‌دهی بین ۴۰۰ °C و ۵۰۰ °C انتخاب شد. زمان نیتروژن‌دهی پلاسمایی با توجه به زمان متداول برای نیتروژن‌دهی فولادهای زنگ‌نزن در این بازه دمایی، ۵ ساعت در نظر گرفته شد. برای پیر سخت شدن نمونه‌ای که در ۴۰۰ °C نیتروژن‌دهی می‌شود، زمان ۱۰ ساعت نیز انجام شد. از ترکیب گاز نیتروژن و هیدروژن با نسبت ۱-۳ و فشار داخلی محفظه در حین فرایند ۳ Torr استفاده شد. ریزسختی سنجی نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده از دستگاه ریزسختی سنج ویکرز کوپا با نیروی ۵۰ گرم و زمان ۱۰ ثانیه استفاده شد.

برای مشاهده سطح مقطع، نمونه‌ها توسط میکروبرش، برش داده شدند و مانت گرم شدند. بعد از سنباده‌زنی، نمونه‌های مانت شده با محلول ۵۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک ۳۷٪، ۵۰ میلی‌لیتر اتانول و ۵ گرم  $CuCl_2$  حکاکی شد. تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده با میکروسکوپ نوری انعکاسی و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس<sup>۳</sup> تهیه شد.

برای فاز شناسی نمونه‌های کونچ شده و نیتروژن‌دهی شده از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل اکسپرت<sup>۴</sup> ساخت شرکت فیلیپس با لامپ مسی تحت جریان ۳۰ میلی‌آمپر و ۴۰ کیلوولت با نرخ روبش ۰/۰۵ درجه در هر ثانیه استفاده شد. نتایج بدست آمده با نرم‌افزار اکسپرت‌های اسکور<sup>۵</sup> فازشناسی شد.

1. MATLAB

2. Hounsfield

3. Philips

4. X'pert

5. X'pert highscore

## نتایج و بحث

شکل ۲ (الف) نمودار پیرسختی فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ را نشان می‌دهد. زمان پیر شدن نمونه با افزایش دما کاهش یافته است. همان طور که در شکل ۲ (ب) مشخص است، زمان رسیدن به بیشینه سختی در  $400^{\circ}\text{C}$  برابر ۱۰ ساعت است؛ در حالی که در  $500^{\circ}\text{C}$  برابر با ۲۰ دقیقه است. همچنین بیشینه سختی با افزایش دما روندی کاهشی را نشان می‌دهد که از  $44\text{ HRC}$  برای  $400^{\circ}\text{C}$  به  $41\text{ HRC}$  برای دمای  $500^{\circ}\text{C}$  رسیده است. کاهش زمان مورد نیاز برای رسیدن به بیشینه سختی به دلیل کاهش ضریب نفوذ است که به دما وابسته است و کاهش میزان سختی با افزایش دما به دلیل توزیع غیریکنواخت تر رسوبات غنی از مس در ساختار در دماهای بیش تر است [۱۸, ۳].

مقایسه نمودار تنش- کرنش نمونه‌های پیر شده در دمای  $480^{\circ}\text{C}$  در شکل ۳ نشان داده شده است. در حالت کونچ شده استحکام کششی برابر با  $1845\text{ MPa}$  است که پس از پیر شدن به مدت نیم ساعت به  $1183\text{ MPa}$  می‌رسد و با ادامه عملیات حرارتی تا دو ساعت، افت می‌کند و به  $1101\text{ MPa}$  می‌رسد. استحکام نهایی نیز وضعیتی مشابه دارد و این امر نشان می‌دهد که خواص مکانیکی آلیاژ از جمله سختی و استحکام در حالت پیر شده بیش تر است.

