تأثیر متغیرهای فرایند نیتروژندهی در دو روش نیتروژندهی پلاسمایی متداول و توری فعّال بر خواص سطحی و لایههای نیتریدی در فولاد گرم کار AISI H13* كيانوش طاهرخاني^(۱)

فرزاد محبوبی (۲)

چکىدە

هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر متغیرهای فرایند نیتروژندهی، یعنی فرکانس و چرخهی کاری، بر نمونههایی با شیارهای مختلف در دو روش نیتروژندهی پلاسمایی متداول و با توری فعّال می باشد. نمونه های اتصال یافته شامل بلوک فلزی از جنس فـولاد سـادهی کربنـی بـا شیارهای مکعب مستطیلی به عمق ۲، ٤، ٦، ٨ و ١٠ میلی متر، ارتفاع ٤٠ میلی متر و پهنای ٢٠ میلی متر و یک بلوک فلزی از جنس فولاد گرمکار AISI H13 بهابعاد ۲۰× ۲۰ میلی متر تهیّه شدند. نمونه های اتصال یافته در محیط AISI H12، دمای C° ۵۰۰، چرخه های کاری ٤٠، ٦٠ و ٨٠ درصد و فرکانس های ٨ و ١٠ کيلوهرتز بهماتت زمان ٥ ساعت با دو روش متداول و توری فعّال نيتروژن دهی پلاسمايی شدند. خواص نمونههای نیتروژندهی شده با اندازهگیری ضخامت لایهی ترکیبی، عمق نفوذ نیتروژن، تعیین نـوع ترکیبات فـازی و تغییـرات ریزسختی بررسی شدند. نتایج آزمایش ها نشان دادند که در روش نیتروژندهی پلاسمایی متداول و با چرخهی کاری ۸۰ درصد و عمق شیار ۲ میلی متر، پدیدهی کاتد توخالی اتفاق می افتد، و این منجر به گرمایش بیشتر نمونه می شود. این در حالی است که پدیدهی کات، توخالی در روش نیتروژندهی پلاسمایی بهروش توری فعّال رخ نمیدهد. مورفولوژی سطح نمونه های نیتروژندهی شده بهروش متداول شامل ذرات گل کَلمی بودند، در حالی که سطح نمونه های نیتروژن دهی شده به روش توری فعّال، از ذرات نیتریدی به شکل شش وجهی با توزیع یکنواخت يوشياه شاه بود.

واژههای کلیدی چرخهی کاری، فرکانس، نیتروژندهی پلاسمایی متداول، نیتروژندهی پلاسمایی با توری فعّال

The Effects of Nitriding Parameters in Hot Working Steel AISI H13 on its Surface Properties and Nitride Layers during Conventional and Active Screen Plasma **Nitriding Treatments**

K. Taherkhani

F. Mahboubi

Abstract

The main aim of this research was to investigate the effects of plasma nitriding parameters including frequency and duty cycle for a seris of test samples with different grooves during conventional plasma nitriding (CPN) and active screen plasma nitriding (ASPN) treatments. The sample assemblies were consisted of rectangular grooved steel blocks with different groove dimensions of 2, 4, 6, 8 and 10 millimeters (width), 40 millimeters (height), and 20 millimeters (length) and AISI H13 steel plates (as the substrate material) with dimensions of $10 \times 40 \times 60$ mm³. The sample assemblies were processed in conventional and active screen plasma nitriding chamber at the atmosphere of 75%H2-25%N2 with the temperature of 500 °C, the duty cycles of 40, 60, 80%, and the frequencies of 8, 10 kHz for 5 hours. The properties of processed substrates were investigated through the evaluation of the compound layer thickness, case depth, phase composition as well as the hardness profile. The results showed that the hallow cathode effect occurs during CPN method for a sample with 2 mm width groove and the duty cycle of 80% leading to the overheating of the sample. The surface morphology of the CPN treated samples was consisted of cauliflower shaped surface nitrides while the surface of the ASPNed samples were covered by the hexagonal particles with a uniform distribution.

Keywords Duty cycle, Frequency, Conventional Plasma Nitriding (CPN), Active Screen Plasma Nitriding (ASPN).

^{*} نسخهی نخست مقاله در تاریخ ۹۱/۸/۸ و نسخهی پایانی آن در تاریخ ۹۲/۹/۲۵ به دفتر نشریه رسیده است.

