



تأثیر زمان عملیات زیر صفر عمیق بر توزیع و اندازه‌ی کاربیدهای ثانویه، سختی و رفتار سایشی فولاد ۵۱۲۰

سِیما تَرکیان^۱، علی شفیع‌ی^۲، محمد رضا طرقی نژاد^۳، مرتضی صفری^۴

^۱. دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان (کارشناسی)

^۲. دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان (دانشیار)

^۳. دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان (استاد)

^۴. باشگاه پژوهشگران جوان (کارشناسی ارشد)

چکیده

در این تحقیق تأثیر زمان عملیات زیر صفر روی فولاد ۵۱۲۰ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌های دیسکی در دمای 920°C به مدت ۶ ساعت کربن‌دهی شده و در هوا خنک شدند و پس از آستنیت‌کردن در روغن کوئچ گردید؛ سپس نمونه‌ها به مدت زمان‌های ۱، ۲۴، ۳۰ و ۴۸ ساعت در نیتروژن مایع نگهداری شدند و در دمای 200°C به مدت ۲ ساعت بازپخت شد. آزمون سایش با استفاده از ساچمه با پوشش کاربید تنگستنی با دو بار ۸۰ و ۱۱۰ نیوتون انجام شد. سختی نمونه‌ها با بار ۳۰ کیلوگرم قبل و بعد از بازپخت اندازه‌گیری شد. نتایج آزمون سایش و سختی سنجی نشان داد که با افزایش زمان فرایند زیر صفر تا ۲۴ ساعت، مقاومت سایشی و سختی نمونه‌ها افزایش یافته است که علت آن کاهش میزان آستنیت باقی‌مانده، افزایش میزان کاربیدهای ثانویه و توزیع یکنواخت آن بوده است.

واژه‌های کلیدی: آستنیت باقیمانده؛ کربن دهی؛ عملیات زیر صفر؛ کاربید

^۱. Sima.torkian@ma.iut.ac.ir

مقدمه

با افزایش درصد کربن، دمای آغاز و پایان استحاله ی مارتنزیت (M_s و M_f) به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در حقیقت کربن موجود به صورت محلول جامد، استحکام یا مقاومت برشی آستنیت را افزایش داده و بنابراین با افزایش کربن نیرو محرکه ی بیش تری جهت شروع لغزش برای تشکیل مارتنزیت لازم است [۱]. با انجام فرایند کربن دهی به منظور سختی کاری سطحی، با افزایش درصد کربن سطح، M_s کاهش یافته و میزان آستنیت باقیمانده در اثر سریع سرد کردن در سطح افزایش خواهد یافت.

آستنیت باقیمانده فازی نرم بوده و در دمای پایین ناپایدار است؛ به گونه‌ای که در دمای پایین و در حین کار به مارتنزیت ترد تبدیل می‌شود. تبدیل آستنیت به مارتنزیت تقریباً ۴٪ انبساط حجمی ایجاد می‌کند که منجر به اعوجاج قطعات می‌شود [۲ و ۳]. بنابراین از عملیات عملیات زیر صفر یا بازپخت چندتایی در دمایی نسبتاً بالا و یا مدت زمان طولانی برای کمینه کردن میزان آستنیت باقیمانده در فولادها استفاده می‌شود [۲].

دو نوع عملیات عملیات زیر صفر^۱ وجود دارد: (۱) عملیات زیر صفر سطحی^۲ که در محدوده دمایی ۱۰۰- تا 60°C انجام می‌گیرد. این عملیات منجر به کاهش آستنیت باقیمانده و افزایش مقاومت سایشی می‌شود. (۲) عملیات زیر صفر عمیق^۳ که در دماهای زیر 125°C انجام می‌شود [۴].

اثرات عملیات زیر صفر عمیق عبارت‌اند از:

- ۱) افزایش عمر سایشی [۲-۷]؛
- ۲) افزایش سختی [۲-۴ و ۶-۸]؛
- ۳) کاهش تنش‌های پسماند [۹-۱۰]؛
- ۴) پایداری ابعادی ماده [۷ و ۱۱]؛
- ۵) افزایش هدایت الکتریکی فلزات و مقاومت به خوردگی [۷ و ۱۱]؛

به علت تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت [۲-۷ و ۹-۱۰] و تشکیل کاربیدهای بسیار ریز [۲-۳ و ۵-۶ و ۱۰]، تشکیل ابرهای نابجایی در فصل مشترک زمینه‌ی مارتنزیتی و کاربیدها در طول فرایند هم‌دماسازی [۱۲]، توزیع یکنواخت کاربیدها، کوچک کردن اندازه‌ی کاربیدهای ثانویه، افزایش میزان و چگالی آنها [۶].

