



بررسی رفتار سایشی فولاد گرافیتی در فرآیند کوبش فراصوتی

علیرضا عباسی، سعید امینی*، قنبرعلی شیخزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۲ تیر ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

فناوری کوبش فراصوتی
سایش
فولاد گرافیتی
ضریب اصطکاک

چکیده: مقاومت به سایش جهت افزایش طول عمر غلتک‌ها بسیار حائز اهمیت است لذا در این تحقیق برای تعیین سایش غلتک‌های نورد از جنس فولاد گرافیتی، از روش تست سایش و تعیین ضریب اصطکاک استفاده شد. در فناوری کوبش فراصوتی، ایجاد کار سختی و فشردگی در لایه‌های سطحی قطعه کار باعث بهبود برخی خواص مکانیکی از جمله صافی سطح، سختی و استحکام می‌شود. با شبیه‌سازی و ساخت ابزار ارتعاشی فراصوتی و نصب آن بر روی دستگاه تراش، عملیات کوبش فراصوتی بر روی نمونه‌های آماده شده از غلتک‌های نورد انجام گرفت. در آزمایش سایش، مقاومت به سایش در نمونه بعد از عملیات بهبود یافت. همچنین نتایج مبین کاهش ضریب اصطکاک در حدود ۵۰ درصد بعد از عملیات می‌باشد. با تهیه گراف پروفیل سطح از سطح سایش مشخص شد بعد از عملیات عرض و عمق سایش کمتر می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نمونه‌های قبل و بعد از عملیات تهیه شد و مکانیزم سایش مورد بررسی قرار گرفت که مکانیزم چسبان و خستگی سطحی قبل از عملیات و مکانیزم خراشان بعد از عملیات مشاهده شد. با انجام فرآیند بر روی سطح غلتک‌های مقاومت به سایش، استحکام، صافی سطح و طول عمر آنها افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

صنعت نورد، یکی از متداول‌ترین و پررونق‌ترین روش‌های تولید فرآورده‌های فلزی، به‌ویژه فولادها است. به‌گونه‌ای که بیش از هشتاد درصد از محصولات فلزی در سطح جهان به این روش تولید می‌شوند. یکی از اجزاء اصلی و پرمصرف در خط نورد، غلتک‌های نورد است که باید در تحقیقات به آن توجه خاص شود. از آنجایی که بسیاری از قطعات در صنعت در معرض سایش هستند، لذا یکی از مهم‌ترین آزمون‌های خواص مکانیکی که در صنعت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، آزمون سایش است. سایش، فرآیند تخریب سطح به علت تماس مکانیکی مواد، با یکدیگر است.

غلتک‌های نورد در حین شکل‌دهی به دلایل مختلفی نظیر خراشیدگی، خستگی، خستگی حرارتی، خوردگی و غیره تحت سایش قرار می‌گیرد و میزان سایش با توجه به تغییرات شرایط کاری در طول غلتک متفاوت بوده و موجب ایجاد پروفیل سایشی در سطح غلتک می‌گردد. میزان سایش بر روی غلتک قابل پیش‌بینی و کنترل نیست و باید عواملی که منجر به سایش می‌شوند کنترل کرد و استحکام و مقاومت به سایش سطح غلتک را افزایش داد. خوردگی، خراشیدگی، خستگی حرارتی، چسبندگی و خستگی مکانیکی از مکانیزم‌های مهم در سایش غلتک‌های نورد می‌باشند [۱]. سایش برخلاف مدول الاستیسیته یا سختی، یک خاصیت ذاتی ماده نیست و بستگی به شرایط کاری نمونه دارد. عواملی همچون ساختمان کریستالی، دانسیته نایجابی، اندازه دانه و توزیع فازهای مختلف می‌تواند بر رفتار سایشی مواد اثر

بگذارد. با توجه به اینکه چه نوع سایشی در یک جسم اتفاق می‌افتد میزان آسیب ایجادشده متفاوت بوده و بستگی به پارامترهای تأثیرگذار بر سایش دارد [۲]. سایش چرخ و ریل براساس کیفیت سطوح در حال تماس، نوع و کیفیت روان‌کار، مقاومت آلیاژ چرخ و ریل در برابر تغییر فرم پلاستیک و نحوه بهره‌برداری می‌تواند به صورت ترکیبی از مکانیزم‌های مختلف سایش ظاهر شود [۳]. آروشیا و همکاران در سال ۲۰۰۹ تأثیر سرعت نوردکاری بر روی ضریب اصطکاک در نورد گرم ورق را بررسی نمودند که با افزایش سرعت نوردکاری، ضریب اصطکاک کاهش می‌یافت [۴]. گوان کیو و همکاران در سال ۲۰۱۶، اصطکاک و رفتار سایشی فولاد 30CrMnSiA در دمای از ۱۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد بررسی نمودند که در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد به کمترین نرخ سایش و اصطکاک دست یافتند [۵]. در سال ۲۰۱۴، میترویس و همکارانش رفتار سایشی و اصطکاک فولادهای آلیاژی 36NiCrMo16 و 36CrNiMo4 را در فرآیند کوبش ساچمه‌ای مورد مطالعه قرار دادند که در هر دو حالت خشک و با روان‌کار به کاهش ضریب اصطکاک و نرخ سایش پس از انجام فرآیند رسیدند [۶]. یو نال و همکاران در سال ۲۰۱۳ رفتار سایشی فولاد کم‌کربن را بعد از فرآیند کوبش ساچمه‌ای بررسی نمودند و نشان دادند که بعد از فرآیند کوبش ساچمه‌ای مقاومت سایشی بهبود می‌یابد [۷].

فناوری کوبش فراصوتی^۱ یک فرآیند کار سرد و از فرآیندهای جدید است که در آن سطح قطعه توسط ابزار کروی تحت ضربات شدید قرار

بر روی جنس 40Cr اثر تکرار تعداد پاس فرایند بر تنش پسماند را بررسی نمودند که با افزایش تعداد پاس فرایند بر روی سطح، تنش پسماند افزایش یافت [۱۵]. کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۵ فرایند کوبش فراصوتی را بر روی فولاد ۷۲۲۵ انجام دادند که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی از ساختار میکرو به ساختار ریزدانه‌تر در چند میکرومتر از سطح رسیدند [۱۶]. در این تحقیق اثر فرایند کوبش فراصوتی بر روی مقاومت سایشی قطعه کار از جنس فولاد گرافیتی GSH48 غلتک‌های نورد گرم بررسی می‌شود که برای این منظور، طراحی و ساخت ابزار ارتعاشی فراصوتی تجهیز UPT انجام گرفت. ابزار ارتعاشی فراصوتی شامل ابزار کروی، هورن، بوستر و ترانسدیوسر است که هورن پس از شبیه‌سازی و ساخت بر مبدل فراصوتی مونتاژ گردید و فناوری کوبش فراصوتی بر نمونه‌هایی که از غلتک‌های نورد به‌دست‌آمده بود انجام شد. نوآوری این تحقیق اندازه‌گیری میزان سایش، ضریب اصطکاک، پروفیل سطح سایش نمونه‌های قبل و بعد از فرایند کوبش فراصوتی و همچنین بررسی مکانیزم سایش از روی تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح سایش می‌باشد.

۲- فرایند کوبش فراصوتی

۲-۱- آماده‌سازی و انجام فرایند

جنس استفاده‌شده در این تحقیق فولاد گرافیتی GSH48 غلتک‌های نورد با ساختار پرلیت و کاربیدهای پراکنده می‌باشد که تصویر تهیه‌شده توسط میکروسکوپ نوری در شکل ۱ نشان داده‌شده است. خواص شیمیایی فولاد گرافیتی در جدول ۱ نمایش داده‌شده است. جهت انجام فرایند کوبش فراصوتی روی دستگاه تراش مدل TN50، دوران rpm45 و پیشروی 0.08 mm/rev تنظیم شد. تجهیز UPT به جای سوپرت عرضی دستگاه تراش قرار گرفت و قطعه‌کار بین سه نظام و مرغک دستگاه تراش بسته می‌شود. برای تولید انرژی الکتریکی با توان بالا و فرکانس ۲۰ kHz از دستگاه ژنراتور فراصوتی مدل MPI با توان ۳ kW، فرکانس در محدوده ۱۸ kHz تا ۳۰ kHz و با کنترل دامنه ارتعاشی استفاده شد. مبدل (ترانسدیوسر) ابزار ارتعاشی فراصوتی، دارای چهار عدد پیزوالکتریک است که فرکانس در حدود ۲۰ kHz را از ژنراتور فراصوتی دریافت و به صورت ویبره مکانیکی تبدیل می‌کند. ارتعاشات مکانیکی توسط بوستر و هورن تقویت شده و توسط ابزار کروی به صورت متوالی بر سطح قطعه‌کار ضربه وارد می‌کند.

