

اثر عملیات برودتی بر روی ریزساختار و خواص سایشی فولاد سردکار D6

علی حبیب‌الله‌زاده*، عباس هنربخش رثوف و شهرام پیرهادی توانداشت

دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی، گروه مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۶/۳/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۷/۲/۱۶، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۷/۵/۲۴

چکیده اثر عملیات برودتی بر روی ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش فولاد سردکار پُرکُرم پُرکربن D6 در مقایسه با اثر عملیات تند سرمایش بازگشت بر این خواص مطالعه شده است. عملیات برودتی شامل مراحل آستنیت‌پختن، سردکردن سریع در روغن داغ، سرمایش سریع فولاد تا دمای ۷۸- یا ۱۸۰°C- و نگهداری نمونه‌ها در یکی از دو دمای مزبور به مدت ۶ یا ۲۴ ساعت است. نتایج نشان می‌دهد که عملیات برودتی، در مقایسه با عملیات سردکردن سریع بازگشت مستمر، به کاهش آستنیت باقی مانده و نیز تشکیل کاربیدهای ریز میکرونی در ساختار فولاد منجر می‌شود. مقاومت به سایش فولاد در اثر استفاده از عملیات برودتی، نسبت به عملیات حرارتی‌های مستمر، بسیار بهبود می‌یابد، در صورتی که تغییرات سختی ناشی از آن زیاد نیست. سختی و مقاومت به سایش فولاد با افزایش زمان یا دمای برودت در طی عملیات برودتی افزایش می‌یابد. مشخص شد که اثر افزایش زمان بیش از اثر افزایش برودت است؛ به نحوی که افزایش زمان از ۶ به ۲۴ ساعت مقاومت به سایش را به میزان ۲۳ درصد بهبود می‌بخشد؛ ولی افزایش برودت از ۷۸- به ۱۸۰°C- فقط ۴ درصد بهبود در مقاومت به سایش ایجاد می‌کند. افزایش سرعت چرخش دیسک ساینده در طی آزمون سایش، مقاومت به سایش را زیاد می‌کند؛ ولی افزایش بار اعمالی این مقاومت را کاهش می‌دهد. به طور کلی، سختی و مقاومت به سایش فولاد D6 پس از عملیات برودتی بسیار برتر از این خواص در همین فولاد پس از عملیات سردکردن سریع بازگشت مستمر است.

کلمات کلیدی ساختار، سختی، مقاومت به سایش، عملیات برودتی، فولاد سردکار، D6.

Effect of Cryotreatment on Microstructure and Wear Properties of Cold Work Tool D6 Steel

A. Habibollahzadeh*, A. Honarbakhsh Raouf and S. Pirhadi Tavandasht

Materials Engineering Department, Engineering Faculty, Semnan University

Abstract Effect of cryogenic treatment on microstructure, hardness, and wear resistance of high Cr-C tool (D6) steel has been studied, in comparison with effect of conventional quench-temper treatments on those properties. Cryotreatment includes austenitizing, quenching in hot oil, immediate cooling of steel down to -78 or -180°C, and keeping the samples at one of those temperatures for 6 or 24 hours. The results show that retained austenite decreases in microstructure and submicron carbides precipitate in matrix of steel after cryotreated samples, in relative to those after conventional quench-temper treatment. Wear resistance in cryotreated samples significantly increases in comparison of conventional treated samples, however, hardness variation is moderate. Hardness and wear resistance increases as time and/or cooling increases during cryotreatment. It is revealed that increasing holding time in cryogenic environment from 6 to 24 hours improves wear resistance by 23%, however decreasing temperature of cryogenic environment from -78 to -180°C provides only 4% improvement in wear resistance. Increasing velocity of wear disk increases wear resistance, whereas, increasing applied load decreases wear resistance of steel. In general, wear resistance of D6 steel after cryotreatment is significantly superior to those properties in D6 steel after conventional quench-temper treatment.

Keywords Microstructure, Hardness, Wear resistance, Cryotreatment, Cold Work D6 Tool Steel.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی، گروه مواد.

تلفن: ۰۲۳۱-۳۳۳۴۲۰۱، پیام‌نگار: ahabibollahzadeh@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

فولادهای سردکار یکی از زیرگروه‌های فولادهای ابزارند که کاربردهای زیادی را در صنعت به خود اختصاص داده‌اند. این فولادها حاوی درصد بالایی از کربن (۱.۵-۲٪) و کروم (۱۱-۱۳٪) به همراه مقادیری مولیبدن، وانادیم یا تنگستن هستند و به علت زیادبودن درصد عناصر آلیاژی، سختی پذیری این فولادها بالاست؛ به طوری که به راحتی با سردکردن سریع از دمای آستنیت در هوا، روغن داغ یا در حمام نمک سخت می‌شوند. به همین علت نیز این فولادها پس از سختکاری پایداری ابعادی خوبی خواهند داشت. این فولادها در مصارفی که اساساً نیازمند مقاومت به سایش بالا هستند، نظیر قالب‌های شکل‌دهی سرد و کشش سیم به کار می‌روند [۱].

فولادهای سردکار به طور معمول با عملیات حرارتی آستنیت سردکردن سریع در روغن داغ، (هوا یا نمک مذاب)، بازگشت، سخت می‌شوند. یکی از مشکلات این عملیات حرارتی مستمر، حضور آستنیت باقی مانده پس از سختکاری است؛ زیرا آستنیت باقی مانده نسبتاً نرم و شبه پایدار است و می‌تواند تحت شرایط خاص، (به طور مثال در دماهای پایین)، به مارتنزیت تبدیل شود. این استحاله همراه با ۴٪ انبساط حجمی است و از اثرات مضر ناشی از اعوجاج حاصل از چنین انبساطی در برخی کاربردهای حساس به راحتی نمی‌توان صرف نظر کرد؛ ضمن این که مارتنزیت جدید ترد است. بنابراین نیاز است تا پس از اتمام عملیات حرارتی، مقدار آستنیت باقی مانده در ساختار فولاد حداقل مقدار ممکن باشد. در راستای کاهش آستنیت باقی مانده و بهبود خواص این فولادها، به صورت روشی جایگزین برای عملیات حرارتی‌های مستمر، از عملیات برودتی استفاده می‌شود که با وجود گرانی نسبی، مزایای بسیاری دارد [۲-۵]؛ به طوری که این مزایا به سهولت افزایش هزینه‌ها را جبران می‌کند. عملیات برودتی برای قطعه‌هایی با

کاربردهایی نظیر قطعه‌های مصرفی در دماهای زیر صفر درجه، قطعه‌هایی بسیار دقیق برای کاربرد در دماهای حداکثر تا 200°C و تحت فشار زیاد، ابزار اندازه‌گیری، و قطعات نیازمند به سطح تمام شده خوب پیشنهاد می‌شود؛ در این کاربردها استحاله خود به خود آستنیت باقی مانده می‌تواند منجر به ناپایداری ابعادی یا تغییر خواص فولاد منجر شود [۴]. در این حالت پس از آستنیت کردن فولاد و سردکردن سریع آن تا دمای محیط، عملیات برودتی در دو مرحله شامل: الف. سرمایش فولاد از دمای محیط تا دمای زیر صفر، (به طور معمول نیتروژن مایع) ب. بازگشت فولاد صورت می‌پذیرد؛ به طوری که در طی مرحله اول، علاوه بر استحاله آستنیت باقی مانده به مارتنزیت جدید، در اثر انقباض شبکه بلوری ناشی از برودت زیاد و نیز انبساط حجمی ناشی از استحاله مارتنزیتی، شرایط برای افزایش نفوذ کوتاه‌برد برای اتم‌های کربن و عناصر آلیاژی فراهم می‌آید و خوشه‌هایی اتمی تشکیل می‌شود [۶-۸]. در این مرحله با کاهش دما در طی عملیات برودتی دو نکته دیده می‌شود: الف. مارتنزیت به دست آمده فوق اشباع تر می‌شود و شبکه بلوری آن اعوجاج بیشتری پیدا می‌کند؛ و ب. مارتنزیت از نظر ترمودینامیکی ناپایدارتر می‌شود؛ به طوری که هر دو عامل موجب رانده شدن کربن به مناطق حاوی عیوب بلوری و تشکیل خوشه‌های اتمی می‌شود [۹]. در طی مرحله دوم از عملیات یعنی بازگشت، این خوشه‌ها یا به عنوان مناطق جوانه زنی کاربیدهای ریز عمل می‌کنند یا به طور مستقیم خود رشد می‌کنند [۹، ۱۰] و به کاربیدهای اِتا، با فرمول $\eta\text{-Fe}_7\text{C}_3$ و ساختار اُرتورومبیک، و با ابعاد کمتر ۶ میکرون در زمینه فولاد تبدیل می‌شوند که نقش عمده‌ای را در بهبود خواص فولاد ایفا می‌کنند [۳، ۵، ۱۱-۱۳]. گزارشی در خصوص رسوب کاربیدهای اِتا در فولادها پس از عملیات حرارتی سخت کاری بازگشت مستمر وجود ندارد و در نتیجه این نوع کاربید فقط در طی عملیات حرارتی برودتی رسوب می‌کند [۱۴]. Huang و

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد ابزار سردکار (درصد وزنی)، D6.

