## تأثیر عملیات حرارتی اولیه بر روی مقاومت سایشی فولاد AISI M2 پس از نیتروژن دهی پلاسمایی

**رقیه محمدزاده و علیرضا اکبری** *دانشکاده مهنادسی مواد– دانشگاه صنعتی سهند– تبریز* ( دریافت مقاله : ۸۸/۸/۴ – پذیرش مقاله : ۸۹/۱/۲۲ )

#### چکیدہ

قابلیت نیتروژن دهی و مقاومت سایشی فولاد AISI M2 پس از نیتروژن دهی پلاسمایی با منیع فرکانس رادیویی در دمای C° ۴۵۰ ترکیب گاز H2٪ + No N2٪ به مدت زمان ۸ ساعت در دو حالت آنیل کامل و کوئنچ-تمپر مطالعه شد. از روی الگوهای تفرق اشعه X ترکیب لایه سفید در هر دو مورد فاز تعیین گردید. ضخامت لایه نیتریدی از بررسی های تغییرات ریزسختی سنجی ویکرز در مقطع عرضی نمونه ها تعیین شد. آزمایش های سایش با روش پین روی دیسک در دمای C° ۴۵۰ ترکیب گان یا دو ش پین گردید. ضخامت لایه نیتریدی از بررسی های تغییرات ریزسختی سنجی ویکرز در مقطع عرضی نمونه ها تعیین شد. آزمایش های سایش با روش پین روی دیسک در دمای محیط، سرعت لایه نیتریدی از بررسی های تغییرات ریزسختی سنجی ویکرز در مقطع عرضی نمونه ها تعیین شد. آزمایش های سایش با روش پین روی دیسک در دمای محیط، سرعت لغزش M5 مال و که بار اعمالی ۸ نیوتن و مسافت سایش ۱۰۰۰ متر انجام گرفت. نتایج نشان داد که لایه نیتریدی در فولاد آنیل شده در مقایسه با فولاد کوئنچ- تمپر شده سختی سطحی کمتر و ضخامت بیشتری داشته و همچنین حجم ساییده شده کمتری دارد. نتایج بر اساس پروفیل سختی و مقادیر تخمینی تشده ترد بی تنههای پسماند تجزیه و تحلیل شد.

واژه های کلیدی: نیتروژن دهی پلاسمایی، عملیات حرارتی، فولاد ابزار M2، لایه نیتریدی، مقاومت سایشی.

# Influence of prior heat treatment on wear resistance of plasma nitrided AISI M2 tool steel

### R. Mohammadzadeh and A. Akbari

Department of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

#### Abstract

Plasma nitriding behavior and wear resistance of full annealed and quenched-tempered AISI M2 steel samples have been investigated after radio frequency plasma nitriding at 450 °C during 8 hr at 75%  $N_2 + 25$  %H<sub>2</sub> gas mixture. XRD analysis revealed formation of  $\varepsilon$  phase on the top surface of the both nitrided samples. Nitrided case depth was determined from cross-sectional microhardness profiles. Sliding wear tests were performed in a ball-on-disk tribometer at 25°C using a 5 mm diameter Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ball under applied load of 8 N, sliding speed of 0.05 ms<sup>-1</sup>, and sliding distance of 1000 m. It was observed that on full annealed samples nitride case has lower surface hardness and thicker case depth. Also after plasma nitriding full annealed samples exhibit higher wear resistance and lower weared material volume than quenched-tempered ones. The results were discussed based on the microhardness and estimated residual stress profiles.

Keywords: Plasma Nitriding, Initial Heat Treatment, M2 tool steel, Nitrided Layer, Wear Resistance.

E-mail of corresponding author: r\_mohammadzadeh@sut.ac.ir

مقدمه

17

نیتروژندهی یکی از مهمترین فرآیندهای ترموشیمیایی سطحی است که به منظور افزایش سختی سطح و مقاومت سایشی ابزار برش و کاهش چسبندگی مواد قطعه کار به ابزار، بر روی فولادهای تندبر انجام می شود [۱، ۲]. لایه نیتریدی حاصل از نیتروژن دهی فولادها از دو بخش تشکیل یافته است: اولین لایه از سطح به سمت مغز قطعه، لایه ترکیبی یا لایه سفید است که بیشتر از نیتریدهای آهن تشکیل یافته و فقط چند میکرومتر ضخامت دارد. دومین لايه كه زيرلايه سفيد قرار دارد به ناحيه نفوذي مشهور بوده و ضخامت بالاترى نسبت به لايه سفيد دارد. ريزساختار ناحیه نفوذی شبیه ریزساختار اصلی قطعه بوده اما در اثر رسوب نیتریدهای عناصر آلیاژی و آهن تقویت شده است [۳]. در اثر نیتروژن دهی خواص شیمیایی و فیزیکی سطح اصلاح شده و از چسبندگی شدید فلزی بین سطوح در تماس با هم جلوگیری به عمل می آید. همچنین سختی و استحکام سطح افزایش یافته و مقاومت سایشی به علت کاهش سایش ساینده و سایش ورقهای بهبود می یابد [۴–8]. مقاومت سایشی فولاد نیتریده شده بستگی به سختی، ضخامت و ترکیب فازی لایه های ترکیبی و نفوذی [۱، ۲] و همچنین خواص مکانیکی زیرلایه دارد. لایه ترکیبی خاصیت روانسازی سطح را افزایش داده و موجب كاهش ضريب اصطكاك مي شود. اما اين لايه به علت ترد بودن در تنش های بالا شکسته شده منجر به تشکیل ذرات ساینده و سایش شدید سطح نمونه می شود [۷، ۸]. بنابراین بهتر است که ضخامت لایه سفید نازک بوده و یا اینکه از سطح برداشته شود.

