



تأثیر پذیری مقاومت سایشی فولاد از اندازه دانه و رابطه هال-پچ

امیرحسین تکالو^۱، توحید حسین زاده^۱، فاطمه سادات سیدان^۲

^۱. دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد (دانشجوی کارشناسی ارشد)

^۲. دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی متالورژی و مواد (استادیار)

چکیده

مقاومت در برابر سایش یکی از ویژگی‌های حیاتی مواد به شمار می‌آید که برای اجزایی که در معرض بارهای مکانیکی و اصطکاک قرار دارند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در میان پارامترهای ریز ساختاری، اندازه دانه به عنوان یکی از عوامل مهم در تعیین رفتار سایشی مواد مطرح شده است. این مقاله به بررسی رابطه بین اندازه دانه، سختی و مقاومت در برابر سایش می‌پردازد و مکانیزم‌های اساسی، مدل‌های نظری و نتایج تجربی را تحلیل می‌کند. در این بررسی، رابطه هال-پچ و پدیده‌های لغزش مرزدانه‌ای و همچنین اثر معکوس هال-پچ در مقیاس‌های فوق‌العاده ریز (نانوساختارها) مورد توجه قرار می‌گیرند. این مقاله در تلاش است تا تصویری جامع از روندهای جاری و مسیرهای آینده در طراحی مواد مقاوم در برابر سایش را ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: سایش؛ معادله هال-پچ؛ اندازه دانه

¹. amirtakaloo94@gmail.com

مقدمه

تریبولوژی شاخه‌ای از علم مهندسی است که به مطالعه تعاملات سطحی بین اجسام در تماس می‌پردازد. این علم به طور گسترده در طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌آلات، ابزارها و قطعات صنعتی برای افزایش عمر مفید، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد استفاده می‌شود. سه محور اصلی بحث تریبولوژی اصطکاک، سایش و روانکاری است. سایش به معنای از دست رفتن تدریجی ماده از سطح اجسام به دلیل بارهای مکانیکی مانند لغزش، غلتیدن یا تماس خراشان است. در صناعی همچون خودروسازی، هوافضا و تجهیزات پزشکی، مقاومت در برابر سایش به منظور افزایش عمر مفید قطعات و کاهش هزینه‌های نگهداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از عوامل کلیدی در بهبود عملکرد سایش، اندازه دانه ماده است. اندازه دانه تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های مکانیکی نظیر سختی، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر شکست دارد که به نوبه خود رفتار سایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱]. رابطه کلاسیک هال-پچ به افزایش مقاومت ماده با کاهش اندازه دانه اشاره دارد. طبق این رابطه، دانه‌های ریزتر باعث افزایش استحکام حدى ماده می‌شوند. اما در زمینه مقاومت در برابر سایش، وضعیت پیچیده‌تر است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند در حالی که ریزسازی ساختار دانه‌ها معمولاً مقاومت در برابر سایش را بهبود می‌بخشد، کاهش بیش از حد اندازه دانه (در محدوده نانو ساختار) ممکن است منجر به اثر معکوس هال-پچ شود؛ به گونه‌ای که لغزش مرزدانه تسهیل شده و ماده در نهایت نرم می‌شود و مقاومت در برابر سایش کاهش می‌یابد [۲-۴]. در این مقاله، برخی یافته‌های اخیر علمی در رابطه با تأثیر اندازه دانه بر مقاومت در برابر سایش بررسی و جنبه‌های نظری و نتایج تجربی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

رابطه هال-پچ و نرخ سایش

معادله کلاسیک هال-پچ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad \text{معادله (۱)}$$

که در آن σ_y استحکام تسلیم ماده، σ_0 تنش اصطکاکی اولیه، k ضریب هال-پچ و d قطر متوسط دانه است. بر اساس این مدل، با کاهش d یا همان اندازه دانه، استحکام ماده افزایش یافته و این امر به طور کلی بهبود مقاومت در برابر سایش را به همراه دارد. با این حال، زمانی که اندازه دانه به مقیاس نانومتری می‌رسد، بسیاری از مواد از رابطه هال-پچ خارج شده و پدیده‌ای به نام "اثر معکوس هال-پچ" مشاهده می‌شود. در این محدوده، به دلیل فراوانی مرزهای دانه، مکانیزم‌هایی مانند لغزش مرزی دانه فعال می‌شوند که در نهایت باعث نرم شدن ماده و کاهش مقاومت در برابر سایش می‌گردند [۳، ۵، ۶].