C	Mn	Cr	W
۲٫۰۵	۰٫۵	۱۲٫۵	۱٫۳

۲ ساعت تنش گیری شدند، و تا دمای 500°C به آهستگی در کوره سرد شدند و در نهایت تا دمای محیط در هوا سرد شدند. برای عملیات حرارتی سختکاری، نمونه‌ها پس از پیش گرم شدن در دمای 650°C به مدت ۱/۵ ساعت و آستنیت شدن، تحت سه نوع عملیات حرارتی تند سرمایش در روغن داغ بازگشت (OT)، سرد کردن سریع در نمک مذاب بازگشت (ST) و عملیات برودتی (Cryo)، قرار گرفتند که جزئیات هریک از عملیات در جدول ۲ ارائه شده است.

طبق جدول، دما و زمان عملیات برودتی نیز تغییر یافته تا اثر این دو عامل بر خواص بررسی شود. در طی عملیات برودتی می باید پس از سرد کردن سریع آنها در روغن گرم، از نگهداری طولانی نمونه‌ها در دمای محیط جلوگیری کرد؛ زیرا چنین تأخیری پایداری آستنیت می شود و اثر عملیات برودتی را کاهش می دهد؛ بنابراین باید پس از سرد کردن سریع اولیه نمونه‌ها عملیات برودتی به سرعت انجام شود [۱۷، ۴، ۱]. سرد کردن و گرم کردن آهسته از دمای محیط تا دمای زیرصفر و نیز از دمای زیرصفر تا دمای محیط می تواند موجب رهایش تندی و تنش انباشته شده در ساختار شود [۱۷].

پس از عملیات حرارتی، نمونه‌ها برای مطالعه ریزساختار، شکل و توزیع کاربیدهای آلیاژی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، آماده شدند. برای اچ کردن

همکاران خود [۹]، ترکیب این کاربیدها را در فولاد ابزار M_2 به صورت $(\text{Mo, Cr, V, W}=\text{M}) \text{Fe}_3\text{M}_3\text{C}$ با ساختار FCC گزارش کرده اند. با خروج اتم های کربن و عناصر آلیاژی از زمینه مارتنزیتی و رسوب کاربیدهای اِتا، از تنش های داخلی در مارتنزیت کاسته می شود و احتمال تشکیل ریزترک ها در زمینه فولاد نیز کاهش می یابد.

عامل تعیین کننده در حجم رسوب کاربیدهای اِتا، زمان و دمای بازگشت پس از عملیات برودتی است و مرحله برودتی به طور معمول بر استحاله آستنیت باقی مانده به مارتنزیت مؤثر است [۱۴]. گزارش های مختلف [۱۶-۱۴، ۵-۳] حاکی از آن است که عملیات برودتی موجب بهبود سختی، افزایش دوام و عمر ابزار، افزایش مقاومت به سایش، پایداری ابعادی، هدایت الکتریکی و حرارتی فولاد می شوند. همچنین میزان افزایش مقاومت به سایش پس از عملیات برودتی در فولادهای ابزار از ۶۰ تا ۲۲۵ درصد نسبت به این مقاومت در نمونه ای با عملیات حرارتی مستمر گزارش شده است [۱۶، ۱۴].

در مقاله حاضر اثر دما و زمان عملیات برودتی بر ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش در فولاد ابزار سردکار کروم تنگستن دار (D6) مطالعه شده است. همچنین خواص حاصل از عملیات برودتی در این فولاد با خواص حاصل از عملیات حرارتی سرد کردن سریع در روغن داغ و نیز در حمام نمک بازگشت فولاد مقایسه شده است.

۲- روش آزمایش

فولاد ابزار سردکار کروم تنگستن دار (D6)، با ترکیب شیمیایی مندرج در (جدول ۱)، استفاده شد. نمونه هایی با ابعاد تقریبی $15 \times 15 \times 10$ میلی متر از این فولاد برش زده شد. تمامی نمونه ها قبل از انجام عملیات حرارتی، در دمای 675°C به مدت

جدول ۲. انواع شرایط فرآیندهای عملیات حرارتی اعمال شده بر فولاد ابزار سردکار D6.

نوع عملیات حرارتی	شرایط	هدف	علامت اختصاری
سردکردن سریع در روغن داغ- بازگشت	۱۵ دقیقه آستنیت در $980 \pm 10^\circ\text{C}$ ، سردکردن سریع در روغن (دمای 70°C تا 80°C)، بازگشت ۱ ساعت در 170°C	عملیات استاندارد ۱ (برای مقایسه)	OT
سردکردن سریع در نمک مذاب- بازگشت	۱۵ دقیقه آستنیت در $980 \pm 10^\circ\text{C}$ ، سردکردن سریع در حمام نمک (۳ تا ۵ دقیقه در دمای 300°C)، بازگشت ۱ ساعت در 170°C	عملیات استاندارد ۲ (برای مقایسه)	ST
عملیات حرارتی برودتی ($-78^\circ\text{C}/6\text{h}$)	۱۵ دقیقه آستنیت در $980 \pm 10^\circ\text{C}$ ، سردکردن سریع در روغن (دمای 70°C تا 80°C)، و در ادامه سرمایش تا دمای -78°C (CO_2 جامد) و نگهداری به مدت ۶ ساعت	بررسی اثر عملیات برودتی	(Cryo-78/6)
عملیات حرارتی برودتی ($-78^\circ\text{C}/24\text{h}$)	۱۵ دقیقه آستنیت در $980 \pm 10^\circ\text{C}$ ، سردکردن سریع در روغن (دمای 70°C تا 80°C)، و در ادامه سرمایش تا دمای -78°C (CO_2 جامد) و نگهداری به مدت ۲۴ ساعت	بررسی اثر زمان در عملیات برودتی	(Cryo-78/24)
عملیات حرارتی برودتی ($-180^\circ\text{C}/6\text{h}$)	۱۵ دقیقه آستنیت در $980 \pm 10^\circ\text{C}$ ، سردکردن سریع در روغن (دمای 70°C تا 80°C)، و در ادامه سرمایش تا دمای -180°C (نیتروژن مایع) و نگهداری به مدت ۶ ساعت	بررسی اثر دما در عملیات برودتی	(Cryo-180/6)
عملیات حرارتی برودتی ($-180^\circ\text{C}/24\text{h}$)	۱۵ دقیقه آستنیت در $980 \pm 10^\circ\text{C}$ ، سردکردن سریع در روغن (دمای 70°C تا 80°C)، و در ادامه سرمایش تا دمای -180°C (نیتروژن مایع) و نگهداری به مدت ۲۴ ساعت	بررسی اثر زمان و هم‌دمایی بودن در عملیات برودتی	(Cryo-180/24)

نمونه‌ها از محلول نیتال ۴٪ استفاده شد. ترکیب شیمیایی زمینه و کاربیدها با آنالیز EDX اندازه‌گیری شد. برای مطالعه حضور آستنیت باقی مانده در نمونه‌ها، و نیز سایر فازهای موجود در ساختار، از روش XRD کمک گرفته شد.