شکل ۴ تصویر متالوگرافی سطح مقطع نمونه‌های نیتروژن دهی شده را نشان می‌دهد. در تصاویر متالوگرافی لایه نیتروژن فقط برای نمونه  $500^{\circ}\text{C}$  مشخص است، در صورتی که برای نمونه‌های نیتروژن دهی شده در دماهای کم تر لایه نیتروژن دهی شده‌ای مشاهده نمی‌شود. اما آنچه که الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های نیتروژن دهی شده و مقایسه آن‌ها با نمونه کونچ شده نشان می‌دهد (شکل ۵) آن است که تمامی نمونه‌های نیتروژن دهی شده پیک‌های مربوط به صفحات بلوری مارتنزیت و جابجایی قله‌ها به سمت زوایای کم تر را تجربه کرده‌اند. این افزایش پهنای پیک و جابجایی آن‌ها به سبب نفوذ نیتروژن به عنوان عنصر بین نشین و افزایش فاصله صفحات بلوری مارتنزیت همراه با ایجاد تنش پسماند فشاری در نمونه‌ها است. در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های نیتروژن دهی شده در دماهای  $400^{\circ}\text{C}$  و  $500^{\circ}\text{C}$  پیک‌های مربوط به نیتريد های آهن نیز مشاهده می‌شود، اگرچه در دماهای کم تر صرفاً مارتنزیت نیتروژن دار مشاهده می‌شود.

سختی سطح نمونه‌های نیتروژن دهی شده در شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که با نفوذ نیتروژن و ایجاد تنش پسماند فشاری در سطح، سختی نمونه‌ها نسبت به عمق نمونه کاملاً متفاوت می‌شود. در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $500^{\circ}\text{C}$  سختی سطح به دلیل تشکیل فازهای نیتريد آهن و کروم و همراه با افزایش ضخامت لایه نیتروژن، از  $1050^{\circ}\text{C}$  به ترتیب به  $1500\text{ HV}$  و  $1850\text{ HV}$  افزایش یافته است. از آن‌جا که گرمای پلاسمای بیش تر در سطح متمرکز است، اطمینان از این که دمای سطح تا عمق نمونه در عملیات نیتروژن دهی یکسان است برای اندازه‌گیری سختی مرکز نمونه مهم است. با توجه به میزان گرمای ویژه فولاد زنگ‌نزن ۴PH-۱۷ ( $460\text{ J/kg }^{\circ}\text{C}$ )، رسانش گرمایی آن ( $18/3\text{ W/m }^{\circ}\text{C}$ ) و ابعاد نمونه‌های نیتروژن دهی، می‌توان از معادله (۱) زمان متعادل شدن سطح و مغز را تخمین زد؛

$$Q/t = - \kappa \cdot A \cdot \Delta T / \Delta x \quad (1)$$

که در آن  $A$  سطح مقطع نمونه،  $T$  دما،  $x$  طول نمونه،  $K$  رسانش گرمایی،  $t$  زمان و  $Q$  مقدار گرمای منتقل شده است، برای دمای  $450^{\circ}\text{C}$  تقریباً ۳۸ ثانیه زمان لازم است تا دمای سطح نمونه با عمق آن یکسان شود. به این ترتیب، سختی مغز نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده نسبت به نمونه کونچ افزایش یافته‌اند. نمونه‌های نیتروژن‌دهی در دماهای  $400^{\circ}\text{C}$  و  $450^{\circ}\text{C}$  به بیشینه سختی رسیده‌اند، ولی نمونه نیتروژن‌دهی شده در دمای  $500^{\circ}\text{C}$  کمی کاهش سختی نسبت به نقطه اوج پیرسازی را نشان می‌دهد. با توجه به سختی مناسب سطح و سختی بیشینه مغز نمونه‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که تمام نمونه در شرایط بیشینه خواص مکانیکی از جمله سختی و استحکام قرار دارد.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی مربوط به سطح مقطع نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده در دماهای آزمون در شکل ۷ آمده است. این تصاویر لایه نیتروژن‌دهی شده در فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH را نشان می‌دهد که با افزایش دما از  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $500^{\circ}\text{C}$  ضخیم‌تر می‌شوند. ضخامت لایه نیتروژن‌دهی در این فولاد برای دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت برابر  $1/4$  میکرون، برای دمای  $400^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ ساعت برابر  $1/1$  و برای دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و  $500^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت به ترتیب برابر  $7/2$  و  $21/1$  میکرون است. این مقادیر نشان می‌دهد که افزایش زمان نیتروژن‌دهی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضخامت لایه نیتروژن‌دهی نداشته و صرفاً سختی مغز نمونه‌ها را از  $403\text{HV}$  به  $447\text{HV}$  افزایش داده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که گرمای عملیات پلاسمایی توانسته است مرکز نمونه را به بیشینه سختی مدنظر برساند و مغز نمونه نیز از لحاظ سختی و استحکام به حالت بهینه خود برسد. هم‌زمان کردن عملیات پیرسازی با عملیات نیتروژن‌دهی و انتخاب دمای مناسب برای نیتروژن‌دهی، علاوه بر حذف یک مرحله جداگانه و زمان‌بر برای پیرسازی، از کاهش سختی و استحکام مرکز نمونه نیز جلوگیری می‌کند. بنابراین، هم‌زمانی عملیات نیتروژن‌دهی با پیرسازی، افزون بر صرفه جویی در زمان و هزینه، موجب افزایش خواص مکانیکی سطح و مغز قطعه می‌شود تا هر دو در بیشینه مقادیر خود قرار داشته باشند.

