

اثر نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر ریزساختار، سختی و خواص کششی فولاد زنگ‌نزن آستنی‌تی AISI 316L

سیدرحمان حسینی، محسن اله‌قلی و خسرو فرمنش

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۳/۰۲/۱۴ - پذیرش مقاله: ۹۳/۰۷/۲۶)

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر نیتروژن‌دهی پلاسمایی روی خواص مکانیکی حجمی شامل خواص کششی فولاد زنگ‌نزن آستنی‌تی AISI 316L (علاوه بر خواص سطحی) است. به این منظور خواص کششی فولاد زنگ‌نزن 316L قبل و بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی بررسی شده است. فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دو دمای ثابت ۴۵۰ و ۵۰۰°C با ترکیب گاز ۲۵ vol.%N₂-۷۵ vol.%H₂ به مدت ۵ ساعت انجام شد. جهت بررسی اثر فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی روی خواص کششی، از آزمون کشش ساده با سرعت ۵ mm/min استفاده شد. برای بررسی سختی سطح از آزمون ریزسختی‌سنجی ویکرز با بارهای ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ گرم‌نیرو استفاده شد. بررسی‌های ریزساختار مقطع عرضی به‌وسیله میکروسکپ الکترونی روبشی و ارزیابی فازی به‌وسیله پراش‌سنج پرتو ایکس انجام شد. تغییرات غلظت نیتروژن در مقطع عرضی به روش نقطه‌ای با استفاده از طیف‌سنجی توزیع انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با انجام فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای ۴۵۰°C، استحکام تسلیم از ۳۲۰ به ۳۴۰ مگاپاسکال و استحکام کششی از ۵۷۰ به ۵۹۵ مگاپاسکال افزایش یافته است. علاوه بر این، با افزایش دمای عملیات از ۴۵۰ به ۵۰۰°C، استحکام تسلیم و استحکام کششی به ترتیب به ۳۵۵ و ۶۱۰ مگاپاسکال رسید. همچنین عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای ۴۵۰°C باعث ارتقای سختی سطح فولاد مذکور از ۲۳۰ به حدود ۱۰۰۰ ویکرز شد. با افزایش دمای فرآیند از ۴۵۰ به ۵۰۰°C، سختی سطح به حدود ۱۲۵۰ ویکرز افزایش یافت. در مجموع، نیتروژن‌دهی پلاسمایی نه تنها خواص سطحی فولاد AISI 316L را بهبود داده است، بلکه خواص حجمی را به میزان قابل توجهی ارتقاء داده است.

واژه‌های کلیدی: نیتروژن‌دهی پلاسمایی، ریزسختی، استحکام تسلیم، استحکام کششی.

Effect of plasma nitriding on the microstructure, hardness and tensile properties of AISI 316L austenitic stainless steel

S.R. Hosseini, M. Allahgholi and Kh. Farmanesh

Department of Materials Engineering, Maleke-ashtar University of Technology

(Received 4 May 2014, accepted 18 October 2014)

Abstract

The aim of this study is investigating the effects of plasma nitriding on the bulk mechanical properties, including tensile properties of AISI 316L austenitic stainless steel (in addition to surface properties). In order to reach this goal, the tensile properties of 316L stainless steel have been studied before and after plasma nitriding process. Plasma nitriding process carried out at two constant temperatures of 450 and 500 °C with gas composition of 75vol.%H₂-25vol.%N₂ for 5 hours. To evaluate the effect of plasma nitriding process on the tensile properties, a simple tension test was carried out at speed of 5 mm/min. To evaluate the surface hardness, the Vickers microhardness test was used with the indentation loads of 50, 100, 300 and 500 g.f. The microstructural study of the cross section and phase analysis were performed by scanning electron microscope and X-ray diffraction, respectively. Changes in nitrogen concentration in cross section were evaluated by energy dispersive spectroscopy. Results showed that the plasma nitriding process at 450 °C increased the yield strength from 320 to 340 MPa and tensile strength from 570 to 595 MPa. Moreover, by increasing the temperature from 450 to 500 °C, yield and tensile strengths were increased to 355 and 610 MPa respectively. The surface hardness enhanced from 230 to almost 1000 HV by plasma nitriding at 450 °C. By elevating the process temperature from 450 to 500 °C, hardness was increased to nearly 1250 HV. In overall, plasma nitriding not only improved surface properties but also enhanced bulk properties of AISI316L stainless steel significantly.

Keywords: Plasma nitriding, Microhardness, Yield strength, Tensile strength.

E-mail of corresponding author: hosseinisr@mut-es.ac.ir

مقدمه

فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L، به‌علت مقاومت به خوردگی بالا و استحکام مناسب، جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله مصارف پزشکی، کاربردهای دریایی، صنایع هوایی و مواردی از این قبیل پیدا کرده است [۱]. فولاد زنگ‌نزن 316L معمولاً بین ۱۶ تا ۱۸ درصد وزنی کروم دارد. این میزان کروم باعث تشکیل یک لایه سطحی غیرفعال اکسیدی می‌شود که از اکسایش و خوردگی فلز پایه، در شرایط محیطی با خوردندگی کم جلوگیری می‌کند [۲]. کروم در محیط‌های نسبتاً کم‌اثر، باعث ایجاد اکسید چسبان روی فولادهای زنگ‌نزن می‌شود [۳]. نیتروژن‌دهی یکی از فرآیندهای مهندسی سطح است که به‌طور گسترده برای بهبود خواص سطحی فولادهای زنگ‌نزن به‌کار می‌رود. از بین فرآیندهای نیتروژن‌دهی، نیتروژن‌دهی پلاسمایی کاربرد زیادی در بهبود خواص فولاد زنگ‌نزن AISI 316L دارد [۴]. یکی از موانع اصلی در نیتروژن‌دهی پلاسمایی فولادهای زنگ‌نزن، وجود لایه اکسید سطحی بسیار چسبنده است. کندوپاش (پراکنش) یون‌های پرانرژی در طی فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی باعث حذف لایه اکسید سطحی و به تبع آن امکان انتقال نیتروژن به‌داخل قطعه می‌شود. افزایش دمای فرآیند در نیتروژن‌دهی پلاسمایی فولاد زنگ‌نزن 316L به بالاتر از 500°C به‌منظور افزایش نفوذ نیتروژن، منجر به تشکیل نیتريد کروم می‌شود. تشکیل نیتريد کروم در سطح این فولادها باعث بهبود مقاومت به سایش چسبان و خراشان می‌شود. از طرفی رسوب نیتريد کروم در لایه سطحی نیتروژن‌دهی شده باعث کاهش قابل‌توجهی در مقاومت خوردگی می‌شود [۵]. خواص سطحی این فولاد با نیتروژن‌دهی در دماهای پایین‌تر از 400°C بهبود چندانی نمی‌یابد [۶]. بنابراین دمای مناسب برای نیتروژن‌دهی پلاسمایی فولادهای زنگ‌نزن بین دماهای 400°C و 500°C است. ریزساختار سطح فولاد زنگ‌نزن 316L بعد از