⁽۱) نویسندهی مسئول، کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

⁽۲) دانشیار، عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

متداول بیشترین استفاده را در روش های نیتروژندهـی فولاد دارد. با وجود تمام مزيت هايي كه روش نیتروژندهی پلاسمایی متداول (CPN) نسبت به روش های سنتی آن دارد، مشکلاتی از قبیل نگهداری و حفظ یکنواختی دما در محفظه ی ورودی قطعه، محدودیّت انجام عملیّات بر روی قطعاتی با شکل های پیچیده، ایجاد لایهی غیریکنواخت در سطح قطعه، خطر ایجاد آسیب قوس و پدیدهی کاتد توخالی (Hallow Cathode) حـين وقـوع فراينـد وجـود دارنـد. پدیدهی کاتد توخالی در نتیجهی هم پوشانی پلاسما در دو طرف شیار و یا حفرہ بهوجود میآید کے باعث جلوگیری از ورود پلاسما بهدرون حفره یا شیار مىشود. به اين اثر، كاتد توخالى گفته مـىشـود [8,9]. تلاش هایی که بهمنظور برطرف کردن عیبهای این روش صورت گرفته است، ضمن آنکه منجر به توسعهی روش نیتروژندهی پلاسمایی متداول شدهاند، باعث ابداع روش نیتروژندهی پلاسمایی با توری فعّال (ASPN یا TC) نیےز شدہ اند. روش کے رد عملیّے ات نیتروژندهی پلاسمایی با تـوری فعّـال هماننـد روش نیتروژندهی پلاسمایی متداول است، با این تفاوت که در روش نیتروژندهی پلاسمایی به روش توری فعّـال، با اتصال توری به قطب منفی و تشکیل پلاسما بر روی سطح توری (نه بر روی سطح قطعهکار) وظیفهی تولید اجزای فعّال نیتریدی و همچنین، گرم کردن نمونهها که نسبت به کاتد در پتانسیل خنثی قرار دارند، بر عهدهی توری فعّال است [8,10]. نشان داده شده است که نیتروژندهی به روش توری فعّال میتواند نتایج مشابهی با نیتروژندهی پلاسمایی متداول داشته باشد. ولی مشکلات موجود در روش نیتروژندهی متداول نظیر آسیب ناشی از قوس سطح، اثر لبه و پدیدهی کاتد توخالی را بر طرف میکند. با توجه به مشکلاتی که در روش نیتروژندهی قطعات با شیارهای باریک و عمیـق وجود دارند و نیاز به کیفیّت سطحی بالا در قالب های

مقدمه

نیتروژندهی پلاسمایی یکی از فرایندهای اصلاح ساختاری سطوح فلزات می باشد کے موجب بھبود مقاومت به سایش، خوردگی و خستگی قطعات صنعتی میشود و در نتیجه، باعث افزایش عمر و کـارایی بهتـر آنها میشود [1]. بهعبارت دیگر، این روش یکی از فرایندهای مهم مهندسی سطح میاشد که بهکمک تخلیهی تابان در دما و ترکیب مناسب از گاز نیتروژن و هیدروژن، نیتروژن جذب سطح شده و در عمق مورد نظر نفوذ میکند. بهاین ترتیب، سختی سطح و مقاومت به سایش انواع مختلف مواد مهندسی به ویژه فولادهای ابزار بهبود مىيابد [2]. عمليّات نيتروژندهمى فولادهما بهطور سنتی هنوز هم با یکی از روش های گازی یا مايع انجام مى گيرد، امّا استفاده از پلاسما در اين عمليّات با كنترل بهتر فازهاي سطحي تشكيل شونده و کیفیّت بهتر سطوح قطعات، سبب کاهش مصرف گاز، کاهش انرژی مصرفی و نیز، کاهش آسیبهای زیست محیطی میشود. روش سنتی نیتروژندهی بهدلیل این که تشكيل لايهي نيتريدي تنها با فرايند نفوذ همراه است، انجام عملیّات نیاز به دمای بالا و زمان زیادی دارد، امّا در روش نیتروژندهی پلاسمایی، با توجـه بـه حضـور يونها و ذرات فعّال نيتروژن، امكان انجام عمليّات در دماهای پایینتر و زمانهای کمتر نیز وجود دارد [3]. در این فرایند، نیتروژن به داخل فولاد نفوذ میکند و سپس، با آهن و عناصر آلیاژی ترکیب شده و توزیع مناسبی از نیتریدهای فلزی را تشکیل میدهد. در نتیجه، یک لایهی نازک از نیتریدهای آهن که شامل فازهای نیتریدی Y':Fe4N و E:Fe2-3N است، در سطح فولاد تشکیل می شود. این لایه به لایهی سفید و یا لايهي تركيبي معروف است [4,5]. خواص قطعات فولادی نیتروژندهمی شده با استحکام هسته، خصوصیّات ساختاری لایههای ترکیبی و نفوذی تعیین مى شود [6,7]. در حال حاضر، نيتروژندهى پلاسمايي

حدیدهکاری و ریختـهگـری تحـت فشـار کـه معمـولاً هندسهی پیچیدهای هم دارند، کنترل عملیّات نیتروژندهی پلاسمایی با تغییر عوامل مـؤثر مـیتوانـد باعث كنترل تأثير پديدهي كاتد توخالي در قطعاتي بـا هندسهی پیچیده و افزایش صرفهجویی اقتصادی شـود. اینکار تاکنون بررسی نشده است است. هدف اصلی از انجام این پژوهش، مطالعه و بررسی و مقایسهی تـأثیر عوامل فرکانس و چرخهی کاری در روش نیتروژندهی پلاسمایی پالسی بهروش معمولی و توری فعّال در قطعاتی با هندسهی پیچیده از جنس فولاد گرمکار H13 (فولاد مورد استفاده در قالب های حدیده کاری) مىياشد. افرون بر اين، يافتن شرايط بهينهى نیتروژندهی برای جلوگیری از وقوع پدیدهی کاتد توخالی در روش پلاسمایی متداول و اصلاح آن با استفاده از روش نیتروژندهی پلاسمایی با توری فعّال، از دیگر هدفهای انجام این تحقیق است.

