

تأثیر هندسه قطعات بر رفتار نیتروژن دهی پلاسمایی به روش معمولی و توری فعال در فولاد

گرم کار AISI H13

کیانوش طاهر خانی^{۱*} و فرزاد محبوبی^۲

چکیده

این مقاله به تأثیر پارامترهای نیتروژن دهی، فرکانس و چرخه کاری بر قطعات با هندسه پیچیده در دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی و نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال می‌پردازد. در این پژوهش عملیات نیتروژن دهی در دمای 500°C ، چرخه‌های کاری ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و فرکانس‌های ۸ و ۱۰ کیلوهرتز روی نمونه‌های شیار دار از جنس AISI H13 با ضخامت‌های شیار ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ میلی‌متر به مدت ۵ ساعت به دو روش معمولی و توری فعال انجام گرفت. تمامی نمونه‌های عملیات شده به کمک آزمایش‌های متالوگرافی، ریز سختی سنجی، زبری سنجی، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان دادند که زبری و سختی سطح در هر دو روش با افزایش چرخه کاری زیاد می‌شود. در روش نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی در چرخه کاری ۸۰٪ و با ضخامت شیار ۲ میلی‌متر پدیده کاند توخالی رخ می‌دهد که منجر به بیش گرمایش نمونه شده و در نتیجه، باعث افزایش زبری سطح و کاهش سختی سطح می‌شود. این پدیده در روش نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال رخ نمی‌دهد. ریخت شناسی سطح نمونه‌های نیتروژن پلاسمایی شده به روش معمولی شامل ذرات گل کلمی شکل می‌باشد. در حالی که نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش توری فعال از ذرات نیتریدی به شکل هگزاگونال با توزیع یکنواخت پوشیده شده‌اند. همچنین، نتایج XRD نشان داد که در هر دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی روی کلیه سطوح فازهای ϵ و γ' تشکیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چرخه کاری، فرکانس، نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی، نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر .

۲- دکترای مهندسی مواد و متالورژی، دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: kiyanoosh@aut.ac.ir

پیشگفتار

فولادهای ابزار گروهی از فولادهای کربنی و فولادهای آلیاژی هستند که با عملیات حرارتی آنها می‌توان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بهینه‌ای در آنها بوجود آورد، به گونه‌ای که بتوان از آنها ابزارهایی نظیر ابزارهای برشی سنبه و ماتریس‌های برش، خم‌کاری، فرم دادن، کشش، قالب‌های پلاستیک، دایکست و اکستروژن ساخت. برخی از ویژگی‌های مطلوب فولادهای ابزار مقاومت سایشی و سختی زیاد، مقاومت گرمایی خوب و استحکام کافی برای کار روی مواد است. فولادهای گرم کار گرم دار $5\%Cr$ مثل H11, H12, H13 سختی پذیری زیادی دارند و مقاطع نسبتاً بزرگ این فولادها را می‌توان با حداقل تغییر ابعاد با سرد کردن در هوا سخت کرد. درصد نسبتاً زیاد سیلیسیم در نوع H13 برای بهبود مقاومت به اکسایش در دمای آستنیتی است. در این آلیاژها به دلیل داشتن $5\%Cr$ و $1/5\%Mo$ در محلول جامد زمان لازم برای رسوب کاربیدها کوتاه است. نیتروژن دهی پلاسمایی یکی از فرایندهای اصلاح ساختار سطوح فلزات است که موجب بهبود مقاومت سایشی، خوردگی و خستگی قطعات صنعتی شده و در نتیجه، منجر به افزایش عمر و کارایی بهتر آنها می‌شود [۱،۲]. بسیاری از انواع نیتروژن دهی وجود دارد که شامل: نیتروژن دهی پلاسمایی پالسی، نیتروژن دهی پلاسمایی با فشار کم، نیتروژن دهی سنتی و غیره می‌باشد. عملیات نیتروژن دهی فولادها به گونه‌ای سنتی هنوز هم به وسیله‌ای یکی از روش‌های گازی یا مایع انجام می‌پذیرد، اما استفاده از پلاسمای در عملیات نیتروژن دهی با کنترل بهتر فازهای سطحی تشکیل شونده و کیفیت بهتر سطوح قطعات، سبب کاهش مصرف گاز، کاهش انرژی مصرفی و کاهش خطرات زیست محیطی می‌شود [۳،۴]. امروزه نیتروژن دهی پلاسمایی متداول بیش‌ترین کاربرد را در نیتروژن دهی فولاد دارد. با وجود تمام مزایایی که روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول (CPN)^۱ نسبت به روش‌های سنتی نیتروژن دهی دارد، مشکلاتی از قبیل: نگهداری و حفظ یکنواختی دما در محفظه ورودی قطعه، محدودیت انجام عملیات روی قطعات با اشکال پیچیده، ایجاد لایه‌ی نا یکنواخت در

