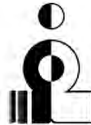




گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

سمپوزیوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷

اهواز - دانشگاه شهید چمران

اثر عملیات حرارتی پیرسازی بر رفتار سایش لغزشی فولاد زنگ نزن PH 17-4

محمد رضا توکلی شوشتری^۱، خلیل رنجبار^۲، محمد هادی مؤید^۳

۱- دانش آموخته مهندسی مواد و متالورژی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

فولاد PH 17-4 یک فولاد زنگ نزن رسوب سختی شونده مارتنزیتی کم کربن شامل نیکل و مس می باشد که توسط عملیات پیرسازی با تشکیل رسوبات ریز فاز ثانویه از محلول فوق اشباع قابل سخت شدن است. این فولاد به دلیل ترکیب خوبی از استحکام بالا، چقرمگی، مقاومت به خوردگی و سایش، و همچنین جوش پذیری، کاربردهای گسترده ای در صنایع هسته ای، شیمیایی، نفت و گاز، هوافضا و... دارد. در این تحقیق، این آلیاژ ابتدا تحت عملیات آنیل انحلالی در دمای بالا قرار داده شد و پس از آب دادن در هوا در دماهای ۴۸۰، ۵۵۰ و ۶۲۰ درجه سانتیگراد برای زمان های مشخص، در معرض پیرسازی قرار گرفت. بررسی های میکروساختاری و سختی سنجی صورت پذیرفت و سپس خصوصیات سایش لغزشی نمونه ها با استفاده از دستگاه سایش pin-on-disc تحت شرایط خشک در دمای اتاق بر روی یک سطح فولادی سخت در بار ثابت ۱۵ نیوتن و سرعت ۰/۵ m/s و طی مسافت لغزشی تا ۳۰۰۰ متر مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، مکانیزم های سایش مطالعه و شناسایی گردیدند. نتایج آزمایشات و بررسی ها نشان داد که نمونه های پیرسازی شده در دمای ۴۸۰°C نرخ سایش کمتری در مقایسه با سایر نمونه ها از خود نشان می دهند.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن PH 17-4، رفتار سایشی، عملیات حرارتی پیرسازی.

^۱ mtc.tech@gmail.com

^۲ k_ranjbar@scu.ac.ir

^۳ mhmoayed@um.ac.ir

۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شونده^۱ بدلیل خصوصیات عملیات حرارتی آنها و همچنین ترکیبی از استحکام بالا، اعوجاج کم، مقاومت به خوردگی و سایش خوب، جوش پذیری عالی و سختی نسبتاً بالا، به طور گسترده در مصارف مختلف و در بسیاری از تجهیزات مورد استفاده واقع شدند. این فولادها با توجه به ترکیب شیمیایی و فازهای موجود در ریزساختار تقسیم بندی می شوند [۴-۱]. یکی از رایجترین و مهمترین آلیاژ رسوب سختی شونده در این گروه، فولاد PH 17-4 (AISI 630) است که یک فولاد زنگ نزن مارتنزیتی شامل ۳-۵٪ وزنی مس می باشد که توسط رسوبات نانومتری غنی از مس توزیع شده در زمینه مارتنزیت تیغه ای شکل تمپر شده استحکام یافته است. تشکیل مقدار کمی دلنا فریت نیز در این فولاد گزارش شده است [۵-۲]. در شرایط آنیل انحلالی با وجود ساختار مارتنزیتی سختی بالایی بدست نمی آید؛ پیرسازی در محدوده دمایی $480-620^{\circ}\text{C}$ به دلیل تشکیل فاز غنی از مس منجر به رسوب سختی و افزایش در سختی و استحکام می گردد [۵-۳]. اگر دمای پیرسازی به بالاتر از 600°C افزایش یابد، تشکیل رسوبات غیر همدوس مس در زمینه و نیز استحاله مقداری از مارتنزیت به آستنیت در طول تیغه های مارتنزیت رخ می دهد [۶-۵ و ۳]. این فولاد، به دلیل داشتن مجموعه خواص مطلوب که در ابتدا بیان گردید، در کاربردهای بسیاری از جمله قطعات ساختمانی هواپیما، تیغه های توربین بخار، تاسیسات راکتورهای هسته ای و نیز محورهای کشتی و پمپ استفاده می گردد [۸-۶ و ۳]. اگرچه، گسترش کاربردی آن به دلیل سختی نسبتاً کم و خواص تریبولوژیکی ضعیف محدود می شود [۸-۷].