با شبیه‌سازی هورن در نرم‌افزار آباکوس، مقدار فرکانس طبیعی طولی ۲۰۴۶۶ Hz حاصل شد که باید با فرکانس طبیعی ۲۰ kHz مبدل (ترانسدیوسر) مطابقت داشته باشد. برای تهیه نقشه ساخت هورن در نرم‌افزار کتیا مدل‌سازی انجام گرفت و از جنس فولاد CK45 ساخته شد. درواقع وظیفه هورن افزایش دامنه ارتعاشی حاصل از مبدل و انتقال آن به ابزار کروی می‌باشد. ابزار کروی از جنس تنگستن کاربید با سختی Rc80 و با قطر ۶ mm به عنوان ابزار فناوری کوبش فراصوتی به منظور مقاومت در برابر حرارت تولیدی در این فرایند و ضربات مکانیکی شدید بر روی

می‌گیرد. در این فرایند لایه زیر سطح فلز به نقطه تسلیم کششی خود می‌رسد تا تغییر فرم پلاستیک ایجاد شود. با بلند شدن ابزار کروی از سطح و برگشت الاستیک لایه زیر سطح در محل برخورد ابزار کروی سطح تحت تنش فشاری ناشی از این برگشت قرار می‌گیرد. با ادامه فناوری کوبش فراصوتی و همپوشانی فرورفتگی‌های ناشی از برخورد ابزار کروی به سطح، یک لایه یکنواخت با تنش فشاری باقیمانده تشکیل می‌شود. این روش عملیات سطحی مکانیکی بدون براده برداری است که با تغییر شکل پلاستیک سطح قطعه، به‌وسیله کارسختی، فشردگی سطح و ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه‌های سطحی در کاهش زبری سطح، افزایش سختی، بالابردن مقاومت سایشی و بالا بردن عمر خستگی قطعه مؤثر است. تنش‌های پسماند کششی تمایل دارند تا ذره‌های تشکیل‌دهنده قطعه را از هم دور کنند که باعث تردشدن و کاهش مقاومت مکانیکی سطح می‌شوند. تنش‌های پسماند فشاری باعث فشرده‌شدن مرز دانه‌های سطحی شده و در نتیجه شروع ترک به تأخیر می‌افتد. اکنون فرایندهای زیادی جهت بهبود خواص مکانیکی سطوح از طریق ایجاد تغییرات در ریزساختار و خواص متالورژیکی مواد معرفی شده‌اند که یکی از این روش‌ها استفاده از روش کوبش فراصوتی است. چو و همکاران بهبود خواص مکانیکی فولاد SKD61 توسط تکنولوژی فورج سرد فراصوتی^۱ را در سال ۲۰۰۵ بررسی نمودند که تنش پسماند از ۴۴۳ MPa- به ۸۱۱ MPa- تا عمق $150 \mu\text{m}$ افزایش یافت [۸]. چریف و همکاران در سال ۲۰۱۰ روش بهبود سطح با نانو ساختار کردن به روش فراصوتی^۲ را بر روی فولاد آستنیتی AISI ۳۰۴ به کار گرفتند. آن‌ها کاهش ۶۰ درصدی تنش پسماند فشاری را پس از فرایند گزارش دادند که منجر به بهبود خواص مکانیکی سطح می‌شود [۹]. تینگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ فرایند غلتک کاری سطح به روش فراصوتی^۳ را جهت افزایش خواص سطحی بر روی فولاد 40Cr انجام دادند که میکرو سختی به میزان ۵۲/۶ درصد افزایش یافت [۱۰]. مین سو و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش نانو ساختار کردن به روش فراصوتی بر جنس HSS55 نشان دادند که صافی سطح از $0.26 \mu\text{m}$ به $0.07 \mu\text{m}$ و سختی از Rc ۵۹/۳ به Rc ۶۵/۳ بهبود یافت [۱۱]. آمانو و همکاران در سال ۲۰۱۱ توسط فرایند نانو ساختار کردن به روش فراصوتی بر بیرینگ SAE 52100، از تنش پسماند فشاری حدود ۲۰۰ MPa- به تنش پسماند ۹۰۰- رسیدند [۱۲]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ خواص خستگی بر روی فولاد ضدزنگ SUS304 را بعد از فرایند نانو ساختار کردن به روش فراصوتی بررسی نمودند که به بهبود ۸۱ درصد استحکام خستگی سطح با اعمال نیروی ۹۰ N نیوتن رسیدند [۱۳]. عباسی و همکاران در سال ۲۰۱۴ تکنولوژی فورج سرد را بر روی فولاد آلیاژی 6XB2C انجام دادند که صافی سطح از $0.6 \mu\text{m}$ به $0.132 \mu\text{m}$ بهبود یافت [۱۴]. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۱ با شبیه‌سازی عددی فرایند غلتک کاری سطح به روش فراصوتی

- 1 Ultrasonic Cold Forging Technology (UCFT)
- 2 Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM)
- 3 Ultrasonic Surface Rolling Processing (USRP)

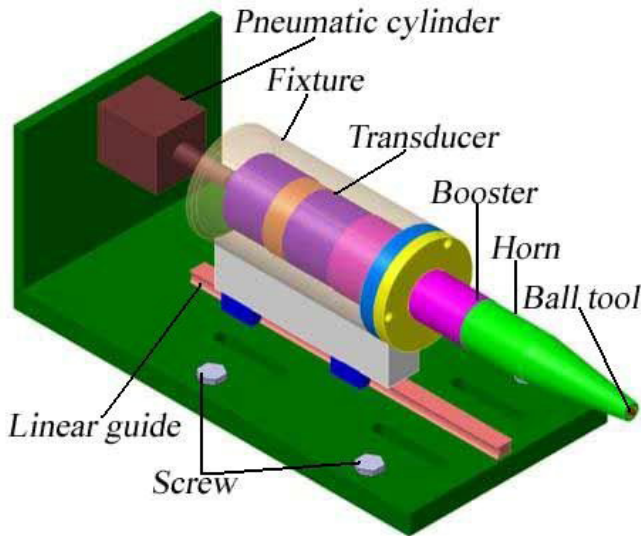


Fig. 2. Modeling of UPT equipment Components in CATIA

شکل ۲: مونتاژ اجزاء تجهیز UPT در نرم افزار کتیا

۲-۲- مباحث تئوری فرآیند

فناوری کوبش فراصوتی از معادله (۲) تبعیت می کند که در این رابطه P_t ، نیروی کل وارد شده به سطح قطعه کار است و خود شامل P_{st} ، نیروی استاتیکی و P_{dy} ، نیروی دینامیکی می باشد. نیروی دینامیکی خود تابعی از f ، فرکانس ژنراتور و p ، دامنه نیروی دینامیکی است. تغییر در فرکانس توسط ژنراتور فراصوتی باعث نیروی دینامیکی متفاوتی در سر ابزار می شود. نیروی استاتیکی با سیلندر پنوماتیک تأمین می شود و به قید و بند اعمال می شود [۱۷].

$$P_t = p_{st} + p_{dy} = p_{st} + p \sin 2\pi ft \quad (2)$$

نیروی استاتیکی حاصل از نیروی پنوماتیکی (P_{st})، نیروی دینامیکی حاصل از ارتعاش ابزار (P_{dy}) در مجموع نیروی نهایی (P_t) را تشکیل می دهد که به سطح قطعه کار وارد می شود و با نیروی عکس العمل قطعه کار مقابله می کند. هنگام عملیات کوبش فراصوتی قطعه دوران دارد و ابزار بر روی پیشانی قطعه کار پیشروی می نماید.

در معادله (۳)، N تعداد ضربه و بیره فراصوتی بر حسب 2 times/mm را نشان می دهد که f فرکانس فراصوتی بر حسب هرتز، d قطر قطعه کار بر حسب میلی متر، n سرعت اسپیندل بر حسب دور بر دقیقه، S پیشروی بر حسب میلی متر بر دور و V سرعت خطی بر حسب میلی متر بر ثانیه می باشد. میزان فرکانس، سرعت دورانی، قطر قطعه کار و سرعت پیشروی بر روی تعداد ضربه کوبش فراصوتی مؤثر است. [۱۸].

$$N = \frac{f}{s \times v} = \frac{60f}{s \times \pi dn} \quad (3)$$

طبق معادله (۳) برای قطعه کار سایش، تعداد ضربه و بیره فراصوتی 25308 times/mm برای یک پاس فرایند کوبش فراصوتی بر روی پیشانی