بنسلی و همکارانش [۱۳] نشان دادند که با انجام عملیات زیر صفر بر روی فولاد En ۳۵۳ کربوره شده، مقاومت سایشی نمونه‌ها بهبود یافته است به گونه‌ای که در اثر عملیات زیر صفری عمیق ناحیه‌ی مقاوم به سایش بیش تر خواهد بود. این افزایش مقاومت سایشی برای نمونه‌های عملیات زیر صفری سطحی ۸۵٪ و برای نمونه‌های عملیات زیر صفر عمیق شده در حدود ۳۷۲٪ بوده است که علت آن رسوب کاربیدهای ثانویه‌ی بسیار ریز بوده است؛ افزایش مقاومت سایشی و سختی به دلیل استحاله‌ی آستنیت باقیمانده به مارتنزیت گزارش شده است. ویل [۱۴] روی تاثیر عملیات عملیات زیر صفر بر فولادهای D_2 و D_3 مطالعه‌ای مقایسه‌ای انجام داد. در این بررسی

^۱ Cryogenic treatment

^۲ Shallow Cryogenic Treatment

^۳ Deep Cryogenic Treatment

نشان داده شده است که، سختی نمونه‌های هر دو فولاد افزایش یافته است. در مورد فولادهای D³ افزایش تدریجی سختی در طول فرایندهای مورد بررسی وجود داشته است. در هر دو فولاد، کاربیدهای توده‌ای مشاهده شده است. شکل عمومی کاربیدها به صورت کروی، گره‌گره یا بیضوی بوده است. در فولاد D² همه‌ی آستنیت باقیمانده به مارتنزیت تبدیل نشده اما در فولاد D³ همه‌ی آستنیت باقیمانده به مارتنزیت تبدیل می‌شود. کنش لو و همکارانش [۱۵] با بررسی اثر عملیات زیر صفر بر ریزساختار و خواص سایشی و مکانیکی فولاد ابزار کار داغ AISI H13 نشان دادند که با انجام عملیات زیر صفر در ۷۰- و عملیات زیر صفری عمیق در ۱۹۶ °C-، آستنیت باقیمانده به مارتنزیت تبدیل شده و با کاهش دما، میزان مارتنزیت حاصله افزایش یافته و تیغه‌های کوچکتر مارتنزیت به صورت یکنواخت در ریزساختار توزیع یافته است؛ همچنین عملیات زیر صفر عمیق منجر به رسوب ذرات کاربیدی ریزتر و یکنواخت‌تر شده است. اصلاح ریزساختار باعث بهبود قابل توجه خواص مکانیکی این فولاد شده است. فولاد ۵۱۲۰ فولاد سخت‌شونده‌ی سطحی می‌باشد و در ساخت قطعاتی که ترکیبی از استحکام متوسط، چقرمگی و مقاومت سایشی نیاز است مورد استفاده قرار گرفته و به طور متناوب در قطعات تحت تنش در صنایع خودروسازی برای ساخت قطعاتی مانند چرخ‌دنده، میل لنگ کاربرد دارد. از آنجا که تا کنون عملیات زیر صفر بر این فولاد انجام نشده است در این پژوهش تأثیر زمان عملیات زیر صفر بر رفتار سایشی فولاد ۵۱۲۰ مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

ترکیب شیمیایی فولاد ۵۱۲۰ در جدول ۱ آورده شده است. به منظور بررسی رفتار سایشی این فولاد، نمونه‌هایی دیسکی در ابعاد $5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \phi$ آماده‌سازی شد؛ این نمونه‌ها در دمای 920°C به مدت ۶ ساعت کربن‌دهی شده و در هوا خنک شدند. ترکیب کربن ده، پودر زغال، باریم کربنات و سدیم هیدروکسید بوده است. عمق لایه‌ی کربن‌دهی $30 \pm 1055 \mu\text{m}$ بوده است. پس از سرد شدن در دمای محیط، عملیات آستنیت‌زدایی بر روی نمونه‌ها اعمال و در روغن کوئنچ گردید. به منظور بررسی تأثیر زمان فرایند زیر صفر عمیق، نمونه‌ها در سه زمان ۱، ۲۴، ۳۰ و ۴۸ ساعت در نیتروژن مایع نگهداری شدند و در دمای 200°C به مدت ۲ ساعت عملیات بازپخت انجام شد. اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها قبل و بعد از بازپخت، با استفاده از دستگاه سختی سنجی ۲RC-S Dia Tester با بار اعمالی ۳۰ کیلوگرم انجام گردید؛ تست سایش بر روی نمونه‌ها با استفاده از گلوله‌ی کاربید تنگستنی و به روش پین روی دیسک با دو بار ۸۰ و ۱۱۰ نیوتون، به مسافت ۱۰۰۰ متر در رطوبت هوای $5 \pm 30\%$ و درجه حرارت $5 \pm 25^\circ\text{C}$ انجام شد؛ نرخ سایش و مقاومت سایش نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۱ (که در آن W_r نرخ سایش (mgr/N.m)، Δm کاهش جرم (mgr)، ρ چگالی (gr/cm^3)، F نیرو (N) و l مسافت سایش (m) و درصد افزایش مقاومت سایشی نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۲ (R_i مقاومت نمونه‌ی عملیات حرارتی متداول شده و R_i مقاومت سایشی نمونه‌ی مورد نظر)، محاسبه شد.