سایش عبارتست از کاهش تدریجی ماده از سطوح جامدی که در تماس با هم هستند و حرکت نسبی دارند و منجر به آسیب و تخریب سطح می گردد که بستگی به شرایط تماسی بین سطوح از جمله فشار، دمای تماسی، ضربه اصطکاک و خواص ماده دارد [۱۰-۹ و ۴]. یکی از فاکتورهای کلیدی در مقاومت به سایش آلیاژهای فلزی، خصوصیات ریزساختاری است که خواص مکانیکی مانند سختی بوسیله آن کنترل می گردد [۱۰-۹]. از آنجا که موضوع سایش در این فولاد از اهمیت خاصی برخوردار است و همچنین مطالعات بسیار اندکی در این زمینه انجام پذیرفته است [۸-۷ و ۴] لذا در این تحقیق، مقاومت به سایش لغزشی فولاد PH 17-4 در شرایط مختلف عملیات حرارتی و ریزساختاری و با استفاده از دستگاه سایش pin-on-disc بر روی یک سطح فولادی سخت مورد ارزیابی قرار گرفته است.

^۱ Precipitation Hardening Stainless Steel / PH

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱ بررسی کمی و کیفی آلیاژ

برای انجام آزمایشات از یک میله آهنگری شده از جنس فولاد زنگ نزن PH 4-17 با ابعاد ۹۳ mm قطر و ۱۰۰ mm طول استفاده شد. آنالیز ترکیب شیمیایی این آلیاژ بر حسب درصد وزنی به روش کوانتومتری، در جدول ۱ آمده که با استاندارد ASTM A 705 مطابقت دارد [۱۱]. عملیات حرارتی در سه حالت مختلف و بر اساس استاندارد ASTM A 705 [11]، همانطور که در جدول ۲ آمده است، انجام گرفت، طوری که نمونه هایی با پیرسازی بیشینه (peak-aged) تا نمونه فرایپر شده (over-aged) بدست آمد [۵]. سپس نمونه های متالوگرافی آماده سازی شد و با کاغذهای سنباده ۱۲۰ تا ۱۲۰۰ پولیش و با خمیر الماسه ۱ میکرون پرداخت نهایی گردید. برای مشاهده میکروسکوپی، نمونه ها در محلول ویللا^۱ غوطه ور شدند. این محلول مارتنزیت را اچ کرده و فاز سیگما و نمای کلی فریت را باقی می گذارد [2]. آزمون متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus BX60M انجام گرفت. نمونه های SEM استفاده شده جهت بررسی دقیق تر ریزساختار، مانند نمونه های متالوگرافی آماده سازی شدند. تصاویر بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) LEO 1455VP بدست آمد. سختی سنجی با راکول C، میانگین سه نقطه در هر نمونه، انجام پذیرفت.

۲-۲ آزمون سایش لغزشی (Sliding Wear)

جهت انجام تست های سایش از یک دستگاه آزمایشگاهی سایش pin-on-disc مدل TRM250 ساخت شرکت آلمانی Wazau و مطابق با استاندارد ASTM G99-95 [12] استفاده گردید. این دستگاه قابلیت ثبت اطلاعات بدست آمده از تست سایش را توسط نرم افزار TriboV43L دارا بوده و همچنین کنترل پارامترهای مختلف آزمایش از قبیل سرعت، بار اعمالی، دما و مسافت سایش را براحتی امکان پذیر می ساخت. تمامی آزمون های سایش تحت شرایط خشک در دمای اتاق (۲۵°C) و رطوبت نسبی ۷۵-٪ تحت بار ثابت ۱۵ نیوتن و تا مسافت لغزش ۳۰۰۰ متر و در سرعت لغزش ۰/۵ متر بر ثانیه انجام گرفت. نمونه های استوانه ای شکل سایش، دارای ابعاد ۶ میلیمتر قطر و ۳۶ میلیمتر طول بوده و توسط ماشین کاری تهیه گردیدند. برای صفحه سایش از یک دیسک فولادی عملیات حرارتی شده با سختی RC 62-65 از جنس E52100 (100Cr6) استفاده گردید. قبل از هر آزمون، سطح تمام نمونه ها با کاغذ سنباده مش ۱۲۰۰ ساییده شدند. این کار با بستن کاغذ سنباده بر روی صفحه سایشی و طی مسافت ۱۵۰ متر صورت گرفت تا از تماس تمام سطح نمونه با صفحه فولادی اطمینان حاصل شود. ضریب اصطکاک