سطح قطعه، خطر آسیب قوس و پدیده‌ی کاند توخالی در طی انجام فرایند دیده می‌شود [۵]. تلاش‌هایی که بمنظور بر طرف کردن کاستی‌های این روش صورت گرفته، ضمن این‌که منجر به توسعه‌ی روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول و ابداع روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال^۲ (ASPN) یا TC^3 شده است. اساس روش کار عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال همانند روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول است، با این تفاوت که در روش نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال، با وصل شدن توری به قطب منفی و تشکیل پلاسمای روی سطح توری نه روی سطح قطعه کار وظیفه تولید اجزای فعال نیتروژن و هم چنین، گرم کردن نمونه‌ها که نسبت به کاند در پتانسیل خنثی قرار دارد، بر عهده توری فعال است [۵،۶]. نشان داده شد که نیتروژن دهی به روش توری فعال می‌تواند نتایج مشابهی با نیتروژن دهی پلاسمایی متداول داشته باشد و با این حال، مشکلات موجود در روش نیتروژن دهی متداول نظیر آسیب ناشی از قوس سطح، اثر لبه و هم چنین، اثر پدیده‌ی کاند توخالی را بر طرف می‌نماید [۵]. با توجه به مشکلاتی که در نیتروژن دهی قطعات با شیارهای نازک و عمیق وجود دارد و نیاز به کیفیت سطحی بالا در قالب‌های اکستروژن و دایکست که معمولاً هندسه پیچیده دارند، کنترل عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی با تغییر پارامترهای تأثیرگذار آن می‌تواند صرفه جویی اقتصادی را افزایش دهد. هدف اصلی از این پژوهش، مطالعه و بررسی تأثیر پارامترهای فرکانس و چرخه کاری در روش نیتروژن پلاسمایی پالسی به روش معمولی و توری فعال بر قطعات با هندسه پیچیده از جنس فولاد گرم کار H13 که فولاد مورد نیاز قالب‌های اکستروژن می‌باشد و تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته، می‌باشد.

مواد و روش پژوهش

ابتدا نمونه‌های مکعبی با ابعاد $60 \times 40 \times 30$ میلی متر مکعب با استفاده از عملیات ماشین کاری از جنس فولاد گرم کار AISI H13، DIN ۱/۲۳۴۴ با ترکیبی که

^۲ - Acture Screen Plasma Nitriding

^۳ - Through Cage

^۱ - Conventional Plasma Nitriding

کار که یک عایق سرامیکی آن را از پتانسیل منفی (کاتد) جدا می‌کند، قرار داده شدند. سپس توری ساخته شده پس از چربی زدایی، اسید شویی در محلول فروکیلین و خشک کردن، روی سکوی موجود در محفظه دستگاه قرار گرفت. در روش نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال، با وصل شدن توری به قطب منفی (کاتد) پلازما روی سطح توری تشکیل می‌شود. هم چنین، تولید اجزای فعال نیتریدی و هم چنین، گرم کردن نمونه‌ها بر عهده توری فعال می‌باشد. در نهایت، ویژگی‌های سطحی، ساختار و فازهای تشکیل شده روی نمونه‌های نیتروژن دهی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ریز سختی سنجی، زبری سنجی و آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفت. پس از عملیات نیتروژن دهی نمونه‌های عملیات شده را از لبه شیار تا ته شیار به فاصله ۱ cm جدا کرده و به ترتیب از بالا (لبه شیار) مناطق را با نام‌های A, B, C, D نام‌گذاری کرده و هم چنین، در این گزارش نتایج مربوط به منطقه‌ی A نزدیک لبه شیار برای زبری سنجی، SEM و XRD گزارش شده است.

نتایج و بحث

شکل (۳) نتایج زبری سنجی سطوح شیارها که به روش توری فعال نیتروژن دهی پلاسمایی شده‌اند را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت شیار از ۲ به ۱۰ میلی متر زبری سطح نمونه‌ها از $0.22-0.24 \mu\text{m}$ به $0.46-0.48 \mu\text{m}$ در چرخه کاری ۸۰٪ و فرکانس ۸ kHz افزایش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند حضور بیش‌تر نیتروژن، در نتیجه‌ی برخورد بیش‌تر یون‌های پر انرژی موجود در محیط پلازما با سطح توری پیرامون نمونه باشد. در نتیجه، به دلیل برخورد یون‌های نیتروژن با آهن در فضای اطراف سطح توری فاز نیتريد آهن بیش‌تری تشکیل می‌شود. بخشی از این فازهای نیتریدی تشکیل شده به صورت رسوب دوباره روی سطح توری قرار می‌گیرند و بخشی دیگر از سوراخ‌های موجود در توری استوانه‌ای و در پوشش مشبک عبور کرده و روی سطح نمونه مورد عملیات رسوب می‌کنند. هم چنین، با حضور بیش‌تر نیتروژن، ذرات نیتریدی بزرگ‌تر شده و

جدول ۱ نشان داده شده آماده گردیده سپس در نمونه‌های آماده شده به شکل مکعب مستطیل، شیارهایی با ارتفاع ثابت ۴۰ میلی متر، پهنای ثابت ۲۰ میلی متر و ضخامت‌های متغیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی متر که در شکل (۱) با (t) نشان داده شده در آن ایجاد شد. دلیل استفاده از نمونه‌هایی با ضخامت‌های شیار گوناگون به نوعی شبیه‌سازی قالب‌های اکستروژن و دایکست که شکل هندسی پیچیده ای دارند و دارای حفره های با ابعاد متفاوت‌اند و باید در معرض عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی قرار گیرند، می‌باشد. هم چنین، بمنظور کنترل دقیق درجه حرارت در حین فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی، درون نمونه‌ها محلی برای تعبیه ترموکوپل در نظر گرفته شد که در شکل (۱) با پیکان نشان داده شده است. شکل (۱) شمایی از نمونه تهیه شده را نشان می‌دهد. سطح مورد بررسی در این پژوهش سطح قسمت مشخص شده در قسمت (ب) شکل (۱) می‌باشد. پس از آماده شدن نمونه‌ها، آن‌ها را در دمای 1050°C به مدت ۱ ساعت آستینته کرده و بلافاصله در روغن کوئچ شدند. جهت جلوگیری از هر گونه تغییر در ساختار فولاد هنگام نیتروژن دهی پلاسمایی، دمای تمپر بالاتر از دمای نیتروژن دهی در نظر گرفته شد و نمونه‌ها در دمای 530°C به مدت ۱ ساعت تمپر شدند. سختی نمونه‌ها ۵۷-۵۴ راکول سی شد. سپس تمامی سطوح نمونه‌ها با استفاده از روش‌های متالوگرافی بمنظور ایجاد سطوح صاف برای عملیات نیتروژن دهی، سنباده و پولیش شدند. جهت انجام عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی به روش معمولی و توری فعال، از دستگاه نیتروژن دهی پلاسمایی متداول که در دانشگاه صنعتی امیر کبیر طراحی و ساخته شده، استفاده شد شکل (۲). نمونه‌ها در اتمسفر حاوی $2\text{N}_2-75\% \text{H}_2$ در دمای 500°C با فرکانس‌های ۸ و ۱۰ kHz، در چرخه های کاری ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ برای مدت زمان ۵ ساعت نیتروژن دهی پلاسمایی شدند. برای عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال، ورق مشبکی از جنس فولاد ساده‌ی کربنی به ضخامت ۰/۸ میلی متر که حاوی سوراخ‌های با توزیع یکنواخت به قطر ۸ میلی متر به صورت استوانه ای تهیه شد. درپوش بکار رفته نیز از ورق مشبک تهیه شد. نمونه‌ها روی میز