در صورت نازک بودن لایه ترکیبی یا ساییده شدن آن، مقاومت سایشی قطعات نیتریده شده وابستگی شدیدی به خواص ناحیه نفوذی و خواص مکانیکی زیرلایه خواهد داشت. در بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه نیتروژن دهی فولادها، اغلب اثر پارامترهای موثر در فرآیند نیتروژن دهی (مانند دما، زمان و ترکیب شیمایی گاز نیتروژن دهی) دهی رمانند دما، زمان و ترکیب شیمایی گاز نیتروژن دهی) تواص مکانیکی زیر لایه و یا نوع عملیات حرارتی اولیه

آن بر روی خواص لایه نیتریدی و رفتار سایشی فولاد پس از نیتروژن دهی انجام شده است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر عملیات حرارتی اولیه، قبل از نیتروژن دهی دو نوع عملیات حرارتی مختلف شامل آنیل کامل و کوئنچ-تمپر بر روی نمونه هایی از فولاد M2 صورت گرفت. نمونه ها در یک راکتور نیتروژن دهی پلاسمایی با امواج فرکانس رادیویی در اتمسفر گازی حاوی H2 ۲۸٪ + 2 N2٪ در دمای C°۴۵ به مدت زمان ۸ ساعت نیتروژن دهی شدند. ساختار و ضخامت لایه نیتریدی و پروفیل سختی در مقطع عرضی نمونه ها تعیین و مقاومت سایشی فولاد قبل و پس از نیتروژن دهی با دستگاه پین روی دیسک اندازه گیری و مقایسه شد.

روش تحقيق

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد M2 مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می دهد. برای بررسی های ریزساختاری و آزمایشهای سایش نمونه های دیسکی شکل از این فولاد با قطر ۳۲ و ضخامت ۸ میلیمتر تهیه شدند. برای انجام عملیات حرارتی آنیل کامل، طبق استاندارد برای انجام عملیات حرارتی آنیل کامل، طبق استاندارد کرد دمای مراک به مدت یک ساعت به ازای هر اینچ ضخامت ظرف محتوی نمونه ها، آستنیته و سپس در کوره سرد شدند. عملیات کوئنچ-تمپر نیز در حمام نمک مذاب طبق این استاندارد طی مراحل زیر انجام گرفت:

1- عملیات پیش گرم دو مرحلهای در دمای  $2^{\circ}$  ۴۵۰ به مدت ۲۵ دقیقه. مدت ۳۰ دقیقه و در دمای  $2^{\circ}$  ۸۵۰ به مدت ۵ دقیقه. ۲- آستنیته کردن در دمای  $2^{\circ}$  ۱۲۰۵ به مدت ۲ دقیقه. ۳- کوئنچ در حمام نمک مذاب با دمای  $2^{\circ}$  ۱۹۰ و سپس در هوا (سختی حاصل از عملیات کوئنچ یا آبکاری در محدوده ۶۶–۶۳ راکول 2 بود) ۴- سه مرحله تمپر در در دمای  $2^{\circ}$  ۵۵۵، هر مرحله به مدت ۸۰ دقیقه (سختی حاصل در هر سه مرحله تمپر در محدوده ۶۶–۶۴ راکول 2 بود). قبل از نیتروژن دهی سطح تمامی نمونه ها تا سنباده شماره قبل از نیتروژن دهی سطح تمامی نمونه ها تا سنباده شماره ۱ میکرون سطح آنها پولیش و مسیقلی گردید. ۱۳

محمدزاده و اکبری، تأثیر عملیات حرارتی اولیه بر مقاومت سایشی فولاد AISI M2 ، علوم و مهندسی سطح ۱۰ (۱۳۸۹)

С	W	Mo	Cr	V	Со	Ti	Al
٠/٨١٩	٥/٧١	٥/٢٧	۳/۸۸	۱/۱۳	•/١•١	•/••٢٤٣	۰/۰۲۰٤
Mn	Ni	Sn	Р	S	Cu	Si	Fe
•/79•	•/1/٣	•/••١••	•/••١••	•/••١••	•/۵۶۶	• /٣•٨	بقيه

**جدول ۱**. ترکیب شیمیایی (بر حسب درصد وزنی) فولاد M2 استفاده شده در این تحقیق

سپس به ترتیب در حمام های آلتراسونیک حاوی استون و الکل به مدت ۱۵ دقیقه چربی زدایی شدند.

عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی با استفاده از یک راکتور پلاسما مجهز به منبع تغذیه فرکانس رادیویی و توان W ۷۵۰ در پتانسیل شناور انجام گرفت. شماتیکی از این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از اینکه نمونه ها در داخل محفظه بر روی نگهدارنده ای از جنس کوارتز قرار داده شدند، فشار محفظه به سطح خلا<sup>4 ۲</sup>-۱۰ پاسکال رسانده شد. کلیه نمونه ها به مدت ۸ ساعت در فشار ۷/۷ پاسکال و در دمای  $2^{\circ} \cdot 61$  ، در ترکیب گازی فشار ۷/۷ پاسکال و در دمای  $2^{\circ} \cdot 61$  ، در ترکیب گازی و کوره خاموش گردید و نمونه ها تا رسیدن به دمای محیط درون محفظه نگاه داشته شدند.