از طرف دیگر دمای پایین‌تر از  $400^{\circ}\text{C}$  ضخامت قابل ملاحظه‌ای برای لایه نیتروژن‌دهی ایجاد نمی‌کند و این ضخامت برای کاربردهایی که در آن‌ها مقاومت سایشی نقش اصلی را ایفا می‌کند کم است. با توجه به وجود نیتريد‌های کروم در نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده در  $500^{\circ}\text{C}$ ، مقدار بهینه دما و زمان برای نیتروژن‌دهی پلاسمایی فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH، به ترتیب  $450^{\circ}\text{C}$  و ۵ ساعت است.

### نتیجه‌گیری

نتایج اولیه حاصل از نیتروژن‌دهی پلاسمایی فولاد زنگ‌نزن ۱۷-۴PH را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

(۱) سختی بیشینه برای این فولاد در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  و زمان ۱۰ ساعت برابر با  $44\text{HRC}$  اندازه‌گیری شد. مقدار این بیشینه سختی با افزایش دما از  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $500^{\circ}\text{C}$  به  $41\text{HRC}$  کاهش یافت و زمان پیرسازی در این دما از ۱۰ ساعت به ۲۰ دقیقه رسید.

۲) سختی لایه نیتروژن‌دهی پلاسمایی شده در دماهای پایین‌تر کم‌تر بود اما مغز نمونه در دمای پایین‌تر از سختی بیش‌تری برخوردار بود. ضخامت لایه نیتروژن‌دهی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  در زمان‌های ۵ ساعت و ۱۰ ساعت تغییری نکرد. ضخامت لایه نیتروژن‌دهی بیش از زمان به دما وابسته است.

۳) نیتریدهای آهن در دماهای  $450^{\circ}\text{C}$  و بالاتر تشکیل می‌شود و در دماهای کم‌تر صرفاً فاز S مشاهده شد.

۴) با انتخاب دما و زمان مناسب نیتروژن‌دهی پلاسمایی، با در نظر گرفتن نمودار پیر سختی، می‌توان سطح و مغز قطعه را به حالت بهینه رساند، به گونه‌ای که علاوه بر حذف یک مرحله جداگانه برای پیرسازی، از کاهش سختی و استحکام مغز نمونه بر اثر حرارت عملیات نیتروژن‌دهی نیز جلوگیری شود.