سختی زمینه و ریزساختار به ترتیب با روش سختی سنجی ویکرز، (با نیروی ۱۰۰ کیلوگرم) و میکروویکرز، (با نیروی ۱۰۰ گرم) اندازه‌گیری شد. از آزمون بلوک (نمونه)، بر دیسک برای اندازه‌گیری مقاومت به سایش نمونه‌ها در برابر فولاد

عملیات حرارتی، زمینه به طور معمول دارای کاربرد نوع $M_{7}C_{3}$ خواهد بود (شکل ۲ و ۳). نکته مهم در زمینه نمونه‌های برودتی (شکل ۱)، حضور ذرات کاربیدی ریز در حد ۰/۵-۱ میکرون است که در زمینه پراکنده شده‌اند، البته این ذرات به علت ریزبودن به راحتی با دستگاه‌های EDX موجود تجزیه نمی‌شوند؛ ولی همان طور که بیان شد ترکیب این کاربیدها به صورت $\eta-Fe_{7}C_{3}$ گزارش شده است [۱۱-۱۳]. باتوجه به شکل ۱، این رسوبات ریز به صورت یکنواخت در زمینه پراکنده شده‌اند که می‌توان این یکنواختی را یکی دیگر از مزایای به کارگیری عملیات برودتی برای فولادها شمرد؛ به نحوی که هر دو عامل ریزی و توزیع یکنواخت این کاربیدها بهبود سختی و مقاومت به سایش را فراهم کنند [۱۹].

الگوی‌های اشعه ایکس در شکل ۳ مبین حضور فازهایی نظیر مارتنزیت (α') و آستنیت باقی مانده (γ) در کنار کاربید $M_{7}C_{3}$ در ساختار است. در صورتی که نسبت شدیدترین پیک‌های مربوط به فازهای مختلف را معیار تقریبی از مقدار نسبی هر فاز در ریزساختار بدانیم، طبق الگوهای موجود در شکل ۳، نسبت بلندترین پیک‌های مربوط به آستنیت باقی مانده و مارتنزیت در نمونه‌هایی با عملیات حرارتی سردکردن سریع بازگشت مستمر و عملیات حرارتی برودتی به ترتیب حدوداً برابر با ۱۷/۳ و ۹/۷ است و همچنین نسبت شدیدترین پیک‌های مربوط به کاربرد $M_{7}C_{3}$ و مارتنزیت در نمونه‌هایی با همان دو نوع عملیات حرارتی به ترتیب حدوداً برابر با ۰/۲۷ و ۰/۱۵ است.

این مقادیر نشان‌دهنده کاهش میزان آستنیت باقی مانده، (دراثر استحاله آن به مارتنزیت) و کاربرد $M_{7}C_{3}$ در زمینه پس از عملیات برودتی در مقایسه با عملیات سردکردن سریع بازگشت است. محققان میزان آستنیت باقی مانده در فولادهای ابزار را پس از عملیات حرارتی مستمر و پس از عملیات برودتی، به ترتیب، برابر با ۱۲-۱۳ و ۶-۸ درصد گزارش کرده‌اند [۱۹، ۱۲].

سخت شده SAE ۲۱۰۰۵ استفاده شد. در تمامی آزمون‌ها، زمان یک ساعت انتخاب شد و اثر سرعت خطی دیسک ساینده و نیز اثر بار اعمالی بر مقاومت به سایش نمونه‌ها ارزیابی شد. برای محاسبه مقاومت به سایش (WR)، از این رابطه استفاده شد [۱۸]:

$$WR = F \cdot v / V \cdot H_V$$

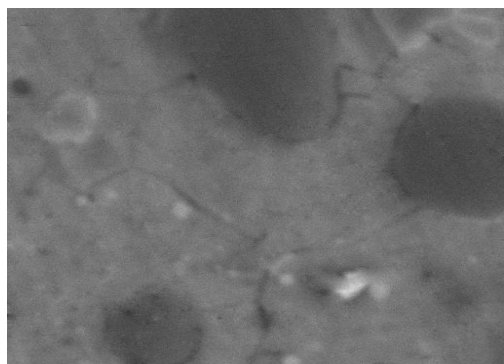
در این رابطه F ، v ، V و H_V به ترتیب بار اعمالی (N)، سرعت خطی دیسک ساینده (m/s)، کاهش حجم نمونه در واحد زمان (m^3/s)، و سختی میکروویکر نمونه.

۳- بحث

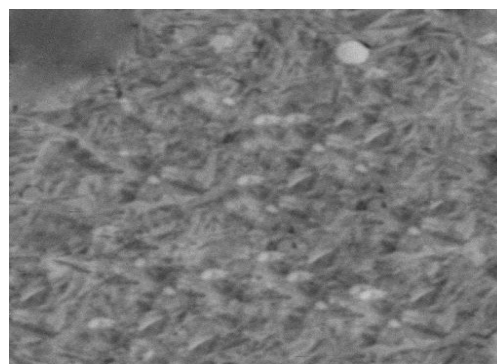
شکل‌های ۱ و ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار فولاد سردکار پس از فرآیندهای مختلف عملیات حرارتی‌های مختلف است.

همان طور که ملاحظه می‌شود، زمینه مارتنزیتی در ریزساختار، حاوی سه نوع مختلف از کاربیدها (به رنگ‌های روشن، تیره و خاکستری)، است. ترکیب زمینه و کاربیدهای مختلف در نمونه‌هایی با عملیات حرارتی مختلف در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. که نسبت کربن به کربن تعیین‌کننده نوع کاربیدهای کربن‌دار است؛ به طوری که اگر این نسبت بیش از ۳ باشد کاربیدها می‌توانند از نوع $M_{23}C_6$ یا $M_{7}C_{3}$ باشند. در غیر این صورت کاربیدها از نوع $M_{7}C_{3}$ خواهند بود [۲]. براین اساس، طبق جدول ۳ و ۴ می‌توان گفت کاربرد تیره از نوع $M_{7}C_{3}$ است که حضور آن براساس الگوی اشعه ایکس (شکل ۳) نیز مورد تأیید است. البته در الگوی اشعه ایکس پیک‌های مربوط به سایر کاربیدها مشاهده نمی‌شود که می‌تواند ناشی از حضور درصد کمی از این کاربیدها در زمینه باشد.

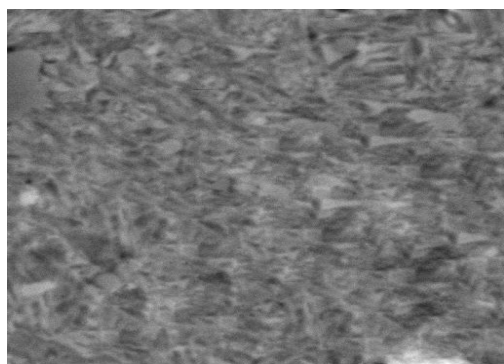
به هر حال نتایج حاکی از این است که پس از هر نوع



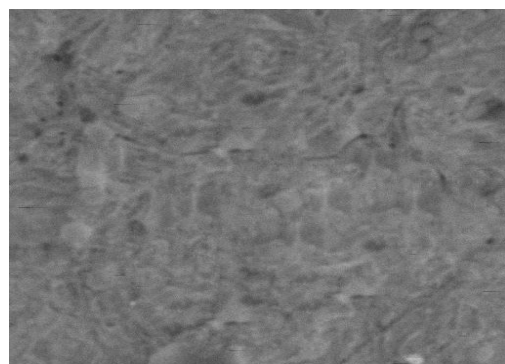
(a)



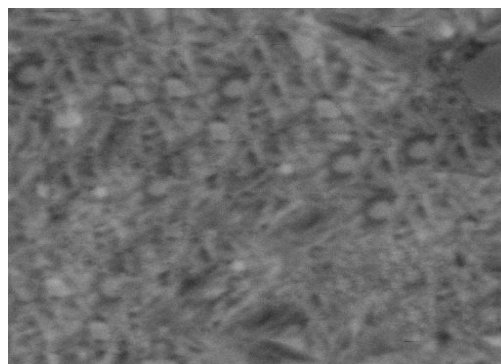
(b)



(c)



