

تأثیر زمان و دما در عملیات سرد کردن زیر صفر بر رفتار سایشی فولاد ۱/۲۴۳۶۵

- امین اخباری زاده^۱، محمدعلی گلگذار^۲، علی شفیعی^۳، مجتبی خلقی^۴
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۲- استاد دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۳- استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۴- مسئول واحد تحقیق و توسعه شرکت سخت افزا

چکیده

برای حذف آستنیت باقیمانده از برخی از انواع فولادهای ابزار تحت شرایطی می توان از عملیات تکمیلی سرد کردن زیر صفر استفاده کرد. فاز نیمه پایدار آستنیت از طرفی مقاومت به سایش را کاهش داده و از طرفی دیگر با تبدیل شدن به مارتنزیت باعث تغییر ابعاد ناخواسته می شود و در نتیجه دقت ابعادی کاهش می یابد. این عملیات در مورد فولادهایی که نیاز به دقت ابعادی بالایی دارند و یا فولادهایی که نیاز به مقاومت به سایش بالایی دارند به نحو وسیعی به کار می رود. در این تحقیق تاثیر عملیات سرد کردن زیر صفر تا دمای 63°C و تاثیر زمان نگهداری در دمای مزبور بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که عملیات زیر صفر کاری باعث بهبود رفتار سایشی فولاد مورد مطالعه می شود. این بهبود در حدی است که می توان زمان نگهداری بیشتر را جایگزین دمای پایین تر نمود. در حالت کرایو ۲۰ رفتار سایشی به میزان $4\% - 7\%$ نسبت نمونه ای که کرایو نشده بهبود نشان داد. این میزان برای نمونه های کرایو ۴۰ و کرایو عمیق (غوطه وری در نیتروژن مایع) به ترتیب 10% و 40% مشاهده شد.

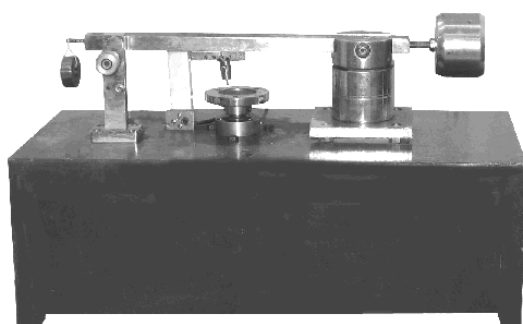
کلیدواژه:

عملیات زیر صفر؛ سایش؛ کرایو.

مقدمه

پذیرفته تر از آستنیت باقیمانده است زیرا آستنیت باقیمانده با تبدیل شدن به مارتنزیت تغییر ابعادی ناخواسته در قطعه پدید می آید. به همین دلیل عملیات کرایو (سرد کردن زیر صفر) در مورد فولادهایی که نیاز به دقت ابعادی و یا مقاومت به سایش بالایی دارند به شکل وسیعی به کار می رود [۱]. در این فرایند، بعد از عملیات کوئنچ، قطعه را در شرایط کنترل شده و با نرخ سرد کردن مناسب تا دمای مورد نظر سرد می کنند. اگر این

برای حذف آستنیت باقیمانده از برخی از انواع فولادهای ابزار امروزه از عملیات تکمیلی سرد کردن زیر صفر استفاده وسیعی می شود. آستنیت باقیمانده به عنوان یک فاز ضعیف در کاهش عمر قطعه نقش بسزایی دارد. از طرفی در قطعاتی که تحت سایش شدید قرار می گیرند مارتنزیت باز پخت شده بسیار



شکل (۱): دستگاه سایش مورد استفاده.