$$Wr = \frac{\Delta m}{(\rho \times F \times l)} \quad Wr = \frac{\Delta m}{(\rho \times F \times l)} \quad (1)$$

$$\text{درصد افزایش مقاومت سایشی} = \frac{(Ri - R_0) \times 100}{R_0} = \frac{(Ri - R_0) \times 100}{R_0} \quad (2)$$

برای بررسی سطح سایش نمونه ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XI۳۰ استفاده گردید؛ به منظور مشاهده ی کاربیدها از محلول کلرید مس (۵ گرم) + هیدروکلریک اسید (۱۰۰ میلی لیتر) + اتانول (۱۰۰ میلی لیتر) استفاده شد.

نتایج و بحث

ریز ساختار و تحولات ریز ساختاری

در شکل ۱ میزان و توزیع کاربیدها به خوبی قابل مشاهده می باشد. با افزایش زمان عملیات زیر صفر تا ۲۴ ساعت میزان کاربیدها افزایش یافته و توزیعی یکنواخت داشته اند، در مدت زمان ۳۰ ساعت کاربیدها شروع به رشد کرده تا جایی که در ۴۸ ساعت کاربیدها کاملاً درشت شده اند. با افزایش زمان عملیات زیر صفر کاربیدهای درشت تر، کاربیدهای کوچکتر را مصرف کرده و رشد می کنند. علت این امر افزایش فرصت نفوذ اتم های کربن در مدت زمان های بیشتر است.

در حین عملیات زیر صفر آستنیت باقیمانده به مارتزیت تبدیل شده و کاربیدهای ریز ثانویه رسوب می کنند.

سختی سنجی و سایش

بر اساس جدول ۲، با افزایش زمان عملیات زیر صفر، سختی و میکروسختی نمونه ها افزایش یافته است. سختی دارای میزانی بیشینه در مدت زمان ۴۸ ساعت عملیات زیر صفر بوده است.

داده های حاصل از آزمون سایش نشان می دهد که نمونه ی ۲۴DCT (شکل ۵، ۶ و ۷) دارای کمترین میزان کاهش وزن و نرخ سایش و بیشترین مقاومت سایشی در هر دو بار اعمالی ۸۰ و ۱۱۰ نیوتون بوده است؛ در زمان های ۳۰ و ۴۸ ساعت کاهش وزن افزایش و مقاومت سایشی کاهش یافته است. نتایج نشان می دهد که مقاومت سایشی در نمونه های عملیات زیر صفر شده ۲۰ تا ۱۹۱/۳۹٪ افزایش یافته است؛ نمونه ی ۲۴ ساعت عملیات زیر صفر شده دارای بیشترین میزان مقاومت سایشی بوده و در نمونه ی ۴۸ ساعت عملیات زیر صفر شده مقاومت سایشی افت پیدا کرده است. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از سطوح سایش نمونه ها (شکل ۲)، مکانیزم غالب سایش در نمونه ی CHT، مکانیزم سایش چسبان بوده است؛ وجود ذرات چسبیده شده به سطح نمونه دلیلی بر این مدعاست. با افزایش زمان عملیات زیر صفر تا ۲۴ ساعت مکانیزم سایش و شدت آن بهبود یافته است و به سایش خراشان تغییر نموده است؛ محصولات سایش نیز بر سطح نمونه ی ۲۴DCT چسبیده است. در زمان های بیشتر عملیات زیر صفر، سایش خراشان شدت یافته و در مدت زمان ۴۸ ساعت به حالت شیاردار شدن تغییر یافته است. وجود ترک هم بر روی سطوح و هم در محصولات سایش گواهی بر