ریزساختار نمونه ها قبل و پس از نیتروژندهی پس از اچ در محلول نایتال ۴٪ توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus PMG3 مورد بررسی قرار گرفت و تصاویر میکروسکوپی از مقطع عرضی آنها به دست آمد.

جهت بررسی ساختار و فازهای تشکیل شده سطحی از تفرق سنج Bruker advanced-D8 با پرتو Cu-K<sub>α</sub> (با طول موج Å 1.5406) تحت شرایط ولتاژ ۴۰ KeV و جریان ۵۰mA ، گام زاویه ای ۰/۰۲ درجه و شمارش ۴ ثانیه در هر گام، از زاویه ۱۰ تا ۱۳۰ استفاده شد.

به منظور اندازه گیری نحوه تغییرات سختی از سطح به مغز از ریزسختی سنجی مدلMDPEL-M400 GL از نوع فرورونده ویکرز با بار اعمالی ۲۵ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه استفاده شد. اعداد سختی گزارش شده میانگین چهار بار اندازه گیری است. ضخامت لایه نیتریدی از بررسی های تغییرات ریزسختی سنجی در مقطع عرضی نمونه ها تعیین شد. بدین منظور مطابق استاندارد JIS فاصله از سطح، خطی افقی نشانگر عدد سختی ۵ ویکرز

بالاتر از سختی مغز قطعه ترسیم شد. فاصله از سطح تا محل تلاقی خط مذکور با منحنی تغییرات سختی به عنوان ضخامت لایه نیتریدی گزارش شد.

به منظور بررسی زبری متوسط سطح نمونهها (R<sub>a</sub>)، قبل و بعد از نیتروژندهی از زبری سنج سطحی مدل Mitutoyo بعد از نیتروژندهی از زبری سنج سطحی مدل مرالعه برای این منظور ۵ میلیمتر و دقت دستگاه در حدود μμ ۱۰/۰ بود. خواص سایشی نمونه های فولادی قبل و پس از نیتروژن دهی با دستگاه سایش از نوع ساچمه روی دیسک [۱۱] مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحقیق حاضر نمونه های فولادی به عنوان دیسک با سرعت ۳۰۳pm (۲۰۰۵ m/۰) در مقابل ساچمه ثابت از جنس Al2O3 با قطر mm می چرخید. مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر و بار عمودی ۸ نیوتن انتخاب گردید. تمام آزمایشات سایش در شرایط اندازه گیری حجم ماده سایده شده، از شیارهای سایشی، پروفیل نگاری سطحی سه بعدی با استفاده از دستگاه پروفیل نگار نوری مدل TaylorSurf CCI 3D به عمل



شکل ۱. شماتیکی از دستگاه نیتروژن دهی پلاسمایی استفاده شده

آمد. با استفاده از نرم افزار Mountains Map بروفیل متوسطی از جاروب های خطی مقطع شیار سایشی محاسبه شد و بعد از محاسبه مساحت متوسط خالص منطقه ساییده شده، با ضرب کردن آن در طول مطالعه شده مقدار حجم ماده ساییده شده به دست آمد. مقادیر گزارش شده متوسط دو بار اندازه گیری برای هر شیار سایشی است.

همچنین پروفیل تنش های پسماند سطحی طبق مدل ارایه شده توسط Leskovšek و همکارانش [۱۲] محاسبه گردید. طبق این مدل در مورد فولادهای ابزار نیتروژن دهی شده، می توان با مشتق گرفتن از پروفیل سختی نسبت به فاصله از سطح تغییرات تنش های پسماند نطحی را بدون اندازه گیری تجربی تنش پسماند تخمین زد.

## نتايج و بحث

14

بررسی های ریزساختاری

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نـوری از سـطح مقطـع عرضي فولاد M2 را پس از عمليات حرارتي اوليـه آنيـل کامل و کونچ-تمپر نشان می دهـد. ریزسـاختار فـولاد در حالت آنیل کامل شامل مخلوطی از کاربیدهای آلیاژی ریز و درشت در زمینه فریتی و در حالت کوئنچ-تمپـر ماننـد حالت آنیل کامل شامل کاربیدهای آلیاژی اما در زمینه ای از مارتنزیت تمپر شده است. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی نمونیه های نیتریده شده در دو حالت أنيل كامل و كوئنچ-تمپر پس از اچ با محلول نایتال ۴ درصد در شکل ۳ نشان داده شده است. چنانکه در تصاویر دیده می شود در سطح مقطع عرضی هیچ یک از نمونه های نیتریده شده لایه ترکیبی آشکاری توسط میکروسکوپ نوری مشاهده نمی شود و تنها ناحیه نفوذی قابل تشخیص است. در مورد فولاد M2 نیتریده شـده در حالت آنیل کامل ناحیه نفوذی سفید رنگی در سطح تشکیل می شود که در مقایسه با فولاد نیتریده شده در تر الترالي کوئنچ-تمپر تحت همان پارامترهای یکسان نیتروژن ir دهی ضخامت بالاتری دارد.