مدل‌های نظری اخیر سعی کرده‌اند با در نظر گرفتن مکانیزم‌های مبتنی بر حرکت ناهموار درون دانه و نیز مکانیزم‌های مبتنی بر مرزدانه، رفتار دوگانه ماده را توضیح دهند. این مدل‌ها نشان می‌دهند که یک اندازه دانه بهینه

وجود دارد که در آن مقاومت در برابر سایش به حداکثر می‌رسد؛ جایی که سختی بالا و قابلیت شکل‌پذیری کافی برای جذب انرژی حین تماس لغزشی به تعادل می‌رسند.

یکی از مهم‌ترین روابطی که برای ارزیابی نرخ سایش مورد استفاده قرار می‌گیرد، محاسبه نرخ سایش بر اساس حجم یا وزن از دست رفته نمونه در آزمون‌های مختلف و مطابق با رابطه زیر می‌باشد.

$$W = \frac{V}{F \times d} \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن W نرخ سایش (mm^3/Nm)، V حجم ماده از دست رفته (mm^3)، F نیروی اعمال شده (N) و d مسافت لغزش (m) می‌باشد.

همچنین می‌توان نرخ سایش را بر اساس کاهش جرم بر اساس رابطه زیر بیان نمود:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \times F \times d} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن Δm کاهش جرم و ρ چگالی ماده است.

مطالعات تجربی بر روی اندازه دانه و مقاومت در برابر سایش

چندین مطالعه تجربی به بررسی تأثیر اندازه دانه بر رفتار سایش در سیستم‌های مختلف مواد پرداخته که در ادامه تعدادی از آن‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مطالعات، معمولاً ساختارهای دارای دانه‌های درشت، فوق‌ریز و نانو ساختار تحت شرایط کنترل شده سایش با یکدیگر مقایسه شده است.

پرکاربردترین و مهم‌ترین آلیاژ ساخته شده تا به امروز بدون شک فولادها هستند که طیف بسیار گسترده‌ای داشته و در دامنه وسیعی از کاربردها در حال ارائه خدمت هستند. بدیهی است که فهم ارتباط میان اندازه دانه با رفتار تریبولوژیکی این دسته از مواد، به خصوص رفتار سایشی آن‌ها از مهم‌ترین اطلاعاتی است که به طراحی دقیق و بهینه قطعات کمک می‌کند. برخی از کاربردها بیش از سایرین در معرض آسیب‌های ناشی از سایش می‌باشند، مانند دستگاه‌های نورد، یاتاقان‌های ساچمه‌ای و غلتکی و ... یکی از فولادهای مورد استفاده در این صنایع AISI52100 است [۷]. طبق مطالعات انجام شده، در حالت نانو ساختار ابتدا با افزایش اندازه دانه فریت از ۸ نانومتر به ۳۲ نانومتر، مقاومت سایشی این فولاد افزایش، اما با افزایش بیشتر اندازه دانه کاهش می‌یابد (شکل ۱). در واقع طبق این مطالعه، بیشترین مقاومت سایشی در اندازه دانه ۳۲ نانومتر مشاهده شد، جایی که ترکیب سختی و شکل‌پذیری بهینه است [۸].

فولادهای مارتنزیتی با استحکام بالا همراه با مقادیری بور از جمله مواد پیشرویی هستند که به طور کلی به دلیل مقاومت عالی در برابر سایش خراشان شناخته شده‌اند. یکی از ویژگی‌های ریزساختاری حیاتی که به عملکرد مکانیکی بالای این فولادها کمک می‌کند، اندازه دانه آستنیت اولیه می‌باشد. ساختار دانه ریزتر با افزایش انعطاف-پذیری همراه است و تغییر شکل پلاستیک نقش مهمی در مکانیزم‌های سایش خراشان ایفا می‌کند.

