

بررسی تأثیر عملیات‌های حرارتی سطحی مختلف بر خواص سایشی فولاد 16MnCr5 مورد استفاده در محور فرعی اسپیندل ماشین افزار

میر نریمان یوزباشی* استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه جامع علمی کاربردی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

علی الماسی فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه جامع علمی کاربردی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

چکیده

درگیری سطوح اسپیندل مورد استفاده در ماشین‌افزار با تکیه‌گاه، باعث ایجاد سایش در سطح اسپیندل شده و در نتیجه عدم کارایی اسپیندل و افت کیفیت محصول خروجی را در پی خواهد داشت. مطابق اطلاعات به دست آمده از کارخانجات فعال در حوزه ماشین‌افزار، محور فرعی اسپیندل‌ها از جنس فولاد 16MnCr5 تهیه می‌شوند. در تحقیق حاضر، تأثیر عملیات‌های حرارتی سطحی کربن‌دهی، کربونیتروژن‌دهی، نیتروکربن‌دهی و ابتدا نیتروژن‌دهی سپس کربن‌دهی (به عنوان یک روش تجربی) روی خواص سایشی فولاد 16MnCr5، به منظور افزایش عمر کاری اسپیندل مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش سایش مورد استفاده در این تحقیق، از نوع بلوک روی رینگ می‌باشد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمون ریزسختی سنجی و متالوگرافی جهت تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد نمونه‌هایی که تحت عملیات سطحی حرارتی کربونیتروژن‌دهی قرار گرفته‌اند؛ از خواص سایشی بهتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها برخوردار هستند. همچنین، تصاویر به دست از میکروسکوپ الکترونی، حاکی از عدم تأثیر نه چندان زیاد، عملیات‌های سطحی بر نحوه شکست نمونه‌ها بوده است.

واژه‌های کلیدی: سایش؛ 16MnCr5؛ کربن‌دهی؛ کربونیتروژن‌دهی؛ نیتروکربن‌دهی؛ نیتروژن‌دهی.

The effect of Various Surface Heat Treatments on Wear Behavior of 16MnCr5 Steel used in Spindles Axis of Machine Tools

M. N. Yoozbashi Materials Engineering, University of Applied Science and Technology of East Azerbaijan, Tabriz, Iran

A. Almasi Materials Engineering, University of Applied Science and Technology of East Azerbaijan, Tabriz, Iran

Abstract

The wear, as a result of contacting of spindle surface with bearings, can be caused the inefficiency of spindle and drop quality of produced parts. According to obtained information from factories operating in the field of machine tools, the axis of spindles made from 16MnCr5 steel. In the current work, the effects of different surface heat treatments involving; carburizing, carbonitriding, nitrocarburizing and first carburizing then nitriding (as an empirical method) on wear behavior of 16MnCr5 have been investigated to increase the spindle service life. The used wear test type was block on ring. In addition, Scanning Electron Microscopy (SEM), microhardness test and metallography have been used for further analysis of results. The wear results showed that, the samples treated by carbonitriding, has a good wear resistance compared with the other samples. Also, the analysis images from the SEM show that surface treatments has not had significant effect on the fracture mode of the samples.

Keywords: Wear; 16MnCr5; Carburizing; Carbonitriding; Nitrocarburizing; nitriding.

مهدوی‌نژاد و همکاران [۶]، کلار [۷]، کیم و همکاران [۸]، زاهدی و همکاران [۹]، کمیوس و همکاران [۱۰] اشاره کرد.

حرکت با دور بالا باعث ایجاد سایش محور فرعی اسپیندل شده و لازم است با استفاده از عملیات حرارتی سطحی، مقاومت سایشی بهبود یابد [۱۱ و ۱۲]. روش‌های بهبود مقاومت سایشی شامل استفاده از فرآیندهای مقاوم‌سازی سطحی است. روش معمول بهبود خواص سایشی فولاد 16MnCr5، کربن‌دهی می‌باشد که در مقاله‌های متعددی، شرایط بهینه و خواص به دست آمده، مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۳-۱۹]؛ ولی در منابع محدودی، به مطالعه و مقایسه سایر عملیات‌های حرارتی سطحی پرداخته شده است. در تحقیق حاضر، به منظور افزایش عمر و مقاومت به سایش محور فرعی اسپیندل‌ها، فولاد مذکور، تحت عملیات سطحی حرارتی مختلف قرار گرفته است.