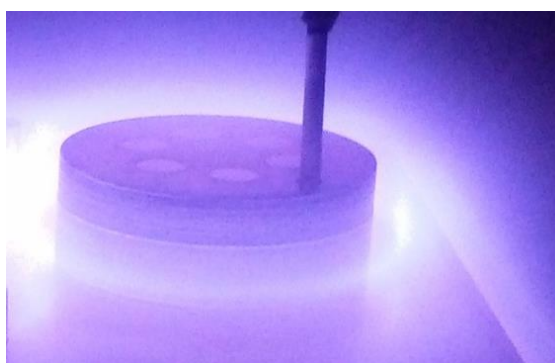
### مراجع

1. J.-H. Wu and C.-K. Lin, "Influence of frequency on high-temperature fatigue behavior of 17-4 PH stainless steels," *Materials Transactions*, vol. 44, pp. 713-721, 2003.
2. W. Jun, Z. Hong, W. Xiao-yong, L. Cong, Q. Shao-yu, and S. Bao-luo, "The Effect of Long-Term Isothermal Aging on Dynamic Fracture Toughness of Type 17-4 PH SS at 350. DEG. C," *Materials transactions*, vol. 46, pp. 846-851, 2005.
3. J. Wang, H. Zou, C. Li, S. Qiu, and B. Shen, "The spinodal decomposition in 17-4PH stainless steel subjected to long-term aging at  $350^{\circ}\text{C}$ ," *Materials Characterization*, vol. 59, pp. 587-591, 2008.
4. C. Hsiao, C. Chiou, and J. Yang, "Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 74, pp. 134-142, 2002.
5. J. Wang, H. Zou, C. Li, R. Zuo, S. Qiu, and B. Shen, "Relationship of microstructure transformation and hardening behavior of type 17-4 PH stainless steel," *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, vol. 13, pp. 235-239, 2006.
6. U. Viswanathan, S. Banerjee, and R. Krishnan, "Effects of aging on the microstructure of 17-4 PH stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 104, pp. 181-189, 1988.
7. M. Murayama, K. Hono, and Y. Katayama, "Microstructural evolution in a 17-4 PH stainless steel after aging at  $400^{\circ}\text{C}$ ," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 30, pp. 345-353, 1999.
8. L. Ruiliang, Y. Mufu, and W. Danlei, "Effect of rare earths on mechanical properties of plasma nitrocarburized surface layer of 17-4PH steel," *Journal of Rare Earths*, vol. 27, pp. 1056-1061, 2009.
9. Y. Xi, D. Liu, D. Han, and Z. Han, "Improvement of mechanical properties of martensitic stainless steel by plasma nitriding at low temperature," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 21, pp. 21-29, 2008.
10. H. Abedi, M. Salehi, M. Yazdkhasti, and A. Hemmasian-E, "Effect of high temperature post-oxidizing on tribological and corrosion behavior of plasma nitrided AISI 316 austenitic stainless steel," *Vacuum*, vol. 8, pp. 443-447, 2010.
11. N. Karimzadeh, E. Moghaddam, M. Mirjani, and K. Raeissi, "The effect of gas mixture of post-oxidation on structure and corrosion behavior of plasma nitrided AISI 316 stainless steel," *Applied Surface Science*, vol. 283, pp. 584-595, 2013.