زملیک و همکاران از ورق‌های فولادی هاردوکس ۵۰۰ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر که توسط شرکت STAL-HURT عرضه شده بود، استفاده کردند. در این مطالعه، بررسی اندازه دانه نمونه‌ها قبل از عملیات حرارتی در

دستور کار قرار گرفت و هدف، بررسی اثر تاریخچه اندازه دانه بر مقاومت به سایش نمونه بود. بدین منظور، عملیات حرارتی در کوره‌های با محافظت گاز آرگون در پنج دمای مختلف بین ۸۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای دستیابی به نمونه‌های مختلف انجام شد. نمونه‌ها ۲ ساعت در هر دما نگهداری و پس از آن در آب با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد کوئنچ شدند. برای تجزیه و تحلیل اندازه دانه آستنیت اولیه، یک مرحله تمپر اضافی پس از عملیات آستنیت‌زدن اعمال شد. نمونه‌ها تا دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده، به مدت ۳۰ دقیقه درون کوره نگهداری و سپس در محیط کوره به آرامی سرد شدند [۹].

به منظور انجام آزمون سختی سنجی و ارزیابی مقاومت سایشی، نمونه‌ها پس از کوئنچ تمپر نشدند. این کار برای حفظ ریزساختار مارتنزیتی انجام شد. آزمون سایش خراشان مطابق با استاندارد ASTM G65 انجام شد. در نهایت مقدار ضریب مقاومت در برابر سایش خراشان یا همان K_b از طریق مقدار جرم از دست رفته توسط نمونه به کمک معادله (۴) قابل محاسبه می‌باشد.

$$K_b = \frac{Z_w \times \rho_b \times N_b}{Z_b \times \rho_w \times N_w} \quad \text{معادله (۴)}$$

در این معادله، K_b ضریب مقاومت نسبی در برابر سایش، Z_w و Z_b به ترتیب کاهش وزن نمونه مرجع و نمونه آزمایشی (برحسب گرم)، N_w و N_b به ترتیب تعداد دورهای غلتک در طول آزمایش نمونه مرجع و نمونه آزمایشی و در انتها ρ_w و ρ_b به ترتیب چگالی نمونه مرجع و نمونه آزمایشی (g/cm^3) می‌باشد. این رابطه، مقاومت سایشی مواد را بر اساس کاهش وزن، چگالی و تعداد چرخش‌های غلتک بیان می‌کند. مقدار بالاتر K_b نشان‌دهنده مقاومت سایشی بیشتر (کاهش وزن کمتر نسبت به نمونه مرجع) است. اگر $K_b > 1$ باشد، ماده آزمایشی مقاوم‌تر از نمونه مرجع است، درحالی‌که اگر $K_b < 1$ باشد، ماده آزمایشی مقاومت سایشی کمتری نسبت به نمونه مرجع دارد.

با توجه به تصاویر SEM ارائه شده در شکل ۲، نمونه در حالت اولیه و پس از آستنیت‌زدن در دماهای ۸۵۰، ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان مشاهده کرد که با افزایش دما به مقادیر بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه دچار افزایش شدید اندازه دانه شده که با مقایسه نمودارها در شکل ۳ می‌توان این‌طور اذعان داشت که اندازه دانه آستنیت قبل از مارتنزیت‌زدن، رابطه معکوس (شکل ۳-الف) با ضریب مقاومت به سایش و به دنبال آن (شکل ۳-ب) سختی دارد.

در ادامه این مطالعه سعی شده با استفاده از نتایج به دست آمده، یک رابطه یا مدل برای ارتباط سختی با ضریب مقاومت به سایش، با ترکیب دو داده مجزای سختی و ضریب مقاومت به سایش نسبت به اندازه دانه آستنیت اولیه عنوان گردد (شکل ۴). این مطالعه افزایش اندازه دانه به بیش از مقادیر ۱۰۰ میکرومتر، با توجه به سابقه عملیات حرارتی، را یکی از عوامل اصلی کاهش شدید مقاومت به سایش عنوان می‌کند (شکل ۵).