مواد و روش تحقیق

ابت ۱ نمون ه ای مکعبی به ابعاد ۳۰×۲۰۰ میلی متر از جنس فولاد گرم کار ۲۱۳ H۱۳ و AISI A و ۱/۳۳٤ و ۱/۳۳۶ و DIN میلی متر از جنس فولاد گرم کار ۳۱۳ ایل در نمونه های ماشین کاری تهیه شدند. سپس، شیارهایی در نمونه های ماشین کاری تهیه شدند. سپس، شیارهایی در نمونه های کمعب مستطیل شکل آماده شده از جنس فولاد ساده ی کربنی به ارتفاع ثابت ۲۰ میلی متر و پهنای ثابت ۲۰ میلی متر و به مسایل شکل آماده شده از جنس فولاد ساده ی کربنی به ارتفاع ثابت ۲۰ میلی متر و پهنای ثابت ۲۰ میلی متر و به محق های ۲، ۵۰ میلی متر و پهنای ثابت ۲۰ میلی می پهنای ثابت ۲۰ میلی می زبان به میلی متر و به میلی تر زنسی په میناز با شکل هندسی پیچیده و حفره های ات نیتروژن ده می پلاسمایی درون نمونه ها محلی برای تعبیه ی ترمو کو پل پلاسمایی، درون نمونه ها محلی برای تعبیه ی ترمو کو پل

در نظر گرفته شد. این محل در شکل (۱) با یک پیکان نشان داده شده است. شکل (۱) شمایی از نمونهی تهیه شده را نشان میدهد. سطح مورد بررسی در این پژوهش، سطح بخش مشخص شده در قسمت (ب) از شکل (۱) و از جـنس فـولاد گـرمکـار AISI H۱۳ می باشد. پس از آماده شدن نمونهها، آن ها در دمای ۱۰۵۰°C بەمدّت زمان یک ساعت آستنیته شدند و پس از آن، بلافاصله در روغین سریع سرد شدند. برای جلوگیری از وقوع هرگونه تغییر در ریزساختار فولاد هنگام نیتروژندهی پلاسمایی، دمای بازپخت بالاتر از دمای نیتروژندهی در نظر گرفته شد و نمونهها برای این منظور، در دمای C°۰۳۰ بهمدّت زمان یک ساعت بازپخت شدند. سختی نمونهها برابر با ٥٤ تا ٥٧ راكول سی بهدست آمد. پس از آن، تمامی سطوح نمونهها به منظور ایجاد سطوح صاف برای عملیّات نیتروژندهـی، سنباده زده شدند و سپس، صیقلکاری انجام شد. برای انجام عمليّات نيتروژندهي پلاسمايي بەروش معمـولي و توری فعّال، از دستگاه نیتروژندهی پلاسمایی متداول مرحلهای استفاده شد (شکل (۲)). نیتروژندهی به نمونه ها در محیطی حاوی ۲۵ درصد N2 و ۷۵ درصد H2 در دمای C° ۰۰۰ با فرکانس های ۸ و ۱۰ کیلوهر تز در چرخههای کاری (نسبت پالس on به off+on). ٦٠ و ٨٠ درصد بهمدت زمان ٥ انجام شد. براى عمليّات نيتروژندهي پلاسمايي بەروش تـورى فعّـال، ورق مشبّکی از جنس فولاد ساده یکربنی بهضخامت ۸/۰ میلیمتر که حاوی سوراخهایی استوانهای شکل به قطر ۸ میلیمتر با توزیع یکنواخت بود، تهیه شد. درپوش مـورد اسـتفاده نيـز از همـان ورق تهيـه شـد. نمونهها بر روی میز کار که یک عـایق سـرامیکی آن را از پتانسیل منفی (کاتد) جدا می کرد، قرار داده شدند (شکل (۳)). سپس، توری ساخته شده پس از چربی زدایی، اسیدشویی در محلول فروکیلین و خشک شدن، بر روی سکّوی موجود در محفظه ی دستگاه قرار

شد. پراش بهدست آمده با استفاده از پرتوی Cu kα با ولتاژ ٤٠ کیلو ولت، جریان ۳۰ میلی آمپر و با زاویهی (۲۵) بین ۳۰ (شروع) تا ۹۰ درجه (پایان) ایجاد شد. پس از عملیّات نیتروژندهی، نمونه ها از لبهی شیار تا تو آن به فاصلهی ۱ سانتی متر جدا شدند و مناطق به ترتیب از بالا با شماره های ۱، ۲، ۳ و ٤ نام گذاری شدند. در این گزارش، نتایج مربوط به منطقهی ۱ نزدیک به لبهی شیار برای

روبشی گزارش شده

اند. در مرحلهی بعد، نمونهها از مقطع عرضی بـرش داده شدند و سطوح برش خورده، از بالا با حرفهـای A و B نامگذاری شدند (شکل (٤)). گرفت. در روش نیتروژندهی پلاسمایی بهروش توری فعّال، با اتصال توری به قطب منفی (کاتد) پلاسما بر روی سطح توری تشکیل میشود. افزون بر این، تولید اجزای فعّال نیتریدی و نیز گرم کردن نمونهها، بر عهده ی توری فعّال بود. در نهایت، برای بررسی ریزساختار سطوح و مقاطع برش خوردهی شیارهای نمونههای نیتروژندهی شده از تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی، برای اندازهگیری ضخامت لایهی ترکیبی از نمونهها از روش سختی سنجی ویکرز با نیروی اعمالی نمونهها از روش سختی سنجی ویکرز با نیروی اعمالی در سطح شیار، از دستگاه پراش پرتوی ایکس استفاده



شکل ۱ شمایی از مجموعهی نمونهی نیتروژندهی پلاسمایی شده (الف)، متشکل از سطح مورد آزمایش از جنس فولاد گرمکار AISI H۱۳ (ب) و سطح شیاردار که با پیچ و مهره بههم وصل شدهاند (پ). پیکان برزگ، محل استقرار ترموکوپل را نشان میدهد.