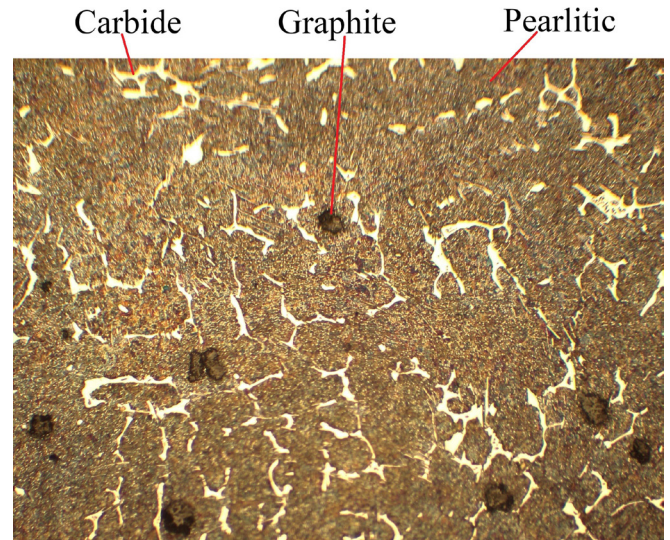


Fig. 1. GSH48-Pearlitic matrix with Graphite and Secondary Carbide(100 x)

شکل ۱: فولاد گرافیتی GSH48 با ساختار پرلیت و کاربیده های پراکنده (۱۰۰x)

جدول ۱: خواص شیمیایی فولاد گرافیتی GSH48 (درصد جرمی)

Table 1. Chemical properties of GSH48 graphite steel (mass %)

عنصر	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Mg	C
درصد جرمی	۱/۱	۰/۷۳۵	۱/۲۷	۰/۳۴۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۱/۹۵
عنصر	Nb	Al	V	Cu	P	W	S
درصد جرمی	۰/۰۳۷	۰/۰۵۳	۰/۰۲۹	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۰۳۸	۰/۰۲۹

قطعه کار استفاده شد. شکل ۲ مونتاژ اجزاء تجهیز UPT در نرم افزار کتیا را نشان می دهد که اجزاء پس از مدل سازی و تهیه نقشه ها، ساخته شدند. از سیلندر پنوماتیکی مدل SC-50 25-S و کمپرسور هوا با فشار 8 bar برای تأمین فشار هوا به عنوان نیروی استاتیکی فرآیند به پشت ابزار استفاده شد. با قراردادن شیر کنترل فشار قبل از مسیر ورودی هوا به داخل سیلندر پنوماتیکی می توان میزان فشار هوا را تنظیم نمود و میزان فشار هوای ورودی با مانومتر نمایش داده می شود. فشار هوا به عنوان نیروی استاتیکی باید از پس زنی ابزار حین برگشت جلوگیری کند و باعث حرکت تجهیز کوبش فراصوتی روی ریل خطی شود. نیروی استاتیکی در حالت بهینه، با فشار هوای 1 bar تأمین و بر روی مانومتر شیر کنترل فشار نمایش داده می شود که از رابطه (۱) با داشتن مشخصات سیلندر پنوماتیکی، نیروی استاتیکی 200 N حاصل می شود.

$$F = P \times A = 0.1 \times (\pi \times 25^2) \cong 200 \text{ N} \quad (1)$$

الکترومغناطیسی کار می‌کند اندازه‌گیری می‌شود. جهت اندازه‌گیری ابتدا سنسور فاصله‌سنج را در بین دو فک گیره دستگاه فرز مهار کرده و همچنین ترانسدیوسر را بر روی کلگی دستگاه فرز متصل می‌شود و فاصله بین ترانسدیوسر و نوک سنسور ۵/۰ mm باید قرار گیرد. با اتصال ترانسدیوسر به ژنراتور فراصوتی و تنظیم میزان فرکانس ۲۰ kHz بر روی آن می‌توان توسط دستگاه اسیلوسکوپ شکل موج ولتاژ بر واحد زمان را مشاهده کرد و میزان دامنه ارتعاش را اندازه‌گیری نمود. تمام مراحل بالا را با اتصال هورن به ترانسدیوسر هم آزمایش می‌شود و میزان دامنه ارتعاش در هر دو حالت حاصل می‌گردد [۲۱].

شکل ۳ نمایش شماتیک و تجهیز UPT در حالت عملیات بر روی پیشانی قطعه کار را نشان می‌دهد. جهت انجام فرآیند قطعه کار توسط دستگاه تراش حول محور خود دوران داده می‌شود و ابزار ارتعاشی فراصوتی، ارتعاشات مکانیکی را به روی سطح قطعه کار انتقال می‌دهد. در این حالت قطعه کار دور خود می‌چرخد که با تنظیم دوران دستگاه تراش تنظیم می‌شود و به میزان تنظیم پیشروی دستگاه تراش در طول قطعه کار حرکت می‌کند و فرآیند کوبش فراصوتی انجام می‌شود. فناوری کوبش فراصوتی روی جنس فولاد گرافیتی GSH48 مورد استفاده در غلتک‌های نورد گرم، انجام گرفت که نتایج در ادامه حاکی از بهبود خواص مکانیکی است. مطابق شکل نیروی استاتیکی حاصل از نیروی پنوماتیکی (P_{st})، نیروی دینامیکی حاصل از ارتعاش ابزار (P_{dy}) و در مجموع نیروی نهایی (P_t) را تشکیل می‌دهد که به سطح قطعه کار وارد می‌شود و با نیروی عکس‌العمل قطعه کار مقابله می‌کند. هنگام عملیات کوبش فراصوتی قطعه دوران دارد و ابزار بر روی پیشانی قطعه کار پیشروی می‌نماید. در فرآیند کوبش فراصوتی طی نیروی استاتیکی و نیروی دینامیکی حاصل از ضربات مکرر ابزار تجهیز UPT به سطح نمونه، تغییر فرم پلاستیکی شدیدی در قطعه رخ می‌دهد. حرکت آسان‌تر نایجایی‌ها در اثر فرکانس بالا مافوق صوت، منجر به تعداد زیادی نایجایی در مرزخانه‌ها می‌شود.

تغییر فرم پلاستیکی شدید روی لایه‌های سطح باعث ایجاد یک ساختار نانوکریستال در سطح می‌شود. باید توجه داشت که اگر ماده نانو ساختار با استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید تولید شده باشد، حاوی تعداد زیادی نایجایی در نزدیکی مرز دانه‌ها می‌باشد [۲۲]. تغییر فرم پلاستیکی شدید روی لایه‌های سطح به علت ایجاد یک لایه از تنش باقیمانده فشاری است که تا عمق معین نفوذ می‌کند [۲۳]. علت ایجاد تنش فشاری این است که ناحیه ضربه‌دیده دچار تغییر فرم پلاستیکی می‌شود ولی ماده اطراف آن ناحیه که در حالت الاستیکی است سعی در مهار و برگرداندن به ابعاد اولیه را دارد، در نتیجه یک تنش باقیمانده فشاری ایجاد می‌شود [۲۴]. هنگامی که ارتعاش با دامنه و فرکانس بالا بر روی یک قطعه اعمال شود، استحکام تسلیم قطعه کاهش می‌یابد و نیروی استاتیکی کمتری برای تسلیم ماده نیاز است. این پدیده به اثر بلاها معروف است و امواجی که در ماده منتشر می‌شود نایجایی‌ها ماده را فعال می‌کنند و به همین دلیل نیروی کمتری برای تسلیم

نمونه استوانه‌ای به قطر ۲۰mm حاصل شد. فرآیند کوبش فراصوتی یکی از فرآیندهای نوین تغییر شکل شدید پلاستیک است که لایه‌های سطحی به ساختاری ریزتر در حد نانومتر می‌رسند و طبق رابطه هال-پیچ سختی و استحکام افزایش می‌یابد. نقش تکنولوژی کوبش فراصوتی در ریز کردن دانه‌ها، به علت تغییر شکل دانه‌هاست که مساحت کلی مرز دانه‌ها به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. در حین تغییر شکل، مرز دانه‌های جدیدی باید ایجاد شود که از طریق نایجایی‌هایی که به طور پیوسته در طی فرآیند تولید می‌شوند، انجام می‌گیرد. افزایش چگالی نایجایی‌ها در حین تغییر شکل، ناشی از به دام افتادن پیوسته نایجایی‌های متحرک تازه تولید شده توسط نایجایی‌های قبلی و ترکیب آن‌ها به صورت مشخصه‌های مختلف ریزساختاری، از ویژگی‌های حالت تغییر شکل یافته محسوب می‌شود. طبق رابطه هال-پیچ، استحکام تسلیم و سختی مواد پلی کریستال متعارف به اندازه دانه‌های آن‌ها بستگی دارد که در معادلات (۴) و (۵) آورده شده است.