نیتروژن‌دهی پلاسمایی، متأثر از متغیرهای فرآیند است. این متغیرها نقش مهمی در ضخامت و فازهای تشکیل‌شده در لایه نیتروژن‌دهی دارند. به‌عنوان مثال ضخامت نیتروژن‌دهی در فولاد 316L، بسته به متغیرهای فرآیند می‌تواند بین ۵ تا $60\mu\text{m}$ باشد [۷]. با تغییر عوامل فرآیند، سطح قطعه می‌تواند شامل لایه تک‌فاز S، لایه‌ای متشکل از فاز S و رسوبات نیتريدی و یا لایه‌ای شامل نیتريد کروم به‌همراه جزیره‌های کوچک و پراکنده از فاز S باشد [۸]. فاز S محلول جامد نیتروژن فوق‌اشباع در آستنیت با شبکه بلوری FCC واپیچیده معروف به آستنیت انبساط‌یافته است که به آن γ_{N} نیز می‌گویند. با توجه به اینکه فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L دارای سختی سطحی پایینی است، بنابراین فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی روش مناسبی برای افزایش سختی سطوح این فولاد است [۴ و ۹]. انجام فرآیند در دمای پایین که فقط باعث ایجاد فاز S می‌شود، می‌تواند سختی سطح فولاد را تا بالای $1000\text{HV}_{(0.05)}$ بهبود دهد [۹].

تا امروز مطالعاتی در خصوص اثر نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر خواص فولادهای زنگ‌نزن به‌خصوص فولاد 316L از جمله مقاومت خوردگی [۱۰]، مقاومت سایشی [۱۱]، ریزساختار [۱۲] و مواردی از این قبیل در داخل و خارج از کشور صورت گرفته و نتایج آن منتشر شده است. در این تحقیقات بیشتر اثر دما، زمان و دیگر متغیرهای نیتروژن‌دهی روی خواص سطحی این فولادها مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات نشان می‌دهد که در ارتباط با بررسی اثر فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر خواص حجمی فولاد زنگ‌نزن 316L از جمله خواص کششی در داخل و خارج از کشور موضوعی منتشر نشده است. با توجه به لزوم بررسی توأم خواص سطحی و حجمی و نظر به اهمیت و استفاده فراوان فولاد مذکور در صنایع مختلف، در این مقاله اثر فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر خواص حجمی و سطحی فولاد زنگ‌نزن 316L مورد تحقیق قرار

آرگن، فشار محفظه تا ۳ تور افزایش داده و دوباره به‌وسیله پمپ چرخشی تا ۱/۵ تور کاهش داده شد. به‌منظور حذف اکسیدها و آلودگی‌های سطحی، سطح نمونه‌ها در محیط حاوی پلاسمای آرگن و هیدروژن با نسبت حجمی $\frac{Ar}{H_2} = 2$ و فشار ۰/۳ تور به مدت ۱ ساعت تحت کندوپاش قرار گرفت. سایر متغیرهای فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی در جدول ۳ آورده شده است. بعد از پایان عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی، گاز ورودی قطع و فشار محفظه تا ۰/۳ تور کاهش داده شد. نمونه‌ها در محدوده فشار ۰/۳ تا ۰/۴ تور در داخل محفظه سرد شدند. مقطع عرضی نمونه‌های ریزساختاری با سنباده‌های ۱۸۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ آماده و سپس به‌وسیله نمد و پودر آلومینای $6 \mu m$ پرداخت شد. از محلول حکاکی ماربل با ترکیب H_2O ۲۵vol.% - ۲۵vol.% HCl -۲۵HNO₃ ۵۰vol.% برای مشخص کردن ریزساختار سطوح نیتروژن‌دهی استفاده شد [۱۴]. نمونه‌های حکاکی‌شده به‌وسیله میکروسکپ الکترونی روبشی مدل VEGAII ساخت شرکت TESCAN مورد ارزیابی قرار گرفت. تصاویر مقطع عرضی با استفاده از آشکارساز الکترون‌های برگشتی (BSE) تهیه شد. برای تهیه و بررسی نیم‌رخ غلظت نیتروژن در سطح، طیف‌سنجی با توزیع انرژی با استفاده از دستگاه EDS مدل RONTEC (نصب‌شده روی میکروسکپ الکترونی روبشی) انجام شد. فازهای تشکیل‌شده در لایه سطحی نمونه‌ها قبل و بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی با استفاده از دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس مدل MPD-Xpert ساخت شرکت فیلیپس با هدف مسی (طول موج 1.54076 \AA)، زمان توقف در هر گام ۲ ثانیه، میانگین ۲۰ دقیقه جاروب در محدوده زاویه (۲θ) ۲۰ تا ۱۰۰ درجه بررسی شد. آزمون سختی‌سنجی به‌وسیله دستگاه سختی‌سنج ویکرز مدل M4U250 با بار یک کیلوگرم‌نیرو (حدود ۱۰ نیوتن) انجام شد. برای

گرفته است. به‌منظور بررسی اثر توأم نیتروژن‌دهی پلاسمایی روی خواص سطحی و حجمی فولاد AISI 316L؛ بررسی‌های ریزساختاری و فازی، آزمون ریزسختی‌سنجی و آزمون کشش انجام و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است.

روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L به‌صورت ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر به‌عنوان ماده اولیه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد مذکور که به‌وسیله دستگاه طیف‌سنج نشر نوری جرقه‌ای (SES)^۱ ساخت شرکت Spectrotest آلمان اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده است. ترکیب شیمیایی واقعی این فولاد در محدوده مجاز عناصر آلیاژی مطابق با استاندارد ASTM-A276 قرار دارد [۱۳]. مشخصات نمونه‌های مورد نیاز برای انجام فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی، بررسی‌های ریزساختاری، آزمون سختی‌سنجی، آزمون کشش و نمونه‌های خام جهت مقایسه در جدول ۲ آورده شده است. سطح نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های شماره ۱۸۰، ۲۴۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ آماده‌سازی شد.

به‌منظور انجام عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی از یک دستگاه نیتروژن‌دهی پلاسمایی تخلیه تابناک نیمه‌صنعتی (موجود در دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر - دانشکده مهندسی مواد) استفاده شد. قبل از این‌که نمونه‌ها داخل محفظه قرار داده شوند، با استون چربی‌زدایی و شستشو شدند. بعد از قراردادن نمونه‌ها در محفظه، ابتدا فشار محفظه به وسیله پمپ چرخشی تا ۰/۰۸ تور کاهش داده شد تا هوای داخل محفظه تخلیه شود. به‌منظور خارج کردن باقی‌مانده هوای محفظه، به‌وسیله گازهای هیدروژن و

به تغییرات ابعاد نمونه‌ها مطابق استاندارد رسم شد. سپس ضمن اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها (قبل و بعد از هر آزمون)؛ استحکام تسلیم، استحکام کششی، درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع محاسبه شد. با توجه به انعطاف‌پذیری نسبتاً زیاد فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، خطی از نقطه ۰/۲ درصد کرنش به موازات خط کشسان رسم و تنش متناظر در محل تقاطع با منحنی به‌عنوان استحکام تسلیم تعیین شد.