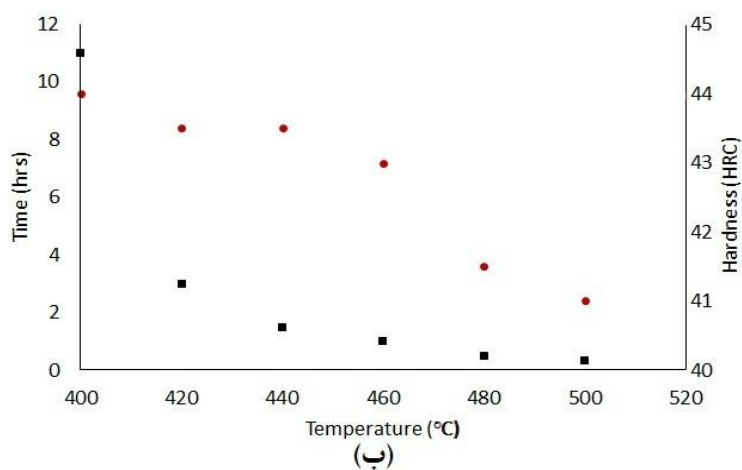
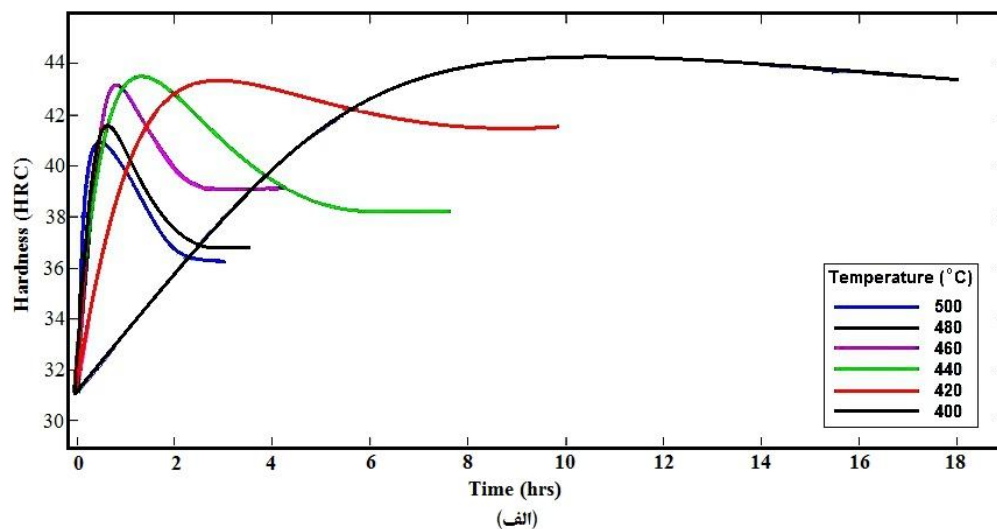
12. H. Abedi and M. Salehi, "Effect of post-oxidizing temperature on tribological and corrosion behavior of plasma nitrided austenitic stainless steel," *Materials & Design*, vol. 32, pp. 2100-2106, 2011.
13. M. Esfandiari and H. Dong, "The corrosion and corrosion-wear behaviour of plasma nitrided 17-4PH precipitation hardening stainless steel," *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, pp. 466-478, 2007.
14. G.-j. Li, J. Wang, C. Li, Q. Peng, J. Gao, and B.-l. Shen, "Microstructure and dry-sliding wear properties of DC plasma nitrided 17-4 PH stainless steel," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 266, pp. 1964-1970, 2008.
15. R. Liu, M. Yan, Y. Wu, and C. Zhao, "Microstructure and properties of 17-4PH steel plasma nitrocarburized with a carrier gas containing rare earth elements," *Materials Characterization*, vol. 61, pp. 19-24, 2010.
16. R. Liu and M. Yan, "The microstructure and properties of 17-4PH martensitic precipitation hardening stainless steel modified by plasma nitrocarburizing," *Surface and Coatings Technology*, vol. 204, pp. 2251-2256, 2010.
17. S. Xiang, J. P. Wang, Y. L. Sun, Y. Y. Yan, and S. G. Huang, "Effect of ageing process on mechanical properties of martensite precipitation-hardening stainless steel," in *Advanced Materials Research*, 2011, pp. 382-385.
18. P. Bała, J. Krawczyk, B. Pawłowski, R. Dziurka, and G. Cios, "The kinetics of phase transformations during continuous heating from as-quenched state of 17-4ph steel", BMO, 2015.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن رسوب سخت شونده

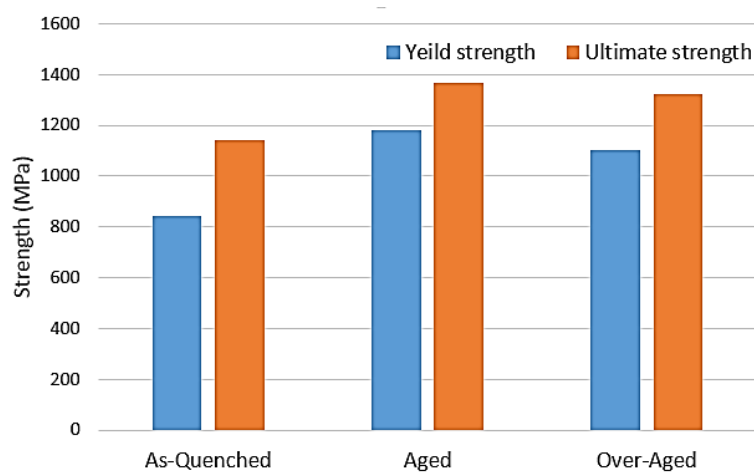
| Nb    | Cu   | Ni   | S     | P     | Mn   | Si   | Cr    | C     | Fe   | عناصر     |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-----------|
| ۰/۱۸۹ | ۳/۱۰ | ۴/۱۰ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۲۹ | ۰/۶۲ | ۰/۵۰ | ۱۶/۰۹ | ۰/۰۳۲ | Bal. | درصد وزنی |