۱- مقدمه

یکی از اجزای ماشین‌افزارها اسپیندل می‌باشد. وظایف مهم اسپیندل‌ها مرکزیت بخشیدن و نگهداری ابزار یا قطعه‌کار و ایجاد حرکت چرخشی یا انتقالی چرخشی می‌باشد [۱]. نکته‌ای که در مورد عدم کارایی اسپیندل‌ها حائز اهمیت می‌باشد؛ تماس اسپیندل با تکیه‌گاه موجب کاهش عمر اسپیندل می‌شود و همچنین تغییر شکل بیش از حد آن، منجر به عدم کارایی و نهایتاً خرابی آن می‌گردد. در این خصوص طراحی اسپیندل با استفاده از روابط نظری حاکم بر طراحی اجزا ماشین انجام شده است [۲]. امروزه بسیاری از سازندگان معتبر، ماشین‌افزارهای با دور بالای صد هزار دور بر دقیقه را مطرح می‌کنند [۳]. در همین راستا مطالعات زیادی پیرامون شبیه‌سازی شرایط کاری و گرمایی اسپیندل‌ها [۴ و ۵] انجام گرفته است؛ که می‌توان به کار

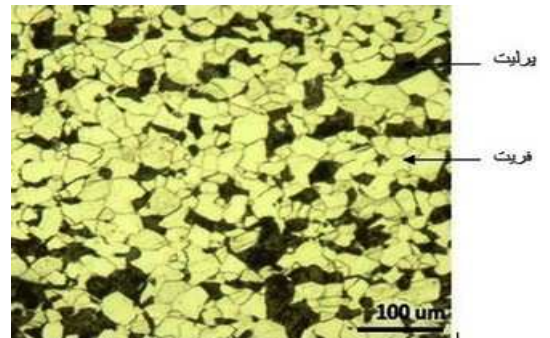
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: nariman_yoozbashi@yahoo.com

۲- مواد و روش تحقیق

جدول ۱ آنالیز شیمیایی و شکل ۱ ریزساختار فولاد 16MnCr5 را قبل از عملیات حرارتی سطحی نشان می‌دهد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی فولاد 16MnCr5

عنصر	C	Si (حداکثر)	Mn	P	S	Cr
درصد وزنی	0.14-0.19	0.4	1.00-1.30	0.035	0.025	0.80-1.10



شکل ۱- ریز ساختار فولاد 16MnCr5 قبل از عملیات حرارتی

نمونه‌های سایش از جنس فولاد 16MnCr5 در ابعاد ۱۰×۱۰×۲۰ میلی‌متر بریده شده و طبق جدول ۲ نام‌گذاری شدند.

جدول ۲- نام‌گذاری نمونه‌های مختلف

ردیف	کد	شرح
1	NTS	نمونه شاهد (بدون هیچ گونه عملیات حرارتی)
2	CNS	نمونه کربونیتروژن دهی
3	NCS	نمونه نیتروکربن دهی
4	FNTCS	ابتدا نیتروژن دهی و سپس کربن دهی

در ادامه عملیات حرارتی سطحی نمونه‌ها به شرح ذیل انجام شد:

۱- کربن‌دهی

۱-۱- پیش گرمایش در دمای 550°C به مدت ۲ ساعت؛

۱-۲- کربن‌دهی در دمای 920°C به مدت ۵ ساعت؛

۱-۳- سختکاری در دمای 840°C به مدت ۲ ساعت و کوئنچ در روغن؛

۱-۴- برگشت در دمای 200°C به مدت ۱ ساعت.

۲- کربونیتروژن‌دهی

۲-۱- پیش‌گرمایش در دمای 550°C به مدت ۲ ساعت؛

۲-۲- کربونیتروژن‌دهی در دمای 920°C به مدت ۵ ساعت در ترکیب گازی ۶۰٪ هوا، ۲۰٪ آمونیاک و ۲۰٪ LPG و با فشار گاز ۱ بار؛

۲-۳- برگشت در دمای 200°C به مدت یک ساعت.

۳- نیتروکربن‌دهی

نیتروکربن‌دهی در دمای 570°C به مدت ۱۰ ساعت در ترکیب گازی ۴۰٪ نیتروژن، ۴۰٪ آمونیاک و ۲۰٪ LPG و با فشار گاز ۱ بار انجام شد.

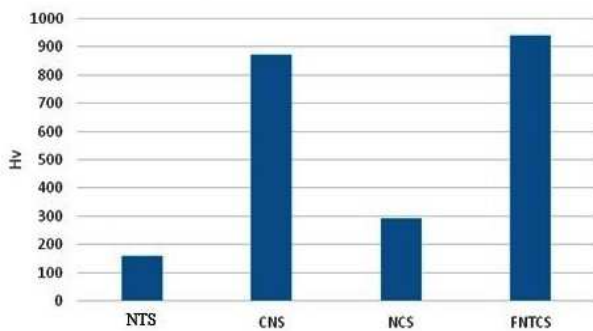
۴- عملیات تجربی ابتدا نیتروژن دهی سپس کربن دهی

در این عملیات که به عنوان روش تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ ابتدا نمونه‌ها در دمای 540°C به مدت ۱۰ ساعت در ترکیب گازی ۴۰٪ آمونیاک، ۶۰٪ نیتروژن و با فشار گاز ۱ بار نیتروژن‌دهی شدند. سپس نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده تحت عملیات کربن‌دهی قرار گرفتند. یعنی هر دو عملیات نیتروژن‌دهی و کربن‌دهی به صورت مجزا انجام گرفت.