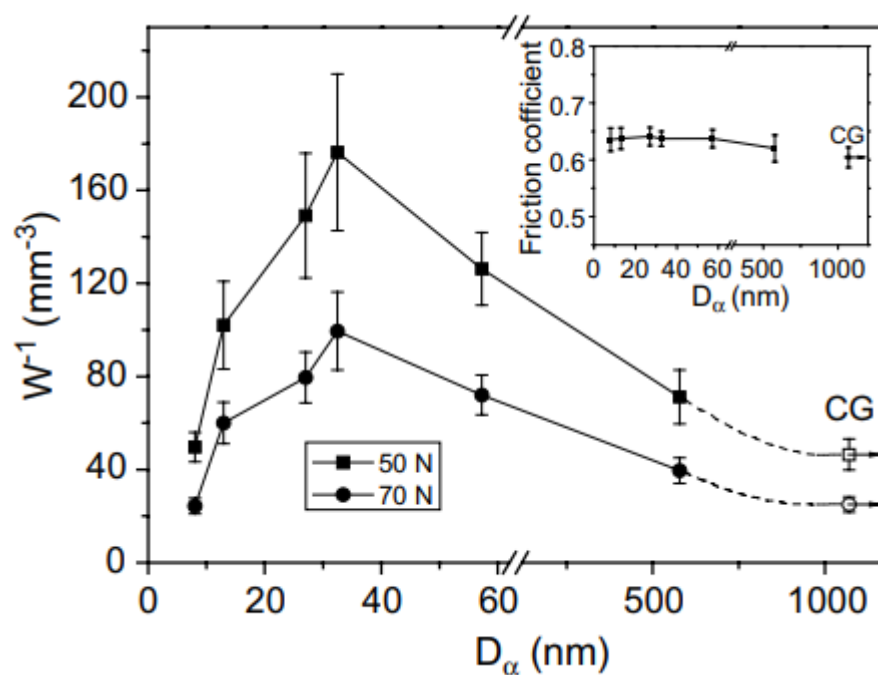
نفر و همکاران بر روی نقش اندازه دانه در فولادهای زنگ نزن 304L به منظور افزایش میزان فاز مارتنزیت و تسهیل انجام این استحاله و در پی آن ایجاد ساختاری مقاومتر نسبت به سایش مطالعه کردند. طبق این مطالعه و تحقیقات پیشین، اندازه دانه بر دمای آغاز تحول مارتزیتی (M_s) تأثیر داشته و بررسی دقیقتر نحوه تأثیر آن بر سینتیک (سرعت) تحول و ویژگی‌های مکانیکی امری ضروری است. برای بررسی این موضوع، نمونه‌هایی از فولاد با اندازه دانه‌های متفاوت تهیه شدند. نمونه‌ها تحت فرآیندهای حرارتی کنترل‌شده قرار گرفتند تا اندازه دانه‌های آستنیتی ریزتر یا درشت‌تر شوند. طبق نتایج به دست آمده، دانه‌های ریزتر باعث افزایش دمای M_s شد، زیرا تعداد مکان‌های جوانه‌زنی افزایش یافت. دانه‌های درشت‌تر نیز دمای M_s را کاهش دادند، زیرا مکان‌های جوانه‌زنی کمتر و پایداری حرارتی آستنیت بیشتر شد. نمونه‌های دانه‌ریز سرعت تحول بیشتری نشان دادند، زیرا مساحت مرز دانه‌ها بیشتر شده و این مرزها به عنوان مکان‌های جوانه‌زنی مارتنزیت عمل نمودند. نمونه‌های دانه‌درشت سرعت تحول کندتری ارائه دادند، زیرا تعداد مکان‌های جوانه‌زنی محدودتر شد. دانه‌های ریزتر سختی بیشتری داشتند، که با اثر هال-پچ توضیح داده شد. طبق این اثر، کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام تسلیم می‌شود. ساختارهای دانه‌ریز، چقرمگی (مقاومت در برابر شکست) بیشتری داشتند، زیرا توزیع تنش در ماده یکنواخت‌تر بود. ساختارهای دانه‌درشت شکل‌پذیری بهتری نشان دادند، اما این ویژگی با کاهش سختی و چقرمگی همراه بود [۱۰].