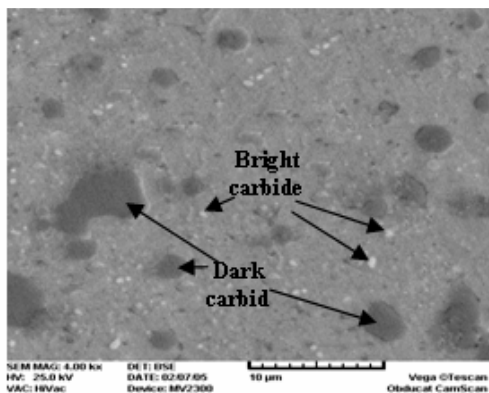
(d)



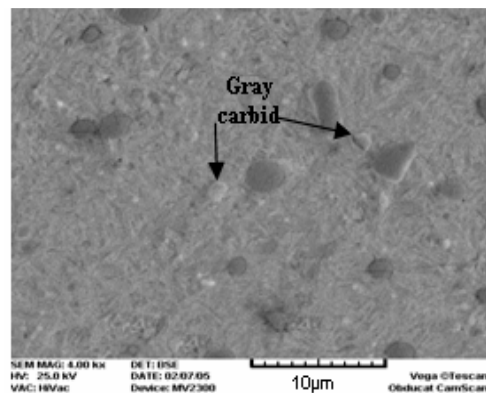
(e)

ذرات ریرمیکرونی

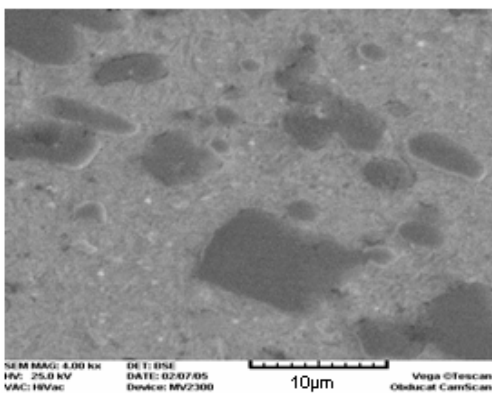
شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از زمینه فولاد سردکار در بزرگ‌نمایی $1500\times$ پس از (a) عملیات حرارتی سردکردن سریع در نمک مذاب بازگشت (ST) و عملیات حرارتی برودتی (Cryo)، (b) در 78°C برای ۶ ساعت، (c) در 180°C برای ۲۴ ساعت، (d) در 180°C برای ۶ ساعت و (e) در 180°C برای ۲۴ ساعت.



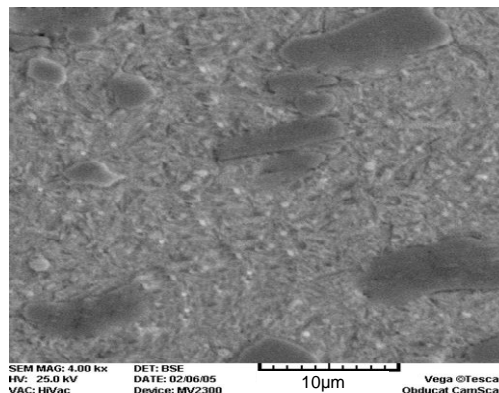
(a)



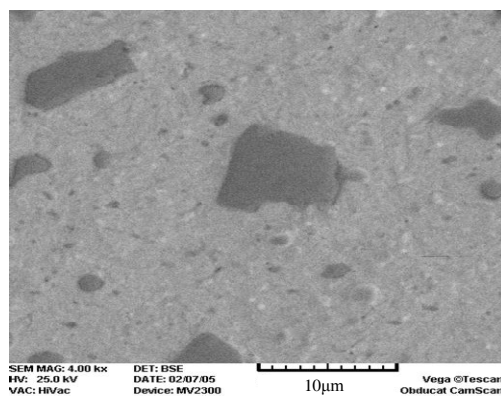
(b)



(c)



(d)



(e)

شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از کاربیدهای مختلف موجود در ساختار فولاد سردکار در بزرگ‌نمایی $\times 4000$ پس از (a) عملیات حرارتی سردکردن سریع در نمک مذاب- بازگشت (ST) و عملیات حرارتی برودتی (Cryo)، (b) در -78°C برای ۶ ساعت، (c) در -78°C برای ۲۴ ساعت، (d) در -180°C برای ۶ ساعت و (e) در -180°C برای ۲۴ ساعت.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی زمینه و کاربیدهای مختلف موجود در ریزساختار فولاد سردکار D6 پس از عملیات سردکردن سریع در نمک‌مذاب. بازگشت (درصد وزنی).

	Matrix	Gray carbide	Dark carbide	Bright Carbide
C	۱,۱۰	۱۲,۳۱	۱۰,۴۱	۱۸,۹۵
Cr	۶,۴۹	۷,۷۱	۴۰,۶۴	۱۰,۴۸
Fe	۹۱,۶۶	۷۶,۷۲	۴۸,۹۵	۷۰,۵۷
W	۰,۷۴	۳,۲۶		

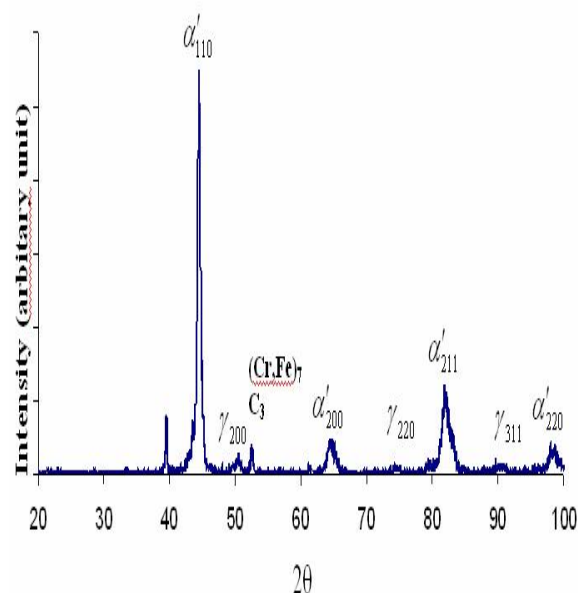
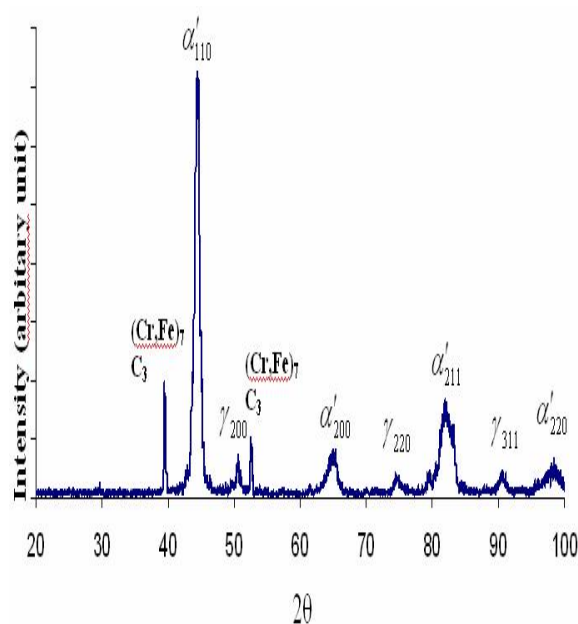
جدول ۴. ترکیب شیمیایی زمینه و کاربیدهای مختلف موجود در ریزساختار فولاد سردکار D6 پس از عملیات برودتی (درصد وزنی).

