دانشگاه شهید چمران اهواز
انجمن آهن و فولاد ایران
گروه ملی صنعتی فولاد ایران

سمپوزیوم فولاد ۸۷
۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷
اهواز - دانشگاه شهید چمران

افزایش عمر فولادهای ابزار و قالب با استفاده از نیتراسیون پلاسمایی

علی فهامی [1]، فخرالدین اشرفی زاده [2]
۱- شرکت مهندسی بین المللی فولاد تکنیک
۲- دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مواد

چکیده

فولادهای ابزار گروهی از فولادهای آلیاژی هستند که برای شکل‌دهی و ماشین‌کاری مواد به کار می‌روند و به نحوی طراحی می‌شوند که دارای سختی بالا، مقاومت به سایش عالی و پایداری تحت شرایط کاری سخت باشند. با افزایش عمر کارکرد این فولادها توسط عملیات پوشش دهی می توان دوره تعویض قطعات، هزینه‌های تولید و استفاده از روان‌کارها را کاهش و کیفیت محصول نهایی و راندمان ماشین‌ها را افزایش داد.

نیتراسیون پلاسمایی از روش‌هایی است که برای افزایش عمر کارکرد قطعات ابزار استفاده می‌شود و به تنهایی و گاهی همراه با یک عملیات تکمیلی دیگر نظیر PVD (پوشش TiN) استفاده می‌شود. حضور عناصر Cr و V که میل ترکیبی زیادی با نیتروژن دارند به افزایش سختی سطح پس از نیتراسیون کمک می‌کند. در این تحقیق فولاد ابزار گرم‌کار از جنس DIN 1.2367 مورد استفاده در قالب اکستروژن و فولاد ابزار سردکار مقاوم به شوک، از جنس DIN 1.2542 مورد استفاده در سنبه‌های پانچ ورق فولادی، نیتروره شدند و از نظر خواص متالورژیکی و عمر کارکرد مورد بررسی قرار گرفتند. با تعیین دقیق پارامترهای عملیات نیتراسیون پلاسمایی برای فولاد DIN 1.2367 به سختی بیش از 1300 HV ، عمق نفوذ 250 µm و مقاومت به سایش بالا و برای فولاد DIN 1.2542 به سختی بیش از 1100 HV و عمق نفوذ 200 µm می توان رسید.

کلمات کلیدی: فولاد ابزار، نیتراسیون پلاسمایی، مقاومت به سایش.

[1] - alifaham@yahoo.com

مقدمه

فولادهای ابزار عموما برای برشکاری و شکل دهی قطعات به صورت قطعه نهایی، استفاده می‌شود. این فولادها حاوی کربن بالا (0.6%<) و عناصر آلیاژی نظیر تنگستن، مولیبدن، وانادیم، منگنز و یا کروم هستند و با تشکیل کاربیدهای آلیاژی امکان مواجهه با شرایط سخت را دارند. در حین کار، بیشتر ابزارها تحت بارهای شدید که در یک لحظه بر آن اعمال می‌شود قرار می گیرند. به دلیل حرکت بین فلز و ابزار، تراشه‌های بسیار ریز جدا شده به تدریج ابزار را از بین می‌برند. در واقع نوعی سایش خراشان توسط ذرات سخت نظیر کاربیدها و ناخالصی‌ها در سطح قطعه و ابزار ایجاد می‌شود که ابزارها باید در برابر این عوامل برای مدت طولانی مقاوم باشند و در بسیاری موارد باید قابلیت تحمل افزایش دما در حین کار را نیز داشته باشند[۱].

در یک پروسه تولید فولاد ابزار باید ترتیب ماشین کاری و عملیات حرارتی (آنیل، سخت‌کاری، تمپر و احیانا سخت‌کاری سطحی) به گونه ای انتخاب شودکه حداقل پیچیدگی قالب و ابزار با حداکثر استحکام، سختی و مقاومت به سایش و خراش بدست آید. از طرفی از اکسید و دکربوره شدن فولاد ابزار باید جلوگیری کرد. به این دلیل معمولا این فولادها به آهستگی و در محیط خلا و یا گاز خنثی عملیات می شوند. عملیات سطحی بیشتر برای افزایش سختی و یا مقاومت به سایش، کاهش چسبندگی و بهبود مقاومت به خوردگی فولادهای ابزار انجام می گیرد [۱و۲].