پس از انجام عملیات‌های حرارتی سطحی مختلف، سطح مقطع نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین نمودار ریزسختی نمونه‌ها از سطح تا مغز نمونه توسط دستگاه ریزسختی‌سنجی تهیه شد. برای بررسی عمق نفوذ کربن، علاوه بر نمودار ریزسختی به دست آمده، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به طیف‌سنج اشعه ایکس استفاده شد. برای تعیین میزان مقاومت به سایش نمونه‌ها (در حالت خشک) از دستگاه آزمون سایش از نوع بلوک روی رینگ استفاده شد. آزمایش‌های سایش با نیروی ۱۵۰ نیوتن و سرعت ثابت ۳/۷ متر بر ثانیه به مدت ۴۰ دقیقه انجام گردید. برای تعیین نرخ سایش، نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمون توسط ترازوی دیجیتال توزین شدند و سپس کاهش وزن هر نمونه، هر ۱۰ دقیقه یک‌بار، اندازه‌گیری شدند. در کل برای هر نمونه، ۳ بار توسط ترازوی دقیق AND با دقت چهار رقم اعشار، کاهش وزن ثبت گردید.

۳- نتایج و بحث

هدف اصلی از انجام عملیات سخت‌کاری سطحی، افزایش سختی می‌باشد. برای همین منظور، اولین پارامتری که بعد از انجام عملیات حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد سختی سطح نمونه‌ها می‌باشد که نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- سختی ویکرز سطح نمونه‌های عملیات حرارتی شده

مطابق شکل، کمترین سختی مربوط به نمونه نیتروکربن‌دهی شده و بیشترین مقدار سختی مربوط به نمونه‌های تجربی ابتدا نیتروژن‌دهی و سپس کربن‌دهی می‌باشد. این رفتار ناشی از تشکیل ترکیبات نیتريدی در سطح نمونه می‌باشد. همچنین کاهش نسبی

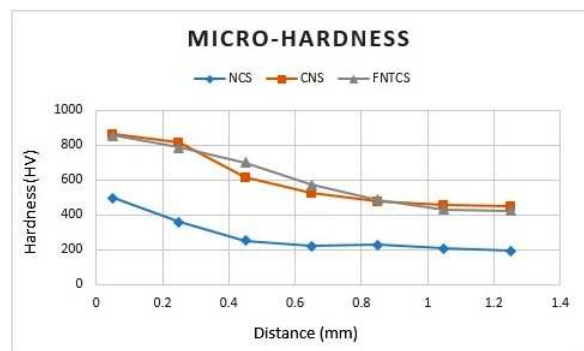
در شکل ۴ الف، سطح نمونه کربونیتروژن دهی شده نشان داده شده است. لایه سفید رنگ مشخص شده، مربوط به تشکیل لایه نیتريد طی فرآیند کربونیتروژن دهی می‌باشد. ضخامت این لایه سفید رنگ نسبتاً کم می‌باشد که دلیل آن، اختلاف دمای نیتروژن-دهی با کربونیتروژن دهی و مدت زمان انجام این عملیات می‌باشد. با بررسی ریزساختار به دست آمده در شکل ۴ ب، در بزرگنمایی بالا، ملاحظه می‌شود که مارتنزیت تشکیل شده در این نمونه‌ها، کمتر بوده و آستنیت باقی‌مانده به همراه پرلیت در ریزساختار مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، در اثر نفوذ نیتروژن، مقدار آستنیت باقی‌مانده و همچنین پایداری آن افزایش یافته است که کاهش سختی را در پی داشته است. با بررسی پراش این نمونه، می‌توان تشخیص داد که نیتريد به طور کامل در این نمونه تشکیل شده است. مطابق شکل ۵، قله‌های مشخص شده، فاز نیتريد را نشان می‌دهند.

در شکل ۴ ج، سطح نمونه نیتروکربن دهی شده نشان داده شده است. در این نمونه، تشکیل یک لایه نازک سطحی که خود شامل دو منطقه بسیار نازک سفیدرنگ و یک ناحیه آبی رنگ است، کاملاً مشهود است. می‌توان پیش‌بینی کرد که این لایه سفید رنگ شامل کربونیتريد اپسیلین و نیتريد کروم است؛ ولی با بررسی پراش این نمونه (شکل ۶) ملاحظه می‌شود سه فاز نیتريد آهن، کاربید آهن و Fe_3N در آن تشکیل شده است. نکته قابل توجه، عدم نفوذ کربن و نیتروژن به لایه‌های داخلی نمونه بوده، به طوری که ریزساختار در نواحی داخلی هیچ تغییری نسبت به نمونه خام نکرده است. دلیل این اتفاق، محدوده دمایی عملیات نیتروکربن دهی می‌باشد که در منطقه فریتی و در دمایی کمتر از $675^{\circ}C$ انجام شده است. در این دما، نمونه آستنیت نشده و تغییری اتفاق نیفتاده است. در شکل ۴ د، ریزساختار نمونه ابتدا نیتروژن دهی سپس کربن دهی (روش تجربی) آورده شده است. در این نمونه، لایه سفیدرنگ کاملاً مشهود می‌باشد که همانند نمونه نیتروژن دهی شده متشکل از نیتريد آهن است. عملیات بعدی کربن دهی که بر روی نمونه انجام گرفته است؛ تأثیری روی ریزساختار نگذاشته است؛ که دلیل آن ممانعت نیتريد آهن از تشکیل شده در سطح نمونه در حین عملیات نیتروژن دهی شده، از نفوذ کربن به داخل ساختار می‌باشد. تنها تأثیر عمیاتی که بر روی می‌توان فقط در ریزتر شدن اندازه دانه‌های داخلی مشاهده کرد که ریزتر از نمونه نیتروژن دهی می‌باشند. همین ریزدانه بودن را می‌توان عاملی موثر بر بیشتر بودن سختی این نمونه‌ها، نسبت به سایر نمونه‌ها دانست.