	Matrix	Gray carbide	Dark carbide
C	۱,۱۲	۹,۹۹	۱۲,۱۰
Cr	۷,۶۳	۹,۳۷	۴۲,۷۱
Fe	۸۹,۳۲	۷۸,۶۷	۴۵,۲۰
W	۱,۹۳	۱,۹۷	

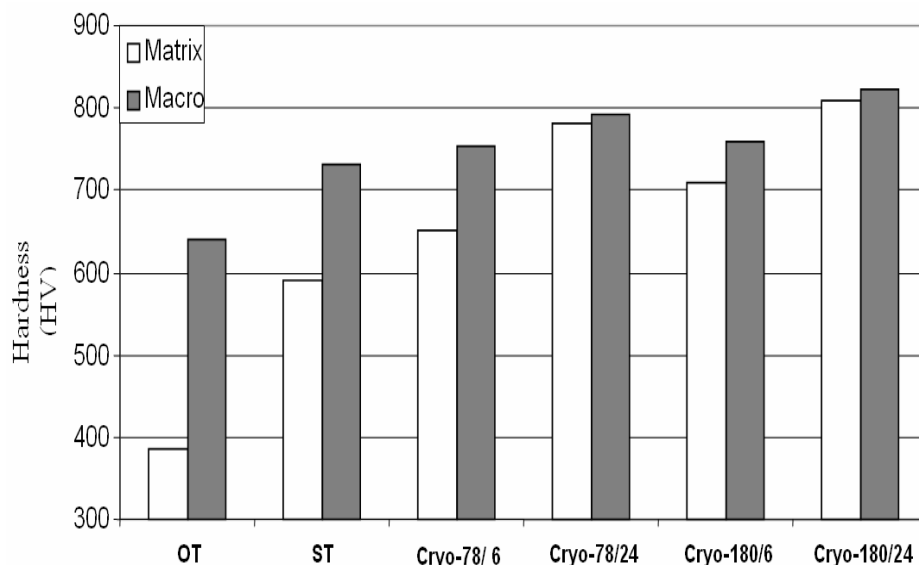
که مقدار آستنیت باقی مانده نزدیک به نصف تقلیل می یابد. در چنین شرایطی شاید علت کاهش آستنیت باقی مانده و تبدیل آن به مارتنزیت، عدم پایداری ترمودینامیکی آستنیت باقی مانده در دمای محیط باشد؛ به طوری که میزان این ناپایداری با کاهش دما تا دماهای زیر صفر افزایش بیشتری یابد.

به عبارتی نیروی محرکه برای تحول آستنیت باقی مانده به فازی دیگر افزایش می یابد. دو حالت موجود برای تحول آستنیت باقی مانده یکی تحول آن به فریت و سمانیت و دیگری تحول آن به مارتنزیت است، که در دماهای پایین که شرایط نفوذ اتم ها مشکل تر است، بروز حالت دوم نزدیک تر به نظر می رسد؛ زیرا در طی تحول آستنیت باقی مانده به مارتنزیت نیازی به نفوذ تک تک اتم ها نیست و استحاله فقط با ایجاد تحول برشی انجام می پذیرد. بنا بر این براساس نتایج متالوگرافی و XRD، عملیات برودتی به کاهش آستنیت باقی مانده منجر می شود و موجب تشکیل رسوبات ریزمیکرونی و یکنواخت در زمینه فولاد می شود که هر دو تحول می توانند عامل اصلی در بهبود سختی و خواص سایشی باشند که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

تغییرات ریزسختی زمینه و سختی کل ساختار به جای فرآیندهای مختلف عملیات حرارتی های مختلف (شکل ۴) حاکی از آن است که کمترین سختی حاصل مربوط به نمونه سردکردن سریع در روغن بازگشت شده است و همچنین در این نمونه تفاوت سختی زمینه و سختی کل درمقایسه با سایر نمونه ها بیشترین مقدار است. چنین امری می تواند مبین این موضوع باشد که در نمونه های OT کاربیده ها سهم بیشتری را در سختی نهایی نمونه برعهده دارند. نمونه ای با عملیات سردکردن سریع در نمک مذاب بازگشت شده (ST) دارای سختی بالاتری نسبت به نمونه قبلی است، و در این نمونه اختلاف میان سختی زمینه و ساختار کلی نیز کاهش می یابد که مبین سهم بالاتر اثر سختی زمینه در سختی کل نمونه است



شکل ۳. الگوی XRD از فولاد سردکار پس از (بالا) سردکردن سریع در نمک مذاب - بازگشت (ST) و (پایین) عملیات برودتی (Cryo-180/24).



شکل ۴. سختی زمینه (□) و سختی کل ساختار (■) در فولاد سردکار پس از عملیات حرارتی‌های مختلف، (علامت اختصاری طبق جدول ۲).

این نمونه‌ها با سایر نمونه‌ها، ۲۸٫۵ درصد است که از جمله علل آن، می‌توان به کاهش آستنیت باقی‌مانده (شکل ۳) و نیز تشکیل خوشه‌های اتمی [۹،۱۰] و رسوب ذرات ریزکاری‌دیدی در زمینه نمونه‌های برودتی (شکل ۱) اشاره کرد. در این حالت کمترین تفاوت میان سختی زمینه و سختی کل نیز مشاهده می‌شود که مبین سهم بالاتر سختی زمینه در افزایش سختی کل نمونه است.

اندازه‌گیری شده از زمینه، برآیند سختی زمینه، (مخلوط مارتنزیت و آستنیت باقی‌مانده)، به همراه رسوبات ریزکاری‌دیدی است (شکل ۱c-d) که با ریزسختی‌سنجی قابل تفکیک از یکدیگر نیستند. به‌طور کلی، در میان نمونه‌های برودتی، سختی کل نمونه‌ها با افزایش زمان یا میزان برودت، افزوده می‌شود ولی اختلاف میان سختی زمینه و سختی کل کاهش می‌یابد. کمترین اختلاف میان سختی زمینه و سختی کل مربوط به نمونه‌ای با زمان برودت ۲۴ ساعت و دمای برودت -180°C است؛

(شکل ۴). شاید علت این امر ایجاد ریزترک‌های بیشتر در نمونه سریع سرد شده در روغن (OT) باشد که با سرعت بیشتری نسبت به نمونه سریع سرد شده در نمک مذاب (ST) از دمای آستنیت سرد شده است. به نحوی که در سرعت‌های سرمایه‌ش بالا احتمال تشکیل ریزترک‌ها در اثر استحاله مارتنزیتی بیشتر است و همچنین تشکیل ریزترک‌ها همراه با رهایش تنش‌های پسماند موجود در مارتنزیت است؛ به‌طوری‌که هر دو عامل می‌توانند باعث کاهش سختی زمینه در طی اندازه‌گیری‌ها شود و در نتیجه فاصله سختی زمینه و سختی کل در نمونه‌های سریع سرد شده در روغن افزایش یابد و سختی زمینه و سختی کل ساختار در مقایسه با سایر نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد.

طبق شکل ۴، بالاترین سختی مربوط به نمونه‌هایی با عملیات برودتی (Cryo) است که نسبت به سایر نمونه‌ها، به‌طور متوسط ۱۴ درصد سختی بالاتر دارد و حداکثر تفاوت سختی در

فراوری شده در 78°C به مدت ۲۴ ساعت، به میزان ۱۰٪ بهتر از سختی نمونه فراوری شده در 180°C - به مدت ۶ ساعت است. این نتیجه، تأکیدی مجدد بر این ایده است که در طی عملیات برودتی، فرآیندی هم‌دما بروز می‌کند.