خراشان بودن مکانیزم سایش بوه است (شکل ۲ و ۳). محصولات سایش حاصل از نمونه ی ۲۴DCT ریز تر شده و نمونه ی ۴۸DCT دارای بزرگترین ذرات حاصل از سایش حتی نسبت به نمونه ی CHT بوده است که بیانگر کاهش مقاومت سایشی نمونه ها با افزایش زمان عملیات زیر صفر می باشد. افزایش مقاومت سایشی نمونه های عملیات زیر صفر شده به دلیل نفوذ موضعی اتم های کربن و عناصر آلیاژی به عیوب می باشد؛ این میکرو تنش های داخلی ناشی از سریع سرد کرن قطعات است. بنابراین افزایش مقاومت سایش در نمونه های عملیات زیر صفر شده ناشی از حذف آستنیت باقیمانده، افزایش میزان کاربید ها و توزیع یکنواخت کاربید ها می باشد. با افزایش زمان نگهداری در دمای زیر صفر، اتم های بیشتری به عیوب نزدیک نفوذ کرده و مکان های جوانه زنی بیشتر برای رسوب کاربید ها فراهم می شود؛ در زمان های بیشتر جدایش اتمی افزایش یافته و منجر به رشد بیش از حد کاربید ها شده و توزیع آن ها را ضعیف می کند. توزیع نامناسب کاربید ها مقاومت سایشی را کاهش و نرخ سایش را افزایش می دهد [۱۷].

نتیجه گیری

- (۱) با افزایش زمان عملیات زیر صفر سختی نمونه ها افزایش یافته است به گونه ای که نمونه ی ۴۸ ساعت عملیات زیر صفر شده دارای بیشترین سختی بوده است.
- (۲) مقاومت سایش نمونه ی ۲۴ ساعت عملیات زیر صفر شده بیشترین میزان و نمونه ی ۴۸ ساعت عملیات زیر صفر شده دارای کمترین مقاومت سایش بوده است که ناشی از توزیع یکنواخت، افزایش میزان و ریزتر شدن کاربید های ثانویه در زمان ۲۴ ساعت بوده است.
- (۳) با افزایش زمان عملیات زیر صفر میزان آستنیت باقیمانده کاهش یافته و حتی حذف می گردد که علت اصلی افزایش سختی نمونه ها می باشد.
- (۴) با افزایش زمان عملیات زیر صفر تا ۲۴ ساعت میزان کاهش جرم، به کمترین میزان و مقاومت سایشی و درصد مقاومت سایشی به بیشترین میزان رسیده است؛ علت این نتیجه ریز شدن کاربید ها، افزایش میزان آن و توزیع یکنواخت آن ها می باشد. با افزایش زمان عملیات زیر صفر بیش از ۲۴ ساعت رشد کاربید ها به دلیل وجود زمان کافی برای نفوذ کربن و عناصر آلیاژی مقاومت سایشی کاهش می یابد.
- (۵) زمان ۲۴ ساعت ترکیب مناسبی از سختی و مقاومت سایشی را در نمونه ها ایجاد کرده است.

مراجع

۱. م.ع. گلعدار، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولاد ها، ویرایش دوم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.
۲. Das D, Dutta A. K and Ray K. K, "Influence of varied cryotreatment on the wear behavior of AISI D۲ steel", *Wear*, ۲۶۶, ۲۰۰۹, ۲۶۷-۳۰۹.
۳. A. Akhbarizadeh, A. Shafyei and M.A. Golozar, "Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D۶ tool steel", *Materials & Design*, ۳۰, ۲۰۰۹, ۳۲۵۹-۳۲۶۴.