M2 شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی فولاد M2 در حالت (الف) آنیل کامل و (ب) کوئنچ-تمپر

الگوهای پراش اشعه ایکس فولاد M2 در دو نوع عملیات حرارتی اولیه مختلف، قبل و پس از نیتروژن دهی در شکل ۴ نشان داده شده است. الگوی پراش قبل از نیتروژن دهی وجود کاربیدهای آلیاژی از نوع Fcc -3(W,Mo)3C- fcc و مرو -M<sub>6</sub>C -M<sub>6</sub>C ریزساختار آنیل (شکل ۴ الف) و فاز مارتنزیت را در ریزساختار کوئنچ-تمپر (شکل ۴ ب) نشان می دهد. الگوی پراش اشعه ایکس فولاد M2 آنیل کامل شده قبل از نیتروژن های فاز فریت/مارتنزیت و کاربیدهای آلیاژی در هر دو مورد های فاز فریت/مارتنزیت و کاربیدهای آلیاژی در هر دو مورد به آهن در حالت کوئنچ-تمپر است. پهن شدن پیک مربوط به آهن در حالت کوئنچ-تمپر است. پهن شدن پیک های مربوط به فاز آهن در حالت کوئنچ-تمپر به احتمال قوی به **محمدزاده و اکبری، تأثیر** عملیات حرارتی اولیه بر مقاومت سایشی فولاد AISI M2 ، **علوم و مهندسی سطح ۱۰ (۱۳۸۹)** 



**شکل ۳.** تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی نمونههای نیتریدی در حالت (الف) آنیل کامل و (ب) کوئنچ–تمپر

علت تتراگونالیته ناشی از ساختار bct و ایجاد تنش های پسماند ناشی از آن است[۱۳]. پس از نیتروژن دهی در هـر دو ریزساختار مورد مطالعه وجود پیک های متعـدد فـاز ٤ در الگوی پراش پرتو ایکس تشکیل لایه ترکیبی تک فازی ٤ را در سطح اثبات مي كند كه بيانگر رسيدن ضخامت لايه ترکیبی به یک مقدار مناسب جهت آشکار شدن با پرتو ایکس است. دو عامل مهم، سینتیک تشکیل لایه ترکیبی را در حین نیتروژن دهی یونی تحت تأثیر قرار می دهند: پدیده کندوپاش و مقدار کربن محتوی فولاد. کربن به تشکیل لایه نیتریدی ٤ کمک میکند و در واقع پایدار کننده ۵ است[۱۴]. بنابراین اگر پارامترهای نیتروژن دهی يلاسمايي طوري طراحي شده باشد كه سرعت كندوياش در آن زیاد باشد شدت دکربوره شدن به اندازهای خواهد بود که غلظت کربن در سطح کاتد به مقادیر بسیار کمی می رسد در این حالت طبق دیاگرام فازی Fe-N-C لایه ترکیبی تنها از فاز Fe<sub>4</sub>N - γ' تشکیل می یابد. اگر سرعت کندویاش در نیتروژن دهی پلاسمایی به اندازه ای کم باشد که نتواند به طور قابل توجهی موجب دکربوره شدن سطح گرد در این حالت مقدار قابل توجهی فاز در کنار فاز  $\gamma'-Fe_4N$  در کنار  $\epsilon$  -Fe<sub>2-3</sub>(N,C) تشكيل خواهد شد. به دليل اينكه درتحقيق حاضر نمونه ها تحت يتانسيل شناور قراگرفته اند انرژي يون ها هنگام رسيدنبهسطح نمونه ها بسيار كم و در حدود چند الكترون



**شکل ۴**. تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع عرضی نمونههای نیتریدی در حالت (الف) آنیل کامل و (ب) کوئنچ-تمپر

۱۵

ولت بوده است. در نتیجه کندوپاشی صورت نگرفته و تأثیری در سینتیک تشکیل لایه ترکیبی ندارد. بنابراین ترکیب لایه سفید در این فولاد به علت بالا بودن مقدار کربن فاز ٤ است [١۵].

## پروفیل سختی

18

نمودار شیب سختی سنجی ویکرز از مقطع عرضی نمونههای نیتریده شده به همراه تصاویر میکروسکوپ نوری از محل اثر فرورونده ویکرز در شکل های ۵ الف و ۵ ب به ترتیب برای فولاد M2 نیتریده شده در حالتهای آنیل کامل و کوئنچ-تمپر <sup>(الف)</sup>نشان داده شده است.در مورد فولاد کوئنچ-تمپر سختی نزدیک سطح در حدود ۵۰ درصد افزایش یافته و از مقدار در نواحی نزدیک سطح رسیده اما در حالت آنیل کامل سختی نزدیک سطح در حدود ۴۰۰ درصد افزایش یافته و از مقدار در نواحی نزدیک سطح رسیده اما در حالت آنیل کامل سختی نزدیک سطح در حدود ۱۹۰۰ درصد افزایش یافته و از مقدار در نواحی نزدیک سطح رسیده اما در حالت آنیل کامل سختی نزدیک سطح در حدود ۱۹۰۰ درصد افزایش یافته و از مقدار در سیده است. همچنانکه مشاهده می شود در هر دو مورد سختی از سطح به مرکز کاهش می یابد.