بررسی ریزسختی سطح خارجی نمونه‌های نیترووره‌شده، از دستگاه ریزسختی سنج ویکرز مدل 402MVD ساخت شرکت WILSON با بارهای ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ گرم‌نیرو استفاده شد. بررسی خواص کششی به‌وسیله دستگاه کشش مدل STM-400 ساخت شرکت سنتام با سرعت کشش ۵ mm/min صورت گرفت. نمونه‌سازی برای آزمون‌های کشش بر اساس استاندارد ASTM E 8M انجام شد [۱۵]. نمودارهای تنش-کرنش مهندسی با توجه

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن AISI 316L

Fe	C	S	P	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	عناصر آلیاژی
باقی‌مانده	حداکثر ۰/۰۳	حداکثر ۰/۰۳۰	حداکثر ۰/۰۴۵	حداکثر ۱/۰۰	حداکثر ۲/۰۰	۲/۰۰-۳/۰۰	۱۰/۰۰-۱۴/۰۰	۱۶/۰۰-۱۸/۰۰	محدوده درصد وزنی طبق ASTM-A276 [۱۳]
۶۹/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۲۲	۰/۰۴۴	۰/۵۷	۱/۲۴	۲/۱۱	۱۰/۱۹	۱۶/۷۱	درصد وزنی به‌دست آمده از آزمون SES

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در فرآیندها و آزمون‌های مختلف

نوع آزمون			کشش			سختی سنجی			بررسی‌های ریزساختاری			
نوع فرآیند	خام	PN1	خام	PN1	PN2	خام	PN1	PN2	خام	PN1	PN2	
ابعاد نمونه	طبق استاندارد ASTM-E8 [۱۵]			۲×۲۰×۳۰ mm			۲×۲۰×۳۰ mm			۲×۲۰×۳۰ mm		

PN1: نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای ۴۵۰°C به مدت ۵ ساعت با ترکیب گاز ۲۵ vol.% N₂-۷۵ vol.% H₂

PN2: نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای ۵۰۰°C به مدت ۵ ساعت با ترکیب گاز ۲۵ vol.% N₂-۷۵ vol.% H₂

جدول ۳. عوامل و متغیرهای فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی

در مرحله اصلی فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی		در مرحله کندوپاش	متغیرها
۵۰۰ ± ۵	۴۵۰ ± ۵	۱۱۰ تا ۲۰	دما (درجه سانتی‌گراد)
۵		۱	زمان (ساعت)
۷۰		۷۰	چرخه عملکرد (درصد)
۵۳۰	۴۲۰	متغیر وابسته به جریان	ولتاژ (ولت)
۴/۴	۳/۹	۲/۵ تا ۱/۵	جریان (آمپر)
۷۵ vol.% H ₂ -۲۵ vol.% N ₂		۶۷ vol.% Ar-۳۳ vol.% H ₂	ترکیب گاز (درصد حجمی)

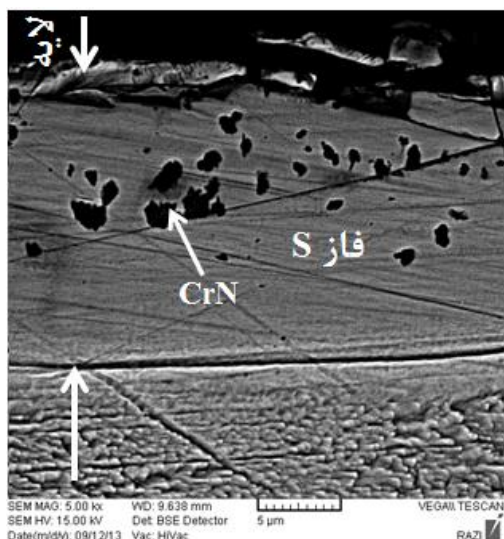
نتایج و بحث

اثر نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر ریزساختار و فازها

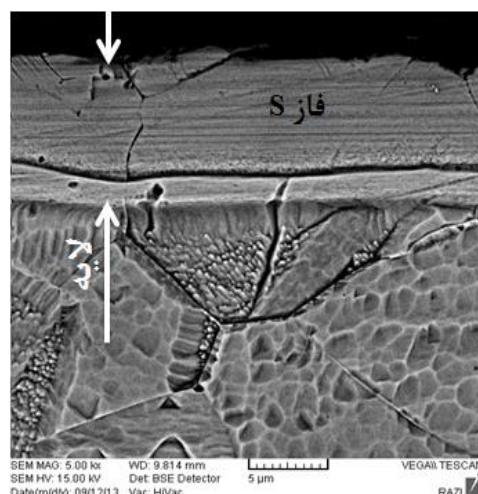
شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی فولاد AISI 316L بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای 450°C را نشان می‌دهد. ناحیه نیتروژن‌شده با رنگ سفید از زمینه آستنیتی جدا شده است. همان‌طور که در تحقیقات گذشته گزارش شده است، نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای 450°C و کم‌تر از آن تنها باعث تشکیل نواحی سفیدرنگ می‌شود [۸]. طبق پژوهش‌های انجام‌شده توسط سایر محققان [۶ و ۱۶] و آنچه در تصویر الکترونی روبشی (شکل ۱) مشاهده می‌شود، نواحی سفیدرنگ مربوط به فاز S یا همان لایه اصلاح‌شده فاز آستنیت زمینه است. ضخامت لایه نیتروژن در حدود $10\ \mu\text{m}$ میکرومتر است. نیتروژن‌دهی در دمای 450°C نسبت به 400°C به دلیل افزایش ضریب نفوذ نیتروژن با افزایش دما، باعث افزایش ضخامت لایه نیتروژن (آستنیت انبساط‌یافته) می‌شود [۱۷ و ۱۸]. از طرفی به‌خاطر کافی نبودن دمای 450°C جهت تحرک اتم‌های کروم، اثری از نیتریدهای کروم در شکل ۱ مشاهده نمی‌شود.

شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مقطع عرضی فولاد 316L بعد از نیتروژن‌دهی در دمای 500°C را نشان می‌دهد. هنگامی که عملیات نیتروژن‌دهی در دماهای بالاتر از 450°C انجام شود، رسوبات نیتريد کروم (CrN) در امتداد مرز دانه‌ها و در وسط دانه‌ها ایجاد می‌شوند که مقدارشان با افزایش دمای عملیات، افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۲ نمایان است با افزایش دمای فرآیند به دلیل افزایش ضریب نفوذ نیتروژن، ضخامت لایه نیتروژن‌دهی شده افزایش یافته است. با مقایسه شکل‌های ۱ و ۲، در دمای 450°C لایه تشکیل‌شده تنها حاوی فاز S است و ضخامتی در حدود $10\ \mu\text{m}$ میکرومتر دارد. با افزایش دما تا 500°C نه تنها ضخامت لایه به حدود $20\ \mu\text{m}$ میکرومتر افزایش یافته است، بلکه رسوباتی در ریزساختار مشاهده می‌شود که شباهت زیادی به نیتریدهای کروم دارند. تشکیل این رسوبات به دلیل تحرک بیش‌تر و نفوذ اتم‌های کروم در دمای بالاتر (500°C) است.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی فولاد 316L بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای 500°C .