شکل ٤ نمایی از برش نمونهها از مقطع عرضی قطعات عملیات شده

۲۰ و ۸۰ درصد و فرکانس های ۸ و ۱۰ کیلوهر تز با عمق های ۲، ٤، ۲، ۸ و ۱۰ میلی متر با دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی، در جدول (۲)، و **نتایج و بحث** ضخامتهای لایهی ترکیبی در نمونههای نیتروژندهـی شده در دمای ثابت ℃ ۵۰۰ در چرخههای کـاری ٤٠، روش نیتروژندهی پلاسمایی بهروش توری فعّال در سطح A و B برابر با صفر میاشد. میتوان نتیجه گرفت که در هـر دو روش، ضـخامت لايـهي ترکيبـي سطوح A بیشتر از سطوح B میباشد. همچنین، در شیارهای نازکتر اختلاف ضخامت لایهی ترکیبی سطوح A و B بیش تر می شود. ضخامت لایه ی ترکیبی سطوح B در شیارهایی با ضخامت کوچکتر، کاهش بیشتری می یابد. افزون بر این، مشاهده می شود که ضـخامت لايـهي تركيبـي در روش نيتـروژندهـي پلاسمایی معمولی بیشتر از ضخامت لایهی ترکیبی در روش نیتروژندهی با توری فعّال میباشد، و این بهدلیل آن است که در روش معمولی، نمونه ها به طور مستقیم در معرض ذرات نیتریدی و اتمهای نیتروژن هستند، ولی در روش نیتروژندهی با توری فعّال، توری نقـش کاتد را دارد و در معـرض مسـتقیم بمبـاران مـیباشـد. همچنین، مشاهده می شود که در هر دو روش، افزایش چرخهی کاری که منجر به افزایش بمباران سطحی می شود، ضخامت لایهی ترکیبی را افـزایش داده اسـت. در هر دو روش، افزایش فرکانس از ۸ به ۱۰ کیلوهرتز، تأثیر زیادی بر روی ضخامت لایـهی ترکیبـی نـدارد و فقط بهمقدار ناچیزی باعث افزایش ضخامت لایهی تركيبي مي شود [7,13]. با توجه به نتايج بهدست أمـده از اندازه گیری ضخامت لایهی ترکیبی، می توان مشاهده کرد که یک پدیدهی قابل توجه در روش نیتروژندهـی پلاسمایی معمولی در نمونهها بهازای چرخه ی کاری ۸۰ درصد و عمق شیار ۲ میلیمتر انفاق افتاده است که در نهایت، باعث شده است تا ضخامت لایهی ترکیبی در چرخهی کاری ۸۰ درصد کمتر از چرخه ی کاری ٤٠ و ٦٠ درصد شود. سختي سطوح شيار نيـز كـاهش یافته است. دلیل آن را می توان به گرمایش بیشتر در نتیجهی وقوع پدیـدهی کاتـد توخـالی نسبت داد کـه بهدلیل کوچک بودن عمق شیار، پلاسما در دو طرف شيار همپوشاني كرده و باعث گير افتادن الكتـرونهـا و يونش بيشتر مي شود [11,14].

روش نیتروژندهی پلاسمایی با توری فعّال، در جـدول (۳) آورده شدهاند. این نتایج با استفاده از میکروسکُپ نوری بهدست آمدهاند و هر یک از آن ها میانگین سه عدد می باشد. مشاهده می شود که ضخامت لایه ی تركيبي با افزايش عمق شيار زياد مي شود، و اين بهدليل افزایش بیشتر حضور نیتروژن درون شیار و افزایش بمباران یونی در سطح نمونه است. در هر دو روش نیتروژندهی پلاسمایی معمولی و توری فعّال، ضخامت لايەي تركيبي بەوسىلەي غلظت نيتروژن كنترل مىشود. ضخامت لایهی ترکیبی با افزایش نیتروژن در مخلـوط گازی افزایش می یابد، و این ناشمی از افزایش نفوذ اتمهای نیتروژن در زیر لایه می باشد. افزون بر این، ضخامت لایهی نیتریدی تشکیل شده افزون بر این، ضخامت لایه ی نیتریدی تشکیل شده به چگالی اتم های فعال از قبیل یون های نیتروژن و یون های رادیکال آزاد بستگی دارد. [11,12]. بهمنظور بررسی خواص سطوح نمونه های پلاسما- نیتراید شده، ضخامت لایهی ترکیبی سطوح A و B (مناطق مختلف در سطوح آزمایش شده) در شکل (٤) اندازه گیری شـدهانـد. در هـر دو روش نيتـروژندهـی پلاسـمايی، ضخامت لایهی ترکیبی تشکیل شده در منطقهی دور از لبهی B (درون شیار) نازکتر از منطقهی نزدیک به لبه (لبهی شیار) در سطح A میباشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲)، ضخامت لایهی ترکیبی در چرخهی کـاری ۸۰ درصـد، فرکـانس ۱۰ کیلـوهرتز و عمق شیار ۱۰ میلیمتر (بزرگترین شیار) در روش نیتروژندهی پلاسمایی معمولی در سطح A برابر با ۱۰/٦ میکرومتر و در سطح B برابر با ۸/٤ میکرومتـر، و در روش نیتروژندهی پلاسمایی بهروش توری فعّال در سطح A برابر با ۹/۵ میکرومتر و در سطح B برابـر بـا ٧/٤ میکرومتر می باشد. افزون بر این، ضخامت لایه ی ترکیبی در چرخه ی کاری ۸۰ درصد، فرکانس ۱۰ کیلوهرتز و عمق شیار ۲ میلیمتر (کوچکترین شیار) در روش نیتروژندهی پلاسمایی معمولی در سطح A برابر با ۳/۸ میکرومتر و در سطح B برابر با صفر، و در