نتیجه‌گیری

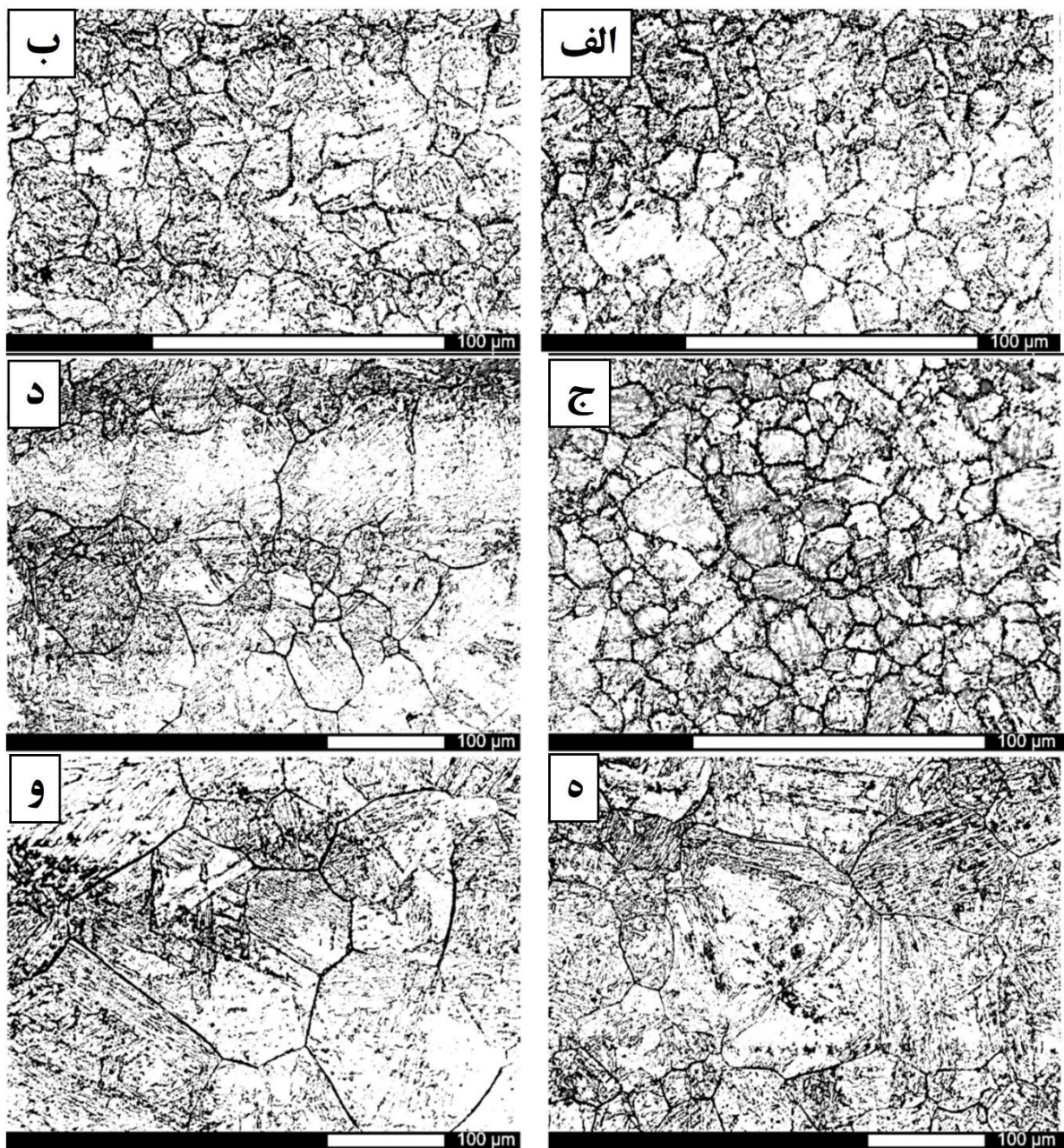
- ۱- اندازه دانه یکی از پارامترهای ریزساختاری است که تأثیر به‌سزایی بر مقاومت در برابر سایش دارد.
- ۲- ریزدانه کردن معمولاً مقاومت در برابر سایش را بهبود می‌بخشد، اما کاهش بیش از حد اندازه دانه در محدوده نانو ساختار ممکن است منجر به اثر معکوس هال-پچ شود، به گونه‌ای که لغزش مرز دانه تسهیل شده و ماده در نهایت نرم می‌شود و مقاومت در برابر سایش کاهش می‌یابد.
- ۳- یک اندازه دانه بهینه وجود دارد که در آن مقاومت در برابر سایش به حداکثر می‌رسد؛ جایی که سختی بالا و قابلیت شکل‌پذیری کافی برای جذب انرژی حین تماس لغزشی به تعادل می‌رسند.
- ۴- اندازه دانه تأثیر قابل توجهی بر تحول مارتزیتی دارد. ساختارهای دانه‌ریز، سرعت تحول را افزایش داده، سختی و چقرمگی را بهبود می‌بخشند؛ اما ممکن است شکل‌پذیری را کمی کاهش دهند. در مقابل، دانه‌های درشت‌تر سختی و چقرمگی کمتری نشان می‌دهند.
- ۵- از طریق بهینه‌سازی اندازه دانه، می‌توان موادی را طراحی نمود که در برابر سایش عملکرد بسیار بالایی از خود نشان دهند. به این ترتیب، عمر قطعات افزایش، هزینه‌های نگهداری کاهش و کارایی کلی سیستم بهبود می‌یابد.