امکان نیتروره کردن فولادهای ابزار برای افزایش مقاومت به سایش و خراش به راحتی وجود دارد. این عملیات که در دماهای بین $^{\circ}C$ ۵۸۰-۵۰۰ انجام می گیرد به دلیل ایجاد تنش‌های فشاری بالا در سطح باعث افزایش سختی می‌شود و مقاومت به ترک‌های گرما خستگی[1] را افزایش می‌دهد [۲و۳]. به‌طور کلی افزایش مقاومت سایشی لغزان و تماسی (Sliding Wear & Rolling Wear) پس از ایجاد لایه نیتریده شده با ضخامت و ترکیب مناسب، توسط محققین زیادی به اثبات رسیده است. علاوه بر این تحقیقات جدید نشان می‌دهد نیتراسیون پلاسمایی می‌تواند سایش ضربه‌ای (Impact Wear Resistance) را بهبود بخشد[٤و٥و٦]. در نیتراسیون پلاسمایی پارامترهایی همچون دمای عملیات، زمان، نوع پلاسما (DC, Pulse, ...) و ترکیب گاز بر لایه‌های تشکیل شده اثر می گذارد [۷].

فولادهای ابزار گرمکار به دلیل دمای تمپر بالا و حضور عناصر با میل ترکیبی بالا با نیتروژن برای نیتراسیون مناسب هستند. از طرفی بسیاری از فولادهای قالب و ابزار سردکار نیز با موقیت نیتریده شده اند [۸].

[1] Heat Checking

در این تحقیق با توجه به نیاز صنعت به کاهش زمان تعویض و افزایش عمر تجهیزات و ابزارها روش نیتراسیون پلاسمایی برای یک نوع فولاد گرمکار و یک نوع فولاد سردکار بکار گرفته شد.

روش تحقیق

ترکیب شیمیایی فولاد 1.2367 در جدول ۱ آورده شده است. عملیات حرارتی فولاد 1.2367 با آستنیته کردن در ۱۰۵۰°C، کونچ در هوا و تمپر در ۶۰۰°C به مدت یک ساعت انجام شد (سختی 35 HRC).

سیکل‌های نیتراسیون پلاسمایی در دماهای ۵۰۰°C و ۵۷۰ و زمان‌های ۷ و ۱۲ ساعت مطابق جدول ۲ انتخاب شد. نیتراسیون پلاسمایی با دستگاه نیمه صنعتی پلاسمایی با منبع تغذیه برق DC+Pulse با توان ۵ کیلو وات انجام گرفت. در نیتراسیون پلاسمایی حضور هیدروژن به عنوان کاتالیزور سبب افزایش سرعت واکنش‌ها می‌شود. بنابراین در این تحقیق از نسبت N_2/H_2: 1/4 استفاده شده است.

نمونه‌های نیتریده شده پس از مانت گرم و پولیش با محلول نایتال ۲٪ اچ شدند. ساختار میکروسکوپی زمینه شامل مارتنزیت تمپر شده و ذرات پراکنده کاربید است. شکل‌های ۱ و۲ تصاویر سطح مقطع نمونه‌های نیتریده شده HW1 و HW3 را نشان می دهد.

میکروسختی به روش ویکرز و با استفاده از دستگاه سختی سنج میکرو Leitz و بار 100 گرم انجام شد. به این ترتیب منحنی‌های مختلف سختی بر حسب فاصله از سطح تا مغز نمونه‌ها رسم شدند و عمق نفوذ تخمین زده شد. شکل ۳ تغییرات سختی برای نمونه‌های نیتریده شده را نشان می دهد.

برای تعیین مقاومت به سایش نمونه‌ها از دستگاه سایش پین روی دیسک استفاده شد. مقاومت به سایش بر اساس کاهش وزن بر حسب مسافت تعیین شد. نیروی عمودی بکار رفته ۲۱ kg پس از آزمایش بارپذیری (Loadability) انتخاب شد. کل مسافت طی شده ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. آزمایش با سرعت ثابت و خطی 0.09 m/s در دمای°C ۲۰ و رطوبت نسبی 30% انجام گرفت. شکل ٤ نمودار کاهش وزن پین و نمونه‌ها را در مسافت 1,000 متر نشان می‌دهد.