میلی متر سختی سطح شیار در همه‌ی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. از آنجایی که غلظت نیتروژن درون شیار با ضخامت ۱۰ میلی متر، بیش‌تر است، درصد نیتريدی‌های تشکیل شده در آن بیش‌تر می‌شود. این موجب افزایش سختی سطح در ضخامت ۱۰ میلی متر می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، سختی سطح در نمونه‌ی نیتروژن دهی شده به روش متداول با ضخامت شیار ۲ میلی متر و با چرخه کاری ۸۰٪ کم‌ترین مقدار سختی را نمایش می‌دهد. علت این امر اثر پدیده‌ی کاتد توخالی بوده همان گونه که گفته شد، سطح این نمونه بیش گرم شده و باعث رشد ناگهانی ذرات نیتريدی می‌شود. در نتیجه، سختی سطوح کاهش می‌یابد [۸]. هم‌چنین، مشاهده می‌شود که در هر دو روش نیتروژن دهی متداول و توری فعال با افزایش چرخه کاری از ۴۰٪ به ۸۰٪ سختی سطح افزایش می‌یابد. به دلیل این که با افزایش چرخه کاری انرژی یون‌ها و فعالیت آن‌ها بیش‌تر می‌شود و ضریب نفوذ نیتروژن افزایش پیدا می‌کند و با افزایش ضریب نفوذ، نیتروژن تا عمق بیش‌تری از سطح نفوذ کرده و باعث می‌شود نیتريد آهن و عناصر آلیاژی بیش‌تری تشکیل شود که این امر موجب زیاد شدن سختی می‌شود. با افزایش فرکانس سختی سطوح به گونه‌ی ناچیزی کاهش می‌یابد [۹]. هم‌چنین مشاهده می‌شود که سختی سطح نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش متداول بیش‌تر از سختی سطح نمونه‌هایی است که به روش توری فعال نیتروژن دهی شده‌اند [۷]. سختی در مناطق نزدیک لبه بیش‌تر است. علت آن نفوذ بیش‌تر نیتروژن به سطح قطعه در این بخش می‌باشد. چون در نزدیکی لبه نسبت سطح به حجمی که در معرض پلاسمای بوده، بیش‌تر است، این باعث شده نیتروژن بیش‌تری به سطح نفوذ کند. هم‌چنین، سختی به ترتیب از A تا D کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد نفوذ نیتروژن به درون شیار از لبه به ته شیار کاهش می‌یابد و این تأثیر در حفره‌هایی با پهنای شیار کم‌تر، بیش‌تر مشهود است.

در شکل (۷) تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ از نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش متداول در چرخه کاری ۸۰٪، فرکانس ۸ kHz و در دمای ثابت ۵۰۰°C در ضخامت‌های شیار ۲، ۶ و ۱۰ میلی متر نمایش داده

زبری سطح بیش‌تر می‌شود. شکل (۴) نتایج زبری سنجی سطوح شیارهایی که به روش متداول (معمولی) نیتروژن دهی پلاسمایی شده‌اند را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت شیار از ۴ به ۱۰ میلی متر زبری سطح نمونه‌ها از $0.41-0.39 \mu\text{m}$ به $0.52-0.54 \mu\text{m}$ در چرخه کاری ۸۰٪ و فرکانس ۸ kHz افزایش پیدا می‌کند. دلیل آن می‌تواند حضور بیش‌تر نیتروژن، در نتیجه‌ی کندوپاش بیش‌تر سطح نمونه‌ها باشد. هم‌چنین، با حضور بیش‌تر نیتروژن، ذرات نیتريدی تشکیل شده در سطح بیش‌تر و بزرگ‌تر شده در نتیجه زبری سطح بیش‌تر می‌شود [۷]. در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول نکته‌ی قابل توجهی در زبری سطح نمونه با چرخه کاری ۸۰٪ و ضخامت شیار ۲ میلی متر دیده می‌شود. مقدار زبری سطح این نمونه در دمای ۵۰۰°C و فرکانس ۸ kHz برابر $0.56 \mu\text{m}$ (بیش‌ترین مقدار زبری سطح) می‌باشد. دلیل آن می‌تواند بیش‌تر گرمایش نمونه در اثر پدیده کاتد تو خالی باشد. به دلیل کوچک بودن ضخامت شیار، پلاسمای در دو طرف شیار هم پوشانی کرده و باعث گیر افتادن الکترون‌ها و یونیزاسیون بیش‌تر می‌شود. در نتیجه کندوپاش سطح بیش‌تر و زبری سطح افزایش می‌یابد. در هر دو روش مقدار زبری برای چرخه کاری ۶۰٪ و ۸۰٪ نسبتاً بالا و برای ۴۰٪ نسبتاً پایین است. از سوی دیگر، زبری سطح با افزایش چرخه کاری افزایش می‌یابد. هم‌چنین، با افزایش فرکانس نیز زبری سطح افزایش می‌یابد. بر اساس گزارش‌ها افزایش اتم‌های طبیعی و مولکول‌های پایدار اتم نیتروژن سبب تشدید بمباران یونی، نفوذ سریع نیتروژن و کندوپاش می‌شود. در نتیجه، با افزایش فرکانس و چرخه کاری، زبری سطوح افزایش یابد. در مقایسه با روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول زبری سطوح نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال کمتر و سطوح نمونه‌ها یکنواخت‌تر است. هم‌چنین، اثر پدیده‌ی کاتد توخالی مشاهده نمی‌شود [۳].