مراجع

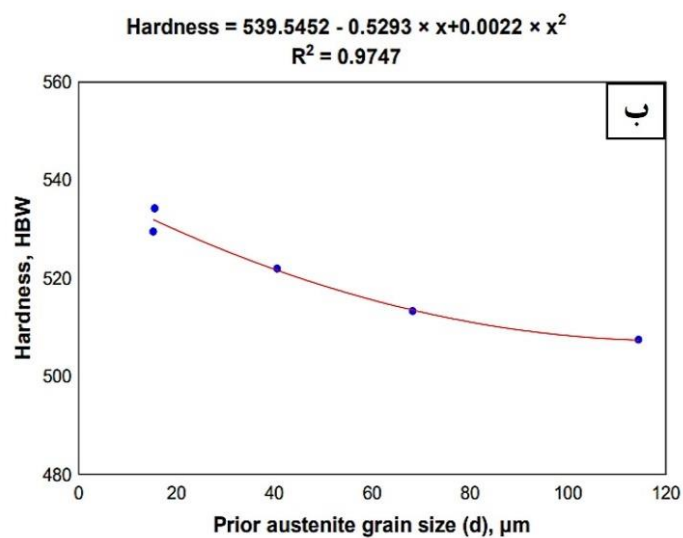
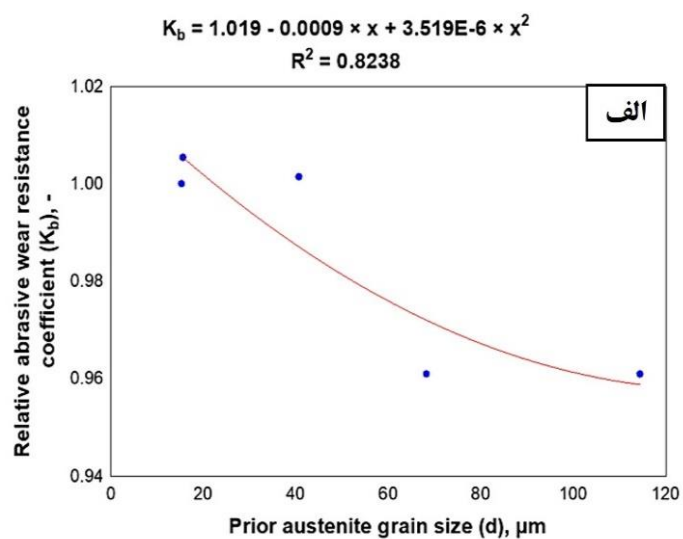
- [۱] H. A. Ajimotokan, *Principles and Applications of Tribology*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. doi: 10.1007/978-3-031-57409-2.
- [۲] C. E. Carlton and P. J. Ferreira, "What is behind the inverse Hall–Petch effect in nanocrystalline materials?," *Acta Mater*, vol. 55, no. 11, pp. 3749–3756, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.actamat.2007.02.021.
- [۳] S. N. Naik and S. M. Walley, "The Hall–Petch and inverse Hall–Petch relations and the hardness of nanocrystalline metals," *J Mater Sci*, vol. 55, no. 7, pp. 2661–2681, Mar. 2020, doi: 10.1007/s10853-019-04160-w.
- [۴] T. J. Rupert and C. A. Schuh, "Sliding wear of nanocrystalline Ni–W: Structural evolution and the apparent breakdown of Archard scaling," *Acta Mater*, vol. 58, no. 12, pp. 4137–4148, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.actamat.2010.04.005.
- [۵] D. Wolf, V. Yamakov, S. R. Phillpot, and A. K. Mukherjee, "Deformation mechanism and inverse Hall – Petch behavior in nanocrystalline materials," *International Journal of Materials Research*, vol. 94, no. 10, pp. 1091–1097, Feb. 2022, doi: 10.1515/ijmr-2003-0199.
- [۶] R.-G. Guan and D. Tie, "A Review on Grain Refinement of Aluminum Alloys: Progresses, Challenges and Prospects," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 30, no. 5, pp. 409–432, May 2017, doi: 10.1007/s40195-017-0565-8.