^۱ Vilella

و میزان سایش (بصورت کاهش ارتفاع) در هر لحظه از آزمایش هم بصورت عددی و هم بصورت نمودار قابل نمایش و ثبت بود. آزمون سایش برای هر نمونه ۳ بار تکرار گردید و پس از آزمون، سطوح سایش یافته و زبره های حاصل از سایش مورد بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ ارزیابی ریزساختار

در شکل ۱ تصاویر SEM از ریزساختار نمونه های B، C و D آمده است. در نمونه B، تیغه های مارتنزیت هم محور تمپر شده که در دانه های آستنیت اولیه تشکیل شده اند به همراه مقدار کمی دلتا فریت دیده می شود (شکل ۱ الف). در مقابل، در نمونه های C و D یک ساختار لایه مانند سفید رنگ مشابه با ساختار ویدمن اشتاتن مشاهده می گردد که مانند ساختار مارتنزیت تمپر شده ی معمول در نمونه B نیست. مطالعات قبلی نشان داده است که یک ساختار لایه ای در ریزساختار آلیاژ PH 4-17 در دماهای پیرسازی بالاتر از 570°C وجود دارد که ممکن است به علت تشکیل آستنیت برگشتی^۱ و یا فاز آلفا فریت تبلور مجدد یافته در مارتنزیت تمپر شده باشد [۶]. از طرف دیگر، در مطالعه حاضر با افزایش دمای پیرسازی از 550°C به 620°C مشاهده می گردد که اندازه و مقدار این لایه های سفید رنگ، طبق اندازه گیری با نرم افزار پردازش تصویر MIP، حداقل به ۴۲٪ حجمی افزایش یافته است (شکل های ۱ ب و ج). بنابراین، این لایه ها، فاز آلفا فریت تبلور مجدد یافته اند که در زمینه مارتنزیت تمپر شده، شکل گرفته اند.

تغییرات ریزساختاری حاصل از شرایط مختلف عملیات حرارتی، خواص مکانیکی از جمله سختی را نیز تحت تاثیر قرار می دهد. نتایج سختی سنجی در جدول ۲ آمده است. بیشترین مقدار سختی در نمونه B (HRC ۴۳/۵) و کمترین مقدار در نمونه D (HRC ۳۰) مشاهده می شود. در دمای 480°C ، رسوبات مس همدوس با زمینه مارتنزیتی هستند و این خوشه های ریز غنی از مس موجب افزایش سختی می شوند [۳ و ۵]. اما دمای پیرسازی بالاتر، سبب نرم شدن قابل ملاحظه ای در ساختار می گردد. دلیل این امر می تواند درشت شدن رسوبات غیر همدوس غنی از مس اپسیلون (ε-Cu) [۱۳] و تشکیل فاز فریت لایه ای شکل باشد [۳ و ۶].

^۱ Reverted austenite

۳-۲ ارزیابی رفتار سایشی

شکل ۲ تغییرات حجم کاهش یافته تجمعی بر حسب مسافت لغزش را برای نمونه های عملیات حرارتی شده B، C و D نشان می دهد. این تغییرات در دماهای ۵۵۰ و ۶۲۰ °C تقریباً بصورت خطی است اما در دمای ۴۸۰ °C اینگونه نیست. همانگونه که در شکل پیداست هر سه نمونه، با افزایش مسافت طی شده، کاهش حجم تجمعی بیشتری از خود نشان می دهند. از طرف دیگر، با افزایش دمای پیرسازی از ۴۸۰ به ۶۲۰ °C، بطور نسبی حجم کاهش یافته تجمعی، افزایش می یابد. در این مطالعه، معادله سایش آرچارد [14] یعنی کاهش حجم تجمعی (V) بر حسب مسافت لغزشی (S) بعنوان معیاری برای نشان دادن نرخ سایش (Q)، مورد استفاده قرار گرفته (رابطه ۱) که V از طریق حاصلضرب مساحت سطح مقطع نمونه در کاهش ارتفاع ثبت شده توسط دستگاه سایش بدست آمده است.

$$Q(\text{mm}^3/\text{m}) = \frac{V}{S} = K \frac{F_N}{H} \quad (1)$$

که F_N نیروی عمودی اعمالی، H سختی نمونه و K ضریب سایشی می باشد.