فولاد ابزار سردکار مقاوم به شوک (Shock Resistance) از جنس 1.2542 که در سنبه‌های مخصوص پانچ ورق‌های فولادی استفاده می شود. عملیات حرارتی این فولاد شامل آستنیته کردن در دمای (۹۵۰°C) نگهداری برای ۱۵ دقیقه و سپس کونچ در روغن و عملیات نیتراسیون پلاسمایی در ۵۵۰°C به مدت ۱۲ ساعت با نسبت گاز N_2/H_2:1/4 انجام شد. عمر مفید تعریف شده برای این سنبه‌ها حدود ۱۰۰۰۰ ضرب پیش بینی شده است که در نمونه‌های نیتراسیون پلاسمایی نشده سنبه‌ها بسیار سریعتر از این میزان تخریب شدند.

نتایج و بحث

فولاد 1.2367 نسبت به دیگر فولادهای گرمکار عناصر آلیاژی کمتری دارد، اما وجود عناصر نیترید زای قوی نظیر مولیبدن در این فولاد به افزایش خواص موردنظر کمک می کند. مولیبدن تردی سطح سخت شده را نیز کاهش می دهد و در مقادیر کمتر از ۱۰% با نیتروژن ترکیبات پایداری تشکیل می دهد. شکل ۱ عمق لایه سخت شده (لایه نفوذی) در نمونه HW1 را در حدود ۱۷۵ میکرون نشان می دهد. در این نمونه لایه سفید تشکیل نشده است. در نمونه HW2 که در دمای ۵۰۰°C نیتریده شده عمق نفوذ کمتر است و به حدود ۵۰ میکرون می‌رسد. در این نمونه هم لایه سفید تشکیل نشد.

با افزایش زمان عملیات، عمق نفوذ و سختی افزایش می‌یابد. شکل۲ تصویر متالوگرافی مقطع نمونه HW3 را نشان می‌دهد. در این نمونه لایه سفید با ضخامت ۵ میکرون دیده می‌شود که به دلیل دما و زمان بالای عملیات، تشکیل شده است. به نظر می‌رسد لایه نفوذی مرز مشخصی با زمینه ندارد و نیتریدهای آلیاژی به صورت پراکنده در عمق نمونه تشکیل شده است اما به طور متوسط عمق نفوذ تا ۳۰۰ میکرون اندازه‌گیری شد (شکل ۳). در این نمونه بهترین نتایج از نظر خواص تریبولوژیکی بدست آمد. شکل٤ نمودار کاهش وزن پین و نمونه‌ها را در مسافت ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهد. با افزایش دمای عملیات تا ۵۷۰°C مقاومت به سایش نمونه‌ها افزایش می‌یابد به طوری که کاهش وزن پین بیش از دو برابر نمونه عملیات شده در ۵۰۰°C است.

چنانچه مشاهده می‌شود بین افزایش در مقاومت به سایش و پارامترهای نیتراسیون پلاسمایی ارتباط نزدیکی وجود دارد. به عنوان مثال با افزایش دمای نیتراسیون، کاهش وزن نمونه کمتر و کاهش وزن پین بیشتر می‌شود. زمان عملیات نیز بر ضخامت و عمق نفوذ تاثیر مثبت و مستقیم دارد اما نه به اندازه دما. بین ضخامت لایه نیتریده شده و سختی با مقاومت به سایش نیز ارتباط مستقیم وجود دارد. گرچه معمولاً لایه سفید تاثیر منفی بر مقاومت به سایش دارد، اما به دلیل عمق نفوذ زیاد نمونه نیتریده شده در ۵۷۰°C تاثیر منفی لایه سفید بر مقاومت به سایش جبران می‌شود.

پس از انجام آزمایش‌های متالورژیکی، آزمایش عملی برای فولاد 1.2367 مورد استفاده در قالب‌های اکستروژن مس انجام گرفت. قالب‌های اکستروژن در شرایط تنشی زیاد، دمای بالا (٦۰۰ تا ۹۰۰°C) و سایش شدید قراردارند. فرسایش قطعات در این شرایط کاری معمولا به صورت چین خوردگی و تغییر شکل پلاستیک دهانه ورودی قالب، سایش قسمت‌های ورودی و میانی قالب، سایش خراشان و میکرو ترک ظاهر می شود. عمر مفید این قالب‌ها ۱۰ لقمه مسی در نمونه نیتریده نشده است. با تخریب هر قالب وقت و هزینه

بالایی صرف توقف خط و تعویض قالب می شود.با انجام سیکل نیتراسیون پلاسمایی چین خوردگی قالب بعد از ٤٠ بار اکسترود اتفاق افتاد که نشان دهنده بهبود موثر فرایند اکستروژن با استفاده از این عملیات می باشد.