معادله (۴)، رابطه هال-پیچ و وابستگی تنش تسلیم را با اندازه دانه بیان می‌کند. اخیراً تأثیر اندازه دانه بر خواص مکانیکی فلزات و آلیاژهای پلی کریستال بررسی شده است. در رابطه هال-پیچ، σ_y تنش تسلیم وابسته به d ، اندازه دانه و K ، مقدار ثابت این رابطه می‌باشند. با توجه به رابطه می‌توان دریافت که با کاهش اندازه دانه تنش تسلیم افزایش پیدا می‌کند. [۱۹]

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (۴)$$

در معادله (۵)، رابطه هال-پیچ و وابستگی سختی با اندازه دانه بیان شده است. این رابطه به صورت تجربی استحکام مرز دانه‌ها را برای فلزات و آلیاژها بیان می‌کند که در آن H سختی ماده، H_0 ثابت سختی، d اندازه دانه و K ثابت ماده می‌باشد و سختی مواد با ریز شدن اندازه دانه افزایش می‌یابد [۲۰].

$$H_y = H_0 + kd^{-1/2} \quad (۵)$$

۲-۳ مکانیزم فرآیند کوبش فراصوتی

در این فرآیند، انرژی الکتریکی از طریق ژنراتور با فرکانس مورد نظر تولید می‌گردد. انرژی الکتریکی با فرکانسی در حدود ۲۰ kHz وارد مبدل شده و به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می‌گردد. این ارتعاشات موجب حرکات رفت و برگشتی ابزار شده که این حرکات در دامنه‌ای کم تکرار می‌شود. هورن که به عنوان یکی از قطعات اصلی به مبدل متصل شده است، وظیفه متمرکز نمودن، تقویت و انتقال ارتعاشات به قطعه کار را بر عهده دارد. نهایتاً، ابزار این ارتعاشات را به سطح قطعه کار منتقل می‌کند.

مقدار دامنه ارتعاش برای مبدل (ترانسدیوسر) ۵ μm است که پس از اتصال هورن دامنه ارتعاش تقویت شده ۱۵ μm می‌شود. دامنه ارتعاش توسط سنسور فاصله‌سنج مدل AEC-5502A-17 که با مکانیزم میدان

رسید و در دستگاه سایش به روش پین روی دیسک^۱ مطابق شکل ۴ قرار گرفت. تنظیمات دستگاه سایش مطابق جدول ۲ صورت می‌گیرد. در دستگاه سایش نمونه دیسکی به قطر ۲۰mm و ضخامت ۵mm در محل فک دستگاه قرار می‌گیرد و از پین با جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ جهت ابزار دستگاه سایش استفاده می‌شود. با تعیین فرکانس ۴۰Hz در دستگاه، دوران دستگاه ۱۰۰ rpm حاصل می‌شود و پین بر روی سطح نمونه دیسکی در قطر ۱۳mm قرار می‌گیرد که طبق رابطه (۶) سرعت خطی ۰/۰۷ m/s حاصل شد.

$$V = \frac{\pi D n}{60000} = \frac{\pi \times 13 \times 100}{60000} \cong 0.07 \text{ m/s} \quad (۶)$$

با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ gr، نمونه قبل و بعد از آزمایش سایش وزن می‌شود و اختلاف وزن تعیین می‌گردد. اختلاف وزن، کاهش وزن و در نتیجه میزان سایش را نشان می‌دهد. ابتدا بر روی یک نمونه بدون عملیات UPT تست بارپذیری مطابق جدول ۳ انجام گرفت که بهترین وزن برای سایش ۴ kg در نظر گرفته شد که شرایط سایش مطلوبی بر روی نمونه ایجاد نمود. در شکل ۵ نمودار کاهش وزن نمونه به میزان نیرو در تست بارپذیری نشان داده شده است.

۳-۲- آزمایش سایش

نیروی ۴kg، به عنوان وزن بهینه برای سایش از تست بارپذیری حاصل شد و در آزمون سایش، مسافت سایش ۱۰۰۰ mm در نظر گرفته شد. در جدول ۴ نتایج تست سایش در نمونه قبل و بعد از فرآیند UPT آورده شده و در شکل ۶ نمودار کاهش وزن بر مسافت لغزش در سرعت ۰/۰۷ m/s و وزن

جدول ۲: تنظیمات دستگاه سایش

Table 2. regulation of wear device

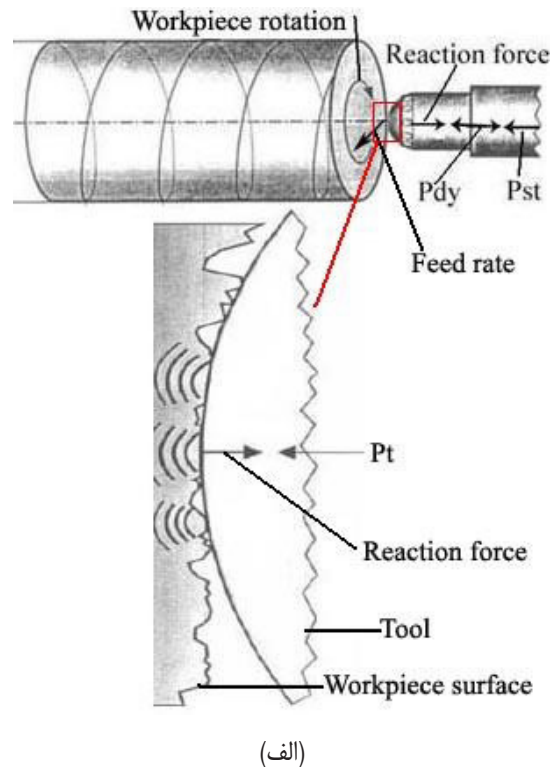
میزان نیرو	دوران	سرعت	فرکانس
۱,۳۶,۹,۱۲ kg	۱۰۰rpm	۰/۰۷m/s	۴۰Hz

جدول ۳: نتایج تست بارپذیری

Table 3. Results of force test

میزان نیرو (kg)	کاهش وزن (mgr)
۰	۰
۱	۰
۳	۰/۳
۶	۱/۴
۹	۲/۳
۱۲	۴/۳

1 Pin on disc



(الف)



(ب)

Fig. 3. (a) Schematic process of UPT
(b) UPT equipment on the lathe

شکل ۳: (الف) نمایش شماتیک فرآیند UPT (ب) تجهیز UPT در حالت عملیات بر روی پیشانی قطعه کار

ماده مورد نیاز است [۲۵].

در فرآیند UPT در اثر وارد شدن ارتعاشات مافوق صوت چپش مجدد نایجایی‌ها بهتر و آسان‌تر انجام می‌گیرد و همچنین نرخ کرنش بسیار زیادی رخ می‌دهد و حاصل آن ریز شدن میکرو ساختار سطح تا حدود ۰/۲ mm از سطح می‌باشد. با توجه به رابطه هال-پنچ، ریز شدن میکروساختار سطح، بهبود خواص مکانیکی از جمله استحکام و سختی را منجر می‌شود.

۳- آزمایش سایش

۳-۱- آزمایش بارپذیری

فرآیند کوبش فراصوتی بر روی پیشانی نمونه استوانه‌ای به قطر و طول ۲۰mm از جنس فولاد گرافیتی انجام گرفت. ضخامت نمونه استاندارد برای دستگاه سایش ۵mm است که توسط دستگاه وایرکات به اندازه مورد نظر

جدول ۴: نتایج تست سایش در نمونه قبل و بعد از فرآیند UPT

Table 4. Results of wear test in before and after UPT

کاهش وزن بعد از فرآیند (mgr)	کاهش وزن قبل از فرآیند (mgr)	مسافت لغزش (m)
۰	۰	۰
۰	۰/۴	۵۰
۰/۲	۰/۷	۱۰۰
۰/۴	۱/۲	۲۰۰
۰/۸	۲/۲	۳۰۰
۱/۴	۲/۸	۴۰۰
۲/۷	۴/۵	۶۰۰
۳/۹	۶	۸۰۰
۵/۹	۷/۱	۱۰۰۰

در نمونه قبل از فرآیند کوبش فراصوتی ۰/۵ و بعد از فرآیند کوبش فراصوتی ۰/۲۵ می‌باشد. نتایج مبین کاهش ضریب اصطکاک در حدود ۵۰ درصد بعد از عملیات UPT می‌باشد. در فرآیند کوبش فراصوتی، با حرکت ابزار روی سطح قطعه کار، برآمدگی‌های سطح یا همان قله‌ها دچار تغییر شکل پلاستیک شده و شروع به حرکت به سمت فضاهای خالی نموده و حفره‌ها را پر می‌کند و منجر به بهبود صافی سطح می‌شود. بهبود صافی سطح منجر به کاهش ضریب اصطکاک می‌گردد.