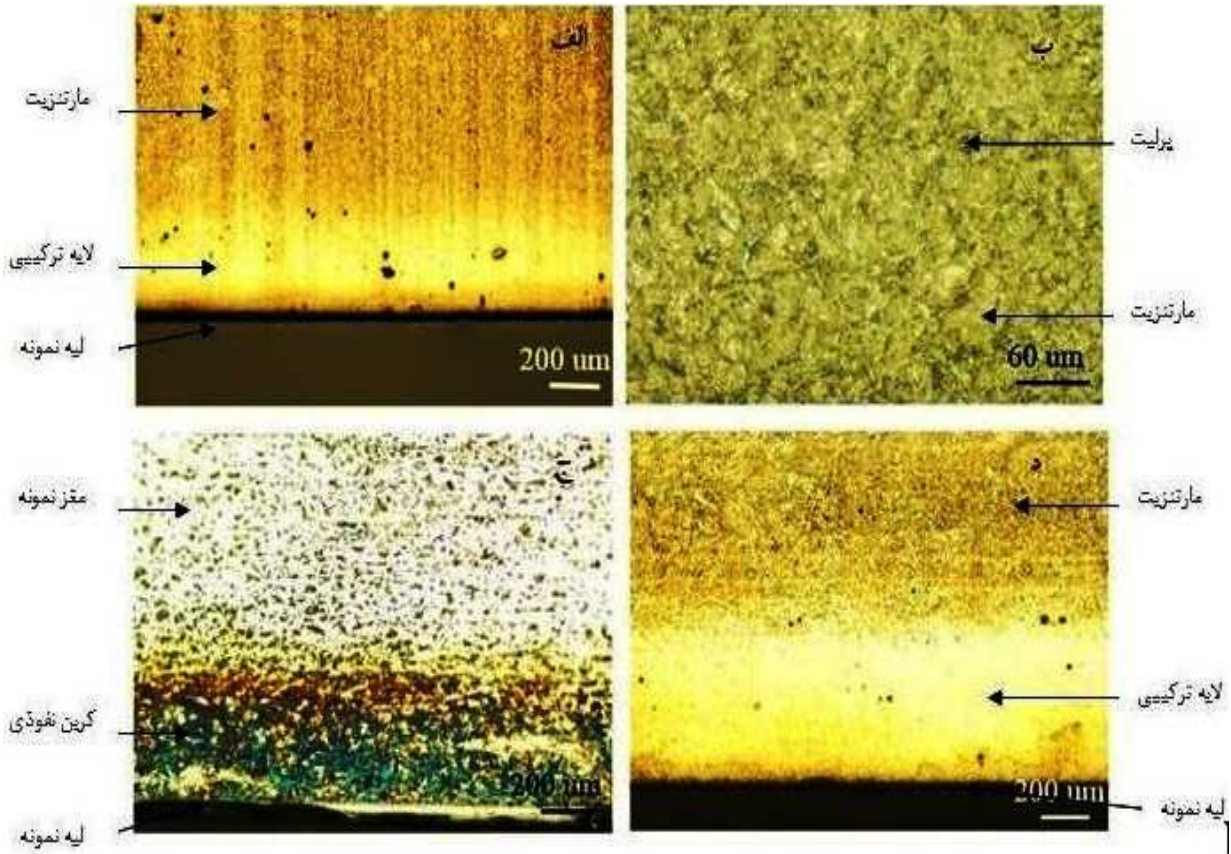
اصطکاک و نرخ سایش، شدیداً وابسته به شرایط حرکت نسبی-اند و تغییرات نسبتاً جزئی در شرایط، می‌تواند تأثیری در سازوکار حاکم و نرخ سایش مربوطه ایجاد کند. بنابراین کنترل دقیق و نظارت بر شرایط انجام آزمایش، برای دستیابی به نتایج قابل قبول ضروری خواهد بود. در پژوهش حاضر آزمون سایش بر روی نمونه‌ها از نوع بلوک روی رینگ بوده و نتایج به صورت کاهش وزن نمونه‌ها بیان شده است که حاصل تفریق وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون سایش است. در شکل ۷ الف، تصویر نمونه‌های مورد استفاده آزمون سایش و شکل ۷ ب، تصویر نمونه‌های مورد استفاده بررسی ریزساختاری آورده شده است. در شکل ۸، نمودار مقایسه‌ای وزن از دست رفته نمونه‌ها

سختی سطح نمونه کربونیتروژن دهی شده نسبت به نمونه‌های ابتدا نیتروژن دهی و سپس کربن دهی شده را می‌توان ناشی از عملیات برگشت این سری از نمونه‌ها دانست که کاهش سختی را در پی داشته است.