جدول (۱): درصد عناصر آلیازی فولاد مورد استفاده

Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Co	W	Va
۸۳/۰۲	۰/۲۱	۰/۰۲۲۵	۰/۰۴۸۶	۰/۰۱۶۹	۰/۱۲۰	۰/۰۵۴۰	۰/۰۵۲۵	۰/۰۷۵۸	۰/۰۲۰

جدول (۲): سختی نمونه ها قبل و بعد از تمپر

سختی میانگین (قبل از تمپر) HRC	سختی میانگین (بعد از تمپر) HRC	نمونه
۰/۷±۶۴	۰/۵±۶۲	کوئنچ
۰/۵±۶۵	۰/۶±۶۲/۵	کرایو ۲۰
۰/۴±۶۶/۷	۰/۴±۶۴	کرایو عمیق
۰/۴±۶۵/۵	۰/۵±۶۳	کرایو ۴۰

دورمر^۵ تاثیر کرایو عمیق را بر فولاد ابزار D2 بررسی کردند [۵]. پائولین^۶ نشان داد که عملیات کرایو را می توان نوعی از عملیات تکمیلی در عملیات حرارتی متداول به منظور حذف آستنیت باقیمانده و افزایش عمر قطعات در نظر گرفت [۶]. موهان لال^۷ تحقیقات وسیعی به شکل مقایسه ای در مورد عملکرد T1 M2 و D3 به وسیله آزمون سایش فلاتنک و لغزشی انجام داد. این تحقیقات نشان داد بعد از عملیات کرایو این فولادها به ترتیب ۳٪، ۱۰٪ و ۱۰/۶٪ بهبود نشان می دهند [۷]. منگ و تاگاشیرا^۸ نشان دادند بعد از عملیات کرایو بر روی فولاد Fe-12Cr-Mo-

فرآیند تا دمای نزدیک به ۱۰۰°C- صورت گیرد به آن سرد کردن (کرایو) سطحی^۱ SCT و اگر تا دمای ۱۸۰°C- صورت گیرد به آن سرد کردن (کرایو)^۲ عمیق DCT^۳ می گویند. در حالت کرایو سطحی درصد قابل توجه و یا تمام آستنیت باقیمانده از قطعه حذف می شود و رفتار سایشی ماده به شدت بهبود می یابد. در حالت سرد کردن عمیق و سطحی بین درصد آستنیت باقیمانده تفاوتی وجود ندارد اما در حالت دوم به دلیل ایجاد محل های جوانه زنی کاربید، درصد کاربید افزایش یافته و پخش یکنواخت تری از خود نشان می دهد، از سویی در اثر کرایو عمیق کاربیدهای ۱۱ به جای کابیدهای ε تشکیل می شوند و به همین دلیل رفتار سایشی مواد در حالت سرد شده در دماهای بسیار پایین بهتر از حالت کرایو سطحی است [۲].

در نمونه کرایو شده بر خلاف پوشش، لایه رویی بعد از سایش توان ادامه کار را دارد و قطعه به سرعت دچار تخریب نمی شود. از طرفی عملیات کرایو بر خلاف پوشش بافت نمونه را دچار تغییر نمی کند و بسیار کم هزینه تر و از لحاظ تکنولوژیک بسیار ساده تر از اعمال پوشش بر نمونه است [۳]. برای انجام عملیات تکمیلی کرایو قطعه را از دمای محیط با شیب بسیار کم دمایی (۱۵-۳۰ °C/h) به دمای مورد نظر رسانده، مدت مناسبی در این دما نگهداشته و سپس با همان شیب دمایی دمای قطعه را به دمای محیط باز می گردانند [۱].