در شکل‌های (۵) و (۶) نتایج ریز سختی از لبه‌ی شیار تا ته شیار نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش متداول و توری فعال در فرکانس ۸ kHz، دمای ۵۰۰°C در چرخه‌های کاری ۴۰٪ و ۸۰٪ نمایش داده می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت شیار از ۲ به ۱۰

شیار و کندوپاش بیش‌تر سطح با افزایش ضخامت باشد [۸]. به گونه‌ی مشابه در نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال مقدار نیتريد آهن با بزرگ‌تر شدن ضخامت شیار افزایش می‌یابد. با این حال، نیتريد‌های آهن تشکیل شده در سطح نمونه با ضخامت شیار ۲ میلی‌متر بسیار ناچیزند و به وسیله‌ی XRD مشاهده نمی‌شود و تنها پیک $\alpha\text{-Fe}$ به وضوح مشاهده می‌شود. هم‌چنین، با مقایسه‌ی نتایج XRD نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش متداول و توری فعال مشاهده می‌شود که شدت فاز ϵ در روش توری فعال نسبت به روش متداول کاهش می‌یابد و بر عکس شدت فاز γ' افزایش می‌یابد. علت این امر حضور بیش‌تر نیتروژن و نیتريد‌های آن درون شیارها در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول می‌باشد [۹]. در کل، نتیجه‌ی این است که بدست آمد این است که نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال به علت جلوگیری از بوجود آمدن پدیده‌ی کاتد توخالی، ایجاد لایه‌ی یکنواخت در سطح، تشکیل فازهای نیتريدی به گونه‌ی یکنواخت و منظم در سطح و امکان نیتروژن دهی کردن قطعات با شیارهای نازک و عمیق نسبت به روش متداول (معمولی) برتری دارد.

نتیجه‌گیری

۱- زبری سطح در هر دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی با افزایش ضخامت شیار، فرکانس و چرخه کاری به دلیل افزایش نیتريد‌های آهن تشکیل شده در سطح شیارها و درشت شدن رسوبات تشکیل شده بیش‌تر می‌شود.
 ۲- در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول زبری سطح نمونه با ضخامت شیار ۲ میلی‌متر و چرخه کاری ۸۰٪ برابر $0.56 \mu\text{m}$ (بیش‌ترین مقدار) می‌باشد زیرا پدیده‌ی کاتد توخالی باعث بیش‌تر گرم شدن نمونه و درشت شدن ناگهانی ذرات نیتريدی گل کلمی شکل می‌شود.
 ۳- در هر دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی سختی سطح شیارها با افزایش ضخامت شیار و افزایش چرخه کاری بیش‌تر می‌شود زیرا غلظت نیتروژن درون شیارها و درصد نیتريد‌های تشکیل شده نیز بیش‌تر شده که این موجب افزایش سختی سطح می‌شود. سختی سطح

می‌شود. در شکل (۸) نیز تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ از نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال در چرخه کاری ۸۰٪، فرکانس ۸ kHz، دمای ثابت 500°C در ضخامت‌های شیار ۲، ۶ و ۱۰ میلی‌متر نمایش داده می‌شود. با توجه به شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود که سطح نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول به وسیله‌ی ذرات گل کلمی و سطح نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال با ذرات نیتريدی هگزاگونالی پوشیده شده است. هم‌چنین، مشخص شده که ذرات گل کلمی شکل بوجود آمده در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول ناشی از کندوپاش و باز رسوب اتم‌های سطح به وسیله‌ی اتم‌ها یا یون‌های نیتروژن در طی این فرایند می‌باشد. در هر دو روش نیتروژن دهی مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت شیار از ۶ به ۱۰ میلی‌متر ذرات نیتريدی درشت‌تر، سطح فلز نا هموارتر و زبرتر می‌شود و هم‌چنین، با کاهش آن سطح هموارتر و ذرات نیتريدی کوچک‌تر می‌شود. مشاهده می‌شود که سطوح نیتروژن دهی شده به روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال هموارتر و یکنواخت‌تر از سطوح نیتروژن دهی شده به روش متداول می‌باشد [۱۰، ۱۱]. هم‌چنین، اثر پدیده‌ی کاتد توخالی در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول در ضخامت شیار ۲ میلی‌متر و چرخه کاری ۸۰٪ باعث شده اندازه‌ی ذرات گل کلمی شکل در شیار ۲ میلی‌متر بزرگ‌تر و درشت‌تر از شیار ۱۰ میلی‌متر شود. با توجه به تصاویر SEM نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال مشاهده می‌شود که اثر پدیده‌ی کاتد توخالی در شیار ۲ میلی‌متر در چرخه کاری ۸۰٪ رخ نمی‌دهد [۷].
 شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج XRD نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش معمولی و توری فعال در دمای 500°C ، فرکانس ۸ kHz و چرخه کاری ۸۰٪ در ضخامت‌های شیار ۲، ۶، و ۱۰ میلی‌متر را نمایش می‌دهند. در سطح همه نمونه‌ها فازهای $\gamma':\text{Fe}_4\text{N}$ و $\epsilon:\text{Fe}_2\text{-3N}$ تشکیل می‌شود [۱۲، ۱۳]. با افزایش ضخامت شیار در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول مقدار فاز ϵ (فاز غنی از نیتروژن) افزایش پیدا می‌کند. این امر می‌تواند به دلیل افزایش حضور بیش‌تر نیتروژن درون