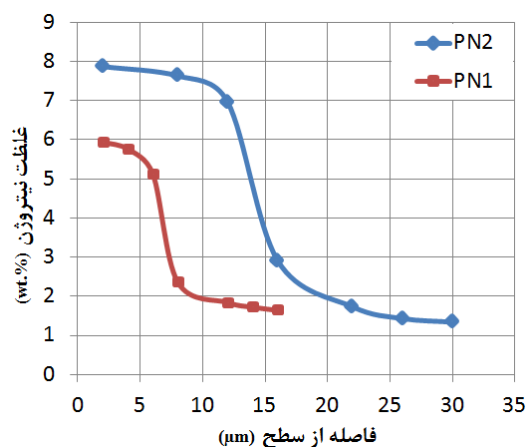


شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقطع عرضی فولاد 316L بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای 450°C .

صورت گرفته است. با افزایش فاصله از سطح (تا حدود ۱۸ میکرومتر) کاهش مقدار نیتروژن با شیب تندی مواجه شده است و دوباره با افزایش فاصله از سطح، مقدار نیتروژن با شیب کمی در حال کاهش است. همچنین شکل ۳ اثر دمای عملیات روی عمق نفوذ نیتروژن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نمایان است، افزایش 50°C در دمای عملیات باعث بالا رفتن ضریب نفوذ و افزایش مقدار نیتروژن در سطح شده است. همچنین عمق نفوذ نیتروژن با افزایش دما بیشتر شده است. لازم به توضیح است که EDS اساساً یک روش نیمه‌کمی است و دقت آن برای شناسایی عناصر سبک نظیر نیتروژن پایین است. در تحقیقات گذشته، محدودیت‌های روش EDS برای شناسایی نیتروژن در فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی با روش‌های GDS و SIMS مقایسه شده است [۱۹]. با وجود این، امکان مقایسه نسبی نتایج و بررسی روند تغییرات غلظت نیتروژن بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دو دمای 450°C و 500°C وجود دارد.

شکل ۴ الگوهای پراش پرتو ایکس فولاد AISI 316L قبل و بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دماهای 450°C و 500°C را نشان می‌دهد. زیرلایه بیشتر شامل فاز آستنیت (γ) است، ولی قله‌های ریز مارتنزیت (α') هم وجود دارد. قله‌های مربوط به فاز آستنیت از صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) به ترتیب در زوایای (۲۰)، (۲۳)، (۵۰)، (۷۴) و (۹۵) درجه برابر با $43/73^{\circ}$ ، $50/78^{\circ}$ ، $74/71^{\circ}$ ، $90/63^{\circ}$ و $95/95^{\circ}$ درجه تفرق یافته‌اند. قله‌های مارتنزیت از صفحات (۱۰۱)، (۲۰۰) و (۲۱۱) به ترتیب در زوایای $44/71^{\circ}$ ، $64/98^{\circ}$ و حدود 82° درجه پراش پیدا نموده‌اند. تشکیل فاز مارتنزیت در زیرلایه، به احتمال زیاد به علت سنباده‌کاری نمونه‌ها، افزایش دمای سطح و یا تغییر شکل مومسان موضعی قبل از آزمون XRD بوده است. در مورد فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، امکان تشکیل مارتنزیت با انجام تغییر شکل مومسان وجود دارد. در این حالت به جای M_s از عبارت

شکل ۳ تغییرات غلظت نیتروژن (برحسب درصد وزنی) برای نمونه‌های نیترووره شده در دماهای 450°C و 500°C را نشان می‌دهد. تغییرات غلظت نیتروژن در دمای 450°C نشان می‌دهد که مقدار بالایی از نیتروژن در نواحی نزدیک سطح به داخل فولاد نفوذ کرده است. با توجه به تغییرات شیب غلظت نیتروژن نسبت به مسافت نفوذ، در فاصله حدود ۶ میکرومتری از سطح غلظت نیتروژن کاهش چندانی نیافته است و بیش‌ترین مقدار را دارد. با افزایش فاصله تا حدود ۸ میکرومتر از سطح، کاهش شدیدی در مقدار نیتروژن با شیب تند مشاهده می‌شود. در فواصل بیش‌تر از سطح (از حدود ۱۰ میکرومتر به بعد)، مقدار نیتروژن به یک حالت تعادل رسیده و با شیب کمی کاهش یافته است. نفوذ بیش از حد نیتروژن به داخل فاز آستنیت در فولادهای زنگ‌نزن نسبت به شرایط تعادلی حلالیت نیتروژن در آستنیت، به دلیل وجود اتم‌های کروم و مولیبدن است، چون‌که این عناصر میل ترکیبی بالایی با نیتروژن دارند.



شکل ۳. نمودار تغییرات غلظت نیتروژن (برحسب درصد وزنی) برای نمونه‌های نیترووره شده در دماهای 450°C و 500°C .

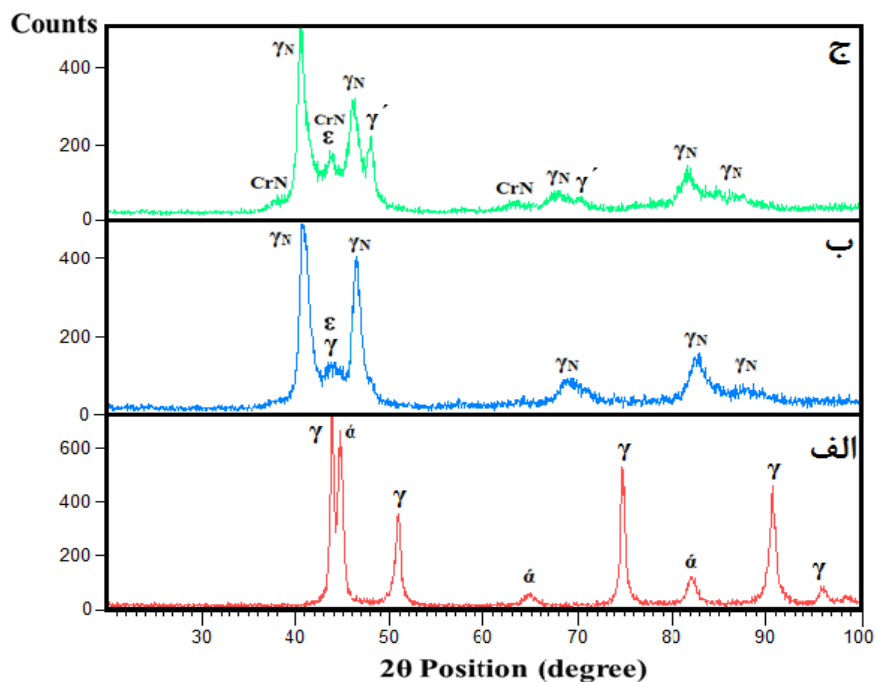
در شکل ۳ به‌طور واضح مشاهده می‌شود که با افزایش دما ضریب نفوذ نیتروژن در نمونه افزایش یافته و مقدار نیتروژن درصد بالایی نسبت به نمونه عملیات شده در 450°C دارد. در نواحی نزدیک به سطح (تا فاصله حدود ۱۲ میکرومتری) کاهش مقدار نیتروژن با شیب کمی

علاوه بر قله‌های فاز S، در زاویه نزدیک به ۴۴ درجه قله دیگری به وجود آمده است که به احتمال زیاد مربوط به یکی از فازهای آستنیت زیرلایه یا نیتريد ϵ است. به علت ضخامت نسبتاً کم لایه تک‌فاز S در شکل ۱ (حدود ۱۰ میکرومتر) و امکان تفرق (هرچند ضعیف) از صفحات بلوری زیرلایه، به احتمال زیاد قله به وجود آمده مربوط به آستنیت است. از طرفی، چون که قله‌های ϵ در زوایای نزدیک ۴۴ درجه تفرق می‌یابند، می‌توان این قله را مربوط به هر دو فاز γ و نیتريد ϵ دانست که هم‌پوشانی دارند.