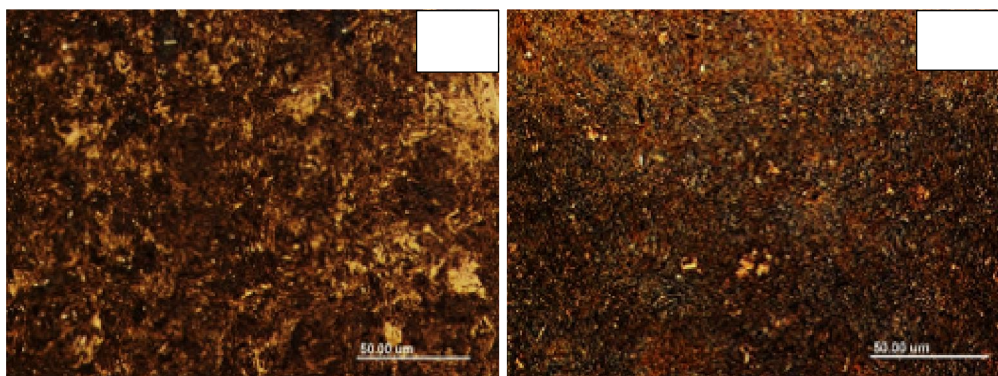
۴. A. Akhbarizadeh, M.A. Golozar, A. Shafeie and M. Kholghy, "Effects of Austenizing Time on Wear Behavior of D₆ Tool Steel After Deep Cryogenic Treatment", *Journal of Iron and Steel Research, International*, ۱۶(۶), ۲۰۰۹, ۲۹-۳۲.
۵. A. Bensely, A. Prabhakaran, D. Mohan Lal and G. Nagarajan, "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En ۳۵۳) by cryogenic treatment", *Cryogenics*, ۴۵, ۲۰۰۵, ۷۴۷-۷۵۴.
۶. A. Behara, S.C. Mishra, "Comparative Study of Cryo -Treated Steel", *International Journal of Scientific & Technology Research*, ۱, ۲۰۱۲.
۷. J. Da Silva Flávio, D. Franco Sinésio, R. Machado Álisson, O. Ezugwu Emmanuel and M. Souza Jr Antônio, "Performance of cryogenically treated HSS tools", *Wear*, ۲۶۱, ۲۰۰۶, ۶۷۴-۶۸۵.
۸. P. Baldissera and C. Delprete, "Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of ۱۸NiCrMo_۵ carburized steel", *Materials & Design*, ۳۰, ۲۰۰۹, ۱۴۳۵-۱۴۴۰.
۹. A. Bensely, S. Venkatesh, D. Mohan Lal, G. Nagarajan, A. Rajadurai and J. Krzysztof, "Effect of cryogenic treatment on distribution of residual stress in case carburized En ۳۵۳ steel", *Materials Science and Engineering*, ۴۷۹, ۲۰۰۸, ۲۲۹-۲۳۵.
۱۰. D. Senthilkumar and I. Rajendran, "Influence of Shallow and Deep Cryogenic Treatment on Tribological Behavior of En ۱۹ Steel", *Journal of Iron and Steel Research, International*, ۱۸, ۲۰۱۱, ۵۳-۵۹.
۱۱. B. Podgornic, F. Majdic, V. Levkovsek and J. Vizintin, "Improving tribological properties of tool steels through combination of deep-cryogenic treatment and plasma nitriding", *Wear*, ۲۸۸, ۲۰۱۲, ۸۸-۹۳.
۱۲. CH. Gogte, D. Peshwe, A. Likhite and S. Lomte, "On the Mechanism of the Effect of the Cryogenic Treatment on High Speed Steels". *Advanced Materials Research*, ۳۸۳-۳۹۰, ۲۰۱۲, ۷۱۳۸-۷۱۴۲.
۱۳. A. Bensely, A. Prabhakaran, D. Mohan Lal and G. Nagarajan, "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En ۳۵۳) by cryogenic treatment", *Cryogenics*, ۴۵, ۲۰۰۵, ۷۴۷-۷۵۴.
۱۴. A. K. Das D, Dutta and K. K. Ray, "Influence of temperature of sub-zero treatments on the wear behaviour of die steel", *Wear*, ۲۶۷, ۲۰۰۹, ۱۳۶۱-۱۳۷۰.
۱۵. A. D. Wale, V. D. Wakchaure, "Effect of cryogenic treatment on mechanical properties of cold work tool steels", *International Journal of Modern Engineering research*, ۳, ۲۰۱۳, ۱۴۹-۱۵۴.
۱۶. M. Koneshlo, K. Meshinchi Asl and F. Khomamizadeh, "Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H₁₃ hot work tool steel", *Cryogenics*, ۵۱, ۲۰۱۱, ۵۵-۶۱.
۱۷. K. Amini, S. Nategh and A. Shafyei, "Influence of different cryotreatments on tribological behavior of ۸۰CrMo_{۱۲} cold work tool steel", *Materials & Design*, ۳۱, ۲۰۱۰, ۴۶۶۶-۴۶۷۵.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۷۱۴۷.

کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کروم
۰/۲۱	۰/۲۲	۱/۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۱۶	۱/۰۷