مولیناری^۴ بر روی تاثیر کرایو عمیق بر روی فولادهای ابزار AISI M2 و AISI H13 تحقیقاتی انجام داد. عملیات کرایو سطحی در دمای ۶۰°C- تا ۸۰°C- برای افزایش سختی و پایداری حرارتی و عملیات کرایو عمیق در دمای ۱۲۵°C- تا ۱۹۶°C- برای بهبود خواص به دست آمده از کرایو سطحی انجام شد. این آزمون ها در محیط نیتروژن مایع و با نرخ سرد- گرم کردن ۲۰-30°C/h به مدت ۳۵ ساعت انجام شد. کل فرآیند در زمانی برابر ۱۰۰ ساعت انجام شد. بدلیل افزایش چگالی کاربیدها و یکنواختی بیشتر آنها در عملیات کرایو خواص این نوع از فولادها بهبود قابل توجهی از خود نشان می دهد [۴]. کولین و

5- collins and Dormer
6- Paulin
7- Mohan Lal
8- Meng and Tagashira

1- Shadow cryo treatment
2- Cryo
3- Deep Cryo treatment
4- Molinari

حرارتی تنش فشاری شدیدی در مرز آستنیت و مارتنزیت ایجاد می‌شود که به عنوان محلی برای جوانه‌زنی ترک و در نتیجه کاهش عمر قطعه عمل می‌کند. در اثر تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت در کرایو، تنش باقیمانده از بین می‌رود و عملاً قطعه عاری از تنش باقیمانده به دلیل وجود آستنیت باقیمانده می‌شود [۱۱]. در این تحقیق به منظور بررسی عملیات کرایو از فولاد ابزار سردکار ۱/۲۴۳۶ (X210CrW12 یا AISI D6) که از فولادهای پر کاربرد در قالب‌سازی است استفاده شده است. بهبود رفتار سایشی این فولاد باعث افزایش عمر قطعات و کاهش شدید در هزینه تعویض خواهد شد.

مطالعات آزمایشگاهی:

مواد اولیه:

فولاد مورد استفاده در این تحقیق از نوع سرد کار ۱/۲۴۳۶ می‌باشد که ترکیبی بسیار نزدیک به AISI D6 دارد. درصد عناصر آلیاژی این فولاد با استفاده از آزمایش کوانتومتری تعیین شد (جدول ۱).

آماده سازی نمونه:

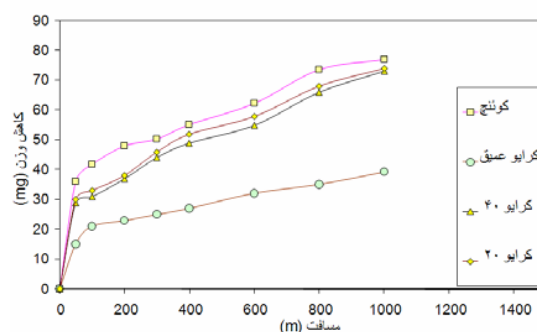
نمونه‌های سایش از فولاد فوق بریده و برای یکنواخت کردن سطح تمام نمونه‌ها سنگ مغناطیسی زده شدند و پس از آن عملیات حرارتی زیر بر روی آنها انجام شد.

نمونه ۱ (کوئنچ): آستنیت $C 970^{\circ}$ به مدت ۲۰ دقیقه در حمام نمک - کوئنچ روغن - تمپر $C 180^{\circ}$ به مدت ۱ ساعت.

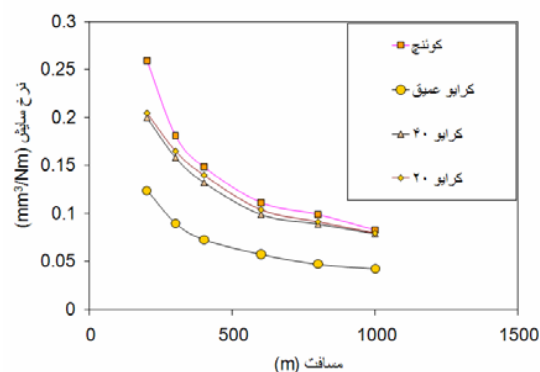
نمونه ۲ (کرایو ۲۰): آستنیت $C 970^{\circ}$ به مدت ۲۰ دقیقه در حمام نمک - کوئنچ روغن - عملیات کرایو در دمای $C 630^{\circ}$ با نرخ سرد - گرم کردن $C/h 15-20$ به مدت ۲۰ ساعت - تمپر $C 180^{\circ}$ به مدت ۱ ساعت.