- [۷] Y. Li *et al.*, "Wear behavior and damage characterization for AISI 52100 bearing steels: Effect of hardness and spherical carbides," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 30, pp. 8359–8370, May 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.05.220.
- [۸] L. Zhou, G. Liu, Z. Han, and K. Lu, "Grain size effect on wear resistance of a nanostructured AISI52100 steel," *Scr Mater*, vol. 58, no. 6, pp. 445–448, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.10.034.
- [۹] M. Zemlik, B. Białobrzaska, M. Stachowicz, and J. Hanszke, "The Influence of Grain Size on the Abrasive Wear Resistance of Hardox 500 Steel," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 24, p. 11490, Dec. 2024, doi: 10.3390/app142411490.
- [۱۰] R. Nafar Dehsorkhi, S. Sabooni, F. Karimzadeh, A. Rezaeian, and M. H. Enayati, "The effect of grain size and martensitic transformation on the wear behavior of AISI 304L stainless steel," *Mater Des*, vol. 64, pp. 56–62, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.07.022.



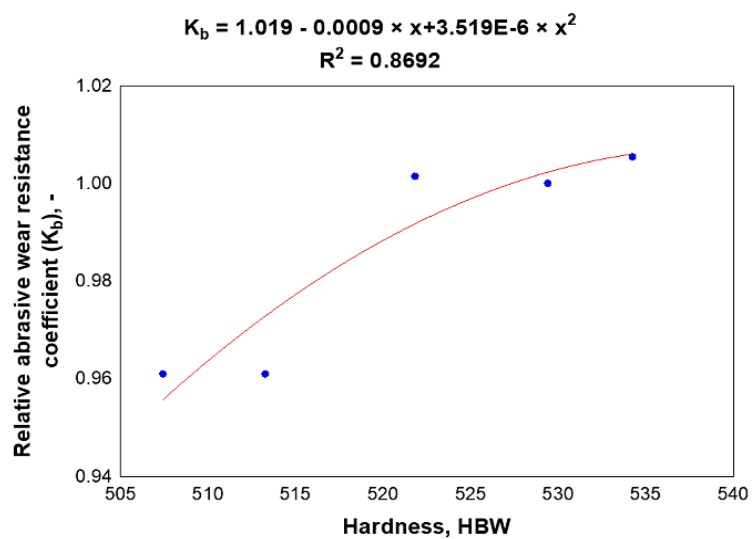
شکل ۱. تغییرات حجم سایش متقابل (W^{-1}) با اندازه دانه فریت برای نمونه‌های فولادی نانو ساختار تحت بارهای ۵۰ و ۷۰ نیوتون. مقادیر W^{-1} نمونه فولاد دانه درشت (CG) برای مقایسه آورده شده است. همچنین تغییرات ضریب اصطکاک اندازه گیری شده تحت بار ۷۰ نیوتون با اندازه دانه فریت آورده شده است [۸].