با افزایش دمای نیتروژن‌دهی ضریب نفوذ نیتروژن بالا می‌رود و باعث انحراف بیش‌تر قله‌های فاز S به زوایای کم‌تر می‌شود. طبق شکل ۴-ج، در نمونه نیتروژن‌دهی شده در دمای 500°C ، نیتريد های ϵ ، γ' و CrN در کنار فاز S ایجاد شده‌اند.

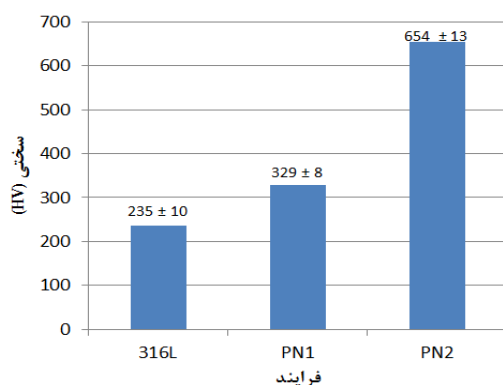
M_d به معنای دمای تشکیل مارتنزیت در تغییر شکل استفاده می‌شود. علاوه بر ترکیب شیمیایی فولاد، درصد تغییر شکل و مقدار مارتنزیت بر دمای M_d مؤثر است. بنابراین عبارت M_{d30} به عنوان دمایی تعریف می‌شود که با اعمال ۳۰ درصد کرنش حقیقی، ۵۰ درصد از آستنیت به مارتنزیت تبدیل شود [۲۰].

الگوی پراش نمونه عملیات شده در دمای 450°C (شکل ۴-ب) بیشتر شامل قله‌های آستنیت انبساط یافته (فاز S یا γ_N) است. بنابراین اطمینان حاصل می‌شود که ناحیه تک‌فاز در ریزساختار الکترونی روبشی (شکل ۱)، فاز S بوده است. این نتیجه با بسیاری از کارهای تحقیقاتی گذشته کاملاً انطباق دارد [۵، ۱۲، ۱۷ و ۱۸]. قله‌های فاز S (در شکل ۴-ب) نسبت به قله‌های آستنیت زیرلایه در صفحات متناظر و زوایای کمتری تفرق یافته‌اند. انتقال قله‌های فاز S به زوایای کوچک‌تر به دلیل نفوذ نیتروژن به داخل شبکه و انبساط شبکه است. همچنین قله‌های فاز S نسبت به قله‌های آستنیت پهن‌تر شده‌اند.



شکل ۴. الگوهای پراش پرتو ایکس فولاد AISI 316L (الف) نمونه خام، (ب) بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای 450°C ، (ج) بعد از نیتروژن‌دهی پلاسمایی در 500°C ، γ = آستنیت، α' = مارتنزیت، γ_N = آستنیت فوق‌اشباع از نیتروژن، ϵ = نیتريد $\text{Fe}_{2.3}\text{N}$ ، γ' = نیتريد Fe_4N .

دمای 450°C شده است. طبق مطالعات انجام شده توسط سایر محققین، حداکثر مقدار سختی سطح نیترووره شده در دمای 480°C برابر با $1100\text{HV}_{0.1}$ به دست آمده که در حدود ۵ برابر سختی نمونه خام ($220\text{HV}_{0.1}$) است [۲۱]. افزایش قابل توجه در سختی به علت تشکیل نیتريد های کروم (علاوه بر فاز S) است.



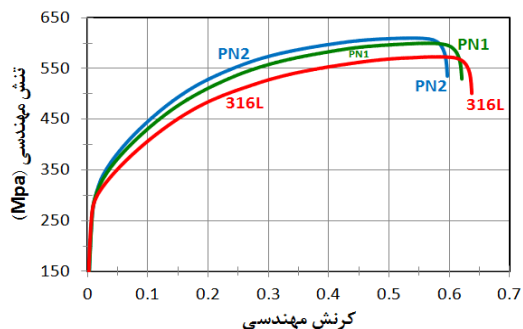
شکل ۵. سختی ویکرز (HV_1) نمونه خام 316L و سختی سطح خارجی نمونه های نیترووره شده در دو دمای 450°C (PN1) و 500°C (PN2).

شکل ۶ ریزسختی نمونه خام و سطح خارجی نمونه های نیترووره شده در دماهای 450°C و 500°C برحسب بار اعمالی را نشان می دهد. به طور کلی با کاهش نیرو در آزمون سختی سنجی، مقدار سختی افزایش می یابد [۲۲]. ریزسختی سطوح نیترووره شده افزایش قابل توجهی نسبت به ماده اولیه به عنوان تابعی از نیروی اعمالی داشته است. همان طور که در شکل نمایان است، ریزسختی نمونه خام به طور متوسط در حدود ۲۰۰ ویکرز تحت تمام نیروهای اعمالی حاصل شده است. با نیتروژن دهی در دمای 450°C به دلیل تشکیل لایه نیتريدی و سختی بالای این لایه، مقدار سختی در بار ۵۰ گرم نیرو حدود چهار برابر نسبت به زیرلایه افزایش یافته و به حدود ۱۰۰۰ ویکرز رسیده است. با افزایش بار تا ۵۰۰ گرم نیرو ریزسختی به ۱/۲۵ برابر نسبت به زیرلایه کاهش یافته است. ریزسختی نمونه عملیات شده در دمای 500°C به حدود ۱۲۵۰ ویکرز افزایش یافته است که بیش از ۵ برابر ریزسختی زیرلایه

با توجه به شکل ۴-ج و همان طور که در تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی (شکل ۲) مشاهده می شود، هنوز در سطح نیترووره شده در دمای 500°C به مقدار قابل توجهی فاز S وجود دارد. قله های فاز S موجود در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه عملیات شده در دمای 500°C ، از صفحات متناظر با صفحات آستنیت (γ) و در زوایای کوچک تری تفرق یافته اند. تشکیل نیتريد های ϵ ، γ' و CrN به دلیل افزایش غلظت نیتروژن و نفوذ کروم با افزایش دما از 450°C به 500°C است. این امر در تصویر میکروسکپی (شکل ۲) و الگوهای پراش (شکل ۴-ج) کاملاً مشهود است. قله تفرق یافته در زاویه $43/7$ مربوط به هردوی نیتريد های ϵ و CrN است که هم پوشانی دارند. تشکیل نیتريد های ϵ و γ' (در کنار فاز S) و همچنین نیتريد کروم (CrN) به صورت توزیع شده در زمینه فاز S) در فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی در دمای حدود 500°C در تعداد قابل توجهی از تحقیقات گذشته مشاهده شده است [۴، ۸، ۱۲، ۱۷ و ۱۸]. بنابراین بررسی تصاویر میکروسکپی الکترونی روبشی (شکل های ۱ و ۲)، توزیع نسبی غلظت نیتروژن (شکل ۳)، الگوهای پراش پرتو ایکس (شکل های ۴-الف، ۴-ب و ۴-ج) و انطباق با یافته های تحقیقاتی گذشته؛ صحت شناسایی ریزساختار و فازها را تأیید می نماید.