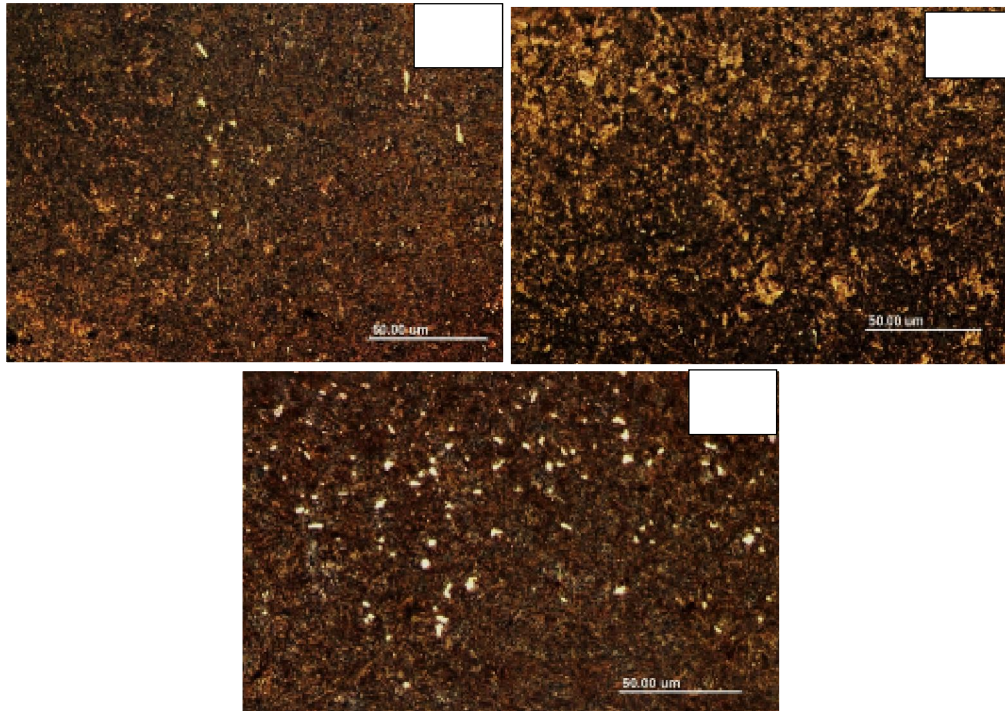
جدول ۲. سختی بر اساس نوع عملیات انجام شده (DCT).

نمونه	نوع عملیات حرارتی انجام شده	سختی قبل از بازپخت (HV ۳۰)	سختی بعد از بازپخت (HV ۳۰)
CHT	آستیت، کوئچ و تمپر	۷۲۵	۵۴۰
۱DCT	۱ ساعت عملیات زیر صفر عمیق و تمپر	۷۴۶	۵۶۴
۲۴DCT	۲۴ ساعت عملیات زیر صفر عمیق و تمپر	۸۱۷	۵۷۹
۳۰DCT	۳۰ ساعت عملیات زیر صفر عمیق و تمپر	۸۲۳	۵۹۴
۴۸DCT	۴۸ ساعت عملیات زیر صفر عمیق و تمپر	۹۶۶	۷۲۰

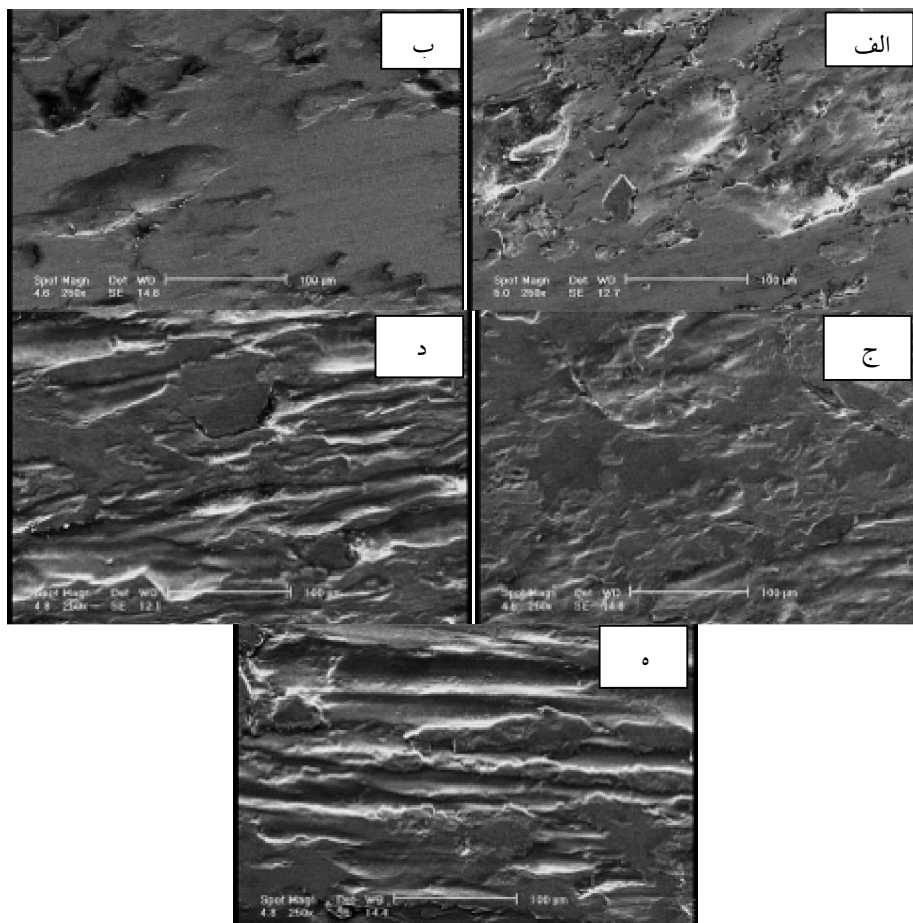


شکل ۱: تصاویر میکروساختار توسط میکروسکوپ نوری، اچ با محلول کلرید مس (۵ گرم) + هیدروکلریک اسید (۱۰۰ میلی لیتر) + اتانول (۱۰۰ میلی لیتر) با بزرگنمایی ۵۰۰X (الف) CHT، (ب) ۱DCT...