چرخەى كارى			7.,	٨٠			;	/.٦٠		<u>'/٤</u> ٠			
فركانس (كيلو هرتز)		۱.		٨		١.		٨		۱.		٨	
سطح		Α	В	Α	В	Α	В	А	В	Α	В	Α	В
	۲	۳۸	•	۳.۷	٠	٤.٤	•	٤.٢	•	٤.١	•	۳.۹	•
	٤	٥.١	٤.٤	٤.٧	٤.٤	٤.٧	۳. ٤	٤.٥	٤.٢	٤.٤	۳۸	٤.٣	۳.٦
پهنای شیار	٦	٦٨	٦.٣	٦.٧	٦.١	••••	••••	•••••	••••	0.0	٤.٧	٤.٥	٤.٣
(میلیمتر)	٨	٩٨	٧.٨	٩.٥	۷.٤	••••	••••	••••		۸.۱	۷.۳	٧.٨	۷.٤
	۱.	۱۰.٦	٨.٤	۱۰.۱	۸.۲	••••	••••	••••		٨.٧	٨.١	٨.٤	۷.٦

جدول ۲ ضخامتهای لایهی ترکیبی در نمونههای نیتروژندهی شده بهروش معمولی

	c	رى فغّال	روش تو	ی شدہ به	بتروژنده	مونەھاي نې	یبی در نہ	لايەي ترك	امتهای	ل ۳ ضخ	جدو		
خەي كارى	·/A•				·/.٦.• ·/.٤.•								
فركانس (كيلو هرتز)		1.		٨		١.		٨		١.		٨	
سطح		А	В	А	В	А	В	А	В	Α	В	А	В
پهنای شیار (میلیمتر)	۲	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	٤	۲.٩	١.٩	۲.۷	١٨	۲.٤	١.٦	۲.۱	۱.٥	۲.۱	١.٢	٨.١	۱.۱
	٦	0.7	٤.٧	٨. ٤	٤.٢					۳.٩	۳.۱	۳.٦	۲.٩
	٨	٧.٦	٦٨	٧.٤	٦.٥					٦.١	٤.٥	٥.٩	٨. ٤
	۱.	٩.٥	٧.٤	٩.٢	٧.١					٧.٤	٦.٩	٧.١	٦.٨

فاصلهای از سطح بهمقدار ثابتی میرسد که این نشاندهنده یتوقف تشکیل نیتریدهای آهن و دیگر عناصر آلیاژی که عوامل افزایش مسختی هستند، میباشد. بهعبارت دیگر، از این فاصله به بعد نیتروژن نتوانسته است نفوذ کند و بنابراین، نقطه یثابت شدن سختی در نمودارهای تغییرات ریزسختی نشاندهنده ی مرز بین لایه ینفوذی و بدنه ینمونه میباشد [18,1] افزون بر این، مشاهده میشود که با افزایش عمق شیار از ۲ به ۱۰ میلی متر، سختی سطح شیار و سختی از است. از آنجا که غلظت نیتروژن درون شیار با عمق ۱۰ ماست. از آنجا که غلظت نیتروژن درون شیار با عمق مده میلی متر بیش تر است، درصد نیتریدهای تشکیل شده در آن بالاتر است. این موجب افزایش سختی سطح در

در شکلهای (۵) و (۲)، ریزسختی نمونههای نیتروژندهی پلاسمایی شده بهروش معمولی و توری فعّال با ضخامتهای متفاوت شیار در فرکانس ۸ کیلوهرتز، دمای ۲[°] ۰۰۰ و در چرخههای کاری ۶۰ و ۰۸ درصد نمایش داده شده است. در تغییرات ریزسختی مربوط به مقطع عرضی نمونهها، یک شیب میان پوسته و هسته مشاهده میشود. در این نمونهها، میان یوسته و هسته مشاهده میشود. در این نمونهها، است. نفوذ نیتروژن از سطح کاهش پیدا کرده است. نفوذ نیتروژن از سطح فولاد شروع می شود و تشکیل و موجب افزایش سختی میشوند. در نتیجه، با فاصله گرفتن از سطح نیتریدهای کم تری تشکیل میشوند و سختی کاهش می یابد. در نهایت، سختی در