اثر نیتروژن دهی پلاسمایی بر سختی

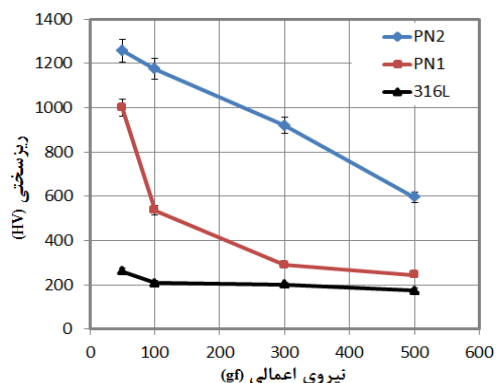
شکل ۵ سختی نمونه خام و نمونه های نیترووره شده با بار یک کیلوگرم نیرو را نشان می دهد. در نیروهای بیش تر به دلیل عمق نفوذ هرم دستگاه سختی سنج ویکرز، مقدار سختی فقط مختص لایه نیترووره شده نیست که این امر در مورد سختی سطح نمونه نیترووره در دمای 450°C صدق می کند. بنحوی که سختی سطح در نمونه نیترووره شده در 450°C افزایش چندانی نسبت به زیرلایه نداشته است. در حالی که افزایش دما تا 500°C ، سختی تقریباً سه برابر زیرلایه و دو برابر مقدار سختی نمونه های نیترووره شده در



شکل ۵. نمودار تنش - کرنش مهندسی برای نمونه خام فولاد 316L و نمونه‌های نیترووره شده در دو دمای 450°C (PN1) و 500°C (PN2).

علاوه بر این، با حل شدن نیتروژن در زمینه آستنیت (نزدیک به سطح قطعه) و تشکیل محلول جامد فوق اشباع (لایه S)، سختی و استحکام نواحی نزدیک به سطح افزایش می‌یابد. همچنین نیتروژن به صورت درون شبکه‌ای با عناصر آلیاژی (به ویژه کروم) ترکیب می‌شود و تشکیل لایه‌های نیتریدی در نواحی نزدیک به سطح آلیاژ می‌دهد. این فازها هم از سختی زیادی برخوردارند و هم منجر به ایجاد تنش‌های فشاری در سطح و درون لایه‌های سطحی می‌شوند. از سوی دیگر، در فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی (همانند بسیاری از روش‌های نفوذی و برعکس اغلب فرآیندهای پوشش دهی سطح)، اثرات فازهای جدید در قسمت خارجی سطح و بیرون از ماده نیست. بلکه این اثرات درون ماده (نواحی نزدیک به سطح) اعمال می‌شود. ارتقای سختی نواحی درونی نزدیک به سطح علاوه بر افزایش موضعی استحکام ماده، مانعی در مقابل تغییر شکل مومسان و پارگی قطعه در شرایط تنشی ایجاد نمی‌نماید. بنابراین باعث افزایش استحکام حجمی ماده می‌شود. علاوه بر این، ایجاد تنش‌های فشاری در سطح، شروع ترک و تا حد زیادی اشاعه ترک را با مشکل مواجه می‌نمایند. بنابراین باعث افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی ماده می‌شود. افزایش استحکام تسلیم باعث مقاومت ماده در برابر تغییر شکل زودرس

است. ریزسختی در نیروی ۵۰۰ گرم به ۳ برابر نسبت به زیرلایه کاهش یافته است. این مقدار کاهش ریزسختی با افزایش نیروی اعمالی نسبت به نمونه عملیات شده در 450°C ناچیز است که به علت رسوبات نیتريد کروم و ضخامت زیاد لایه نیترووره شده در دمای 500°C است.



شکل ۶. نمودار ریزسختی نمونه خام 316L و سطح خارجی نمونه‌های نیترووره شده در دو دمای 450°C (PN1) و 500°C (PN2) تحت نیروهای مختلف.

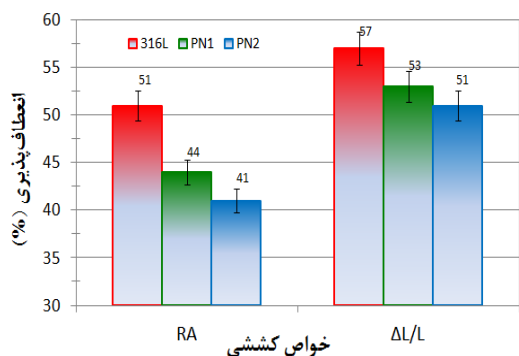
اثر نیتروژن دهی پلاسمایی بر خواص کششی

شکل ۷ نمودار تنش - کرنش را برای نمونه خام و نمونه‌های نیترووره شده در دماهای 450°C و 500°C نشان می‌دهد. استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نسبی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 316L به ترتیب در حدود ۲۷۵ تا ۳۰۰ MPa، ۵۸۰ تا ۹۷۰ MPa و ۶۰ تا ۶۴ درصد است [۱]. این مقادیر برای فولاد 316L خام در این تحقیق به ترتیب در حدود ۳۲۰ MPa، ۵۷۲ MPa و ۵۷ درصد به دست آمده است. نیتروژن دهی پلاسمایی علاوه بر بهبود خواص سطحی، خواص کششی را نیز تحت تاثیر قرار داده است.

در فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، عنصر بین‌نشین نیتروژن می‌تواند تا عمق قابل توجهی از فولاد نفوذ نماید. هرچند به واسطه وجود عناصر آلیاژی، درصد نیتروژن نفوذکننده به عمق زیرلایه کم است. این موضوع تا حدی (هرچند محدود) باعث افزایش استحکام از طریق سازوکار محلول جامد می‌شود.

می‌شود. تغییرات تنش بین سطح و حجم مواد به ایجاد ترک در نمونه نیتروژن‌دهی شده کمک می‌نماید. در نتیجه، شکل‌گیری عیوب ایجاد شده به وسیله نفوذ نیتروژن به شبکه را تسهیل می‌کند. در یکی از جدیدترین تحقیقات، اثر ساچمه‌زنی روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی پایدار شده با نیتروژن مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳]. در تحقیق مذکور نشان داده شده است که ساچمه‌زنی مافوق صوت (USSP) نه تنها بر ریزساختار و سختی نواحی نزدیک به سطح (تا عمق ۱۰۰ میکرومتری) اثر مثبت دارد بلکه باعث افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی می‌شود.