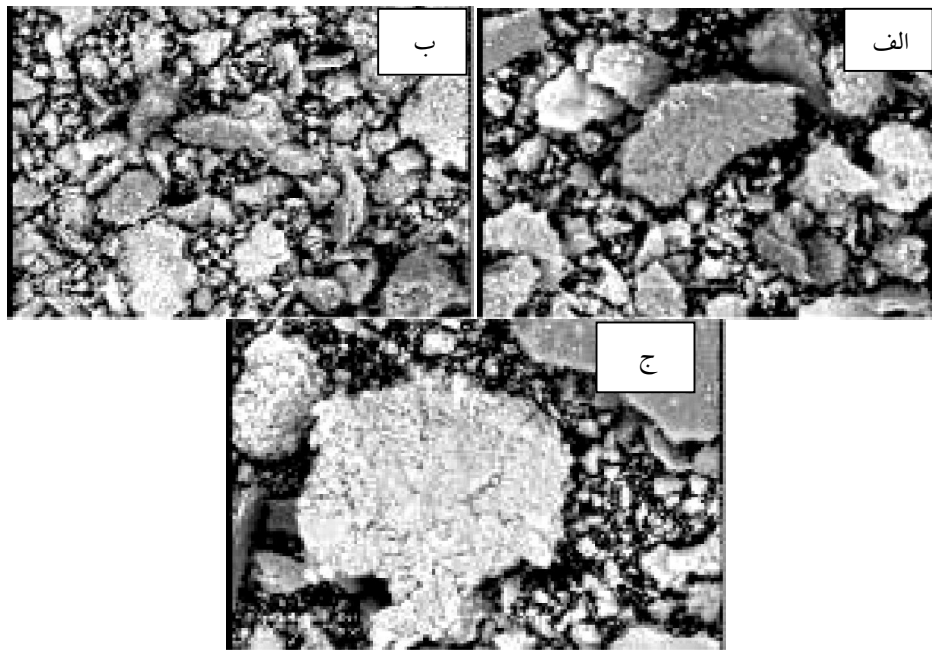
تأثیر زمان عملیات زیر صفر...



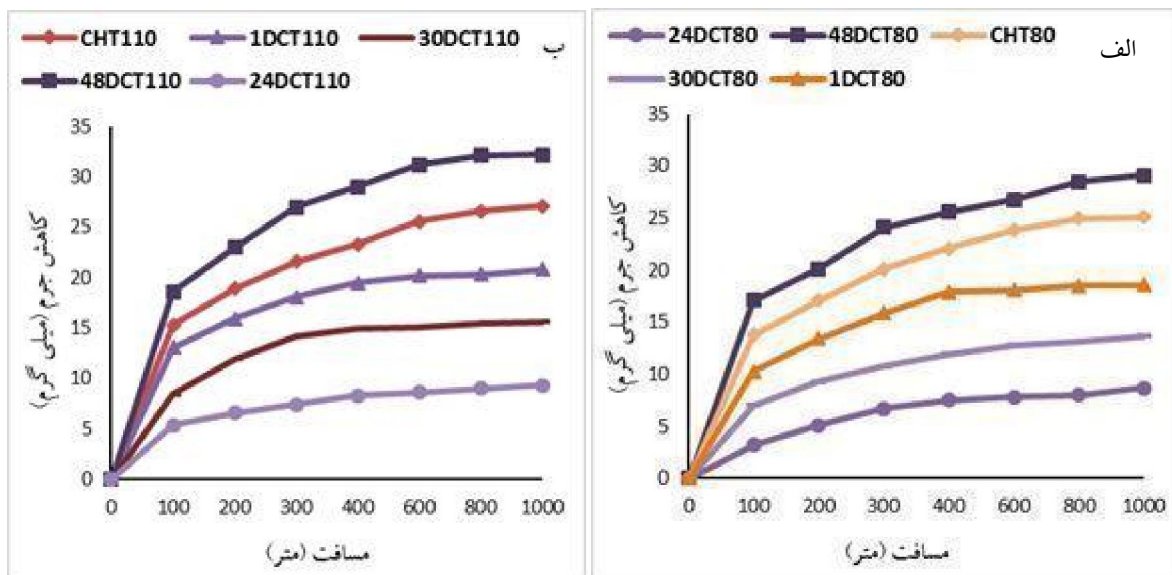
ادامه ی شکل ۱: (ج) ۲۴DCT، (د) ۳۰DCT، (ه) ۴۸DCT.