عمق ۱۰ میلیمتری می شود. با توجه به نتایج بهدست آمده، سختی سطح در نمونهی نیتروژندهی شده به روش معمولی با عمق شیار ۲ میلیمتر تحت چرخهی کاری ۸۰ درصد کـمتـرین سـختی را دارد. دلیـل آن را می توان به وقوع پدیدهی کاتد توخالی نسبت داد. همان طور که گفته شد، سطح ایـن نمونـه بیشـتر گـرم شـده است و این باعث رشد ناگهانی ذرات نیتریدی میشود. در نتیجه، سختی سطوح کاهش می یابد. این در حالی است که در روش نیتروژندهمی پلاسمایی با توری فعّال، اثری از پدیدهی کاتد توخالی مشاهده نمی شود [15]. افزون بر این، مشاهده میشود که در هر دو روش نیتروژندهی معمولی و توری فعّال، ریزسختی با افزایش چرخه یکاری از ٤٠ به ۸۰ درصد از سطح بهسمت بدنه در تمام شیارها به جز عمق شیار ۲ میلیمتری، افزایش یافته است، زیرا با افزایش چرخهی کاری انرژی یون،ها و فعالیّت آن،ها بیش تمر می شود و ضريب نفوذ نيتروژن افزايش پيدا مي كند. با افزايش ضریب نفوذ، نیتروژن تا عمق بیش تری از سطح نفوذ میکند و این باعث میشود تـا نیتریـد آهـن و عناصـر آلیاژی بیش تری تشکیل شود که موجب افزایش سختی میشوند [7]. همچنین مشاهده میشود که ریزسختی نمونههای نیتروژندهی شده بهروش معمولی بیشتر از ریزسختی نمونههایی است که بهروش توری فعّال نيتروژندهي شدهاند [16]. در شکل (۷- الف) و (۷-ب)، تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی نمونههای نیتروژندهی شده بهروش معمولی و توری فعّال با عمق شیار ٤ میلیمتر در دمای C° ۵۰۰ و تحت چرخههای کاری ۸۰ درصد و فرکانس ۸ کیلوهرتز آورده شده است. تصویرهای گرفته شده مربوط به سطوح منطقهی A در شکل (٤) می باشند. ب توجه به نتایج در جدول های (۲) و (۳) و شکل (۷)، می توان دریافت که با وجود کندوپاش سطوح در روش نيتروژندهمي پلاسمايي بهروش معمولي، ضخامت

٣٢

لایهی نیتریدی تولید شده ضخیم تر از لایههای نیتریدی در روش نیتروژندهی با توری فعّال است. در این تصویرها، ضخامت لایهی ترکیبی در نمونهها با خطوطی نمایش داده شده است [16].

در شکل (۸)، تصویرهای میکروسکی الکترونے روبشے با بزرگنمای ۲۰۰۰ برابر از نمونههای نیتروژندهی شده بهروش متداول با چرخهی کاری ۸۰ درصد، فرکانس ۸ کیلوهرتز و در دمای ثابت ۰۰°C بەازاى عمق،ھاى شيار ۲ مىلىمتر (كوچك ترين ضخامت شیار) و ۱۰ میلیمتر (بزرگ ترین عمق شیار)، نمایش داده شدهاند. افزون بر این، در شکل (۹) تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی با بزرگنمای **۵۰۰۰** برابر از نمونههای نیتروژندهمی شده بهروش توری فعّال در چرخهی کاری ۸۰ درصد، فرکانس ۸ کیلوهرتز، دمای ثابت C° ۵۰۰ و در عمقهای شیار ۲ و ۱۰ میلیمتر نشان داده شدهاند. همانگونه که در تصویرهای شکل های (۸) و (۹) مشاهده می شود، سطح نمونههای نیتروژندهمی شده بهروش متداول بهوسیلهی ذرات گل کَلمی و سطح نمونههای نیتروژندهی شده بهروش توری فعّال با ذرات نیتریدی شش وجهی پوشیده شده است. افزون بر ایـن، ذرات گل کَلمی تشکیل شده در روش نیتروژندهمی متداول ناشی از کندوپاش و رسوب دوبارهی اتم های سطح توسط اتمها يا يـونهـاي نيتروژن حين ايـن فراينـد میباشد. در هر دو روش نیتروژندهی، مشاهده میشود که با افزایش ضخامت شیار، ذرات نیتریدی درشتتر، سطح فلز ناهموارتر و زبرتـر مـیشـود. هـمچنـین، بـا کاهش ضخامت شیار، سطح هموارتر شده و ذرات نیتریدی کوچکتر میشوند. مشاهده میشود که سطوح نیتروژندهمی شده بهروش توری فعّال هموارتر و یکنواخت تر از سطوح نیتروژندهمی شده بهروش متداول مى باشد [17,18]. افزون بر اين، وقوع پديدهى کاتد توخالی در روش نیتروژندهمی متداول بهازای

عمق شیار ۲ میلیمتر و چرخهی کاری ۸۰ درصد باعث شده است تـا انـدازهی ذرات گـل کَلمـی در شـیار ۲ میلیمتر بزرگتر و درشتتـر از شـیار ۱۰ میلـیمتـری شود. با توجه به تصویرهای میکروسکُپ الکترونی

روبشی از نمونههای نیتروژندهی شده بهروش توری فعّال، مشاهده می شود که پدیدهی کاتد توخالی در شیار ۲ میلیمتر بهازای چرخهی کاری ۸۰ درصد رخ نداده است [16].