سمت مغز غلظت نیتروژن کاهش می یابد در نتیجه میزان نیتریدهای فلزی تشکیل شده و به تبع آن سختی کاهش می یابد; سه عامل عمده در افزایش سختی و استحکام در اثر نفوذ نیتروژن اتمی به سطح دخیل هستند [۱۶، ۱۷]: ۱- فوق اشباع شدن فاز زمینه از نیتروژن و استحکام دهی آن از طریق تشکیل محلول جامد، ۲- ایجاد رسوبات نیتریدی ریز پراکنده شده در ساختار که مانعی در برابر لغزش نابجاییها محسوب می شوند، ۳- ایجاد تنش های پسماند فشاری در لایه نیتریدی. همچنانکه ملاحظه می شود ضخامت لایه نیتریدی در حالت آنیل کامل ۲۵ست ا و در حالت کوئنچ-تمپر در کوئنچ-تمپر کمتر از حالت آنیل کامل است.

زيرا به علت نفوذ نيتروژن از سطح، به تدريج از سطح به

زبرى سطحى

نتایج حاصل از زبری سطح نمونه های کـوئنچ-تمپـر و آنیـل کامل شده قبل و بعد از نیتروژن دهـی در شـکل ۶ نشـان داده شده است.





**شکل ۵**. پروفیل ریز سختی سنجی نمونههای نیتریده شده در حالت (الف) آنیل کامل و (ب) کوئنچ-تمپر

۱۷

محمدزاده و اکبری، تأثیر عملیات حرارتی اولیه بر مقاومت سایشی فولاد AISI M2 ، علوم و مهندسی سطح ۱۰ (۱۳۸۹)

قبل از نیتروژن دهی زبری سطح فولاد M2 در هر دو نوع عملیات حرارتی اولیه تقریباً برابر و در حدود μm ۰/۰۳ ۱۰/۰ است. مقایسه زبری نمونه های فولادی نیتریده شده نشان می دهد که نمونه های آنیل کامل در مقایسه با حالت کوئنچ-تمپر بیشترین زبری سطح را دارد.

افزایش زبری سطح پس از نیتروژن دهی پلاسمایی را می توان به عوامل مختلفی نظیر کندوپاش حین انجام فرآیند[۱۸]، ایجاد تنش پسماند در اثر نیتروژن دهی [۱۹] انبساط شبکه آهن در اثر نفوذ نیتروژن با مکانیزم بین نشینی و همچنین تشکیل رسوبات نیتریدهای آلیاژی[۲۰] نسبت داد.

در نیتروژن دهی پلاسمایی به روش DC، دمای قطعات کاری از طریق کندو پاش اتمها از سطح توسط یونهای گازی، به دمای نیتروژن دهی رسانده می شود. به علت کندوپاش غیریکنواخت اتم ها از سطح زیرلایه توسط یون های حاصل از تخلیه هالهای زبری سطح افزایش می یابد[۱۹]. در این روش جهت حصول دمای نیتراسیون بالا ولتاژ اعمالی بین کاتد و آند باید افزایش یابد. با افزایش ولتاژ انرژی سینیتیکی یون های نیتروژن برخورد کننده به سطح افزایش یافته و مقدار کندوپاش اتمها از سطح بیشتر خواهد شد. بنابراین در نیتروژن دهی پلاسمایی DC، کندو پاش سهم عمده اصلی را در

افزایش زبری سطح به خصوص در دماهای بالا دارد[۲۰]. در این تحقیق جهت رساندن دمای نمونه ها به دمای نیتراسیون از یک کوره مقاومتی مجزا استفاده شده است. از آنجایی که در حین نیتروژن دهی هیچ گونه پتانسیلی به نمونه ها اعمال نشده و نمونه ها تحت پتانسیل شناور قرار گرفتند کندو پاش موثری در سطح اتفاق نیفتاده است. بنابراین در این مطالعه کند و پاش در افزایش زبری سطح نقش قابل از نیتروژن دهی به دلیل انبساط حجمی ناشی از نفوذ نیتروژن به داخل شبکه آهن و تشکیل نیتریدهای فلزی است. با توجه به اینکه در مواد پلی کریستال جهت گیری دانه ها نسبت به هم متفاوت است. انبساط شبکه در اثر نفوذ نیتروژن در دانه های مختلف در جهت های مختلفی اتفاق افتاده و چون مقدار این جابه جایی برای صفحات مختلف کریستالو گرافی متفاوت است زبری سطح ایری سطح تفاق

می تواند به طور کیفی تا حدودی بیانگر میزان نفـوذ نیتـروژن به سطح زیرلایه باشد.

## مقاومت سايشى

نتایچ پروفیل نگاری سطحی از مناطق سایش فولاد M2 در دو حالت کوئنچ-تمپر و آنیل کامل قبل و پس از نیتروژن دهی پلاسمایی در شکل ۷ در قالب تصاویر دو بعدی نشان داده شده است. پروفیل دو بعدی سطح در واقع از کنار هم قرار گرفتن یک دسته خط حاصل از جاروب خطی توپوگرافی سطح شیار سایشی تشکیل می شود.

این تصاویر و محاسبات کمی مربوطه که در ادامه آورده شده است با استفاده از نرم افزار Mountains Map Universal به دست آمده است.