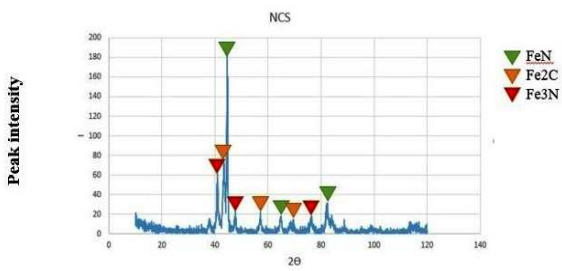
با توجه به شکل ۳، افت سختی سطح طی عملیات نیتروکربن-دهی اتفاق افتاده است و سختی در عمق 0.4 میلی‌متری به شدت کاهش یافته است. دلیل این افت را می‌توان به ضخامت لایه تشکیل شده نسبت داد. سختی بعد از این عمق، در حدود فلز خام می‌باشد که می‌توان آن را به دمای عملیات که زیر دمای $675^{\circ}C$ است، نسبت داد. برای تعیین عمق لایه سخت شده، با اتکاء به مشخص کردن محل سختی 550 ویکرز، عملی نمی‌باشد؛ زیرا سختی بیشینه بدست آمده در این نمونه در سطح در حدود 550 ویکرز می‌باشد. با این وجود و با توجه به تغییرات سختی در شکل ۳، عمق نفوذ در این نمونه در حدود 0.4 میلی‌متر می‌باشد. عناصر منگنز و کروم موجود در فولاد، پایداری سمنتیت را در پی دارند؛ در حالی که عنصر سیلیسیم، باعث تجزیه فاز سمنتیت می‌شود. فولاد مورد استفاده فولاد آلیاژی هیپوپوتکتوئید می‌باشد؛ لذا قبل از دمای یوتکتوئید، سمنتیتی تشکیل نشده است. همچنین عنصر سیلیسیم باعث تعویق کربن دهی می‌شود. می‌توان این تعویق را عاملی بر کاهش عمق نفوذ کربن دانست. مشاهده می‌شود که با اضافه شدن نیتروژن به روش کربن دهی (در روش کربونیتروژن دهی)، سختی نمونه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به طوری که عمق نفوذ بیشتر از 0.5 میلی‌متر می‌باشد. دلیل این کار را می‌توان به تشکیل فاز کربونیتريد اپسیلین و نیتريد کروم نسبت داد. همچنین وجود نیتروژن باعث کاهش سرعت بحرانی سرد شدن و در نتیجه افزایش سختی پذیری می‌شود. به همین دلیل سطح فولاد به مراتب سختی بالاتری دارد. همچنین نفوذ نیتروژن به داخل نمونه و بالا رفتن مقدار آن در نواحی داخلی و دورتر از سطح، باعث پایداری آستنیت شده که کاهش سختی در نواحی داخلی را می‌توان به این موضوع نسبت داد. با توجه به تصاویر ریزساختاری (شکل ۴ الف)، وجود آستنیت باقی-مانده در ریزساختار این سری از نمونه‌ها تأیید شده است. در روش کربونیتروژن دهی و نیتروکربن دهی، نفوذ کربن و نیتروژن تقریباً همزمان با یکدیگر اتفاق می‌افتد. در نمونه آزمایشی آخر، نفوذ کربن و نیتروژن به صورت جداگانه انجام شده است که سختی به دست آمده در این روش در حد قابل قبول بوده و عمق نفوذ سختی تقریباً بیشتر از تمامی نمونه‌ها، در حدود 0.7 میلی‌متر به دست آمده است.



شکل ۳- ریزسختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده



شکل ۴- الف) ریزساختار تشکیل شده در اثر عملیات کربونیتروژن دهی، ب) ریزساختار تشکیل شده در اثر عملیات کربونیتروژن دهی با بزرگنمایی بالاتر، ج) ریزساختار تشکیل شده در اثر عملیات نیتروکربن دهی و د) ریزساختار تشکیل شده در اثر عملیات نیتروژن دهی و سپس کربن دهی

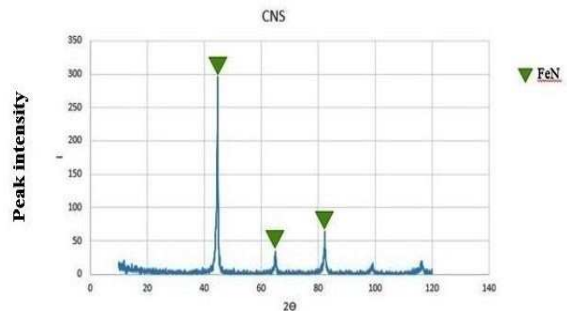


شکل ۶- پراش اشعه ایکس نمونه نیتروکربن دهی شده

بعد از آزمون سایش آورده شده است. مطابق شکل ملاحظه می شود انجام عملیات حرارتی سطحی، تأثیر زیادی در مقدار ماده از دست رفته، داشته است. نتایج توزین نمونه ها در جدول شماره ۳، بعد از ۴۰ دقیقه آزمون آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می توان تشخیص داد که تمامی عملیات حرارتی سطحی انجام شده، باعث بهبود خواص سایشی نمونه ها شده اند؛ ولی روش نیتروکربن دهی، علیرغم تشکیل همزمان نیتريد و کاربید، کمترین تأثیر ممکن را بر روی نمونه ها گذاشته است. بهترین رفتار سایشی را نمونه ی کربونیتروژن دهی از خود نشان داده است.