شکل ۱: طرز نمونه گذاری در محفظه دستگاه نیتروژن دهی پلاسمایی برای جلوگیری از اثر لبه.

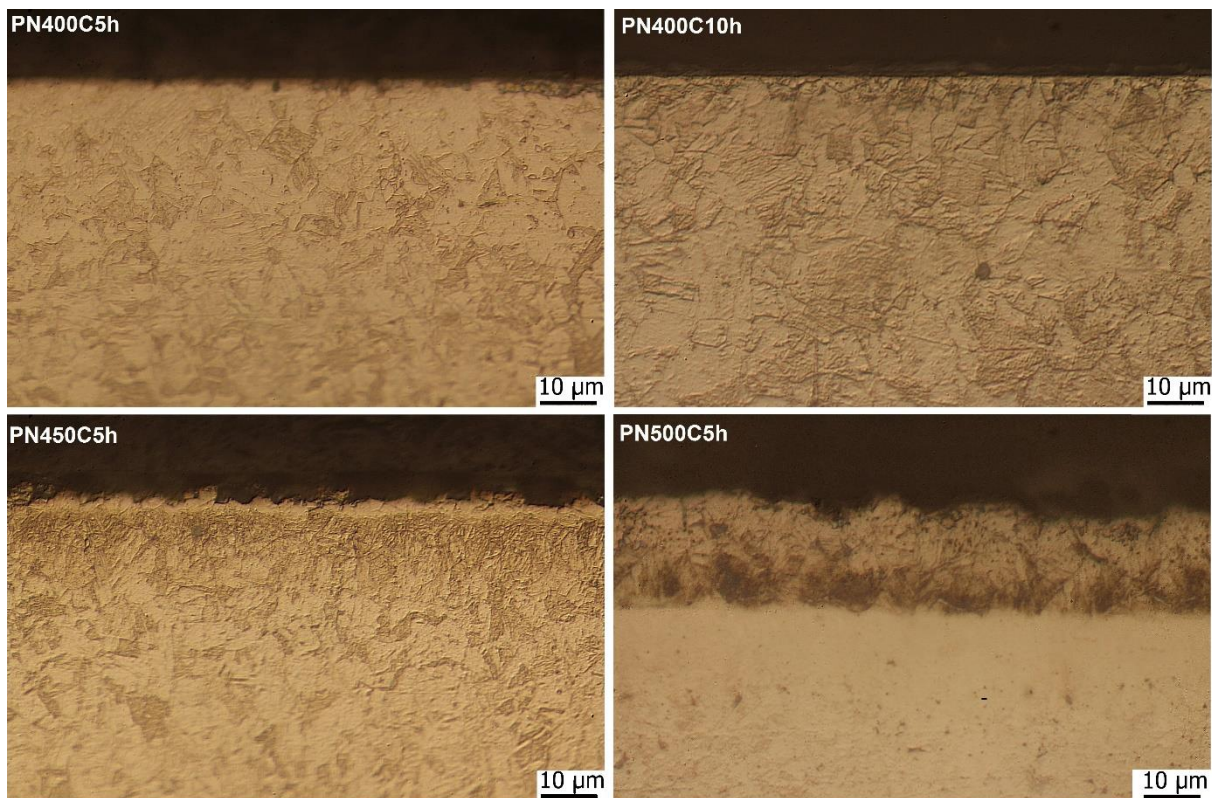


شکل ۲: (الف) نمودار پیرسختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده، (ب) سختی بیشینه و زمان رسیدن به سختی بیشینه برای نمونه‌های پیرشده.