نرخ سایش نمونه ها به کمک رابطه ۱ در هر دمای پیرسازی بطور میانگین محاسبه و در جدول ۲ آمده است. همانطور که ملاحظه می گردد، نرخ سایش از $1/63 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ در دمای ۴۸۰ °C به $3/78 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{m}$ در دمای ۶۲۰ °C افزایش یافته است. نتیجه دیگری که می توان بدست آورد، کاهش حجم تجمعی کاهش یافته و نیز نرخ سایش، با افزایش مقدار سختی است. این موضوع را می توان در شکل ۳ مشاهده کرد. آشکار است که نمونه B، پیرسازی شده در دمای ۴۸۰ °C، با سختی بیشتر، دارای بیشترین و نمونه D، پیرسازی شده در دمای ۶۲۰ °C، با کمترین سختی، دارای کمترین مقاومت به سایش می باشد. بنابراین بهبود رفتار سایشی نمونه ها ارتباط مستقیم به سختی آنها دارد. از طرفی سختی به میکروساختار وابسته است که با عملیات حرارتی پیرسازی کنترل شده است.

به منظور تعیین مکانیزم عمل کننده سایش، از میکروسکوپ الکترونی کمک گرفته شد. شکل ۴ تصاویر گرفته شده از سطوح سایش یافته در نمونه های B، C و D را نشان می دهد. مکانیزم میکرو تورقی (micro-delamination) مشاهده شده در سطوح سایشی، نشاندهنده تغییر فرم شدید ایجاد شده در اثر لغزش بین (نمونه) بر روی دیسک بوده که جوانه زنی و تشکیل ترکهای ریز در زیرسطح ساییده شده را موجب شده است. این ترک ها پس از تشکیل، رشد کرده و با گسترش در مناطق ضعیف (مانند فصل مشترک فازهای مارتنزیت و فریت) و یا مناطق تحت تنش شدید، بهم پیوسته و با تداوم فرایند سایش، از سطح جدا شده و بصورت تکه های ورقه ای (شکل ۴ د) از منطقه سایش خارج می گردند [۱۵]. همچنین جدا شدن ذرات از سطح در اثر برش پلاستیک و نیز وجود شیارهای طولی که در تصاویر SEM دیده

می شود نشان از مکانیزم های چسبندگی (adhesion) و میکرو شیاری (micro-grooving) می باشد [۴].

۴- نتیجه گیری

با بررسی و ارزیابی اثر عملیات حرارتی پیرسازی بر رفتار سایش لغزشی آلیاژ PH 17-4، نتایج زیر قابل دستیابی است:

نمونه های پیرسازی شده در دمای ۴۸۰ بمدت یکساعت، بیشترین سختی و در نتیجه کمترین میزان سایش را نشان دادند. رفتار سایشی متفاوت نمونه B در مقایسه با سایر نمونه ها، ناشی از ریز ساختار بدست آمده در اثر پیرسازی است. بررسی های میکروسکوپی نشان داد که مکانیزم های سایشی از قبیل تورق، شیاری و چسبندگی در این نمونه ها فعال هستند.