شکل ۷- نمونه های الف) آزمون سایش و ب) بررسی ریزساختاری

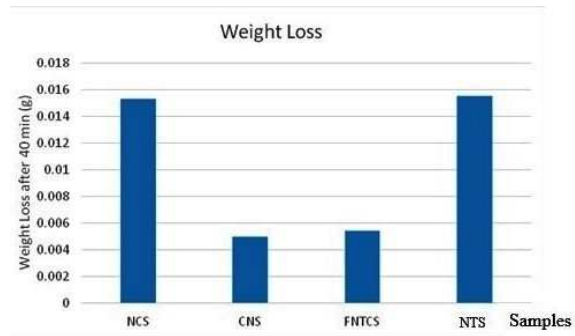


شکل ۵- پراش اشعه ایکس نمونه کربونیتروژن دهی شده

شده است، این نمونه دارای سطحی با سختی بالا و مقاوم به سایش به همراه مغزی نرم است. با دقت بیشتر در سطح سخت شده ملاحظه می‌شود که خود این سطح از دو ناحیه کاملاً مجزا تشکیل شده است. ناحیه‌ای با ریزساختار بسیار ریز در سطح و ناحیه‌ای با دانه‌های درشت‌تر در زیر آن که حالتی گذرا از دانه‌های ریز به درشت به سمت مغز نمونه را دارد.

در شکل ۹ ج، تصویر SEM نمونه ابتدا نیتروژن‌دهی و سپس کربن‌دهی به صورت جداگانه قرار گرفته است، آورده شده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، این نمونه ابتدا تحت عملیات نیتروژن‌دهی قرار گرفته است، به همین دلیل لایه نیتريدی تشکیل شده در این عملیات، مانع از نفوذ کربن در عملیات کربن‌دهی ثانویه شده است. در نتیجه تنها تأثیری که عملیات ثانویه کربن‌دهی بر ریزساختار این نمونه گذاشته است، رشد دانه‌ها و تخلخل‌های تشکیل شده در سطح نمونه می‌باشد. این موضوع در شکل ۹ ج، کاملاً مشهود است که تخلخل‌های بزرگتری را نسبت به نمونه‌ی نیتروژن‌دهی (شکل ۹ د) دارد.

آنالیز EDS لایه‌های تشکیل شده در نمونه‌های کربونیتروژن‌دهی شده در شکل ۱۰ الف نشان داده شده است. در این نمونه نیتروژن به میزان زیاد و مقدار کمی کربن ملاحظه می‌شود. در شکل ۱۰ ب، آنالیز EDS نمونه نیتروکربن‌دهی شده، آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نفوذ نیتروژن به مقدار زیاد نشان داده شده است و مقدار نفوذ کربن بسیار پایین است و دلیل آن دمای پایین عملیات می‌باشد.

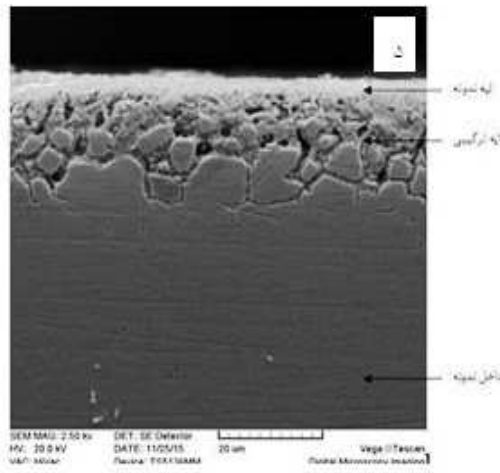
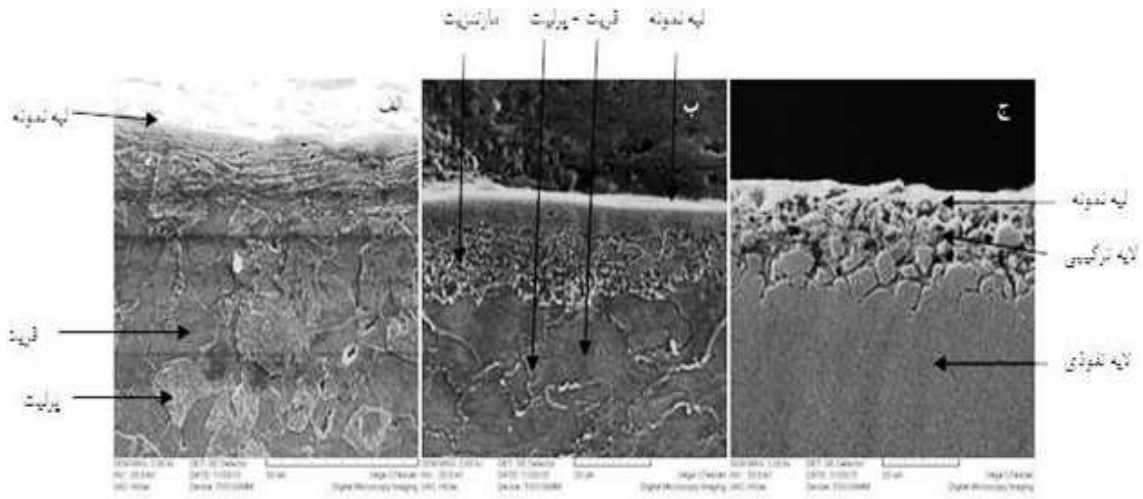