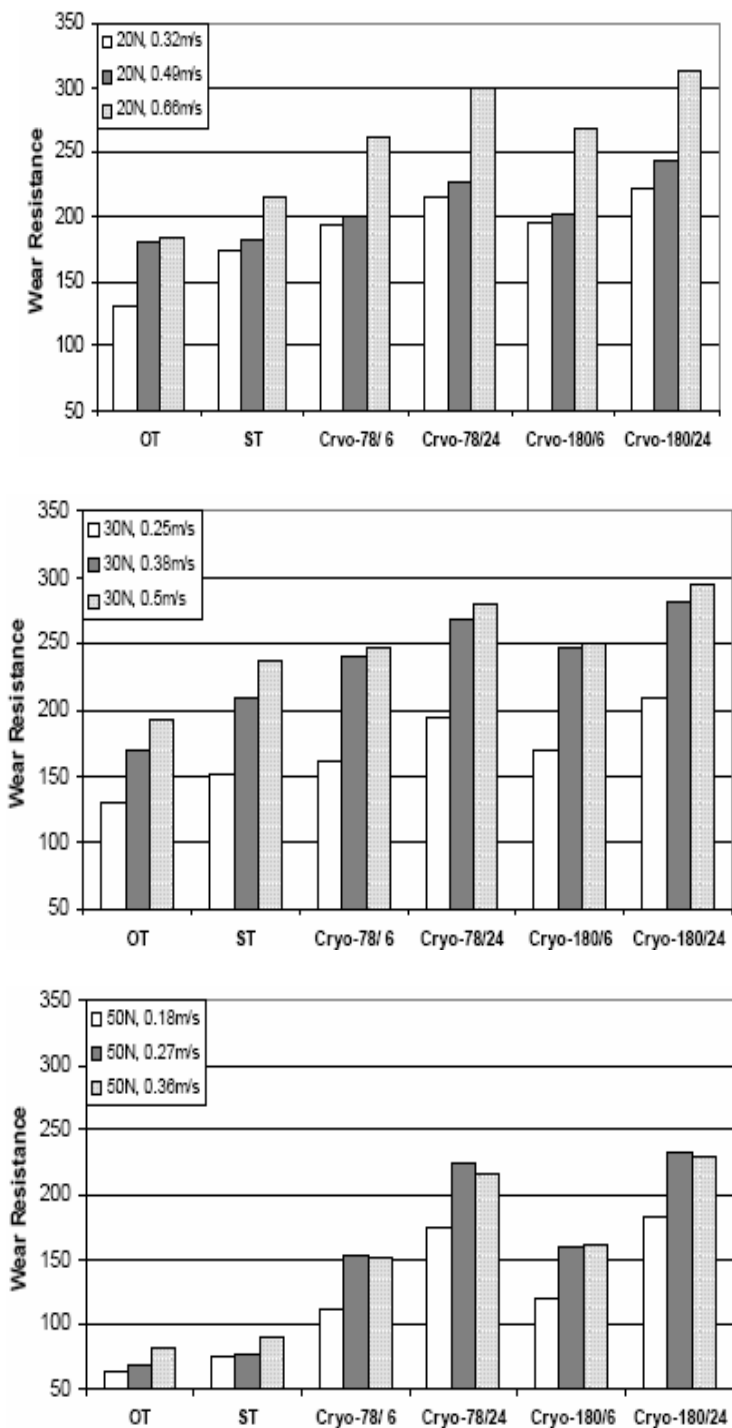
در ضمن به ازاء زمان برودت ۶ ساعت، افزایش میزان برودت از 78°C - به 180°C - باعث افزایش سختی در حد ۹ درصد می‌شود که در مقایسه با اثر زمان برودت بر سختی، تاثیر کمتری را نشان می‌دهد. همچنین به ازاء زمان ۲۴ ساعت برودت دهی، تفاوت سختی نمونه‌ها پس از قرارگیری در 78°C - یا 180°C کمتر می‌شود و به حد ۴ درصد می‌رسد. نکته اول: اثر دمای برودت بر سختی کمتر از زمان برودت دهی است و نکته دوم: در زمان‌های طولانی برودت دهی، اثر دمای برودت کاهش می‌یابد. در نتیجه به ازاء زمان‌های برودت دهی طولانی، حتی در دمای 78°C نیز می‌توان از مزایای عملیات برودتی برای افزایش سختی فولاد بهره گرفت. چنین نتیجه‌ای موافق نتایج دیگر محققان نیز می‌باشد [۱۷].

در بررسی نتایج آزمون‌های سایش، شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که کمترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه سردکردن سریع در روغن - بازگشت‌شده، (OT) است نمونه‌ای با عملیات سردکردن سریع در نمک مذاب بازگشت شده (ST) مقاومت به سایش بالاتری نسبت به نمونه قبلی دارد. این نتایج در راستای نتایج سختی‌سنجی هاست؛ یعنی مقاومت به سایش با افزایش سختی بهبود می‌یابد. از طرف دیگر مقاومت به سایش در نمونه‌های برودتی بیش از سایر نمونه‌هاست که متناظر با بالاتر بودن سختی در چنین نمونه‌هایی نیز می‌باشد؛ به نحوی که به طور متوسط میزان بهبود در مقاومت به سایش در نمونه‌های برودتی حدود ۸۰ درصد بیش از این مقاومت در سایر نمونه‌هاست. از آنجا که در نمونه‌های برودتی، مقدار آستنیت باقی‌مانده در زمینه ناچیز است و ذرات ریز رسوب می‌کنند، این دو عامل، نقش مفید و اصلی را در بهبود مقاومت به سایش ایفا می‌کنند.

نمونه‌ای که بیشترین سختی را در حد ۸۲۰ ویکرز دارد و شامل کمترین آستنیت باقی‌مانده، (شکل ۳) و احتمالاً بیشترین رسوبات ریزکاری‌بندی در زمینه (شکل ۱c-d) است.

از آنجا که در تحقیق حاضر زمان بازگشت فقط یک ساعت انتخاب شده است، باید توجه داشت که به احتمال زیاد فرصت کافی برای رسوب کامل کاربیدهای ریز میکرونی فراهم نشده است. در این حالت افزایش سختی نمونه‌ها در طی عملیات برودتی به طور معمول حاصل از جایگزینی آستنیت باقی‌مانده نرم توسط مارتنزیت سخت و پُر تنش است؛ ولی در مرحله بازگشت تشکیل کاربیدهای ریز میکرونی در زمینه فولاد نیز موجب افزایش سختی می‌شود. اما اگر چه استحاله آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت موجب افزایش سختی می‌شود، در مرحله بازگشت، به ازاء تشکیل کاربیدهای ریز، میزان کربن اشباع بالا در مارتنزیت کاهش می‌یابد و از تنش‌های داخلی در مارتنزیت کاسته می‌شود و در نهایت سختی مارتنزیت اُفت می‌کند. بنابراین در عمل، افزایش سختی فولاد پس از عملیات حرارتی، برآیند بروز تمامی این گونه تحولات است.

در میان نمونه‌های برودتی، افزایش زمان برودت دهی در دمایی خاص موجب افزایش قابل توجه در سختی زمینه، در حد ۱۴ تا ۲۰ درصد می‌شود (شکل ۴)؛ البته این افزایش تأثیر کمتری بر سختی کل دارد و اثر آن در حد ۵ تا ۸ درصد است. در این شرایط اثر زمان در دمای برودت 78°C بر افزایش سختی بیشتر از اثر آن در دمای برودت 180°C است؛ به طوری که در این دما با افزایش زمان برودت دهی از ۶ به ۲۴ ساعت سختی زمینه در حد ۲۰ درصد بهبود می‌یابد. تغییر سختی نمونه‌ها با افزایش زمان برودت دهی مبین وقوع پدیده یا پدیده‌هایی هم‌دما، در ساختار فولاد است که یکی از آن پدیده‌ها می‌تواند تشکیل خوشه‌های اتمی باشد؛ به نحوی که نگهداری طولانی‌تر نمونه‌ها در دماهای پایین، فرصت انجام نفوذ موضعی و تشکیل خوشه‌های اتمی بیشتری را فراهم می‌کند. علاوه بر این، سختی نمونه



شکل ۵. مقاومت به سایش فولاد سردکار پس از شرایط مختلف حرارتی، بار اعمالی (N)، و سرعت (m/s) دیسک ساینده (علامات اختصاری طبق جدول ۲).

بهترین شرایط سایشی در نمونه‌ای با ۲۴ ساعت نگهداری در دمای 180°C به دست می‌آید که تحت شرایط مختلف (بار اعمالی و سرعت)، حداقل 30% و حداکثر 180% مقاومت به سایش بهتری نسبت به نمونه‌های غیربرودتی دارد، (شکل ۵ و ۶). این امر درحالی است که میزان افزایش سختی در این نمونه‌ها فقط درحد حداکثر ۱۴ تا ۲۰ درصد است. به عبارتی اگرچه در نظر اول افزایش سختی چشمگیر نیست، بهبود مقاومت سایشی حاصل شده زیاد است. چنین نتایجی با گزارش‌های سایر محققان که افزایش مقاومت سایش در فولادهای ابزار را از ۶۰ تا ۲۲۵ درصد ذکر کرده اند، همخوانی خوبی نشان می‌دهد [۱۶،۱۴].