۵- در سطح کلیه‌ی نمونه‌ها فازهای γ :Fe₄N و Fe₂: ϵ تشکیل شده است. با افزایش ضخامت شیار شدت فاز ϵ به γ افزایش می‌یابد. در سطح نمونه عملیات شده با توری فعال با ضخامت ۲ میلی‌متر فقط فاز α مشاهده می‌شود.

نمونه‌های عملیات شده در روش (CPN) بیش‌تر از سختی سطح در روش (ASPN) می‌باشد.

۴- سطح نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول به وسیله‌ی ذرات گل کلمی و سطح نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال با ذرات نیتريدی هگزاگونالی با توزیع یکنواخت پوشیده شده است.

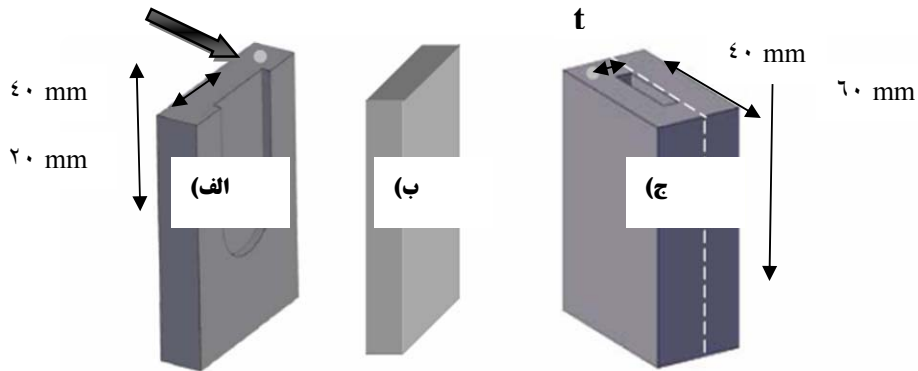
منابع

- 1- M. Karakan, A. Alsaran and A. Celik, "Effects of Various Gas Mixtures on Plasma Nitriding Behavior of AISI 5140 Steel", Material characteristics, Vol. 49, pp. 241-6, 2003.
- 2- B. Y. Jeong and M. H. Kim, "Effects of the Process Parameters on the Layer Formation Behavior of Plasma Nitrided Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 141, pp. 182-6, 2001.
- 3- Goo-Hwan Jeong, Min-Sun Hwang, Yong Jeong, Myun-Hokim and Chong Lee, "Effect of the Duty Factor on the Surface Characteristics of the Plasma Nitride and Diamond-Like Carbon Coated High-Speed Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 124, pp. 222-227, 2000.
- 4- G. Nayal, DB. Lewis, M. Lembke and E. Cockremje, "Influence of Sample Geometry on the Effect of Pulse Plasma Nitriding of M2 Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 57, pp. 147, 1999.
- 5- CZ. Li and T. Bell, "Principals Mechanisms and Applications of Active Screen Plasma Nitriding", Heat Treatment of Metal, Vol. 30, pp. 1-7, 2003.
- 6- J. Gorges, "TC Plasma Nitriding", Plasma Metal, proceeding of 12th IFHTSE Congress, Melbourne, Australia, International Federation of Heat Treating and Surface Engineering, Vol. 3, pp. 225-229, 2000.
- 7- Z. Soltani Asadi and F. Mahboubi, "Effect of Component Geometry on the Plasma Nitriding Behavior of AISI 4340", Materials and Design, pp. 1-6, 2011.
- 8- SH. Ahangarani and F. Mahboubi, AR.Sabour, "Effect of Various Nitriding Parameters on Active Screen Plasma Nitriding Behavior of a Low-Alloy Steel", Vacuum, Vol. 1032, pp. 1-7, 2006.
- 9- Bong-Yong Jeong and Myung-Ho kim, "Effect of Pulse Frequency and Temperature on the Nitride Layer and Surface Characteristics of Plasma Nitrided Stainless Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 137, pp. 249-254, 2001.
- 10- C. Zaho, CX. Li, H. Dong and T. Bell, "Study on the Active Screen Plasma Nitriding and it is Nitriding Mechanism", Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 15-20, 2006.
- 11- SH. Ahangarani, AR. Sabour and F. mahboubi, "Surface Modification of 30 Cr Ni Mo8 Low-Alloy Steel by Active Screen Step and Conventional Plasma Nitriding Methods", Surface and Coatings Technology, Vol. 254, pp. 27-35, 2007.
- 12- A. Nishimoto, K. Nagatsuka, R. Narita, H. Nii and K. Akamatsu, "Effect of the Distance between Screen and Sample on Active Acreen Plasma Nitriding Properties", Surface and Coatings Technology, Vol. 205, pp. 365-8, 2010.
- 13- F. Mahboubi, M. Samandi, D. Dunne, A. Bloyce and T. Bell, "Plasma Nitriding of Microalloyed Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 71, pp. 135-41, 1995.