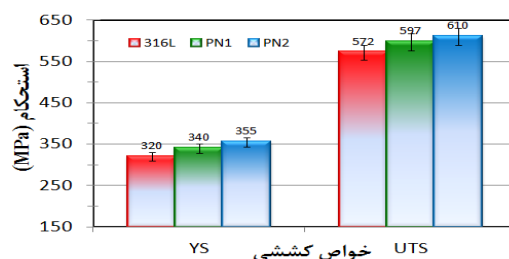
همین محققین در کار مشابهی با انجام ساچمه‌زنی مافوق صوت، استحکام تسلیم و کششی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ را افزایش داده‌اند [۲۴]. همچنین در تحقیقات جداگانه‌ای با انجام ساچمه‌زنی بر سطح آلیاژ تیتانیم، استحکام کششی از ۱۰۰۰ به ۱۱۵۰ مگاپاسکال افزایش یافته است [۲۵]. به نظر می‌رسد ریزشدن اندازه دانه‌های سطحی (در فرآیند ساچمه‌زنی)، اثر زیادی بر افزایش استحکام تسلیم و کششی داشته است. بنابراین ارتقای موضعی خواص سطحی می‌تواند خواص حجمی (از جمله خواص کششی) را در حد قابل توجهی بهبود دهد. با توجه به شکل ۸، نیتروژن‌دهی در دمای ۴۵۰°C، استحکام تسلیم و استحکام کششی را نسبت به نمونه خام افزایش داده ولی باعث کاهش ازدیاد طول نسبی به میزان ۴ درصد شده است.



شکل ۹. مقادیر درصد ازدیاد طول ($\Delta L/L$) و درصد کاهش سطح مقطع (RA) برای نمونه خام فولاد 316L، نمونه نیتروژن‌دهی شده در دمای ۴۵۰°C (PN1) و نمونه نیتروژن‌دهی شده در دمای ۵۰۰°C (PN2).

به‌طور کلی، نیتروژن‌دهی پلاسمایی منجر به تشکیل فازهای سخت در سطح فولاد زنگ‌نزن 316L شده و خواص کششی را افزایش داده است. بنابراین نیتروژن‌دهی پلاسمایی نه تنها خواص سطحی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی را به شدت تغییر می‌دهد بلکه خصوصیات حجمی ماده را

شکل‌گیری عیوب ایجاد شده به وسیله نفوذ نیتروژن به شبکه را تسهیل می‌کند. در یکی از جدیدترین تحقیقات، اثر ساچمه‌زنی روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی پایدار شده با نیتروژن مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳]. در تحقیق مذکور نشان داده شده است که ساچمه‌زنی مافوق صوت (USSP) نه تنها بر ریزساختار و سختی نواحی نزدیک به سطح (تا عمق ۱۰۰ میکرومتری) اثر مثبت دارد بلکه باعث افزایش استحکام تسلیم و استحکام کششی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی می‌شود. همین محققین در کار مشابهی با انجام ساچمه‌زنی مافوق صوت، استحکام تسلیم و کششی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ را افزایش داده‌اند [۲۴]. همچنین در تحقیقات جداگانه‌ای با انجام ساچمه‌زنی بر سطح آلیاژ تیتانیم، استحکام کششی از ۱۰۰۰ به ۱۱۵۰ مگاپاسکال افزایش یافته است [۲۵]. به نظر می‌رسد ریزشدن اندازه دانه‌های سطحی (در فرآیند ساچمه‌زنی)، اثر زیادی بر افزایش استحکام تسلیم و کششی داشته است. بنابراین ارتقای موضعی خواص سطحی می‌تواند خواص حجمی (از جمله خواص کششی) را در حد قابل توجهی بهبود دهد. با توجه به شکل ۸، نیتروژن‌دهی در دمای ۴۵۰°C، استحکام تسلیم و استحکام کششی را نسبت به نمونه خام افزایش داده ولی باعث کاهش ازدیاد طول نسبی به میزان ۴ درصد شده است.



شکل ۸. مقادیر استحکام تسلیم (YS) و استحکام کششی (UTS) نمونه خام فولاد 316L، نمونه نیتروژن‌دهی شده در دمای ۴۵۰°C (PN1) و نمونه نیتروژن‌دهی شده در دمای ۵۰۰°C (PN2).

هم تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتیجه گیری

باتوجه به مطالعات، روش تحقیق، بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، توزیع نسبی غلظت نیتروژن، الگوهای پراش پرتو ایکس، یافته‌های سختی‌سنجی، نتایج آزمون‌های کشش، تحلیل‌ها و انطباق با یافته‌های تحقیقاتی گذشته؛ نتایج زیر را به‌طور خلاصه می‌توان ارایه نمود:

- اثرات نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دو دمای ۴۵۰ و ۵۰۰°C بر خواص سطحی و حجمی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L مورد تحلیل قرار گرفت.
- با نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دمای ۴۵۰°C، ریزساختاری شامل آستنیت انبساط‌یافته (فاز S یا γ_N) در سطح فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L ایجاد شد.
- با افزایش دمای فرآیند به ۵۰۰°C نیتروژن‌دهی، ϵ ، γ' و CrN (علاوه بر فاز S) تشکیل شدند.
- نیتروژن‌دهی پلاسمایی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L در دماهای ۴۵۰°C و ۵۰۰°C باعث افزایش سختی سطح به ترتیب به حدود ۱۰۰۰ و ۱۲۵۰ ویکرز شد.
- سختی سطح نمونه نیتروژن‌دهی شده در دماهای ۴۵۰ و ۵۰۰°C، به ترتیب چهار و پنج برابر نسبت به سختی زیرلایه بیش‌تر شده است.
- نیتروژن‌دهی پلاسمایی در دماهای ۴۵۰°C و ۵۰۰°C باعث افزایش استحکام تسلیم فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L از ۳۲۰ به ترتیب به ۳۴۰ و ۳۵۵ مگاپاسکال شد.
- استحکام کششی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L در دماهای ۴۵۰°C و ۵۰۰°C از حدود ۵۷۰ به ترتیب به حدود ۵۹۵ و ۶۱۰ مگاپاسکال افزایش یافت.
- نیتروژن‌دهی پلاسمایی باعث کاهش جزیی درصد ازدیاد طول نسبی و افت قابل توجه در درصد کاهش سطح مقطع فولاد 316L شده است.

لازم به توضیح است که بخشی از اثرات نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر خواص حجمی تا حدی مستقل از ابعاد نمونه و بخشی به ابعاد نمونه بستگی دارد. به عبارت دیگر، بخشی از اثرات نیتروژن‌دهی پلاسمایی بر خواص کششی، به‌واسطه ممانعت از ایجاد ترک و اشاعه پارگی از سطح و نواحی نزدیک سطح است. این‌گونه اثرات تا حدی مستقل از ابعاد نمونه هستند. این موضوع تا حدی شبیه به اثرات تنش‌های فشاری بر ترک‌های خستگی سطحی است. از طرف دیگر، بخشی از اثرات، ناشی از مستحکم شدن ناحیه‌ای (نزدیک به سطح) از مقطع عرضی ماده است. در این حالت، درصد ناحیه سخت‌شده نسبت به کل مساحت مقطع عرضی اهمیت دارد. در این تحقیق، از نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده که مساحت مقطع عرضی آن‌ها ۴۰ میلی‌متر مربع بوده است. اگر ضخامت ناحیه سخت‌شده در دمای ۵۰۰°C حدود ۵۰ میکرومتر (شامل لایه S در شکل ۲ به‌علاوه بخش مؤثر ناحیه نفوذی) در نظر گرفته شود؛ مساحت ناحیه سخت‌شده، ۲/۲ میلی‌متر مربع (۵/۵ درصد مساحت مقطع عرضی نمونه) به‌دست می‌آید. در دمای ۵۰۰°C، استحکام تسلیم و کششی به ترتیب حدود ۱۱ و ۷ درصد افزایش یافته است. برای درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع می‌توان محاسبات مشابهی انجام داد. همچنین می‌توان این‌گونه محاسبات را برای دمای ۴۵۰°C تکرار نمود که از گنجایش این مقاله خارج است. ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی در مقایسه با بسیاری از قطعات صنعتی کم‌تر است. معمولاً درصد مساحت ناحیه سخت‌شده به کل مساحت مقطع عرضی در قطعات بزرگ‌تر، کم‌تر از نمونه‌های آزمایشگاهی است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود با افزایش ابعاد قطعه، درصد ویا نرخ تغییر خواص کششی کم‌تر از مقادیر مندرج در این مقاله شود. بررسی دقیق‌تر این موضوع نیازمند انجام آزمون روی نمونه‌هایی با ابعاد متفاوت است که می‌تواند در تحقیقات آینده ادامه یابد.