نمونه ۳ (کرایو ۴۰): آستنیت $C 970^{\circ}$ به مدت ۲۰ دقیقه در حمام نمک - کوئنچ روغن - عملیات کرایو در دمای $C 630^{\circ}$ با نرخ سرد - گرم $C/h 15-20$ به مدت ۴۰ ساعت - تمپر $C 180^{\circ}$ به مدت ۱ ساعت.

نمونه ۴ (کرایو عمیق): آستنیت $C 970^{\circ}$ به مدت ۲۰ دقیقه در حمام نمک - کوئنچ روغن - عملیات کرایو در دمای $C 630^{\circ}$ با نرخ سرد - گرم $C/h 15-20$ به مدت ۲۰ ساعت -

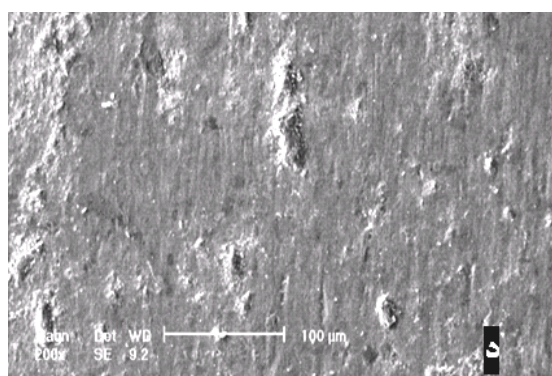
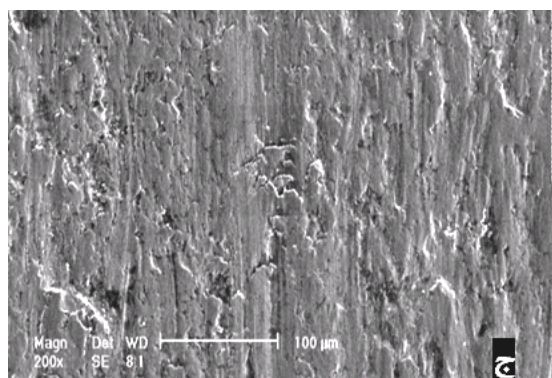
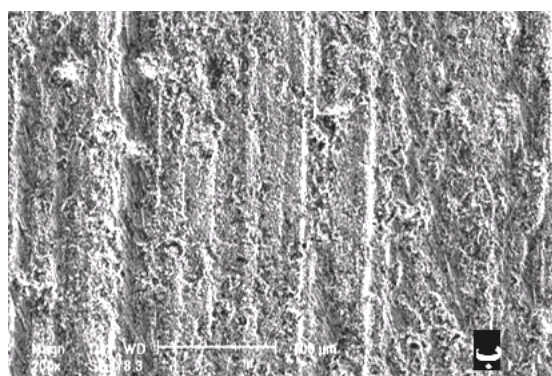
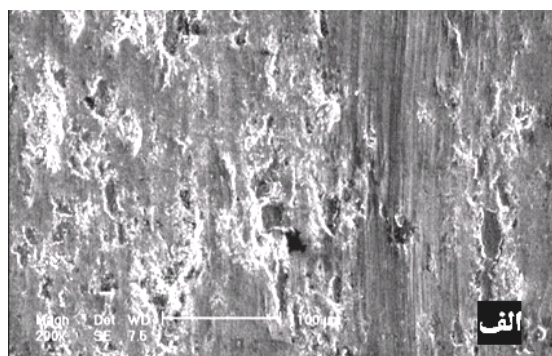