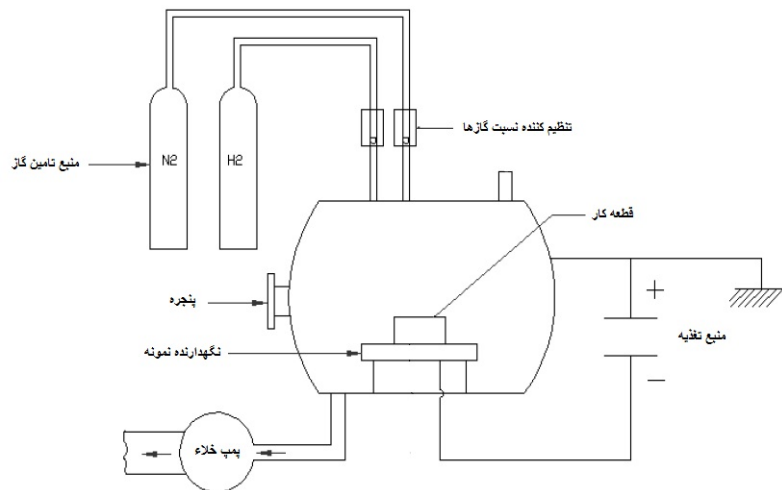
پیوست‌ها

جدول ۱- در صد ترکیب فولاد گرم کار AISI H13 (Wt%).

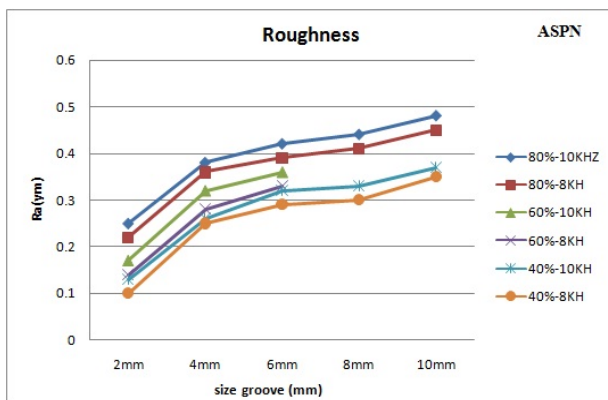
عنصر	C	Si	Mn	P	V	S	Cr	Mo
%وزنی	0.42	0.82	0.45	0.03	0.3	0.02	4.7	1.52



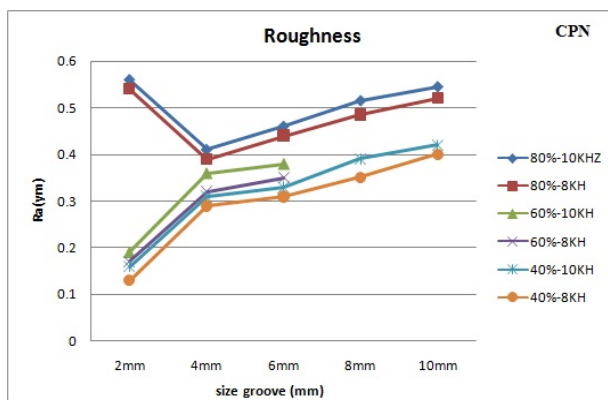
شکل ۱- شمایی از (الف) مجموعه نمونه عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی شده متشکل از (ب) سطح مورد آزمایش از جنس AISI H13 و (ج) سطح شیار دار که با پیچ و مهره به هم وصل شده‌اند، پیکان محل استقرار ترموکوپل را نمایش می‌دهد.



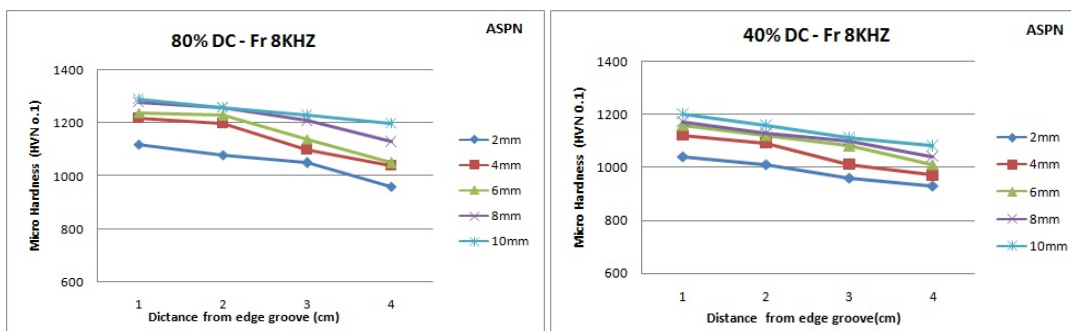
شکل ۲- طرح شمایی از سیستم نیتروژن دهی پلاسمایی موجود در دانشگاه صنعتی امیر کبیر.



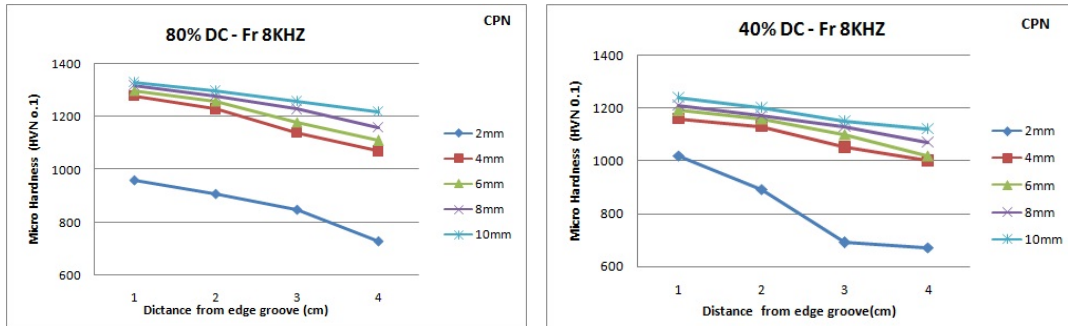
شکل ۳- نتایج زبری سطوح نمونه های عملیات شده به روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال (ASPN).