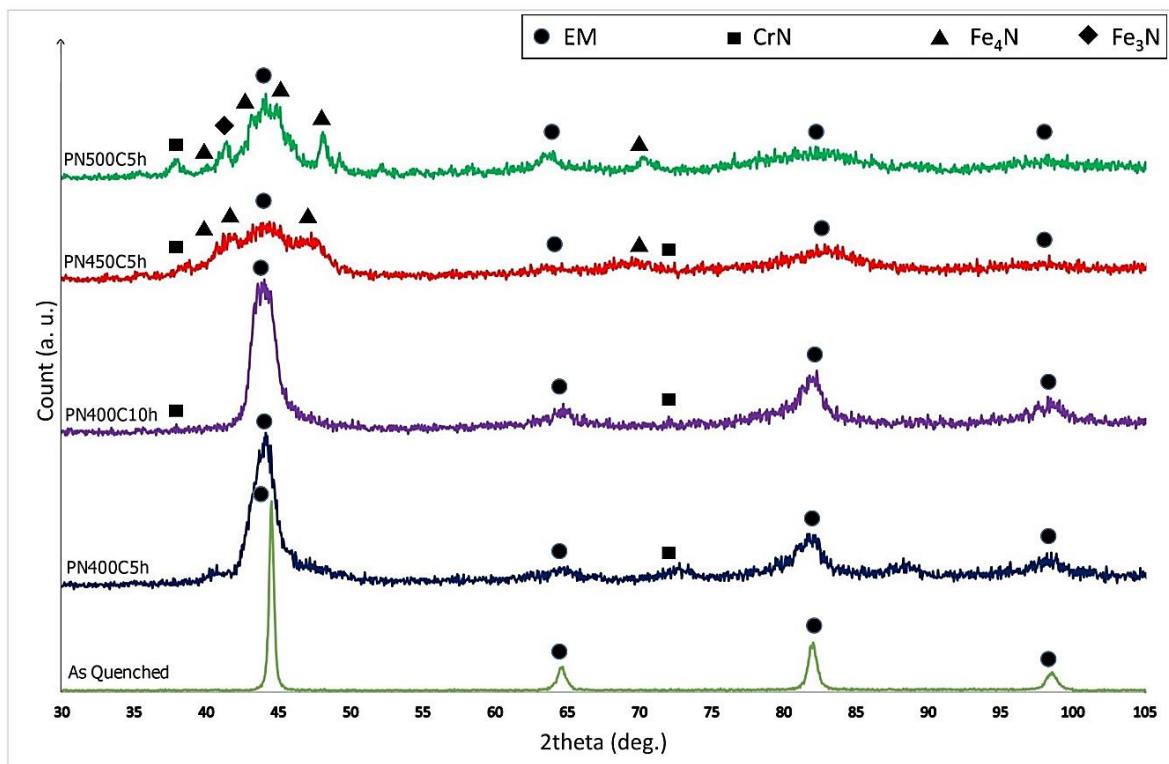


شکل ۳: مقایسه استحکام نمونه‌های پیرشده در ۴۸۰ °C.