شکل٦ تغییرات ریزسختی نمونههای نیتروژندهی شده بهروش توری فعّال در دمای ℃ ۵۰۰، فرکانس ۸ کیلوهرتز و چرخهی کاری ۸۰ درصد (الف) و ٤٠ درصد (ب).



شکل۷ تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی نمونههای نیتروژندهی شده با عمق شیار ۱۰ میلیمتر در دمای C° ۵۰۰ چرخهی کاری ۸۰ درصد و فرکانس ۸ کیلوهرتز بهروش معمولی (الف) و توری فعّال (ب).



شکل۸ تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از نمونههای نیتروژندهی شده بهروش متداول در دمای ℃ ۵۰۰ ، چرخهی کاری ۸۰ درصد و در عمقهای ۲ میلیمتری (الف) و ۱۰ میلیمتری (ب)



۸۰ شکل ۹ تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از نمونههای نیتروژندهی شده بهروش توری فعّال در دمای ℃ ۵۰۰ ، چرخهی کاری درصد و در عمقهای ۲ میلیمتری (الف) و ۱۰ میلیمتری (ب)



شکل ۱۰ نتایج پراش پرتوی ایکس مربوط به نمونههای نیتروژندهی شده در چرخهی کاری ۸۰ درصد و فرکانس ۸ کیلوهرتز بهروش نیتروژندهی پلاسمایی متداول برای ضخامتهای ۲ میلیمتر (الف) و ۱۰ میلیمتر (ب)



شکل ۱۱ نتایج پراش پرتوی ایکس مربوط به نمونههای نیتروژندهی شده در چرخهی کاری ۸۰ درصد و فرکانس ۸ کیلوهرتز بهروش نیتروژندهی پلاسمایی با توری فعّال برای ضخامتهای ۲ میلیمتر (الف) و ۱۰ میلیمتر (ب).

شکلهای (۱۰) و (۱۱)، نتایج پراش پرتوی ایکس مربوط به نمونههای نیتروژندهی شده بهروش معمولی و توری فعّال را در دمای C° ۵۰۰ فرکانس ۸ کیلوهرتز و چرخهی کاری ۸۰ درصد و برای عمق های شیار ۲ و ۱۰ میلیمتر نشان میدهند. در سطح همه ی نمونهها فازهای γ':Fe4N و ε:Fe2-3N تشکیل شدهاند [19,20]. با افزایش عمق شیار در روش نیتروژندهی يلاسمايي متداول، مقدار فاز ع (فاز غنبي از نيتروژن) افزایش پیدا کرده است که می تواند بهدلیل افزایش حضور نیتروژن درون شیار و کندوپاش بیشتر سطح با افزایش ضخامت باشد [15]. بهطور مشابه، در نمونههای نیتروژندهی شده بهروش توری فعّال، مقدار فاز نيتريد آهن با بزرگتر شدن عمق شيار افزايش يافته است. با اینحال، نیتریدهای آهن تشکیل شده در سطح نمونهی با عمق شیار ۲ میلی متر بسیار ناچیز است و بهوسیلهی پراش پرتوی ایکس تشخیص داده نشده است. در این حالت، تنها پیک α-Fe بهوضوح مشاهده می شود. افزون بر این، با مقایسهی نتایج پراش پرتـوی ایکس مربوط به نمونههای نیتروژندهی شده بهروش متداول و توری فعّال، مشاهده می شود که شدّت مربوط

به فاز ٤ در روش توری فعّال نسبت به روش متداول کاهش یافته است و برعکس، شـتت فاز γ افزایش یافته است. دلیل این رفتار به حضور بیشتر نیتروژن و نیتریدها درون شیارها در روش نیتروژندهی پلاسمایی متداول نسبت داده می شود [7]. در نهایت ، می توان نتیجه گرفته که نیتروژندهی پلاسمایی بهروش توری فعّال بهدلیل جلوگیری از وقوع پدیده کاتد توخالی، ایجاد لایه یکنواخت در سطح، تشکیل فازهای نیتریدی به طور یکنواخت و منظم در سطح و امکان نیتروژندهی قطعات با شیارهای نازک و عمیق، نسبت به روش متداول برتری دارد.

نتيجه گيرى

۱- ضخامت لایهی ترکیبی در روش نیتروژندهی
پلاسمایی متداول بیشتر از ضخامت لایهی ترکیبی
در روش نیتروژندهی با توری فعّال است.
۲- در هر دو روش نیتروژندهی، افزایش چرخهی
کاری منجر به افزایش بمباران سطحی شد و
ضخامت لایهی ترکیبی را افزایش داد. در هر دو
روش، افزایش فرکانس از ۸ به ۱۰ کیلوهرتز تأثیر

زیادی بر ضخامت لایـهی ترکیبی نداشـت و تنهـا بهمقدار ناچیزی باعث افزایش ضخامت لایهی تركيبي شد.

۳– در روش نیتروژندهی پلاسمایی متـداول، پدیـدهی درصد و عمق شیار ۲ میلیمتر اتفاق افتیاد و باعیث شد تا ضخامت لایهی ترکیبی در چرخه ی کاری ۸۰ درصد کمتر از چرخه های کاری ٤٠ و ٦٠ درصد شود. سختی سطوح شیار نیز کاهش یافت. ٤- در هر دو روش نیتـروژندهـی پلاسـمایی، سـختی سطح شيارها با افرايش عمق شيار و افرايش چرخهی کاری بیشتر شد. سختی سطح نمونههای نیتروژندهی شده در روش نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی بیشتر از سختی سطح در روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال بهدست آمد. ٥- نقطههایی از سطح شیار که به لبه نزدیکتر بودند

سختى بالاترى داشتند.