برای حالت های مختلف مذکور در هر یک از اشکال فوق مقیاس واحدی انتخاب شده است تا مقایسه بصری و تعیین نقش فرآیند نیتروژن دهی در افزایش مقاومت سایشی به راحتی امکان پذیر شود. به منظور محاسبه کمی حجم سایش یافته ابتدا متوسطی از پروفیل های ثبت شده از مقطع شیار سایشی توسط نرم افزار مذکور به دست آمد. مثالی از پروفیل متوسط دو بعدی در شکل ۸ نشان داده شده است. به طورکلی پروفیل های مقطع شیار در آزمایش سایش پین روی دیسک حاوی یک فرورفتگی در مرکز و سطوح برآمده در لبه های شیار است.







**شکل ۷**. تصاویر حاصل از پروفیل نگاری سطحی از مناطق سایش فولاد M2 در حالت آنیل کامل، (الف) نیتریده نشده و (ب) نیتریده شده و فولاد M2 در حالت کوئنچ-تمپر (ج) نیتریده نشده و (د) نیتریده شده

قسمت عمده فرورفتگی ناشی از برداشته شدن ماده از سطح در اثر سایش و بخشی از آن در اثر تشکیل برآمدگی در مجاورت شیار سایشی است. برآمدگی به علت جابه جایی ماده و تجمع آن در اثر تغییر شکل دایمی ایجاد می شود. در شکل ۸ این نواحی به ترتیب با SP و SR نشان داده شده است. مساحت این نواحی با استفاده از همین نرم افزار از طریق انتگرال گیری محاسبه شد و حجم خالص ماده ساییده شده از طریق رابطه زیر به دست آمد:

طول شیار × ( S<sub>R</sub> - S<sub>P</sub> ) = حجم ساییده شده نتایج کمی آزمایش سایش به صورت نمودار حجم ساییده شده برای فولاد M2 در دو حالت کوئنچ-تمپر و آنیل کامل قبل و پس از نیتروژن دهی در شکل ۹ آورده شده است. مقایسه رفتار سایشی نمونه های کوئنچ-تمپر و آنیل کامل قبل از نیتروژن دهی نشان می دهد که مقدار حجم ماده ساییده *D.ir* کوئنچ-تمپر شده است. زیرا زمینه مارتنزیتی در نمونه کوئنچ-

تمپر موجب افزایش سختی زمینه شده است. مقاومت به سایش چسبنده با افزایش سختی بهبود می یابد. متوسط تنش تماسی حاصل(تنش هرتز)، در اثر فشار دادن گلوله به سطح در آزمایش ساچمه روی دیسک تابعی از بار اعمالی، شعاع گلوله به کار برده شده و مدول الاستیک گلوله اعمالی، شعاع گلوله به کار برده شده و مدول الاستیک گلوله و دیسک مطابق رابطه زیر است [۲۱] :  $\sigma_{c} = \frac{P}{\pi a^{2}} \qquad a = \left[\frac{3}{4}PR(\frac{(1-v_{disc}^{2})}{E_{disc}} + \frac{(1-v_{ball}^{2})}{E_{ball}})\right]^{\frac{1}{3}}$ 

که در آن P بار اعمالی روی گلوله، a شعاع تماس، R شعاع گلوله، E مدول الاستیک و ۷ ضریب پواسون گلوله (ball) و زیرلایه (disc) است. تغییرات تنش تماسی هرتز با بار اعمالی برای فولاد M2 در حالتهای نیروژن دهی شده و نشده در شکل برای فولاد منده است. با وجود اینکه طبق شکل ۱۰ تنش های تماسی هرتز در فولاد نیتریدی ( در حدود MPa) بیشتر از فولاد نیتریده نشده (۲۴۰ MPa ) است پس از نیتروژن دهی، محمدزاده و اکبری، تأثیر عملیات حرارتی اولیه بر مقاومت سایشی فولاد AISI M2 ، علوم و مهندسی سطح ۱۰ (۱۳۸۹)



شکل ۸. نمونه ای از پروفیل سنج سطحی دو بعدی متوسط از شیار سایشی

همانطورکه در شکل ۹ دیده می شود، نـرخ سـایش نمونـه هـای نیتریده شده به مراتب نسبت به نمونههای نیتریده نشده کمتـر است.

این موضوع بیانگر این واقعیت است که عملیات نیتروژندهی با موفقیت مقاومت سایشی را بهبود داده است. وجه مشترک نمونه های نیتریده شده با وجود تفاوت در مقدار حجم ساییده شده آنها سختی بالای آنها نسبت به حالت نیتریده نشده است. یکی از دلایل عمده افزایش مقاومت به سایش در اثر نیتروژن دهی پلاسمایی ایجاد پوسته نیتریدی سخت در سطح و در نتیجه جلوگیری از سایش شدید است.



**شکل ۹**. نمودار حجم ساییده شده فولاد M2 قبل و پس از نیتروژن دهی پلاسمایی در حالت کوئنچ–تمپر و آنیل کامل

جهت مقایسه دلیل تفاوت رفتار سایشی نمونه های نیتریده شده باید فاکتورهای مهم در پدیده سایش از قبیل سختی سطح، ضریب اصطکاک، نوع تنش های پسماند ایجاد شده، توزیع SID.ir تنش های اعمالی و چقرمگی را مورد بررسی قرار داد.