شکل (۳): نمودار کاهش وزن - مسافت طی شده



شکل (۴): نرخ سایش - مسافت طی شده

V-1.4C رفتار سایشی بین ۱۱۰٪-۶۰۰٪ بهبود نشان می‌دهد [۸]. از سویی دیگر در مورد فولادهای کربن داده شده وجود دارد که در مورد تأثیر عملیات کرایو بر رفتار سایشی مواد نگاه مثبتی ندارند [۹-۱۰]. مشخص شده است که در عملیات SCT کاربیده‌های اپسیلون و در عملیات DCT کاربیده‌های اتا بوجود می‌آیند [۱]. همچنین مشخص شده است که امکان تبدیل کامل آستنیت به مارتنزیت وجود ندارد و عملیات سرد کردن بیشتر درصد مارتنزیت را تغییر نمی‌دهد بلکه نوع کاربیده‌های تولیدی را عوض می‌کند [۲]. در مورد فولاد M2 مشخص شد که عملیات سرد کاری در خلا نسبت به عملیات حرارتی در محیط خلا باعث بهبود خواص مکانیکی ماده می‌شود و باعث پخش بهتر کاربیده‌ها و ریزتر شدن آنها بعد از عملیات تمپر شده است که باعث بهبود چقرمگی و مقاومت به سایش می‌شود [۴]. در اثر تبدیل آستنیت به مارتنزیت تغییر حجم در فاز آستنیت به وجود می‌آید، در اثر وجود فاز آستنیت باقیمانده بعد از عملیات



شکل (۵): تصاویر میکروسکوپ الکترونی.

الف: کوئنچ؛ ب: کرایو ۲۰؛ ج: کرایو ۴۰؛ د: کرایو عمیق

غوطه‌وری در نیتروژن مایع به مدت ۱۰ ساعت - گرم کردن تا دمای محیط - تمپر 180°C به مدت ۱ ساعت.

شایان ذکر است به منظور پاک کردن نمک از روی نمونه‌ها و یکنواخت کردن سطح نمونه‌ها پس از عملیات کوئنچ تا سمباده ۶۰۰ سمباده زده شده و پس از آن عملیات تکمیلی کرایو بر روی آنها انجام شد.

آزمون‌ها:

نمونه‌ها بعد از عملیات فوق مورد آزمایش سختی و سایش قرار گرفتند. آزمایش سایش از نوع پین روی دیسک (شکل ۱) و با پینی از جنس فولاد بلبرینگ با سختی ۶۴HRC، در دمای اتاق ($25 \pm 2^{\circ}\text{C}$) و ۳۰٪ رطوبت با نیروی ۱۲۰ نیوتن و در فواصل ۵۰-۱۰۰۰ متر انجام شد. در هر مرحله و در فواصل مشخص قطعه سایش وزن شده و میزان کاهش وزن با توجه به مسافت طی شده تعیین شد.

بحث و نتایج:

سختی نمونه‌ها پس از عملیات کوئنچ، کرایو و تمپر محاسبه شد. مشخص شد سختی در محدوده ۳-۱ HRC افزایش نشان می‌دهد. تغییرات سختی با توجه به عملیات کرایو در جدول (۲) آورده شده است. سختی نمونه‌ها بعد از تمپر در حدود ۲ HRC کاهش می‌یابد. نتایج سختی سنجی نشان می‌دهد نمونه کرایو شده در مقایسه با نمونه کوئنچ شده افزایش سختی نشان می‌دهد. این افزایش سختی در کرایو عمیق ۳ HRC است که بعد از تمپر به سختی نمونه کوئنچ شده بعد از تمپر می‌رسد. این افزایش سختی در کرایو به دلیل حذف آستنیت باقیمانده و جایگزین شدن آن با مارتنزیت است.