٦- سطح نمونه های نیتروژن دهی شده بهروش متداول بهوسیلهی ذرات گل کَلمی و سطح نمونههای نیتروژندهی شده بـهروش تـوری فعّـال بـا ذرات کاتد توخالی در نمونههای با چرخهی کاری ۸۰ نیتریدی شش وجهی با توزیع یکنواخت پوشیده شده بود.

 ν- در سطح کلیهی نمونهها، فازهای Fe4N: γ و-Fe2: ٤3N تشكيل شدند. با افزايش ضخامت شيار، شدّت فازهای ٤ به ۲ افزایش یافت. در سطح نمونهی نیتروژندهی شده با توری فعّال با عمق شبار ۲ میلی متر، تنها فاز α مشاهده شد. با افزایش ضخامت و کاهش چرخهی کاری، نسبت فازهای ع به ۲ افزایش یافت، امّا افزایش فرکانس تأثیر قابل توجهی بر مقدار فازهای تشکیل شده نداشت.

مراجع

- 1. Olzon-Dionysio, M., Campos, M., Kapp, M. and Souza, S.DE., "Influences of plasma nitriding edge effect on properties of 316 L stainless steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 204, pp. 3623-3628, (2010).
- 2. Berg, M., Budtz, C.V., Reitz, H., Schweitz, K.O. and Chevallier, J., "on Plasma nitriding of steels", Surface and Coating Technology, Vol. 124, pp. 25-31, (2000).
- 3. Ozbaysal, K. and Inal, O.T., "Structure and properties of ion nitrided stainless steel", Material Science and Engineering, Vol. 21, pp. 4318, (1986).
- 4. Ochoa, E.A., Wisnivesky, D., Minea, T., Ganciu, M., Tauziede, C., Chapon, P. and Alvarez, F. "Microstructure and properties of the compound layer obtained by pulsed plasma nitriding in steel gear", Surface and Coatings Technology, Vol. 1203, pp. 157-1461, (2009).
- 5. Sirin, S.Y., Sirin, K. and Kaluc, E., "Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel", Material Characterization, Vol. 59, pp. 351-358, (2008).
- 6. Ashrafizade, F., "Influence of plasma and gaz nitriding on fatigue resistance of plain carbon steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 173-174, pp. 1196-1200, (2003).
- 7. Jeong, B.Y. and Kim, M.H., "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).

- Li, CZ. and Bell, T., "Principals mechanisms and applications of active screen plasma nitriding", Heat Treatment of Metal, Vol. 30, pp. 1-7, (2003).
- 9. Shen, L., Wang, L. and Xu, J., "Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel assisted with hollow cathode effect", Surface and Coatings Technology, (2012).
- Gorges, J., "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).
- De Sousa, R.R.M., De Araújo, F.O., Da osta, J.A.P., Dumelow, T., De Oliveira, R.S. and Alves Jr, .,"Nitriding in cathodic cage of stainless steel AISI 316 influence of sample position", Vacuum, Vol. 83, pp. 1402-1405, (2009).
- Wierzchon, T., Rudnicki, J., Hering, M. and Niedbala, R., "Formation and properties of nitrided layers produced in pulsed plasma at a frequency between 10 and 60 kHz", Vaccum, Vol. 48, pp. 499-502, (1997).
- Jeong, G.H., Hwang, M.S., Jeong, Y., Hokim, M. and Lee, C., "Effect of the duty factor on the surface characteristics of the plasma nitride and diamond-like carbon coated high-speed steel", Surface and oatings Technology, Vol. 124, pp. 222-227, (2000).
- Alves Jr, C., Rodrigues, J.A. and Martinelli, A.E., "The effect of pulse width on the microstructure of d.c-plasma-nitrided layers", Surface and oatings Technology, Vol. 122, pp. 112-117, (1999).
- 15. Ahangarani, SH., Mahboubi, F. and Sabour, AR., "Effect of various nitriding parameters on active screen plasma nitriding behavior of a low-alloy steel", Vacuum, Vol. 1032, pp. 1-7, (2006).
- 16. Soltani Asadi, Z. and Mahboubi, F., "Effect of component geometry on the plasma nitriding behavior of AISI 4340", Materials and Design, Vol. 43, pp. 1-6, (2011).
- 17. Zaho, C., Li, C.X., Dong, H. and Bell, T., "Study on the active screen plasma nitriding and it is nitriding mechanism", Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 15-20, (2006).
- Ahangarani, SH., Sabour, AR. and mahboubi, F., "Surface modification of 30Cr Ni Mo8 low-alloy steel by active screen step and conventional plasma nitriding metods", Surface and Coatings Technology, Vol. 254, pp. 27-35, (2007).
- Nishimoto, A., Nagatsuka, K., Narita, R., Nii, H. and Akamatsu, K., "Effect of the distance between screen and sample on active screen plasma nitriding properties", Surface and Coatings Technology, Vol. 205, pp. 365-368, (2010).

20. Mahboubi, F., Samandi, M., Dunne, D., Bloyce A. and Bell, T., "Plasma nitriding of microalloyed steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 71, pp. 135-141, (1995).