شکل ۸- مقدار جرم از دست رفته در اثر آزمون سایش بعد از ۴۰ دقیقه

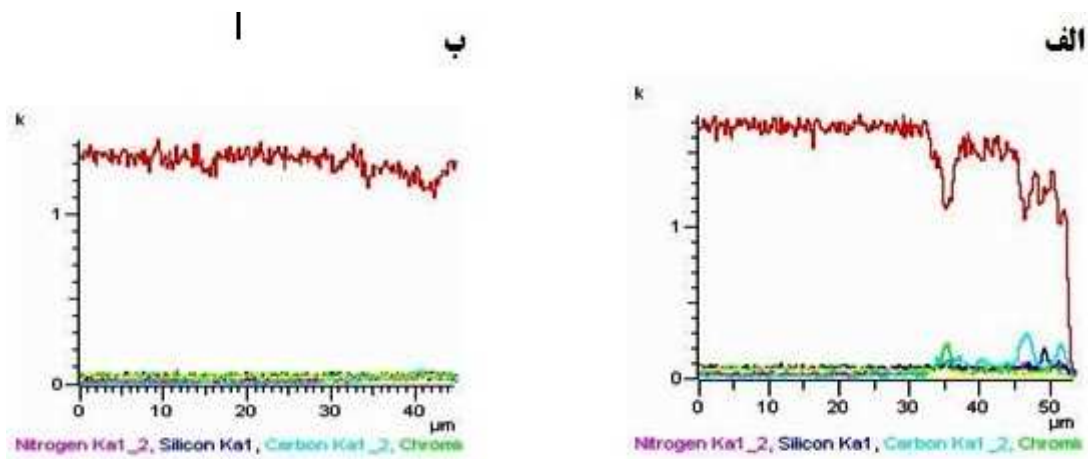
جدول ۳- وزن قطعات در آزمون سایش بعد از ۴۰ دقیقه

نمونه	وزن قبل از سایش	وزن بعد از سایش
نیتروکربن‌دهی	14.8909	14.8756
کربونیتروژن‌دهی	15.1226	15.1176
ابتدا نیتروژن‌دهی و سپس کربن‌دهی	15.1062	15.1008

برای تحلیل بیشتر رفتار سایشی و ریزسختی به دست آمده، بررسی‌های میکروسکوپی توسط SEM انجام شد. در شکل ۹ الف، تصویر SEM نمونه خام آورده شده است. با مقایسه این تصویر با تصویر SEM از نمونه کربونیتروژن‌دهی (شکل ۹ ب)، مشخص می‌شود که این عملیات تأثیر چندانی بر ریزساختار داخلی نمونه نگذاشته است؛ ولی باعث تشکیل یک لایه سخت در سطح بیرونی شده است که در تصاویر ریزساختاری تهیه شده هم کاملاً مشخص است. در واقع همان‌طور که در نمودار ریزسختی شکل ۳، نشان داده



شکل ۹- تصویر SEM الف) نمونه خام، ب) نمونه کربونیتروژن دهی شده،
ج) نمونه ابتدا نیتروژن دهی و سپس کربن دهی شده و د) ریزساختار تشکیل شده در اثر نیتروژن دهی



شکل ۱۰- آنالیز EDS الف) نمونه های کربونیتروژن دهی شده و ب) نمونه های نیتروکربن دهی شده