شکل ۱۰. منحنی تغیرات متوسط تنش فشاری تماسی با بار عمودی اعمالی در آزمایش سایش با ساچمه از جنس Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به قطر mm ۵ روی دیسک فولادی از جنس AISI M2

در این تحقیق ضریب اصطکاک که خود عامل مهمی در مقدار حجم سایده شده است اندازه گیری نشده است اما با توجه به الگوهای پراش پرتو ایکس در همه نمونه ها ترکیب شیمیایی سطح شامل نیترید آهن ٤ است. به این ترتیب به علت یکسان بودن ترکیب شیمیایی سطح انتظار اختلاف زیادی در کاهش ضریب اصطکاک نمونه های نیتریده شده ای که حاوی لایه ترکیبی در سطح هستند، پس از نیتراسیون نیست. نتایج پروفیل های ریزسختی سنجی نشان می دهد که سختی در فاصله ۱۰ میکرومتری از سطح برای فولاد کوئنچ-تمپر بیشتر از حالت آنیل کامل است. اما از طرف دیگر نتایج آزمایش سایش نشان می دهد که نمونه نیتریده شده در حالت آنیل مقاومت سایشی بالاتری دارد. پس تنها سختی سطح تعیین کننده نمی باشد. تنش ۱۶۰۰– مگا پاسکال و در فاصله ۹۰ میکرومتـری از سطح است.

با توجه به اینکه در بارگذاری تماسی، ماکزیمم تنش برشی در زیر سطح ایجاد می شود (در فاصله a ۷۷/۰ از سطح [۲۲] که در آن a شعاع تماس اولیه است). از محاسبات مربوط به شعاع تماس اولیه در سطح نمونه های نیتریده شده در این تحقیق از روی خواص ساچمه و دیسک در بار اعمالی ۸ نیوتن مقدار شعاع متوسط تماس مطابق رابطه ۱، حدود ۱۰۰–۹۰ میکرون به دست می آید. بدین ترتیب باید ماکزیمم تنش برشی در حوالی ۱۰۰ میکرون از سطح ظاهر شود. وجود تنش های پسماند فشاری بالا می تواند منجر به خنثی شدن تمام یا بخشی از تنش های برشی (ناشی از تنش اعمالی) شود. یعنی با وجود سختی پایین نمونه های نیتریده شده در حالت آنیل به خصوص در نواحی زیر سطحی به علت وجود تنش های پسماند فشارى بالا، تغيير شكل دايمي كمترى ايجاد مي شود، لـذا بخشی از مقاومت سایشی بالای نمونه های نیتریده شده در حالت آنیل را می توان به توزیع تنش های پسماند فشاری نسبت داد.

در حالت کلی باید گفت که رفتار سایشی فولاد نیتریده شده حاصل برهم نهی خواص مختلف لایه های نیتریدی شامل ترکیب، ضخامت، سختی، چقرمگی و تنش های پسماند و جسم پایه است. با وجود مقاومت به سایش برتر فولاد نیتریده شده در حالت تحت بار اعمالی ۸ نیوتن، در بارهای اعمالی سلاتر که امکان تغییر شکل جسم پایه بیشتر می شود انتظار می رود فولاد کوئنچ و تمپر شده به علت حمایت مکانیکی بهتر از لایه نیتریدی مقاومت به سایش بالاتری نسبت به فولاد نیتریده شده در حالت آنیل داشته باشد.

## نتيجه گيري

۱- ضخامت لایه نیتریدی روی فولاد M2 در حالت آنیل کامل بیشتر از حالت کوئنچ- تمپر است که نشان دهنده وابسته بودن نفوذ نیتروژن از سطح به عمق فولاد، به ریزساختار اولیه آن است.

تنش های پسماند نقش بسیار مهمی در تعیین مقادیر سختی، مقاومت به خستگی و سایش قطعات نیتریده شده بازی می کند. به علت در دسترس نبودن امکانات مربوط به اندازه گیری تنش با روش sin<sup>2</sup>¥، با وجود محدودیت های موجـود، در این مطالعه ارزیابی تنش های پسماند در لایه نیتریدی فقط به صورت کیفی از روی تغییرات پروفیل سـختی بررسـی شـد. اخيراً Leskovšek و همكارانش [١٢] نشان داده اند كه ارتباط مستقیمی بین پروفیل سختی با توزیع تـنش هـای پسـماند در فولادهای ابزار پلاسما نیتریده شده وجود دارد. در صورت برقراری چنین رابطهای می توان تغییرات تنش های پسماند را از سطح تا عمق با مشتق گـرفتن از پروفیـل سـختی نسـبت بـه فاصله از سطح به دست آورد. شکل ۱۱ تغییرات تـنش هـای پسماند را از روی مقادیر پروفیل های سختی سنجی بـه ترتیـب برای نمونه های نیتریده شـده در حالـت کـوئنچ-تمپـر و آنیـل نشان می دهد. مطابق این شکل در مجاورت سطح نمونه های کوئنچ-تمپر تنش های پسماند فشاری بزرگتری نسبت به نمونه های آنیل شده وجود دارد. در هر دو سـری از نمونـه هـا بیشترین مقدار تنش پسماند فشاری در زیر سطح ایجاد مي شود.