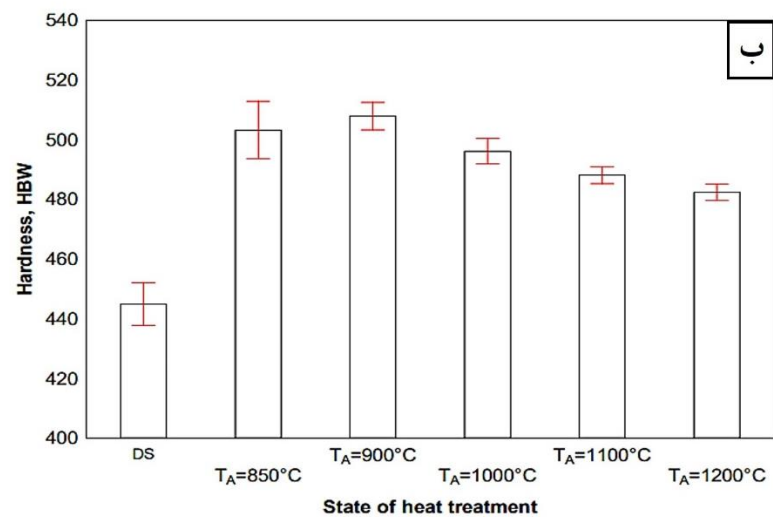
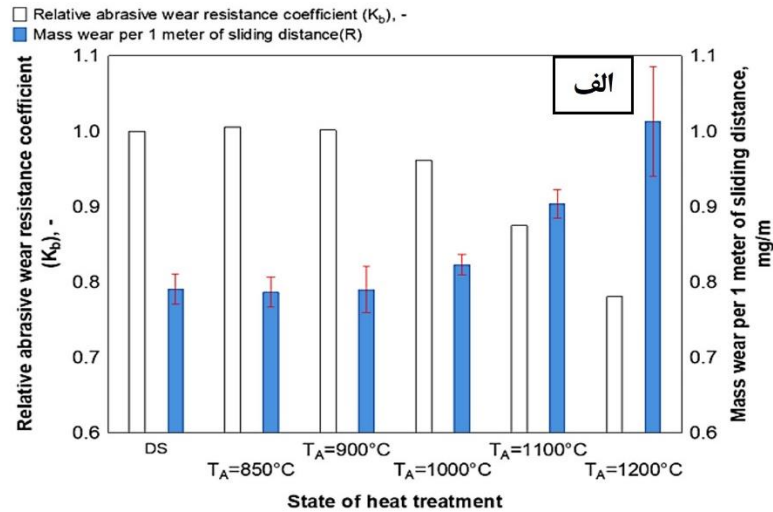
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه در (الف) حالت اولیه و پس از آستنیت‌زدن در دماهای (ب) ۸۵۰ (ج) ۹۰۰ (د) ۱۰۰۰ (ه) ۱۱۰۰ (و) ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد [۹]



شکل ۳: تأثیر اندازه دانه آستنیت اولیه بر (الف) مقاومت سایشی و (ب) سختی [۹]



شکل ۴: مدل نهایی که ارتباط بین میزان سختی و مقاومت به سایش خراشان را نشان می‌دهد. [۹]



شکل ۵ میزان (الف) ضریب مقاومت به سایش و (ب) سختی نسبت به دمای استحاله [۹]