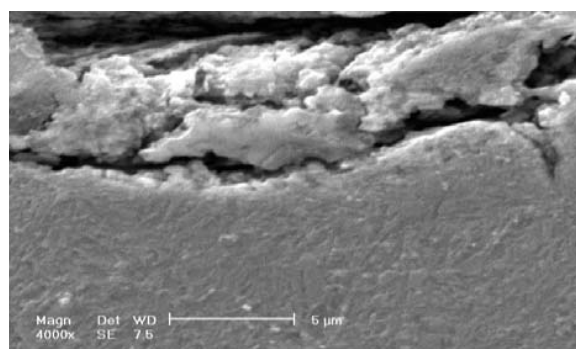
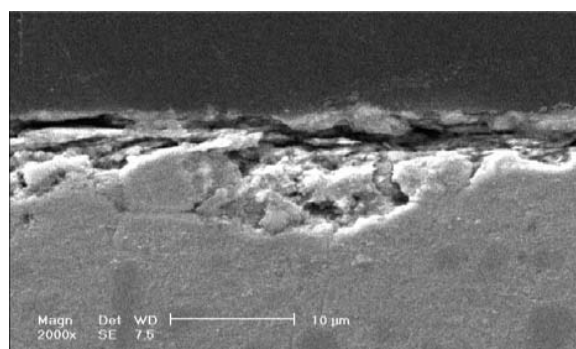
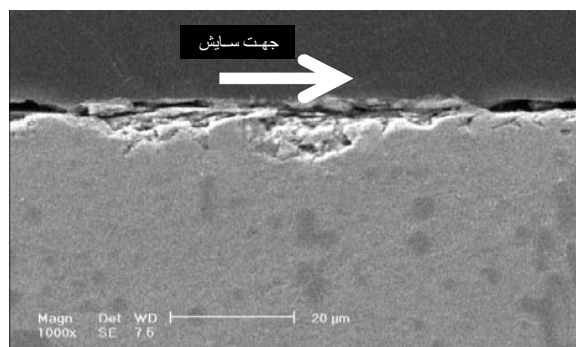
در آزمون سایش نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت طی شده، رفتار بهتر نمونه آستنیت‌ته شده به مدت کمتر در مقایسه با سایر نمونه‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۳). با استفاده از رابطه $W_r = \Delta m / (\rho L F_n) * 10^3$ نرخ سایش نمونه‌ها محاسبه شد. در این رابطه نرخ سایش بر حسب mm^3/Nm ، Δm کاهش وزن (g)، ρ چگالی (g/cm^3)، L مسافت طی شده (m) و F_n نیروی اعمالی بر حسب نیوتن است. نرخ سایش از فاصله ۲۰۰

به ۴۰٪ افزایش می‌یابد. افزایش شدید در حالت کرایو عمیق در مقایسه با کرایو سطحی به دلیل افزایش دانه‌های کاربید، توزیع یکنواخت‌تر و کاهش درصد آستنیت باقیمانده است.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی SEM در شکل (۵) آمده است. این تصاویر از غالب بودن مکانیزم سایش خراشان حکایت می‌کنند. با توجه به شکل (۵-د) عمق و عرض شیارها از در حالت کرایو عمیق بسیار کمتر از سایر شکل‌ها می‌باشد که با رفتار سایشی بهتر کرایو عمیق هم خوانی دارد. در حالت کوئنچ ماده بسیار نرم‌تر و از لحاظ رفتار سایشی بسیار ضعیف‌تر از حالات دیگر است، شیارها در این حالت بسیار عمیق‌تر دیده می‌شوند شکل (۵-الف). شکل (۵-ب و ج) از لحاظ کاهش عمق شیارها در به ترتیب در مکان‌های بعدی قرار می‌گیرند. برای اطمینان از غالب بودن مکانیزم سایشی نمونه‌ها در جهت موازی سایش و روی خط سایش مقطع‌زده شدند. سپس با استفاده از سمباده و پولیش سطح نمونه‌ها صاف و پس از آن در محلول ۴٪ نایتال اچ شدند (شکل ۶). با توجه به شکل، تغییر فرم پلاستیک در سطح کاملاً مشخص است. عدم وجود ترک در لایه‌های پایین‌تر امکان تولید شیار و کنده شدن ذرات سایش به وسیله مکانیزم خستگی را منتفی می‌کند. با توجه به شیارهای موجود در سطح در نمونه‌ها و تغییر فرم پلاستیک در مقطع نمونه‌ها غالب بودن مکانیزم خراشان تایید می‌شود.