۲١

- منابع
- 1. M. A. Pessin, M. D. Tier, T. R. Strohaecker, A. Bloycec, Y. Sun and T. Bell, *The effects of plasma nitriding process parameters on the wear characteristics of AISI M2 tool steel*, Tribology Letters, 8 (2000) 223-228.
- 2. D. Kakaš and M. Zlatanović, *Wear resistance of plasma nitrided high speed steels, Ion Nitriding and Ion Carburizing;* Cincinnati, Ohio, USA, (1989) 141-146.
- 3. J. O'Brien, *Plasma (ion) nitriding*, ASM Handbook, ASM international, Metals Park, 4 (1994).
- B. Podgornik and S. Hogmark, Surface modification to improve friction and galling properties of forming tools, Materials Processing Technology, 174 (2006) 334-341.
- 5. B. Podgornik and J. Vižintin, *Wear* resistance of pulse plasma nitrided AISI 4140 and A355 steels, Materials Science and Engineering A, 315 (2001) 28-34.
- Y. Xi, D. Liu and D. Han, Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature, Surface & Coatings Technology, 202 (2008) 2577-2583.
- M. Karakan, A. Alsaran and A. Çelik, *Effects of various gas mixtures on plasma nitriding behavior of AISI 5140 steel*, Materials Characterization, 49 (2003) 241-246.
- A. Alsaran, Determination of tribological properties of ion-nitrided AISI 5140 steel, Materials Characterization, 49 (2003) 171–176.
- 9. DIN 17350 Standard, *Tool steelstechnical conditions of delivery additional information on heat treatment*, (1980) 1-27.
- 10. JIS G0562 Standard, Surf. Eng., 11 (1995) 57-60.
- 11. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM G99-95a.
- 12. V. Leskovšek, B. Podgornik and D. Nolan, *Modelling of residual stress* profiles in plasma nitride tool steel,

۲- در فولاد نیتریده شده در حالت کوئنچ-تمپر سختی از مقدار ۱۰۰۰ ویکرز مربوط به سختی مغز به حدود ۱۵۰۰ ویکرز در نواحی نزدیک سطح می رسد که معادل حدود ۵۰ درصد افزایش است. در مورد فولاد نیتریده شده در حالت آنیل کامل سختی نزدیک سطح تقریباً به میزان ۳۳۰ درصد افزایش یافته و از مقدار ۲۶۰ ویکرز در مغز به ۱۱۰۰ ویکرز در نزدیکی های سطح می رسد.

۳- نیتروژن دهـی در ترکیب H<sub>2</sub> ۲۵ H<sub>2</sub> × ۷۵ N<sub>2</sub> در هـر دو حالت آنیل کامل و کوئنچ-تمپر منجر به تشکیل لایـه ترکیبی تک فازی ع در سطح می شود.

۴- نتایج آزمایش های سایش نشان می دهد که نیتروژندهی پلاسمایی تحت شرایط فوق باعث افزایش مقاومت سایشی فولاد M2 در سایش لغزشی خشک در هر دو حالت آنیل کامل و کوئنچ-تمپر شده می شود.

۵. در بار اعمالی ۸ نیوتن، فولاد M2 با ریزساختار اولیه آنیل کامل بیشترین مقاومت سایشی را در مقایسه با حالت کوئنچ-تمپر دارد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که در محدوده بار سایشی مطالعه شده با انتخاب صحیح ساختار اولیه فولاد می توان مقاومت به سایش فولاد ابزار تندبر AISI M2 را افزایش داد.

تشکر و قدردانی نویسندگان مقاله از آقای پروفسور تامپلیه استاد دانشگاه پواتیه کشور فرانسه به خاطر فراهم نمودن امکان استفاده از تجهیزات نیتروژن دهی پلاسمایی و دانشگاه صنعتی سهند به خاطر حمایت مالی تشکر و قدر دانی می نمایند.

Materials characterization, 59 (2008) 454-461.

- P. J. Willbur, J. A. Davis, R. Wei, J. J. Vajo and D. L. Williamson, *High current density, ion implantation of AISI M2 tool steel for tribological applications,* Surface and 14.Coatings Technology, 83 (1996) 250–256.
- 14. C. Ruseta, S. Ciucab and E. Grigorea, The influence of the sputtering process on the constitution of the compound layers D.ir obtained by plasma nitriding, Surface

and Coatings Technology, 174 –175 (2003) 1201–1205.

- G. Nayal, D.B. Lewis, M. Lembke, W. D.Münz and J.E. Cockrem, *Influence of* sample geometry on the effect of pulse plasma nitriding of M2 steel, Surface and Coatings Technology, 111(1999)148– 157.
- M. Pellizzari, A. Molinari and G. Straffelini, *Thermal fatigue resistance of* gas and plasma nitrided 41CrAlMo7 steel, Materials Science and Engineering A, 352 (2003)186-194.
- Y. Sun and T. Bell, *Plasma surface* engineering of low alloy steel, Materials Science and Engineering A, 140 (1991) 419-434.
- P. Novák, D. Vojtěch and J. Šerák, Wear and corrosion resistance of a plasmanitrided PM tool steel alloyed with niobium, Surface and Coatings Technology, 200 (2006) 5229-5236.

- 19. E. I. Meletis, V. Singh, J. C. Jiang, On the single phase formed during lowtemperature plasma nitriding of austenitic stainless steels, Materials science letters, 21 (2002) 1171-1174.
- F. Mahboubi and K. Abdolvahabi, *The* effect of temperature on plasma nitriding behaviour of DIN 1.6959 low alloy steel, Vacuum, 81 (2006) 239-243.
- 21. H. Czichos, *friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM Handbook, ASM International,(1994).
- 22. B. Podgornik and J. Vižintin, *Sliding and pitting wear resistance of plasma and pulse plasma nitrided steel*, Surface Engineering, 17 (2001) 300-304.