در نمونه فولاد ابزار ۱/۲۵٤۲ که برای سنبه پانچ ورق‌های فولادی با ضخامت ۱۲ میلیمتراستفاده می شود تخریب به دو دلیل عمده صورت می گیرد؛ یا به علت پیچیدگی سنبه ناشی از سختی پایین و عملیات حرارتی کونچ و تمپر نامناسب (شکل ۵) که عمر مفید سنبه را به کمتر از ۵۰۰ ضربه می رساند و یا به دلیل خراش ناشی از تماس با ماتریس در حین کار. عیب اول با عملیات حرارتی مناسب و ایجاد ساختار مارتنزیت تمپر شده با سختی ٤٥HRC رفع شد و عملیات نیتراسیون پلاسمایی به افزایش مقاومت به سایش خراشان قطعه کمک کرد به طوری که سختی پس از نیتراسیون به ۱۱۰۰ ویکرز و عمق نفوذ، ۲۰۰ میکرون رسید و عمر کارکرد سنبه‌ها پس از نیتراسیون، ۱۵۰۰۰ ضربه برآورد شد.

نتیجه گیری

قالب‌های اکستروژن در کارخانه‌های مختلف به دو دلیل عمده مستهلک می‌شود. دلیل اول چین خوردگی و تنگ شدن بیش از حد دهانه ورودی قالب که نتیجه آن کاهش قطر محصول خواهد بود و دلیل دوم خراش قالب روی سطح محصول می‌باشد. با افزایش سختی لایه‌های سطحی به روش نیتراسیون پلاسمایی، مقاومت به سایش قالب‌ها در حد چشمگیری افزایش می یابد. علاوه بر این که تاثیر مثبتی در کاهش چین خوردگی دهانه‌های قالب دارد که این امر باعث ثبات ابعادی بیشتر محصول خواهد شد.

تشکر و قدردانی

آزمایشات نیتراسیون پلاسمایی این تحقیق در مرکز پژوهش و مهندسی سطح ایران انجام گرفته که به این وسیله قدردانی می شود.

مراجع

[1] “ASM Handbook”, 1991, Vol. 4 Heat Treating.
[2] E. J. Miola, S. D. de Souza, M. Olzon-Dionysio, D. Spinelli, C. A. dos Santos, “Nitriding of H-12 tool steel by direct-current and pulsed plasmas”, Surface and Coatings Technology, 1999, 116–119, pp.347–351.
[3] J. L. Albarran, J. A. Ju&rez-Islas and L. Martinez, “Nitride width and microhardness in H-l 2 ion nitrided steel”, Materials Letters, 1992, 15, pp. 68-72.

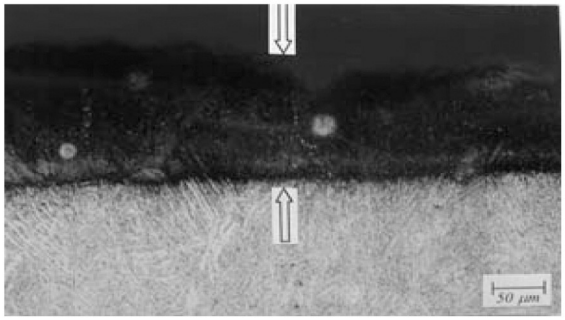
[4] A. E. Zeghni, M. S. J. Hashmi, “The effect of coating and nitriding on the wear behaviour of tool steels”, Journal of Materials Processing Technology, 2004,155–156, pp. 1918–1922.
[5] M. Uma DEVI, “Damage Mechanisms in Salt Bath Nitro-carburised and Plasma Nitrided Hot Forging Dies of H11 Tool Steel”, ISIJ International, 2002, Vol. 42, No. 5, pp. 527–533.
[6] M. Uma Devi, T. K. Chakraborty, O. N. Mohanty, “Wear behaviour of plasma nitrided tool steels”, Surface and Coatings Technology, 1999, 116–119, pp. 212–221.
[7] F. Borgioli, E. Galvanetto, A. Fossati, T. Bacci, “Glow-discharge nitriding and post-oxidising treatments of AISI H11 steel”, Surface and Coatings Technology, 2002,162, pp.61–66.
[8] C. Kwietniewski, W. Fontana , C. Moraes , A. da S. Rocha , T. Hirsch , A. Reguly “Nitrided layer embrittlement due to edge effect on duplex treated AISI M2 high-speed steel”, Surface and Coatings Technology, 2004, 170, pp. 27–32.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولادهای 1.2367 و 1.2542.