درطی آزمون‌های سایش اثر دو عامل سرعت حرکت نمونه و دیسک ساینده دربرابر یکدیگر و افزایش بار اعمالی، برروی مقاومت به سایش نیز بررسی شد. نتایج آزمون‌ها (شکل ۵) مبین این است که با افزایش سرعت دیسک، مقاومت به سایش افزایش می‌یابد که ممکن است علت آن تشکیل اکسیدهای محافظ و چسبنده ازقبیل Cr_2O_3 در سطح فولاد ابزار باشد که به‌واسطهٔ افزایش دما (ناشی از افزایش سرعت دیسک) در نقاط تماس نمونه و دیسک می‌توانند تشکیل شوند. ازطرفی افزایش سرعت دیسک فرصت برای چسبندگی را در نقاط تماس کاهش می‌دهد و درنتیجه مقاومت به سایش بهبود بیشتری می‌یابد. توجه دقیق این نتایج مطالعات بیشتری نیاز دارد.

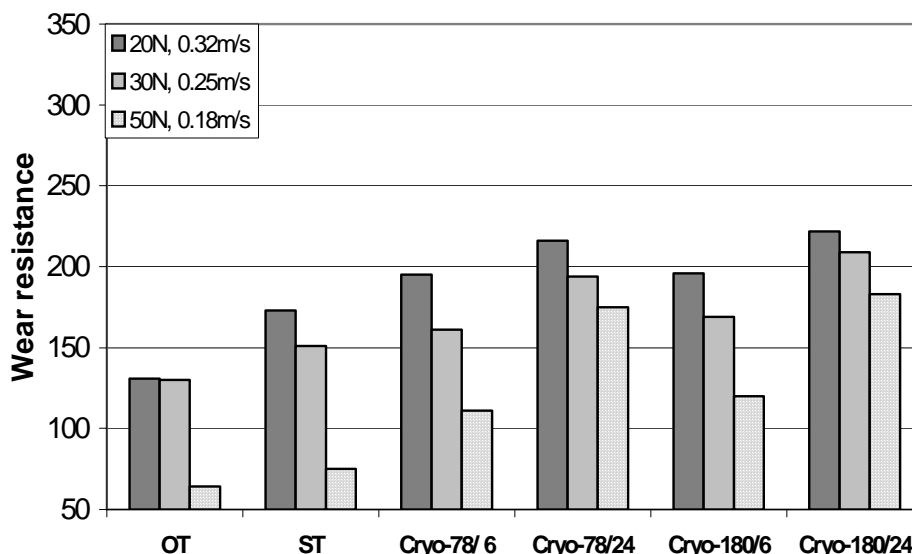
ازطرف دیگر همان‌طور که می‌توان انتظار داشت، افزایش بار اعمالی درطی آزمون سایش موجب کاهش مقاومت به سایش در تمامی نمونه‌های سخت شده می‌شود (شکل ۶)، علت چنین کاهش‌ی در مرحلهٔ اول، افزایش تنش‌های موضعی ناشی از افزایش بار در نقاط تماس دو سطح درگیر (نمونه و دیسک)، است که می‌تواند به تشدید فرآیند سایش، از روش افزایش مقدار تغییرشکل‌ها یا تشکیل ریز ترک‌ها در سطوح تماس منجر شود.

علاوه براین، افزایش تنش‌های موضعی به افزایش دمای

در این حالت با اینکه نمونه‌های غیربرودتی (OT و ST) دارای آستنیت باقی مانده است، (شکل ۳) و این فاز نیز نسبت به مارتنزیت نرم‌تر و چقرمه‌تر است، انتظار می‌رود مقاومت به سایش در این نمونه‌ها بهتر از نمونه‌های برودتی باشد؛ ولی درنهایت نتایج خلاف این موضوع را نشان می‌دهند. بر این اساس به نظر می‌رسد سازوکار سایش در نمونه‌های برودتی (با آستنیت باقی ماندهٔ ناچیز و کاربیدهای ریز) متفاوت با نمونه‌های غیربرودتی (دارای آستنیت باقی مانده) باشد و ممکن است مقاومت به سایش در نمونه‌های برودتی بیشتر متأثر از حضور کاربیدهای ریز و با توزیع یکنواخت در زمینهٔ مارتنزیتی باشد؛ به طوری که به واسطهٔ رسوب این کاربیدها در طی بازگشت، درصد کربن (و به احتمال زیاد عناصر آلیاژی) در زمینهٔ مارتنزیتی کاهش و چقرمگی زمینه بهبود می‌یابد؛ به طوری که آمیزه‌ای از مخلوط زمینهٔ چقرمه‌تر و ذرات سخت و ریزکاربیدی، مقاومت به سایش در فولاد را افزایش می‌دهند.

مقایسهٔ مقاومت به سایش نمونه‌های برودتی نشان می‌دهد (شکل ۵ و ۶) که در یک دمای برودتی خاص با افزایش زمان عملیات، مقاومت به سایش به‌طور میانگین 26.5% درصد افزایش می‌یابد؛ درمقابل درطی عملیات برودتی با کاهش دما از

مقایسهٔ مقاومت به سایش نمونه‌های برودتی نشان می‌دهد (شکل ۵ و ۶) که در یک دمای برودتی خاص با افزایش زمان عملیات، مقاومت به سایش به‌طور میانگین 26.5% درصد افزایش می‌یابد؛ درمقابل درطی عملیات برودتی با کاهش دما از



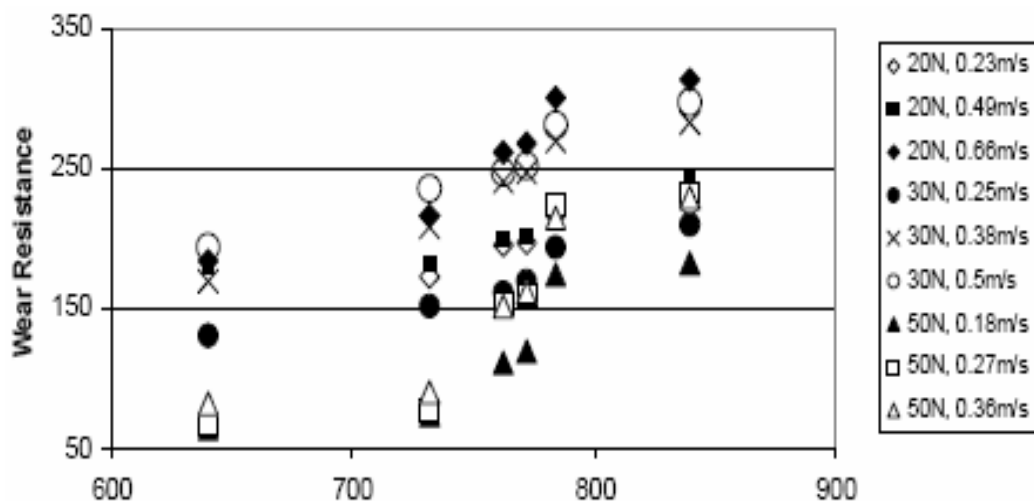
شکل ۶. مقاومت به سایش فولاد سردکار پس از عملیات های حرارتی مختلف، بارهای اعمال متفاوت (N)، در شرایط حداقل سرعت (m/s)، دیسک ساینده (علامت اختصاری طبق جدول ۲).

به حضور آستنیت کمتر و نیز حضور ذرات ریزکاریبندی با پراکندگی یکنواخت، اشاره کرد که احتمال تحولات ساختاری را در حین سرویس دهی کاهش می دهد و تغییرات کمتری را در خواص ایجاد می کند.

در نهایت ارتباط مقاومت به سایش با سختی نمونه ها در شکل ۷ ارائه شده است که طبق آن با افزایش بار اعمالی از ۲۰ نیوتن به ۵۰ نیوتن، به طور متوسط ۵۴/۷ و ۲۱/۷ درصد، به ترتیب، از مقاومت به سایش نمونه های غیربرودتی و برودتی کاسته می شود. در چنین شرایطی کمترین کاهش در مقاومت به سایش نیز برای نمونه های برودتی با زمان برودت ۲۴ ساعت و برابر با ۱۲/۸ درصد است. طبق شکل ۷ در بارهای کم (۲۰ نیوتن) با افزایش سختی نمونه ها، مقاومت به سایش روند صعودی دارد و ارتباط سختی سایش تقریباً خطی است.