نتیجه گیری:

عملیات کرایو باعث بهبود خواص سایشی و افزایش سختی این فولاد می‌شود. زمان نگهداری در دمای کرایو بر رفتار سایشی ماده تأثیر می‌گذارد در حدی که افزایش زمان نگهداری تأثیر دمای کرایوی کمتر را تا حد زیادی برآورده می‌سازد. دلیل اصلی بهبود خواص در کرایو سطحی تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت و در کرایو عمیق افزایش دانه‌های کاربید، توزیع یکنواخت این ذرات است. در حالت کرایو ۲۰ رفتار سایشی به میزان ۴٪-۷٪ نسبت نمونه‌ای که کرایو نشده بهبود نشان می‌دهد این میزان برای نمونه‌های کرایو ۴۰ و عمیق به ترتیب ۱۰٪ و ۴۰٪ است.



شکل (۶): سطح مقطع سایش پس از اچ در نایتال ۴

متر به بعد محاسبه شد (شکل ۴). نتایج بدست آمده در این مرحله به وضوح نشان می‌دهد رفتار مواد در حالت کرایو نسبت به عملیات حرارتی مرسوم به میزان ۴٪-۷٪ نسبت به کرایو ۲۰ و ۷٪-۱۰٪ نسبت به کرایو ۴۰ بهبود نشان می‌دهد. از سویی بهبود رفتار سایشی در کرایو ۴۰ نسبت به کرایو ۲۰ تأثیر مستقیم زمان نگهداری قطعه در دمای پایین را بر رفتار سایشی نشان می‌دهد، به این شکل که با افزایش زمان نگهداری رفتار سایشی را به میزان ۲٪-۴٪ بهبود می‌یابد. در مقایسه با کرایو عمیق این میزان

منابع:

- [1] Hong-Shan Yang, Wang Jun, Shen Bao-Luo, Liu Hao-Huai, Gao Sheng-Ji and Huang Si-Jiu, Effect of cryogenic treatment on the matrix structure and abrasion resistance of white cast iron subjected to destabilization treatment. *Wear*, Volume 261, Issue 10, 30 November 2006, Pages 1150-1154
- [2] ASTM standard for wear testing. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. Designation 99-95a 2002, vol. 14.02, 2002. p. 386-9.
- [3] Flávio J. da Silva, Sinésio D. Franco, Álisson R. Machado, Emmanuel O. Ezugwu and Jr., Antônio M. Souza, Performance of cryogenically treated HSS tools, *Wear*, Volume 261, Issues 5-6, 20 September 2006, Pages 674-685
- [4] Molinari A, Pellizzari M. E. Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. *Mater Process Technol* 2001; 118:350-5.
- [5] Collins DN, Dormer J. Deep cryogenic treatment of a D2 cold work tool steel. *Heat Treat Met* 1997; 3:71-4.
- [6] Paulin P. Frozen gears. Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning *Gear Technol* 1993 (MaHRCh 26-29).
- [7] Mohan Lal D, Renganarayanan S, Kalanidhi A. Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels. *Cryogenics* 2001; 41:149-55.
- [8] Meng F, Tagashira K. Wear resistance and microstructure of cryogenically treated Fe-1.4Cr-1C bearing steel. *Scri Metall Mater* 1994; 31(7):865-8.
- [9] Smoloikov EA, Tkachenko VI. How cold treatment in liquid nitrogen affects cutting tool life. *Mach Tooling* 1980; 51(6):22-4.
- [10] Speich GR. Ferrous martensitic structures. *ASM handbook*, vol. 9, 1985. p. 668-72.
- [11] N.R. Dhar and M. Kamruzzaman, Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Issue 5, April 2007, Pages 754-759