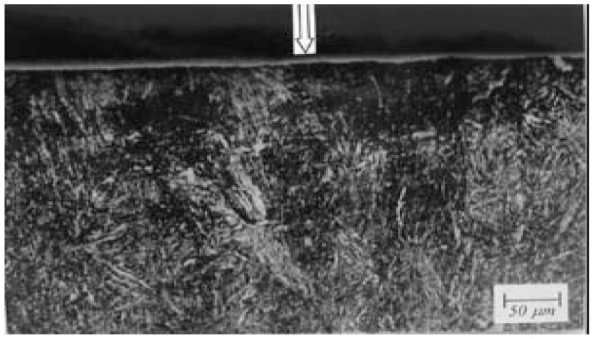
نوع فولاد	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%V	%Mo	%W
1.2367	۰/۴	۰/۴	۰/۴۵	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۵	۰/۴	۳	–
1.2542	۰/۴۵	۰/۹	۰/۳	۰/۰۳۵	۰/۰۳	۱/۱	۰/۱۵	–	۲

جدول ۲. سیکل‌های نیتراسیون انجام شده روی فولاد1.2367.

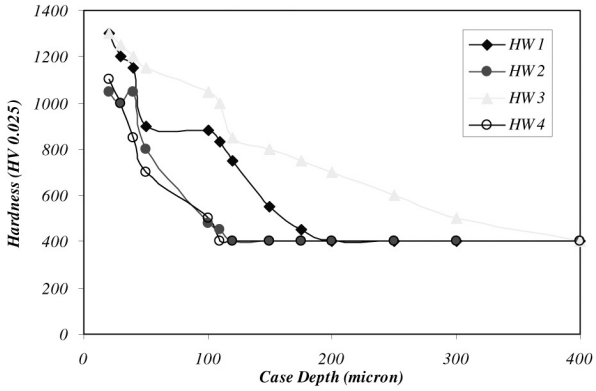
شماره نمونه	دمای عملیات (°C)	زمان عملیات (hr)	فشار (torr)
HW1	۵۷۰	۷	~۱۰
HW2	۵۰۰	۷	~۱۰
HW3	۵۷۰	۱۲	~۱۰
HW4	۵۰۰	۱۲	~۱۰



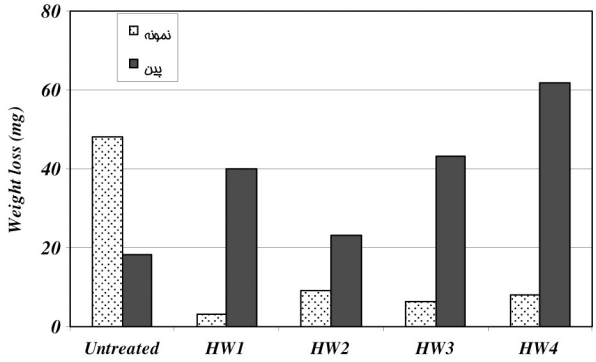
شکل ۱. عمق لایه سخت شده (لایه نفوذی)در نمونه HW1.



شکل ۲. عمق لایه سخت شده (لایه نفوذی)در نمونه HW3.



شکل ۳. منحنی تغییرات سختی نمونه‌های نیتریده شده فولاد1.2367.



شکل ٤. کاهش وزن نمونه و پین در آزمایش سایش با نیروی kg ۲۱ در مسافت ۱۰۰۰ متر برای نمونه نیتریده نشده و نمونه‌های HW1 تا HW4.

شکل ۵. پیچیدگی سنبه پس از پانچ ۵۰۰ سوراخ به دلیل سختی پایین.