۳-۴- آزمایش پروفیل سطح سایش

نمونه‌های قبل و بعد از فرآیند UPT بعد از آزمایش سایش و پین سایش در شکل ۹ نشان داده شده است. با دستگاه اندازه‌گیری زبری سطح مدل SJ-210-Mitutoyo، پروفیل سطح سایش اندازه‌گیری شد که شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودارهای پروفیل سطح از سطح سایش در نمونه قبل و بعد از فرآیند UPT را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است پروفیل سطح سایش نمونه قبل از فرآیند دارای عمق $28\ \mu\text{m}$ - و عرض $3/5\ \text{mm}$ می‌باشد و در نمونه بعد از فرآیند دارای عمق $16\ \mu\text{m}$ - و عرض $2/2\ \text{mm}$ است که در نمونه بعد از عملیات عرض و عمق سایش کمتر می‌باشد. همچنین مساحت زیر نمودار پروفیل سطح در نرم‌افزار Arean حاصل شد که در نمونه قبل از عملیات کوبش فراصوتی میزان مساحت زیر نمودار $0/0541\ \text{mm}^2$ - است و بعد از عملیات مساحت زیر نمودار $0/0170\ \text{mm}^2$ - می‌باشد که علت آن سایش کمتر در نمونه بعد از عملیات با کوبش فراصوتی است. در فرآیند کوبش فراصوتی در اثر اعمال ویریه مکانیکی توسط ابزار کروی بر روی سطح قطعه کار منجر به تغییر شکل شدید پلاستیک و در نتیجه سختی و صافی سطح افزایش می‌یابد. به علت سختی سطح در نمونه بعد از عملیات کوبش فراصوتی و مکانیزم سایش از نوع خراشان منحنی نمودار پروفیل سطح سایش حالت کنگره‌ای بیشتری دارد.



Fig. 4. wear device of pin on disc

شکل ۴: دستگاه سایش پین روی دیسک

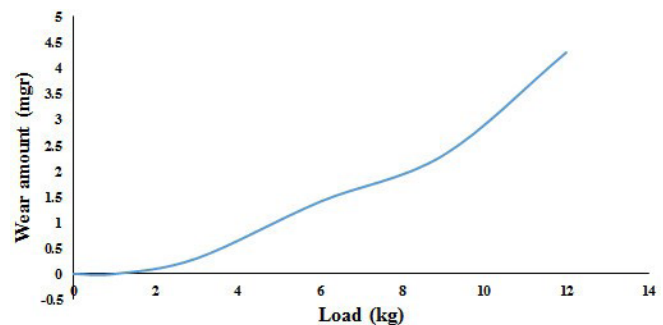


Fig. 5. diagram of decrease weight on amount force

شکل ۵: نمودار کاهش وزن نمونه به میزان نیرو

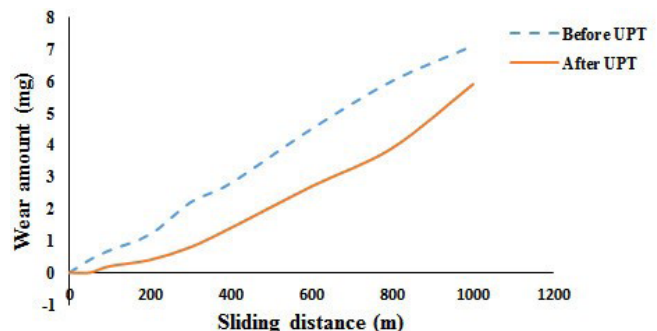


Fig. 6. diagram wear test in before and after UPT

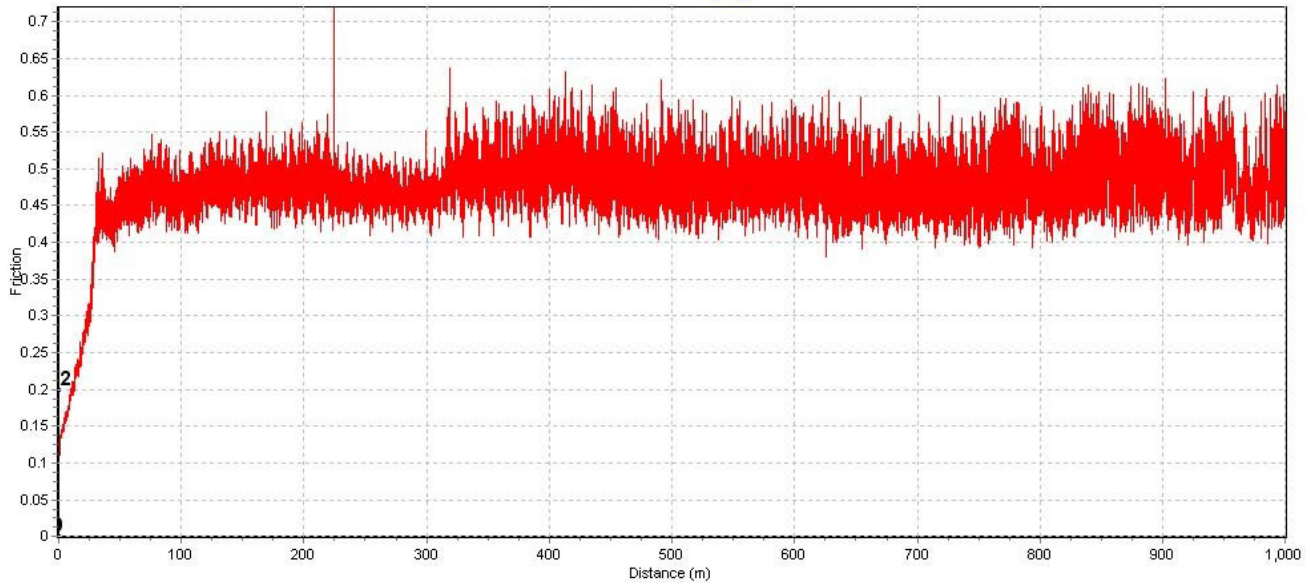
شکل ۶: نمودار تست سایش در نمونه قبل و بعد از فرآیند UPT

۴ kg نشان داده شده است که بعد از فرآیند کوبش فراصوتی میزان کاهش وزن بسیار کاهش یافته و در نتیجه سایش بر روی نمونه بعد از عملیات کوبش فراصوتی که سطحی سخت و صیقلی حاصل می‌شود بسیار کمتر است.

۳-۳- ضریب اصطکاک

دستگاه آزمایش سایش به یک کامپیوتر متصل است و نیروی اعمالی توسط پین بر سطح نمونه وارد می‌شود. حسگر نیرو مقدار ضریب اصطکاک را در هر لحظه برحسب مسافت پیموده شده توسط نرم‌افزار ترسیم می‌کند. در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نمودارهای ضریب اصطکاک بر مسافت لغزش در نمونه قبل و بعد از فرآیند UPT نشان داده شده است. ضریب اصطکاک

wear test (1)

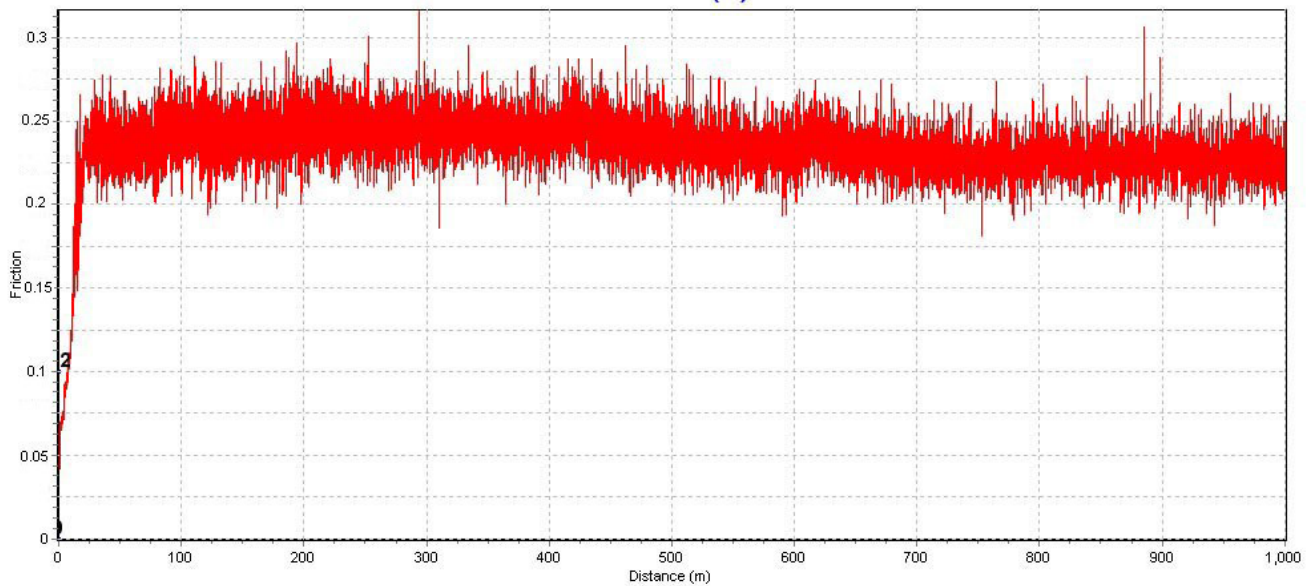


Vertical force : 4.00Kgf Velocity : 0.07m/s Gain : 6.21

Fig. 7. diagram Coefficient friction in before UPT

شکل ۷: نمودار ضریب اصطکاک قبل از فرآیند UPT

wear test (1)