- temperature of plasma nitriding in AISI 316L austenitic stainless steel*, Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, 22(2003)63-66.
9. C. X. Li and T. Bell, *Corrosion properties of active screen plasma nitrided 316 austenitic stainless steel*, Corrosion Science, 46(2004)1527-1547.
۱۰. مهدی نادری و سیدرحمان حسینی، ارزیابی رفتار خوردگی فولاد زنگ‌نزن AISI 316 پس از فرآیند جدید نیتروژن‌دهی پلاسمایی با تغییر نرخ افزایش دما، مجموعه مقالات سیزدهمین کنگره ملی خوردگی ایران، دانشگاه تبریز، انجمن خوردگی ایران، (۱۳۹۱) ۱۵۹۱-۱۶۰۰.
۱۱. مهدی نادری و سیدرحمان حسینی، تأثیر فرآیند جدید نیتروژن‌دهی پلاسمایی با تغییر نرخ افزایش دما بر خواص سایشی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316، مجموعه مقالات سیزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح، دانشگاه تبریز، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران، (۱۳۹۱) ۶۱۶-۶۲۵.
۱۲. مهدی نادری و سیدرحمان حسینی، ارزیابی تأثیر فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی با نرخ تغییر دما بر ساختار سطح فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316، مجموعه مقالات دوازدهمین سمینار ملی مهندسی سطح، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر اصفهان، انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران، (۱۳۹۰) ۴۰۴-۴۱۳.
13. ASTM A 276, *Standard specification for stainless steel bars and shapes*, Annual Book for ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, 2000.
 14. J. Buhagiar, *Plasma surface engineering and characterization of biomedical stainless steels*, PhD Thesis, School of Metallurgy and Materials, The University of Birmingham, June 2008.
 15. ASTM E 8M, *Standard test methods of tension testing of metallic materials (Metric)*, Annual Book for ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, 2008.
- در مجموع فرآیند نیتروژن‌دهی پلاسمایی علاوه بر اینکه باعث ارتقای ریزساختار و خواص سطحی شده، منجر به افزایش سختی، استحکام تسلیم و استحکام کششی شده است. بنابراین خواص حجمی فولاد AISI 316L در مقیاس آزمایشگاهی بهبود یافته است.
- مراجع
1. J. R. Davis and C. Ohio, *Introduction to stainless steels*, ASM Speciality Handbook: Stainless Steels, ASM International, 2nd Edition, 3-126, 1996.
 2. J. R. Davis and C. Ohio, *Metallurgy and properties of wrought stainless steels*, ASM Speciality Handbook: Stainless Steels, ASM International, 2nd Edition, 13-66, 1996.
 3. K. H. Lo, C. H. Shekand and J. K. L. Lai, *Recent developments in stainless steels*, Materials Science and Engineering, 65(2009)39-104.
 4. Y. Li, L. Wang, J. Xu and D. Zhang, *Plasma nitriding of AISI 316L austenitic stainless steels at anodic potential*, Surface and Coatings Technology, 206(2012)2430-2437.
 5. X. Y. Li, *Low temperature plasma nitriding of 316 stainless steel - Nature of S phase and its thermal stability*, Surface Engineering, 17(2001)147-152.
 6. G. Li, Q. Peng, C. Li, Y. Wang, J. Gao, S. Chen, J. Wang and B. Shen, *Effect of DC plasma nitriding temperature on microstructure and dry-sliding wear properties of 316L stainless steel*, Surface and Coatings Technology, 202(2008)2749-2754.
 7. L. Nosei, S. Farina, M. Avalos, L. Nachez, B.J. Gomez and J. Feugeas, *Corrosion behavior of ion nitrided AISI 316L stainless steel*, Thin Solid Films, 516(2007)1044-1050.
 8. A. M. de Oliveira, R. M. Munoz Riofano, L.C. Casteletti, G.F. Tremiliosi and C.A.S. Bento, *Effect of the*

۱۶. محمدعظیم سهرابی و نقی پروینی احمدی، بررسی رفتار خوردگی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی غنی از نیتروژن، مجموعه مقالات سمپوزیوم فولاد ۸۸ انجمن آهن و فولاد ایران، ۱۱ و ۱۲ اسفند ماه ۱۳۸۸، ۶۱۵-۶۲۴.
17. F. Borgioli, A. Fossati, E. Galvanetto and T. Bacci, *Glow-discharge nitriding of AISI316L austenitic stainless steel: influence of treatment temperature*, Surface and Coatings Technology, 200(2005)2474-2480.
18. L. C. Casteletti, A. L. Neto and G. E. Totten, *Plasma nitriding of stainless steels*, Ionic Technologies Inc, TS 16949, AS 9100, 2008.
19. S. R. Hosseini and F. Ashrafizadeh, *Compositional depth profile investigation of plasma nitriding by multiple analyses techniques*, Vacuum 85(2011)920-926.
20. M. Mc Guire, *Stainless steel for design engineers*, ASM International, Materials Park Ohio, 2008.
21. Y. Sun and T. Bell, *Sliding wear characteristics of low temperature plasma nitrided 316 austenitic stainless steel*, Wear, 218(1998)34-42.
22. L. Pichon, S. Okur, O. Öztürk, J.P. Rivière and M. Drouet, *CoCrMo alloy treated by floating potential plasma assisted nitriding and plasma based ion implantation: Influence of the hydrogen content and of the ion energy on the nitrogen incorporation*, Surface and Coatings Technology, 204(2010) 2913-2918.
23. P. K. Rai, V. Pandey, K. Chattopadhyay, L.K. Singhal and V. Singh, *Effect of ultrasonic shot peening on microstructure and mechanical properties of high-nitrogen austenitic stainless steel*, Journal of Materials Engineering and Performance 23(2014)4055-4064.
24. P. K. Rai, V. Pandey, K. Chattopadhyay, L.K. Singhal and V. Singh, *Effect of surface nanostructure on tensile and low cycle fatigue behavior of Al 2014 alloy*, Materials Science and Engineering 63(2014)2-17.
25. B. K. C. Ganesha, W. Shab, N. Ramanaiaha and A. Krishnaiah, *Effect of shotpeening on sliding wear and tensile behavior of titanium implant alloys*, Materials and Design, 56(2014)480-486.
26. G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 1988.