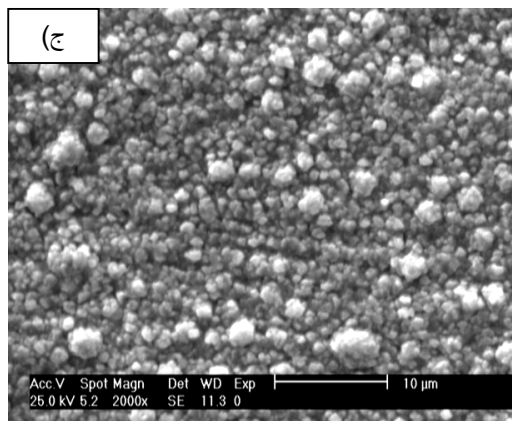
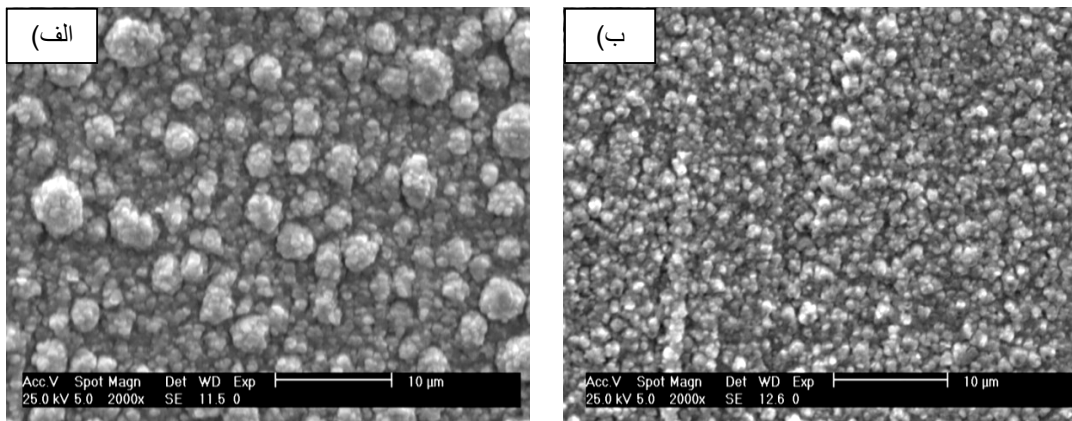
شکل ۴- نتایج زبری سطوح نمونه های عملیات شده به روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول (CPN).



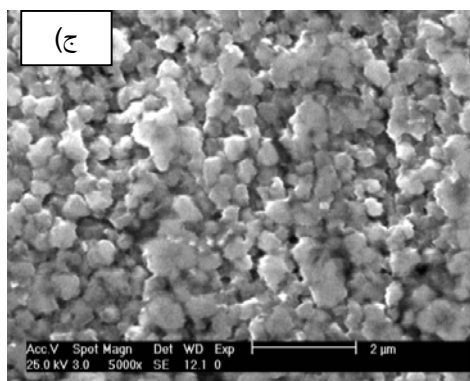
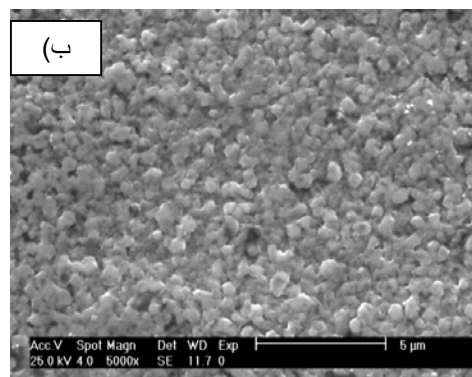
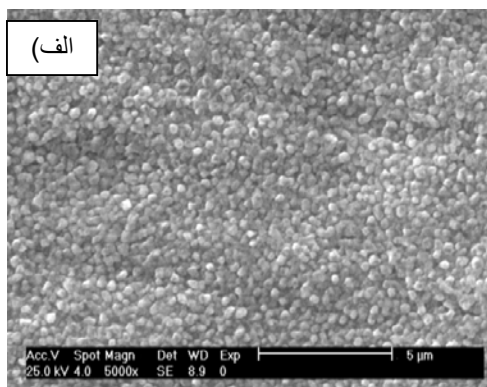
شکل ۵- نتایج سختی سطح نمونه های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش توری فعال از لبه شیار تا ته شیار در فرکانس ۸ کیلو هرتز، دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد و در چرخه های کاری الف) ۴۰٪ و ب) ۸۰٪.