Vertical force : 4.00Kgf Velocity : 0.07m/s Gain : 6.21

Fig. 8. diagram Coefficient friction in after UPT

شکل ۸: نمودار ضریب اصطکاک بعد از فرآیند UPT

۳-۵ مکانیزم سطح سایش

معمولاً مکانیزم‌های متعددی، در سایش یک نمونه نقش دارند که با تهیه تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از سطح سایش مکانیزم سایش بررسی شد. در این مقاله با استفاده از دستگاه پوشش‌دهی مدل (SCD ۰۰۵) سطح سایش نمونه‌ها روکش طلا شد و سپس با استفاده از دستگاه میکروسکوپ

الکترونی مدل فیلیپس (XL ۳۰) به بررسی ساختار سطح سایش نمونه‌های قبل و بعد از فرآیند فراصوتی پرداخته شد. بعد از آزمون سایش تصاویر با بزرگنمایی متفاوت از سطح سایش تهیه شد و با نتایج حاصل از تغییر وزن و ضریب اصطکاک در آزمون سایش، مکانیزم سایش بررسی گردید. شکل ۱۲ (الف-ب-ج) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش

قبل از فرآیند کوبش فراصوتی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، انتقال و نفوذ آنها در فصل مشترک سطوح درگیر موجب اتصال چسبان شده و مناطق برجسته‌ای را روی سطح ایجاد کرده است. از طرفی در قسمت‌های دیگر اثر خستگی سطحی روی سطح نمایان است. شکل می‌توان گفت مکانیزم سایش از نوع چسبان و خستگی سطحی است. شکل ۱۲ (د-ه) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش بعد از فرآیند کوبش فراصوتی آثار خراشیدگی و ایجاد خش نیز نشان می‌دهد که مکانیزم سایش از نوع خراشان است. شکل ۱۲ (الف) سطح سایش قبل از فرآیند را نشان می‌دهد که دارای عرض سایش بیشتری است و نواحی اطراف سطح سایش ناهموار و خشن است. مطابق شکل ۱۲ (ب) عرض سطح سایش در نمونه بعد از فرآیند کمتر شده است و نواحی اطراف سطح سایش صافی سطح بالایی دارد.

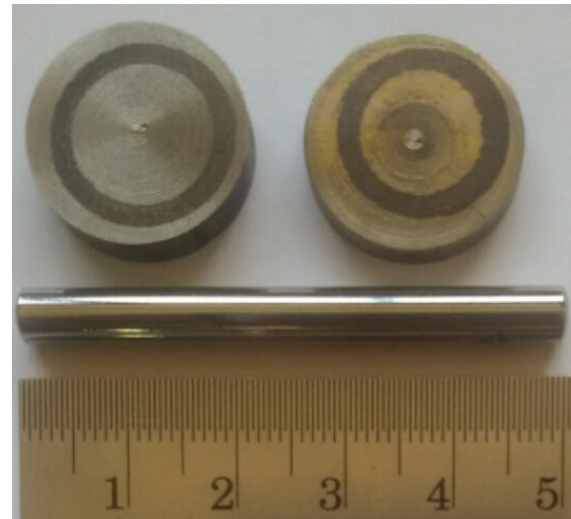


Fig. 9. samples wear test in before and after UPT and wear pin

شکل ۹: نمونه‌های قبل و بعد از فرآیند UPT بعد از تست سایش و پین سایش

فرآیند کوبش فراصوتی عملیات سخت‌کاری سطحی را با صاف کردن

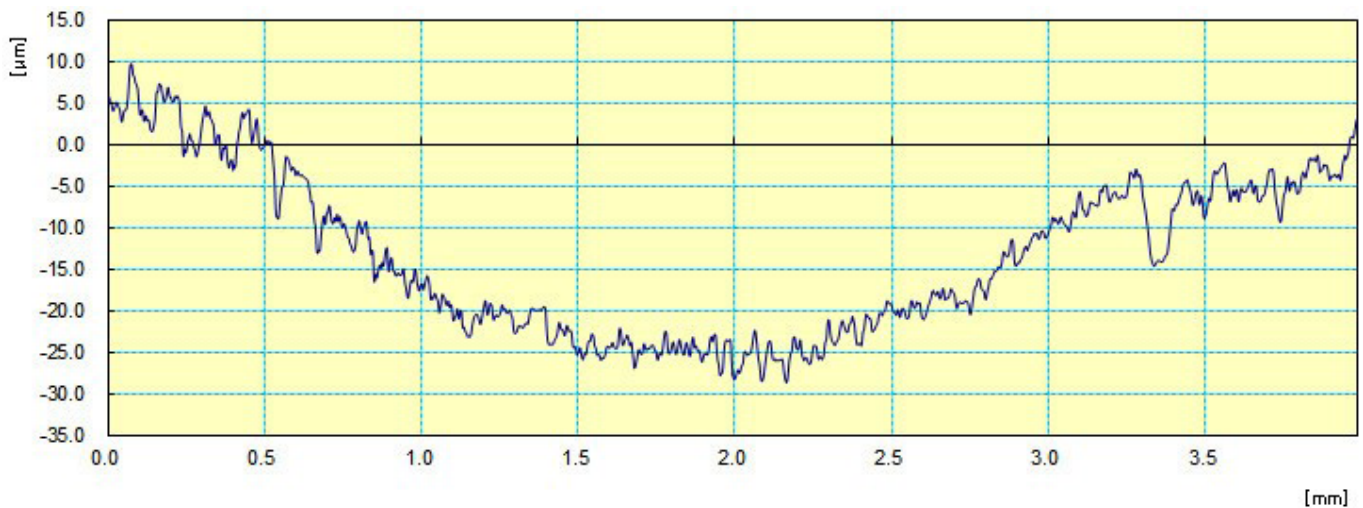


Fig. 10. diagram Coefficient friction before UPT

شکل ۱۰: گراف پروفیل سطح سایش قبل از فرآیند UPT

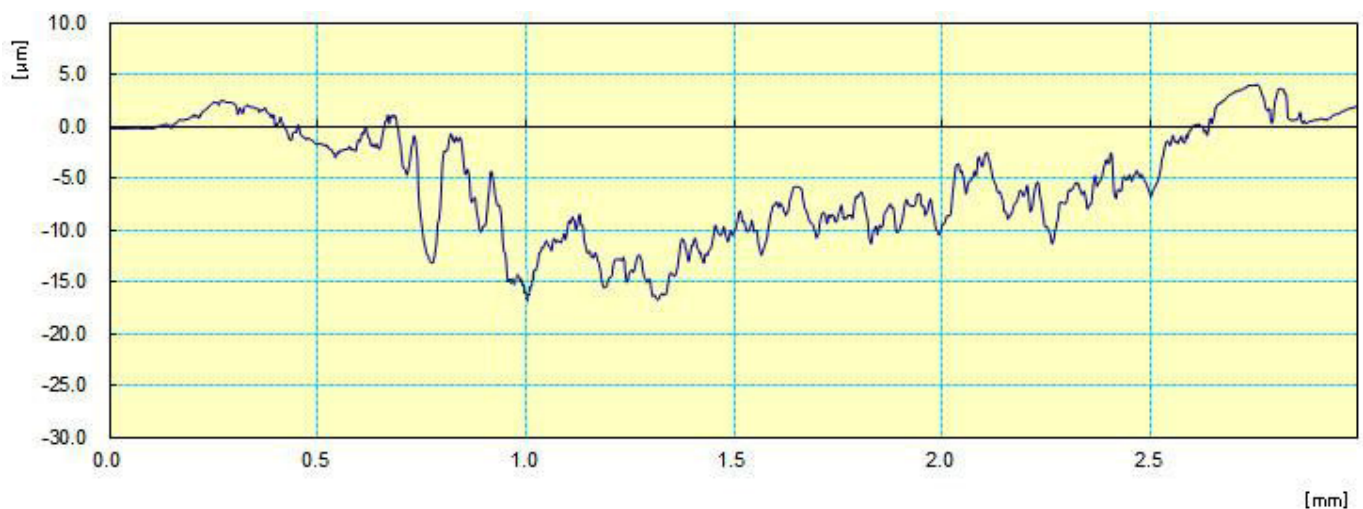
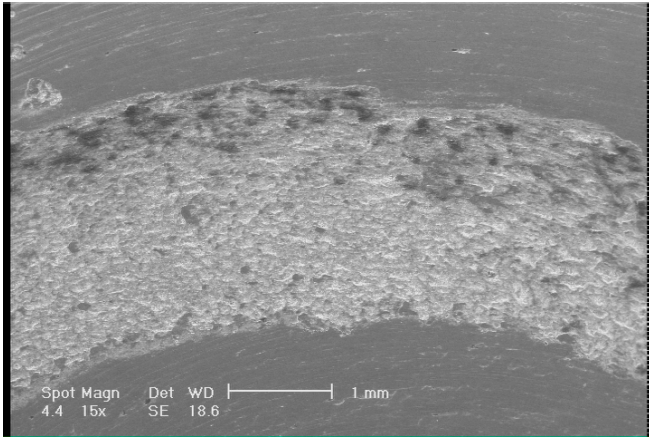