۴- نتیجه گیری

- ۱- در اثر عملیات‌های حرارتی سطحی کربن‌دهی، کربونیتروژن‌دهی، نیتروکربن‌دهی و نیتروژن‌دهی بعد کربن‌دهی (به عنوان یک روش تجربی)، خواص سایشی تمامی نمونه‌ها بهبود یافته است؛ روش نیتروکربن‌دهی، علیرغم تشکیل همزمان نیتريد و کاربید، کمترین تأثیر ممکن را روی نمونه‌ها گذاشته است. بهترین رفتار سایشی مربوط به نمونه کربونیتروژن‌دهی شده می‌باشد.
- ۲- کاهش سختی سطح رخ داده طی عملیات نیتروکربن‌دهی در عمق ۰/۴ میلیمتری را می‌توان به ضخامت لایه تشکیل شده و دمای عملیات حرارتی نسبت داد.
- ۳- در نمونه ابتدا نیتروژن‌دهی و سپس کربن‌دهی شده (عملیات تجربی)، لایه سفید رنگ متشکل از نیتريد‌های آهن، مشابه آنچه که در نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده وجود دارد؛ مشاهده می‌شود و عملیات بعدی کربن‌دهی که بر روی نمونه انجام گرفته است؛ تأثیری روی ریزساختار نگذاشته است که دلیل آن ممانعت نیتريد‌های تشکیل شده در سطح نمونه، در حین عملیات نیتروژن‌دهی، از نفوذ کربن به داخل ساختار می‌باشد.
- ۴- در نمونه اول نیتروژن‌دهی سپس کربن‌دهی (عملیات تجربی) تأثیری که عملیات کربن‌دهی روی نمونه گذاشته است را می‌توان فقط در اندازه دانه نمونه‌های داخلی متوجه شد که ریزتر از اندازه دانه‌های نمونه نیتروژن‌دهی می‌باشد. این ریزدانه بودن را می‌توان عاملی موثر بر بیشتر بودن سختی این نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها مخصوصاً نمونه نیتروژن‌دهی شده دانست.
- ۵- تصویر SEM نمونه کربونیتروژن‌دهی نشان می‌دهد که این عملیات تأثیر چندانی روی ریزساختار نگذاشته است؛ ولی باعث تشکیل یک لایه سخت در سطح بیرونی نمونه شده است.

۵- مراجع

- [1] Abele E., Altintas Y. and Brecher C., Machine tool spindle units, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 59, pp. 781-801, 2010.
- [2] Week M. and Bibring H., Handbook of Machine Tools, Vol. 2, Jhon Wiley, New York, 1984.
- [3] Honggi L. and Yung C.S., Analysis of bearing configuration effects on high speed spindles using an integrated dynamic thermo-mechanical spindle model. Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 347-364, 2004.
- [4] Gagnon V., Bouzgarrou B.C., Ray P. and Barra C., Dynamics analysis and design optimization of high speed spindle bearing system, Springer, pp. 505-518, 2007.
- [5] Niizeki S., Ceramic Bearings for Special Environments, Motion & Control-NSK, Vol. 1, pp. 5-12, 1996.
- [6] مهدوی نژاد ر. و غلامی نژاد ثانی آبادی م., آنالیز تنش‌های مکانیکی و حرارتی در اسپیندل ماشین‌های تراش. نشریه دانشکده فنی، جلد (۴) ۴۱، ص ۵۳۳-۵۲۵.
- [7] Kolar P. and Holkup T., Prediction of machine tool spindle's dynamics based on a thermo-mechanical model, MM Science Journal, pp. 166-171, 2010.
- [8] Kim J.D., Zverv I. and Lee K. B., Thermal model of high speed spindle units, ScriRP, pp. 306-315, 2010.
- [9] Zahedi A. and Movahhedy M.R., Thermo-mechanical modeling of high speed spindles, Scientia Iranica B, Vol. 19(2), pp. 282-293, 2012.
- [10] Campos P.H.S., Ferreira J.R., de Paiva A.P., Balestrassi P.P. and Davim J.P., Modeling and optimization techniques in machine of hardened steels: a brief review, Advanced Material Science, Vol. 34, pp. 141-147, 2013.

[11] Holmberg K. and Matthews A., Coating Tribology, 2nd Edition, Elsevier, 1994.

[12] Shea M.M. and Rytz E.F., Austempering Nodular Iron for optimum toughness, Transactions of the American Foundrymen's Society, Vol. 94, pp. 683-688, 1986.

[13] Sultan J.N., Effect of austenizing and tempering heat treatment temperatures on the fatigue resistance of carburized 16MnCr5 (ASTM 5115) steel, Tikrit Journal of Engineering Sciences, Vol. 20(4), pp. 1-10, 2013.

[14] Kula P., Pietrasik P. and Dybowski K., Vacuum carburizing-process optimization, 13th international scientific conference on achievements in mechanical and materials engineering, Poland, 2005.

[15] Wang S., Yue W., Fu Z., Wang C., Li X. and Liu J., Study on the tribological properties of plasma nitrided bearing steel under lubrication with borate ester additive. Tribology international, Vol. 66, pp. 259-264, 2013.

[16] Sert H., Can A., Arikian H., Selcuk B. and Toprak H., Wear behavior of different surface treated cam spindles, Wear, Vol. 260, pp. 1013-1019, 2006.

[17] Mann B.S. and Prakash B., High temperature friction and wear characteristics of various coating materials for steam valve spindle application, Wear, Vol. 240, pp. 223-230, 2000.

[18] Burbank J. and Woydt M., Comparison of slip rolling behavior between 20MnCr5 gear steel, 36NiCrMoV1-5-7 hot working tool steel and 45SiCrMo6 spring steel, Wear, Vol. 328, pp. 28-38, 2015.

[۱۹] دستمزد ن.، اسحق بیگی ع. و اشرفی‌زاده ف.، سختکاری فولاد

16MnCr5 و Ck45 در ابزارهای خاک‌ورز، هشتمین کنگره ملی

مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون، دانشگاه

فردوسی مشهد. بهمن ۱۳۹۲.