مراجع

- [1] J. R. Davis, "ASM Specialty Handbook stainless steel", 1994, ASM international, Materials Park, OH, USA.
- [2] J. C. Lippold, D. J. Kotecki, "Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel", 2005, New Jersey, John Wiley & Sons.
- [3] C. N. Hsiao, C. S. Chiou and J. R. Yong, "Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel". Mater Chem. Phys., 2002, 74, pp. 132-142.
- [4] J. D. Bressan, D. P. Daros, A. Sokolowski, R.A. Mesquita, C. A. Barbosa, "Influence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing", J. Mat. Process. Technol., 2008, 205, pp. 353-359.
- [5] L. W. Tsay, T. Y. Yang, M. C. Young, "Embrittlement of laser-surface-annealed 17-4 PH stainless steel", Mater. Sci. Eng. A., 2001, 311, pp. 64-73.
- [6] J. Hung Wu, C. Kung Lin, "Influence of high temperature exposure on the mechanical behavior and microstructure of 17-4 PH stainless steel". Mater. Sci. Eng., 2003, 38, pp. 965- 971.
- [7] M. Esfandiari, H. Dong, "The corrosion and corrosion-wear behaviour of plasma nitrided 17-4PH precipitation hardening stainless steel", Surface & Coatings Technology, 2007, 202, pp. 466-478.
- [8] Gui-jiang Li, Jun Wang, Qian Peng, Cong Li, Ying Wang, Bao-luo Shen, "Microstructure and dry-sliding wear properties of DC plasma nitrided 17-4 PH stainless steel", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2008, 266, pp. 1964-1970.
- [9] محمدرضا توکلی شوشتری، محمد بیت حردان، خلیل رنجبر، "بررسی تاثیر فاصله بین لایه ای پرلیت در فولاد ۱۰۸۰ بر خواص تریبولوژیکی آن"، هشتمین همایش ملی مهندسی سطح و عملیات حرارتی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۶، ص ۹۵-۱۰۰.
- [10] S. F. Wayne, S. L. Rice, "The role of microstructure in the wear of selected steels", Wear, 1983, 85, pp. 93 - 106.

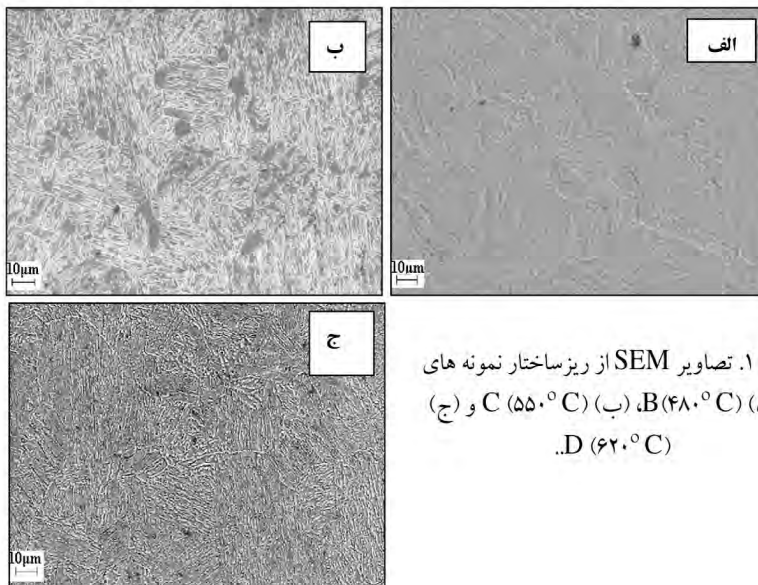
- [11] ASTM A 705: "Standard specification for age-hardening stainless steel forgings", 1996, Annual Book of ASTM standards.
- [12] Annual book of ASTM STANDARDS, "ASTM G99-95", pp. 124-128.
- [13] H. R. Habibi Bajguirani, "The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 ph stainless steel", Mater. Sci. Eng. A., 2002, 338, pp. 142-159.
- [14] I. M. Hutchings, "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials", 1995, London, Arnold.
- [15] S. C. Lim, M. F. Ashby, "Wear-mechanism maps", Acta. Metall., 1987, 35, pp. 1-24.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ 17-4 PH مورد استفاده در این تحقیق.