Fig. 11. diagram Coefficient friction after UPT

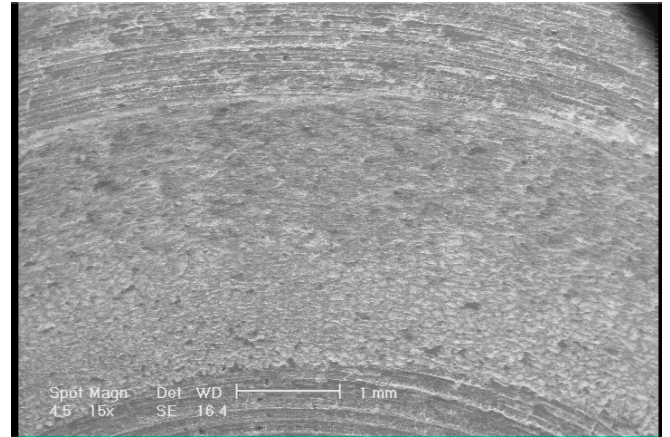
شکل ۱۱: گراف پروفیل سطح سایش بعد از فرآیند UPT

شیارهای کم عمق کشیده بر روی سطح سایش پدیدار می شود. مطابق شکل ۱۲ (ب-ج) سطح نمونه قبل از فرآیند، در تست سایش تغییر فرم پلاستیک زیادی را متحمل می شود و کرنش های ناشی از تنش موضعی باعث تغییر در ریزساختار ماده شده و در نتیجه ترک های ریز خستگی حاصل می شود.

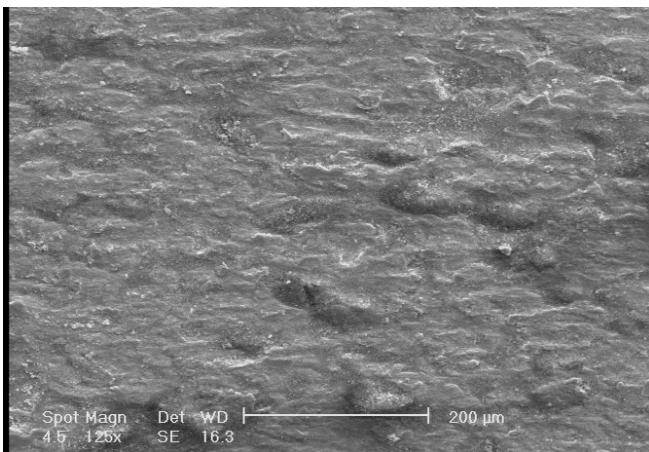
ناهمواری های سطحی و فشردن آن ها درون یک لایه سخت شده انجام می دهد که با شکست لایه های زیر سطحی و ایجاد کارسختی، سختی سطح افزایش می یابد. سطح نمونه بعد از فرآیند، سختی بالاتری دارد به همین دلیل مطابق شکل ۱۲ (ه-و) مکانیزم سایش از نوع خراشان حاصل می شود و



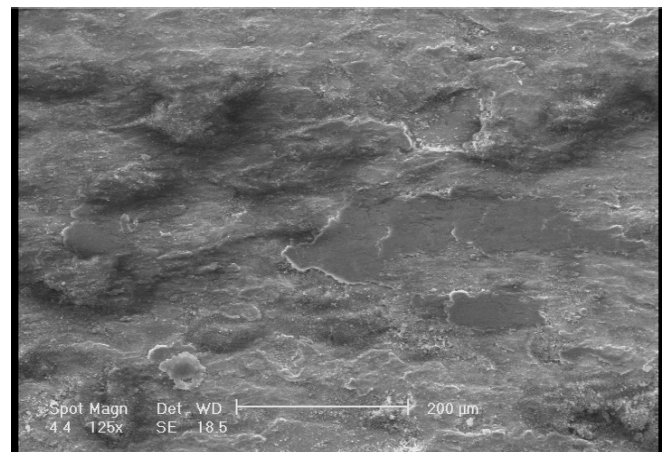
(د) سطح سایش در نمونه بعد از فرآیند (15x)



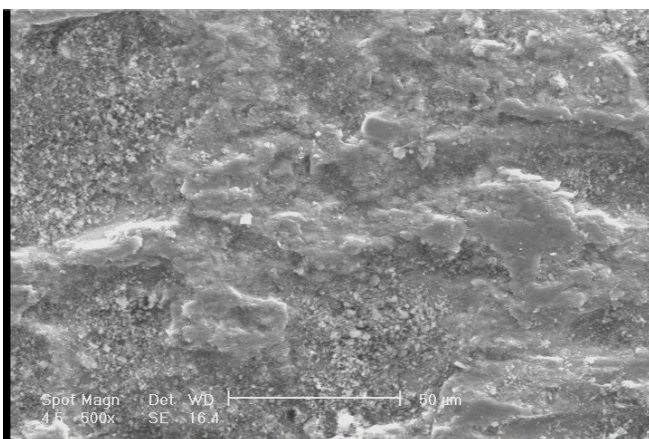
(الف) سطح سایش در نمونه قبل از فرآیند (15x)



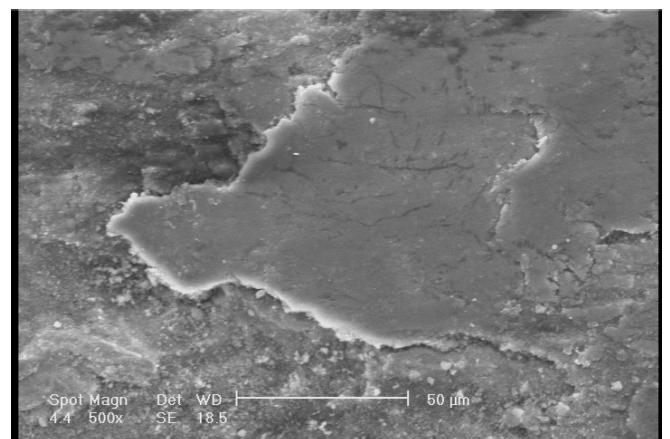
(ه) سطح سایش در نمونه بعد از فرآیند (125x)



(ب) سطح سایش در نمونه قبل از فرآیند (125x)



(و) سطح سایش در نمونه بعد از فرآیند (500x)



(ج) سطح سایش در نمونه قبل از فرآیند (500x)

Fig. 12. SEM images from wear surface in samples of after and before UPT, (a) wear surface before UPT (15 x), (b) wear surface before UPT (125 x), (c) wear surface before UPT (500 x), (d) wear surface after UPT (15 x), (e) wear surface after UPT (125 x), (f) wear surface after UPT (500 x)

شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش نمونه های قبل و بعد از فرآیند UPT

است که لایه‌های سطحی قطعه کار را با حرکات رفت و برگشتی و منظم ابزار فشرده می‌سازد و باعث بهبود برخی خواص مکانیکی از جمله صافی سطح، سختی، استحکام، میزان سایش و ضریب اصطکاک می‌شود.

با انجام آزمایش‌های سایش، پروفیل سطح سایش، میکروسکوپ الکترونی، نتایج زیر حاصل گردید:

- ضریب اصطکاک در نمونه قبل از فرآیند کوبش فراصوتی ۰/۵ و بعد از فرآیند کوبش فراصوتی ۰/۲۵ می‌باشد. نتایج مبین کاهش ضریب اصطکاک در حدود ۵۰ درصد بعد از عملیات UPT می‌باشد.
- در آزمایش سایش به روش پین روی دیسک میزان کاهش وزن پس از طی مسافت ۱۰۰۰ m بر روی نمونه قبل و بعد از عملیات کوبش فراصوتی به ترتیب ۷/۱ mgr و ۵/۹ mgr حاصل شد.
- با تهیه گراف پروفیل سطح از سطح سایش، میزان مساحت زیر نمودار قبل و بعد از فرآیند UPT به ترتیب $۰/۰۵۴۱ \text{ mm}^2$ و $۰/۰۱۷۰ \text{ mm}^2$ به دست آمد که علت آن سایش کمتر نمونه بعد از عملیات UPT می‌باشد.
- میکرو ساختار سطح با آزمایش میکروسکوپ روبشی الکترونی (SEM) انجام شد که قبل از فرآیند مکانیزم سایش از نوع چسبان و خستگی سطحی و بعد از فرآیند مکانیزم سایش از نوع خراشان می‌باشد که مبین افزایش استحکام، سختی و تنش‌های پسماند فشاری است.
- با انجام فرآیند UPT بر روی سطح غلتک‌های نورد مقاومت به سایش، استحکام، صافی سطح و طول عمر آن‌ها افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

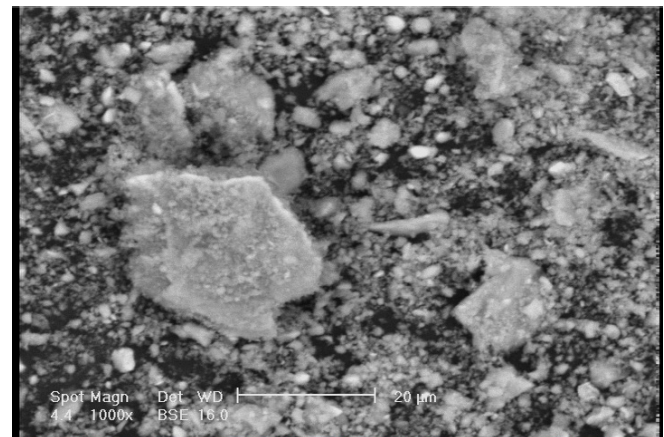
نویسندگان از همکاری شرکت سهامی ذوب آهن اصفهان، شرکت چدن‌سازان و دانشگاه صنعتی اصفهان تشکر می‌نمایند.