نکته مهم این است که در بارهای زیاد (۵۰ نیوتن) تغییرات مقاومت به سایش با سختی غیرخطی می شود؛ به

نقاط تماس می شود که به واسطه آن استحکام موضعی در نقاط تماس کاهش می یابد، و قطعه ها در نقاط تماس منبسط می شوند و فشار موضعی و مساحت سطح درگیر در مناطق تماس به مقدار بیشتری افزایش می یابد. تمامی این عوامل موجبات افزایش اصطکاک ها میان دو ماده را فراهم می آورد و حجم سایش را افزایش می دهد؛ در واقع مقاومت به سایش کاهش می یابد. البته میزان کاهش مقاومت به سایش (به خصوص در بار ۵۰ نیوتن) در نمونه های برودتی کمتر از سایر نمونه هاست، (شکل ۶ و ۷). این واقعیت می تواند مبین این موضوع باشد که استفاده از عملیات برودتی، در مقایسه با سایر عملیات سختکاری، به علت پایدارتر کردن ساختار در برابر تغییرات حرارتی، موجب افزایش سختی گرم در فولاد می شود و مقاومت به سایش را بهبود می بخشد. شرایط مشابه با این موضوع برای فولادهای D۲ و M۲ نیز گزارش شده است [۱۷]. از علل پایداری حرارتی ساختار در نمونه های برودتی، می توان



شکل ۷. ارتباط میان سختی و مقاومت به سایش در فولاد D6، در شرایط متفاوت عملیات حرارتی، بار اعمالی، و سرعت خطی دیسک سای.

سردکار D6 مشخص کرد که در مقایسه با عملیات حرارتی مستمر سرد کردن سریع بازگشت، عملیات برودتی موجب بهبود فراوان در سختی و به خصوص در مقاومت به سایش این فولاد، به ترتیب در حد ۱۴ و ۸۰ درصد، می شود و همچنین موجب فراهم شدن شرایط زیر در این فولاد می شود:

۱. آستنیت باقی مانده در ساختار کاهش می یابد و کاربیدهای ریزمیکرونی با توزیع یکنواخت در ریزساختار رسوب می کنند.
۲. نگهداری فولاد در دماهای برودتی (-78°C یا -180°C) موجب بروز پدیده یا پدیده های هم دما می شود.
۳. تأثیر افزایش زمان عملیات برودتی بر بهبود سختی و مقاومت به سایش بیش از اثر کاهش دما در طی این عملیات است.
۴. با نگهداری طولانی مدت فولاد در دماهای برودتی، اثر کاهش دمای برودت از (-78°C به -180°C) بر سختی و مقاومت به سایش کاهش می یابد.
۵. افزایش سرعت حرکت در طی آزمون سایش منجر به

روشی که طبق شکل ۷ در ۵۰ نیوتن، افزایش سختی نمونه ها تا کمتر از ۷۴۰ ویکرز، به بهبود مقاومت به سایش در فولاد D6 نمی شود. در صورت افزایش سختی نمونه تا مقادیری بیش از ۷۴۰ ویکرز، مقاومت به سایش با شیب نسبتاً زیادی افزایش می یابد. از آنجا که فقط نمونه های برودتی سختی بالای ۷۴۰ ویکرز دارند، به نظر می رسد در این حالت نیز توانایی در حفظ سختی و پایداری حرارتی، عامل چنین رفتاری در نمونه های برودتی است؛ زیرا افزایش بار در طی آزمون سایش (تا ۵۰ نیوتن) همراه با افزایش دما در میان سطوح نمونه و دیسک ساینده است. در این شرایط فقط نمونه هایی که سختی گرم خود را حفظ کنند، مقاومت به سایش بیشتری ارائه می دهند. به عبارتی استفاده از عملیات برودتی به حفظ سختی گرم در نمونه ها منجر می شود و حد تحمل بار را در نمونه ها در طی شرایط سایشی افزایش می دهد.

۴- نتیجه گیری

ارزیابی ریزساختار، سختی و مقاومت به سایش در فولاد

- Carbides in Special Cryogenic and Tempering Process Key to Improved Properties of Alloy Steels”, *Industrial Heating*, Vol. 64 No. 1 (1997) 40-44.
8. Yun, D., Xiaoping, L. and Hongshen, X., “Deep Cryogenic Treatment of High Speed Steel and its Mechanism”, *Heat Treatment of Metals*, Vol. 25 No. 3 (1998) 55-59.
 9. Huang, J. Y. and Zhu, Y. T., Liao, X. Z., Beyerlein, I. J., Bourke, M. A. and Mitchell, T. E., “Microstructure of Cryogenic Treated M2 Tool Steel”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 339 Trans. A (2003) 241-244.
 10. Hayakawa, H., Tanigami, M. and Oka, M., “Low Temperature Aging of the Freshly Formed Marten site in a Fe-Ni-C Alloy”, *Metallurgical Trans. A* Vol. 16 (1985) 1745-1750.
 11. Chen, L., Böttger, A. and Mittemeijer, E. J., “Tempering of Iron-Carbon-Martensite sites”, *Metallurgical Trans. A* Vol. 23 No. 4 (1992) 1120-1145.
 12. Meng, F., Tagashira, K., Azuma, R. and Sohma, H., “Role of Eta Carbide Precipitation on the Wear Resistance Improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C Tool Steel by Cryogenic Treatment”, *ISIJ*, Vol. 34 No. 2 (1994) 205-210.
 13. Meng, F., Tagashira, K., Sohma, H., “Wear Resistance and Microstructure of Cryogenic Treated Fe-1.4Cr-1C Bearing Steel”, *Script Metallurgical and Materialia*, Vol. 31 No. 7 (1994) 865-868.
 14. Yen, P. L., “Effect of Cryogenic Treatment on the Wear Resistance of Tool Steel”, PhD Thesis, The Pennsylvania State University, USA, (1996).
 15. Mahmudi, R., Ghasemi, H. M., Faradji, H. R., “Effects of Cryogenic Treatments on the Mechanical Properties and Wear Behavior of High Speed Steel M2”, *Heat Treatment of Metals*, Vol. 27 No. 3 (2000) 69-72.
 16. Collins, D. N. and Dormer, J., “Deep Cryogenic Treatment of a D2 Cold Work Tool Steel”, *Heat Treatment of Metals* Vol. 24 No. 3 March (1997) 71-74.
 17. Lal, D. M., Renganarayanan, S. and Kalanidhi, A., “Cryogenic Treatment to Augment Wear Resistance of Tool and Die Steels”, *Cryogenic*, Vol. 41 (2001) 149-155.
 18. ASTM Standard Book, “Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on Disk Apparatus”, G99-95 Vol. 03-02 (1995) 386-390.
 19. Dasilva, F. J., Franco, S. D., Machado, Á. R., Ezugwu, E. O. and Souza, J. A. M., “Performance of Cryogenically Treated HSS Tools”, *Wear*, Vol. 261 (2006) 674-685.

- بهبود مقاومت به سایش در نمونه‌های برودتی می‌شود.
۶. نمونه‌های برودتی به جای افزایش بار اعمالی مقاومت بیشتری، درمقایسه با سایر نمونه‌ها، دربرابر کاهش مقاومت به سایش از خود نشان می‌دهند.
 ۷. عملیات برودتی موجب بهبود پایداری حرارتی و سختی گرم در فولاد می‌شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان مقاله از مدیر محترم گروه مواد ریاست محترم دانشکده مهندسی دانشگاه سمنان برای حمایت‌های مالی، تدارکاتی و آزمایشگاهی تشکر می‌نمایند.

مراجع

1. Wilson, R., “Metallurgy and Heat Treatment of Tool Steels”, McGraw-Hill, London (1975).
2. Tool Materials, ASM Specialty Handbook, Editor Davis, J. R., (1995).
3. Becherer, B.A., and Witheford, T. J., “Cold Treatment and Cryogenic Treatment of steel”, 10th Edition Article ASM, Materials Park, OH, Vol.4 (1991) 203-206.
4. Geller, Yu., Tool Steels, Mir Publisher, (1987), 303-305.
5. Reitz, W. and Pendray, J., “Cry processing of Materials, a Review of Current Statute”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 16 No. 6 (2001) 829-840.
6. Meng, F., Tagashira, K., Azuma, R. and Sohma, H., “Role of Eta-Carbide Precipitations in the Wear Resistance Improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C Tool Steel by Cryogenic Treatment”, *ISIJ*, Vol. 34 No. 2 (1994) 205-210.
7. Yen, P. and Kamody, D. J., “Formation of Fine Eta