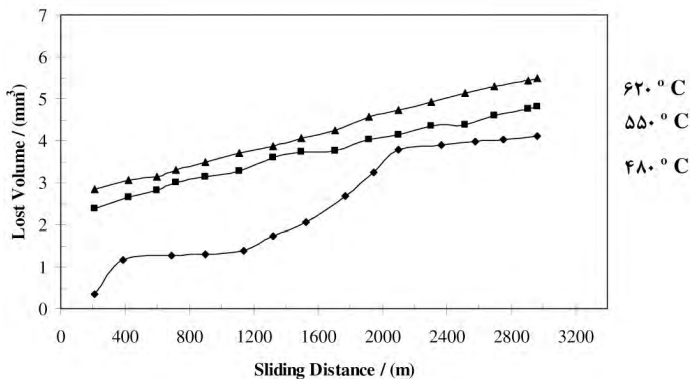
| C | Ni | Cr | Cu | Mo | S | P | Si | Mn | Nb | V | عناصر |
|------|------|-------|------|------|-------|-------|-----|------|------|------|-----------------|
| ۰/۰۱ | ۳/۹۶ | ۱۵/۷۴ | ۲/۷۴ | ۰/۰۶ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۲۱ | ۰/۸ | ۰/۸۶ | ۰/۲۸ | ۰/۰۲ | درصد وزنی |
| ۰/۰۷ | ۳-۵ | ۱۷/۵ | ۳-۵ | - | ۰/۰۳ | ۰/۰۴ | ۱ | ۱ | ۰/۴۵ | | ASTM A 705(Max) |

جدول ۲. عملیات حرارتی اعمال شده، سختی و پارامترهای سایش میانگین بدست آمده.

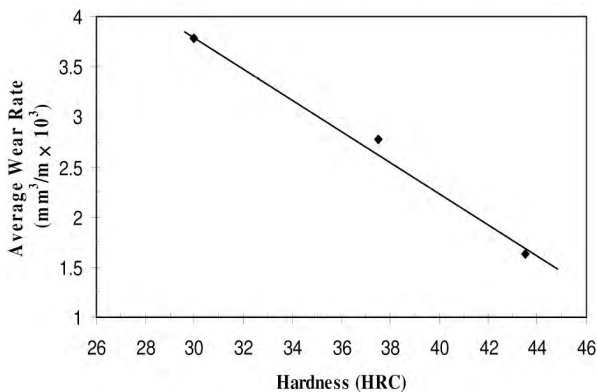
| نمونه | شرایط عملیات حرارتی | Hardness (HRC) | Wear rate ($\text{mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$) |
|-------|---|----------------|---|
| B | Condition A(1h) \rightarrow 480°C \times 1h \rightarrow air cool | ۴۳/۵ | ۱/۶۳ |
| C | Condition A(1h) \rightarrow 550 °C \times 4h \rightarrow air cool | ۳۷/۵ | ۲/۷۸ |
| D | Condition A(1h) \rightarrow 620 °C \times 4h \rightarrow air cool | ۳۰ | ۳/۷۸ |



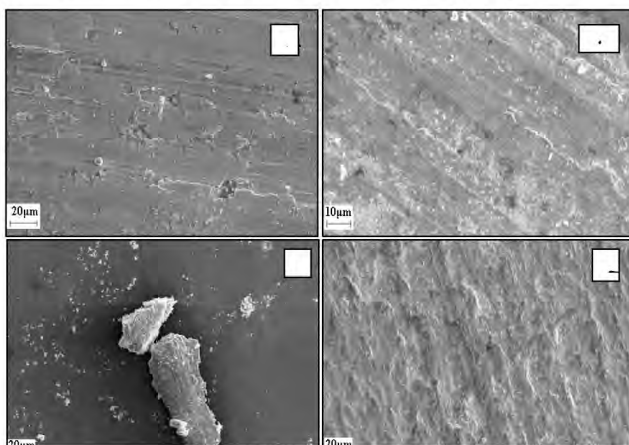
شکل ۱. تصاویر SEM از ریزساختار نمونه های (الف) B (480°C)، (ب) C (550°C) و (ج) D (620°C).



شکل ۲. نمودار حجم تجمعی کاهش یافته بر حسب مسافت لغزشی در نمونه های عملیات حرارتی شده.



شکل ۳. نمودار نرخ سایش میانگین بر حسب میزان سختی.



شکل ۴. تصاویر SEM از سطوح سایش یافته در نمونه های (الف) (۴۸۰°C)، (ب) (۵۵۰°C)، (ج) (۶۲۰°C) و (د) زبره های حاصل از سایش که بصورت تکه های ورقه ای از منطقه سایش خارج شده اند.