منابع

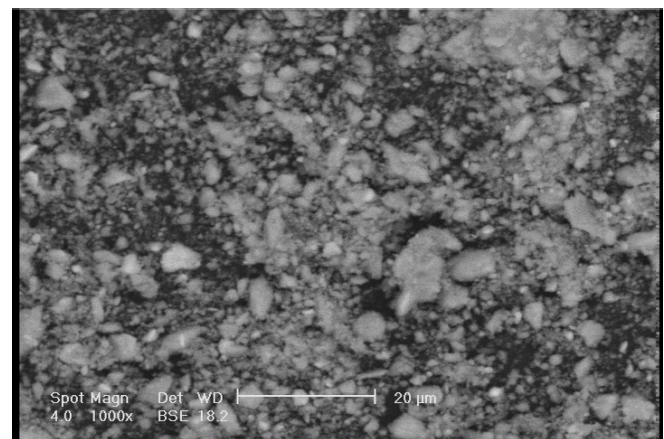
- [1] K.Tong, M.Chakko. Prediction of roll sapling in 4-high mills based on fatigue strength of roll materials and wear pattern of roll, *AISE Yearly Proceeding*, (1964) 539-569.
- [2] K.C.Ludema, Friction, Wear, Lubrication, *Tecnology & Engineering*, 9(1996) 272.
- [3] X.Jin, P.Wu, Z.Wen, Effects of structure elastic deformations of wheelset and track on creep forces of wheel0rail in rolling contact, *Wear*, (2002) 247-256.
- [4] A.Azushima, Y.Nakata, T.Toriumi, prediction of effect of rolling speed on coefficient of friction in hot sheet rolling of steel using sliding trobi-simulator, *Journal of Materials Processing Technology*, (2009) 6.
- [5] Sh.Guan qu, F.Qiang lai, G.Hong Wang, Z.Min Yuan, X.Qiang li, H.Guo, Friction and wear behavior of 30CrMnSiA steel at elevated temperatures, *Journal of*

در غلتک‌های نورد، بدون انجام فرآیند UPT، ترک‌های خستگی و افزایش ضریب اصطکاک منجر به کاهش طول عمر آن‌ها و در بعضی مواقع شکست می‌شود.

طبق شکل ۱۳ جهت بررسی مکانیزم سایش از براده‌های سایش قبل و بعد از فرآیند کوبش فراصوتی تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) تهیه شد. شکل ۱۳(الف) براده‌های سایش قبل از فرآیند را نشان می‌دهد. براده‌های سفیدرنگ تنگستن کارباید است که از پین سایش کنده شده و دوباره بر روی سطح در حال سایش چسبیده است. شکل ۱۳(ب) براده‌های سایش بعد از فرآیند را نشان می‌دهد که براده‌ها حالت کشیده شده دارند و در فصل مشترک دو سطح قرار گرفته و خود سبب خراشیدگی سطح می‌شوند.



(الف) براده‌های سایش در نمونه قبل از فرآیند (1000x)



(ب) براده‌های سایش در نمونه بعد از فرآیند (1000x)

Fig. 13. SEM images from wear filings in samples of after and before UPT, (a) wear filings before UPT (1000 x), (b) wear filings after UPT (1000 x)

شکل ۱۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از براده‌های سایش نمونه‌های قبل و بعد از فرآیند UPT

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، اثر فناوری کوبش فراصوتی بر روی فولاد گرافیتی GSH48 بررسی شد. این فرآیند یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید

- [15] Y.Liu, L.Wang, D.Wang, Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process, *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 2106-2113.
- [16] A. Karimi, S. Amini, Steel 7225 surface ultrafine structure and improvement of its mechanical properties using surface nanocrystallization technology by ultrasonic impact, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83(5)(2016) 1127–1134.
- [17] C.M.Suh, G.H.Song, M.S.Suh, Y.S.Pyoun, Fatigue and mechanical characteristics of nano-structured tool by ultrasonic cold forging technology, *Materials Science and Engineering A*, 443 (2007) 101-106.
- [18] XJ.Cao, YS.Pyoun, R.Murakami, Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surfacemodification, *Applied Surface Science*, 256(21) (2010) 6297–6303.
- [19] N.Hansen. Hall–Petch relation and boundary strengthening, *Scripta Materialia*, 51 (2004) 801–806.
- [20] A. Amanov, O. Penkov, Y. S. Pyun, D. E. Kim ,Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the tribological properties of AZ91D magnesium alloy, *Tribology International*, 54(2012) 106–113.
- [21] A. Abbasi, S. Amini, G.A. Shikhzade ,Investigation of ultrasonic peening technology on the GSH48 graphite steel, *Modares Mechanical Engineering* 16(9) (2016) 29-36.
- [22] Y.Estrin, A. Vinogradov, Fatigue behavior of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation, *International Journal of Fatigue*, 32 (2010) 898-907.
- [23] M.Multigner, S.Ferreira, E.Frutos, M.Jaafar, J.Ibanez, P.Marin, Superficial severe plastic deformation of 316 LVM stainless steel through grit blasting: Effects on its microstructure and subsurface mechanical properties, *Surface & Coatings Technology*, 205 (2010) 1830-1837.
- [24] Y.Sun, Sliding wear behavior of surface mechanical attrition treated AISI 304 stainless steel, *Tribology International* 57 (2013) 67-75.
- [25] F.Balaha, B.Langenecker, Plastic deformation under simultaneous cyclic and unidirectional loading at low and ultrasonic frequencies, *Materials Science and Engineering*, 68 (1984) 197-206.
- Materials Engineering and Performance*, 25(4) (2016) 1407-1415.
- [6] S.Mitrovic, D.Adamovic, F.Zivic, D.Dzunic, M.Pantic ,Friction and wear behavior of shot peened surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 alloyed steels under dry and lubricated contact conditions, *Applied Surface Science*, (290) (2014) 223– 232.
- [7] O. Unal, R. Varol, A. Erdogan, M. S. Gok,Wear behaviour of low carbon steel after severe shot peening, *Materials Research Innovations*,17(7) (2013) 519– 523.
- [8] I. Cho, G. Song, C. Kim, A. Nobuhide, A.Combs, J. Park, C. M. Suh, J. H. Park, Y. S. Pyoun. "Nano structured surface modification of tool steel and its beneficial effects in mechanical properties, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19(11)(2005) 2151-2156.
- [9] A. Cherif, Y. Pyoun, B. Scholtes, Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) on residual stress state and fatigue strength of AISI 304, *Journal of Materials Engineering and Performance*,19(2) (2010) 282-286.
- [10] W. Ting, W. Dongpo, L. Gang. ,Investigations on the nanocrystallization of 40Cr using ultrasonic surface rolling processing, *Applied Surface Science*, 255(5) (2008) 1824-1829.
- [11] C.M.Suh, S.Y.Oh, Y.S.Pyoun, Enhancement of the punch pin durability induced by the PVD coating in production process of the automotive inner pipe, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 24(5) (2010) 1061- 1066.
- [12] A. Amanov, I.S. Cho, Y.S. Pyoun, C.S. Lee, I.G. Park, Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects, *Wear*, 286 (2012) 136-144.
- [13] K.Y.Zhang, Y.S.Pyoun, X.J.Cao, B.Wu, R.Murakami, Fatigue properties of SUS304 stainless steel after ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM), *International Journal of Modern Physics*, 6 (2012) 330-335.
- [14] A. Abbasi, S. Amini, A. Emamikhah, Design and implementation of the ultrasonic cold forging technology process for improving surface mechanical properties of 6XB2C cold-worked alloy steel tool, *Journal of Engineering Manufacture* 230(2) (2014) 267-278.

Please cite this article using:

A. Abbasi, S. Amini, G. Shikhzade, Investigation of the Wear Behavior of Graphite Steel (GSH48) in Ultrasonic Peening Process, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 529-540.
DOI: 10.22060/mej.2017.12899.5463

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