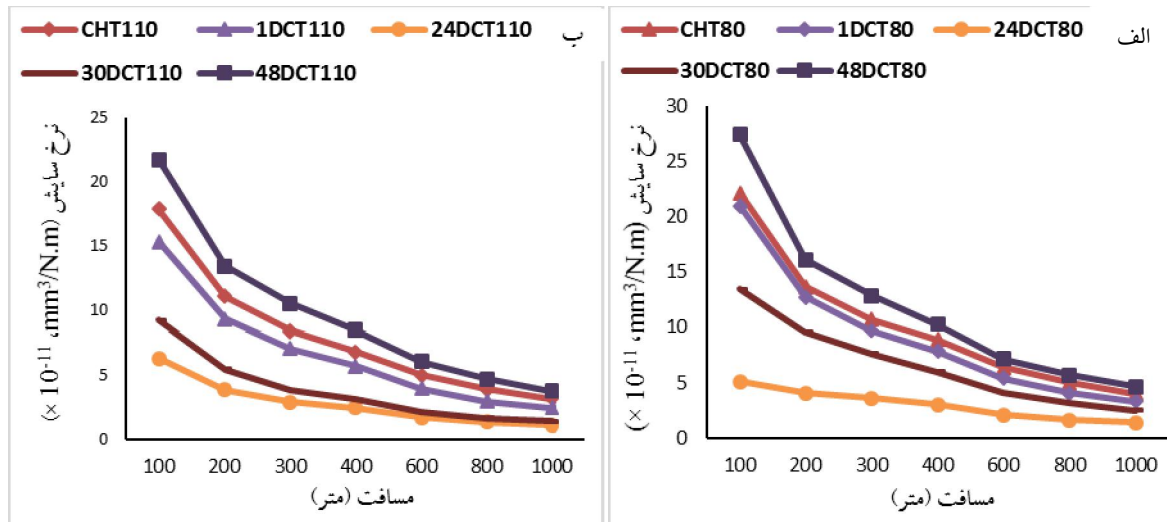
شکل ۲: سطح سایش دیسک، الف) CHT، ب) ۱DCT، ج) ۲۴DCT، د) ۳۰DCT و ه) ۴۸DCT در بار اعمالی ۸۰N



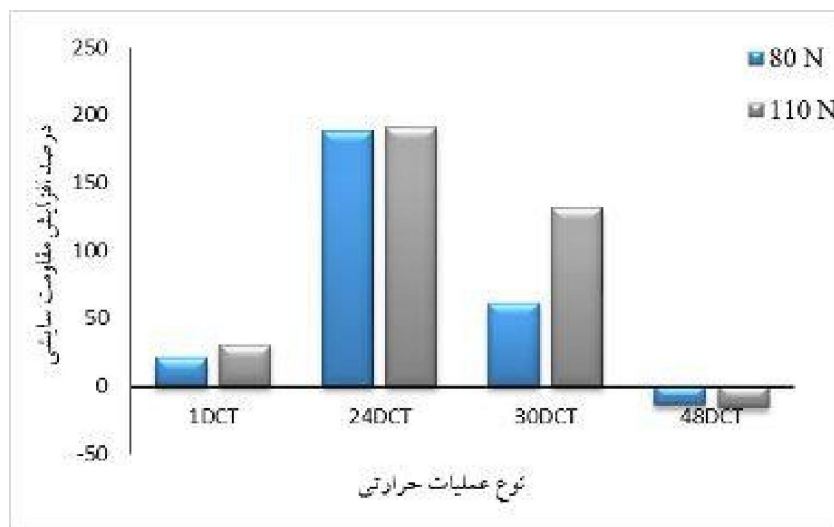
شکل ۳: تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات سایش الف) نمونه ی CHT، ب) نمونه ی ۲۴DCT و ج) نمونه ی ۴۸DCT



شکل ۵: نمودار کاهش جرم بر حسب مسافت برای نمونه های مختلف، الف) ۸۰ N و ب) ۱۱۰ N.



شکل ۶: نرخ سایش بر حسب مسافت برای نمونه های مختلف، الف) ۸۰ N و ب) ۱۱۰ N.



شکل ۷: درصد افزایش مقاومت سایشی بر اساس نوع عملیات حرارتی