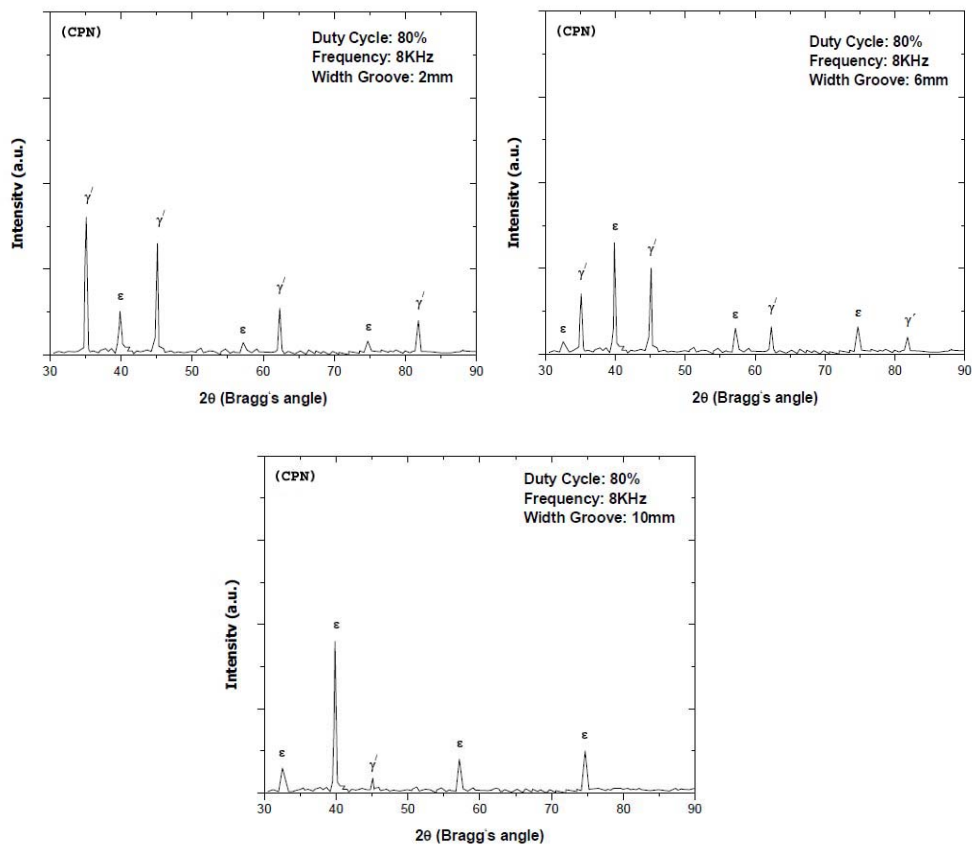
شکل ۶- نتایج سختی سطح نمونه های نیتروژن دهی شده به روش متداول از لبه شیار تا ته شیار در فرکانس ۸ کیلو هرتز، دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و در چرخه های کاری الف) ۴۰٪ و ب) ۸۰٪.



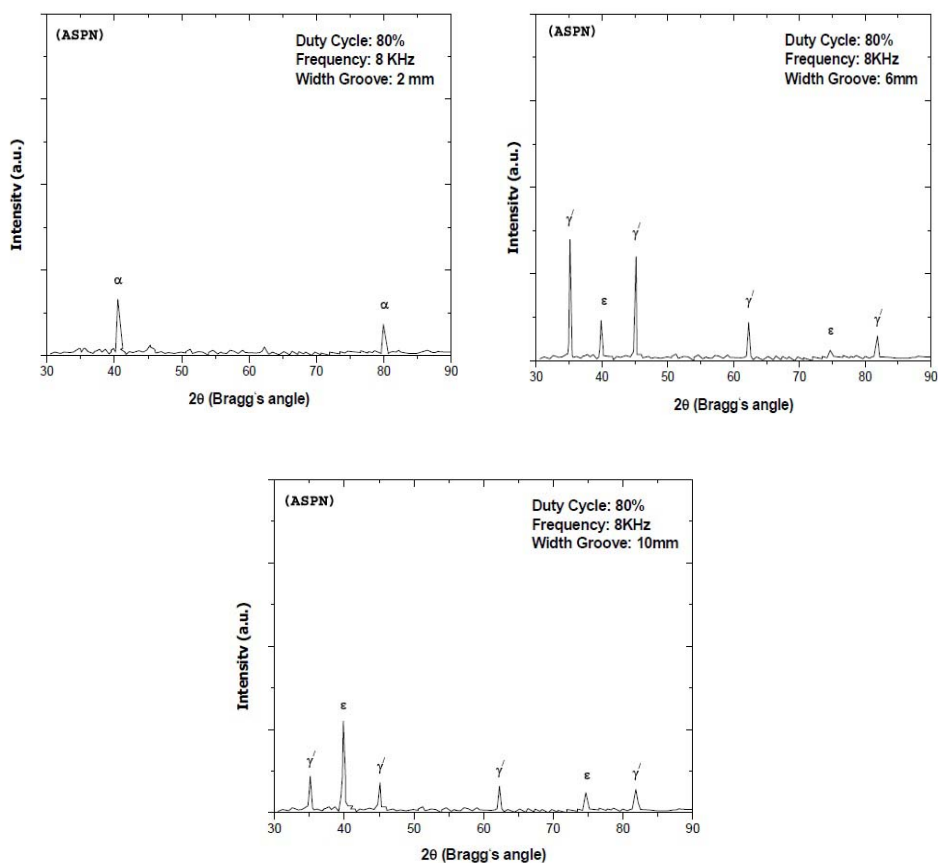
شکل ۷- تصاویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰۰ از نمونه های نیتروژن دهی شده به روش متداول در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، چرخه کاری ۸۰٪ و در ضخامت‌های شیار الف) ۲ mm، ب) ۶ mm و ج) ۱۰ mm.



شکل ۸- تصاویر SEM با بزرگنمایی ۵۰۰۰ از نمونه های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد، چرخه کاری ۸۰٪ و در ضخامت های شیار الف) ۲ mm، ب) ۶ mm و ج) ۱۰ mm.



شکل ۹- نتایج XRD نمونه‌های عملیات شده در چرخه کاری ۸۰٪ و فرکانس ۸ kHz در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول برای ضخامت‌های شیار الف (۲ mm، ب) ۶ mm و ج) ۱۰ mm.



شکل ۱۰- نتایج XRD نمونه‌های عملیات شده در چرخه کاری ۸۰٪ و فرکانس ۸ kHz در روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال برای ضخامت‌های شیار الف) ۲ mm، ب) ۶ mm و ج) ۱۰ mm.