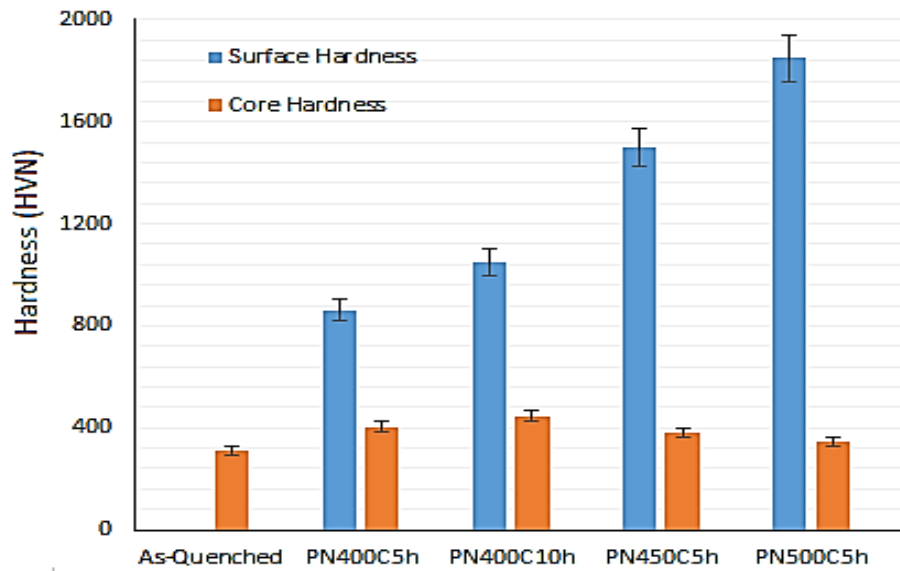




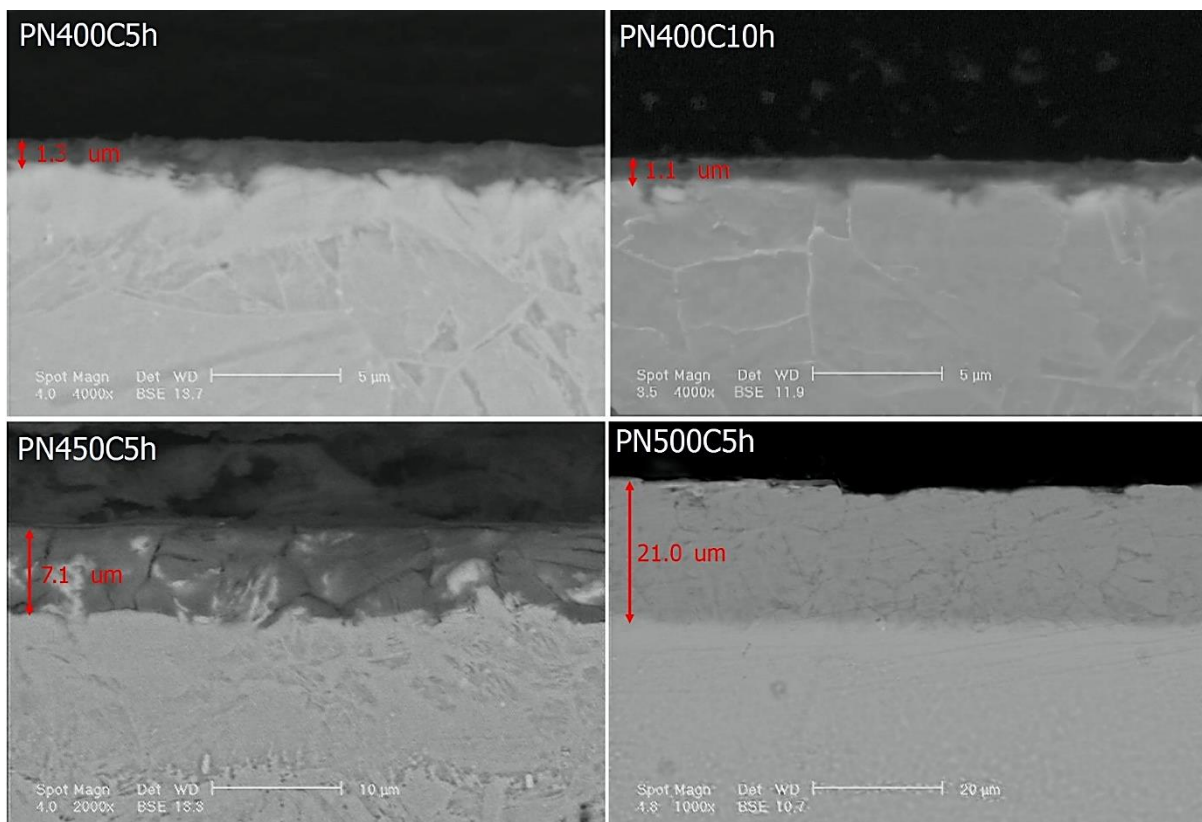
شکل ۴: تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده.



شکل ۵: الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه کونچ شده و نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده.



شکل ۶: سختی سطح و مغز نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده.



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپی الکترونی مربوط به سطح مقطع نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده.