



مروری بر رفتار تریبولوژیکی غلتک های نورد

نگار اصغرزاده یزدی^۱، فاطمه عباس زاده^۱، فاطمه سادات سیدان^۲

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

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

چکیده

افزایش بهره‌وری غلتک‌های نورد مستلزم بهبود خواص سطحی آن‌ها است که پژوهش حاضر قصد بر مروری مختصر بر رفتار تریبولوژیکی این غلتک‌ها دارد. عوامل متعددی از جمله جنس غلتک و پوشش‌های سطحی می‌توانند بر فرآیند سایش غلتک‌ها تأثیرگذار باشند. فولادهای HSS, HCr, IC به منظور استفاده در غلتک‌های نورد پیشنهاد شده‌اند. این آلیاژها با تشکیل کاربیدهای M_6C , M_7C_3 , M_2C , MC سختی و مقاومت به سایش خوبی از خود نشان می‌دهند. یکی از ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین راه‌ها برای بهبود خواص مکانیکی سطح یک ماده، ایجاد پوشش بر روی آن است. پوشش‌های پاشش حرارتی، رسوب‌دهی شیمیایی بخار (CVD)، رسوب‌دهی فیزیکی بخار (PVD)، روش‌های ترموشیمیایی (کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی، بوردهی) به منظور افزایش سختی سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوشش‌های کروم سخت خواصی عالی در نورد فراهم می‌کنند، اما به دلیل مسائل زیست محیطی باید در دراز مدت جایگزین شوند. در این راستا، پوشش‌های سرامیکی رسوب یافته توسط روش‌های PVD و PECVD با موفقیت برای بهبود مقاومت در برابر سایش، کاهش اصطکاک و افزایش عمر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پوشش‌ها به دلیل سختی بسیار بالا، نتایج بهتری نسبت به فولادهای HSS بدون پوشش از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: غلتک نورد؛ سایش؛ ریزساختار؛ پوشش؛ فولاد HSS

^۱. negaryazdi79@gmail.com

مقدمه

نورد یک فرآیند پرکاربرد تغییر شکل پلاستیکی فلز برای تولید اشکال ساختاری مختلف، میلگردها و میله‌ها، ورق‌ها و نوارهای آبکاری شده است. نورد فلز تکنولوژی جدیدی نیست. در قرن چهاردهم از غلتک‌های دستی اولیه برای صاف کردن طلا و نقره استفاده می‌شد. یکی از اولین کارخانه‌های نورد که سابقه‌ای از آن وجود دارد توسط لئوناردو داوینچی در سال ۱۴۸۰ طراحی شد [۱]. در اواخر قرن شانزدهم از آسیاب‌های نورد به منظور رول کردن طلا و نقره برای بدست آوردن ضخامت یکنواخت در ساخت سکه استفاده می‌شد. در آغاز قرن هفدهم، غلتک‌های ساده با دو ارتفاع برای نورد سرب و قلع ساخته شدند. دستگاه‌های نورد شروع به پیچیده‌تر شدن کردند و شبیه همتای مدرن خود در قرن هجدهم شدند. در ابتدا، فولاد به پروفیل (ریل، تیرآهن، کانال، پروفیل‌های گرد) نورد شد، اما از حدود سال ۱۹۳۰ محصولات تخت (ورق و نوار) به طور فزاینده‌ای غالب شدند [۲]. اندازه و قدرت دستگاه‌های نورد در طول قرن نوزدهم و تا قرن بیستم افزایش یافت. در اواخر قرن نوزدهم و در قرن بیستم، انواع ورق‌های نورد سرد و گرم آلومینیوم، مس، برنج، سرب، قلع، تیتانیوم، زیرکونیوم و آلیاژهای ویژه به صورت تجاری در دسترس قرار گرفت [۳]. دستگاه‌های نورد امروزی برای پردازش بسیاری از فلزات در کاربردهای گسترده با استانداردهای بالا در دقت ابعاد، سطح و خواص مواد طراحی شده‌اند. بسته به اینکه دمای نورد بالاتر یا کمتر از دمای تبلور مجدد مواد در حال پردازش باشد، فرآیندهای نورد را می‌توان به عنوان نورد گرم یا سرد شناسایی کرد. دستگاه‌های نورد بسته به تعداد غلتک‌ها، آرایش غلتک‌ها و جهت نورد با چندین پیکربندی طراحی می‌شوند. انواع آرایش غلتک‌های نورد در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۴].

در عملیات نورد، چندین فرآیند به طور همزمان عمل کرده و کیفیت سطح نوار نورد شده را کنترل می‌کنند. تمام بخش‌های سیستم تریبولوژی نورد شامل تعامل دینامیکی غلتک‌ها، نوار و روان‌کننده است. پارامترهای فرآیند مانند فشار نورد، کاهش ضخامت و سرعت نورد، زبری سطح غلتک و نوار، خواص مواد، عملیات سطحی غلتک‌ها، نوع روان‌کننده و ترکیب رفتار تریبولوژیکی در نهایت مقدار کل ذرات سایش تشکیل شده را کنترل می‌کند [۵]. علت اصلی تخریب غلتک‌ها، سایش مداوم است، فرآیندی پیچیده که در آن خستگی مکانیکی و حرارتی با سایش و خوردگی ترکیب می‌شود. تجربه نشان داده است که نرخ سایش غلتک پس از تولید مقدار مشخصی از فولاد نورد شده به سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین، برای جلوگیری از سایش فاجعه‌آمیز، تغییرات غلتک باید پس از نورد یک تناژ مشخص انجام شود.

مکانیزم‌های سایش در غلتک‌های نورد

عوامل متعددی می‌توانند بر فرآیند سایش و غلتک‌ها تأثیرگذار باشند که مهم‌ترین آن‌ها جنس غلتک و پوشش سطحی آن‌ها است [۶]. مکانیزم‌های سایش که در غلتک‌های نورد رایج هستند عبارت‌اند از:

الف) سایش خراشان یکی از فرایندهای غالب سایش غلتک است. حضور ذرات سخت و ساینده در سطح فلز یا روانکار با ایجاد خراش و بریدگی بر روی سطح غلتک، باعث ایجاد سایش آن می‌شوند.

ب) سایش چسبان که به علت چسبیدن ذرات فلز به سطح غلتک در اثر فشار و اصطکاک بالا اتفاق می‌افتد.

ج) سایش خستگی در اثر اعمال بارهای متناوب و تنش‌های متناوب بر سطح غلتک، باعث ایجاد ترک‌های ریز در سطح غلتک می‌شود. این ترک‌ها به مرور زمان رشد کرده و منجر به جدا شدن قطعات کوچک از سطح می‌شوند.

د) سایش تریبوشیمیایی که در اثر واکنش شیمیایی بین سطح غلتک و محیط اطراف (مانند روانکار، رطوبت و مواد شیمیایی) ممکن است اتفاق افتد.

تأثیر جنس و ساختار متالورژیکی غلتک‌های نورد بر سایش

شرایط نورد گرم فولادها با توجه به افزایش تولید ورق یا صفحات فولادی نازک با مقاومت بالا موضوعی پیچیده است. نورد گرم عمدتاً تحت تأثیر سایش، اکسیداسیون و خستگی حرارتی غلتک‌ها قرار می‌گیرد. بنابراین، غلتک‌های فولادی تندبر (HSS) برای برآورده کردن الزامات توسعه یافته‌اند و در بسیاری از کارخانه‌های نورد جایگزین غلتک‌های چدن معمولی شده‌اند. اخیراً ترکیبات HSS اصلاح‌شده برای غلتک‌ها توسعه یافته‌اند که می‌توانند به طور گسترده برای بهبود مقاومت در برابر سایش و کیفیت سطح و در عین حال افزایش عمر غلتک مورد استفاده قرار گیرند. غلتک‌های HSS ساختار و خواص متفاوتی نسبت به فولادهای ابزار تندبر معمولی دارند. هنگام ساخت فولادهای ابزار تندبر، ساختار ریخته‌گری می‌تواند با تغییر شکل بعدی مانند آهنگری از بین برود و ریزساختار نهایی آن‌ها شامل مارتنزیت تمپر شده حاوی کاربیدهای به خوبی توزیع شده ریز و سخت در زمینه پس از عملیات حرارتی است. غلتک‌های HSS از کاربیدهای سخت مانند MC، M_2C ، M_6C ، M_7C_3 و کاربیدهای کروی ریز در زمینه تشکیل شده‌اند. در میان آن‌ها، کاربیدهای MC توزیع شده در داخل دانه‌ها نقش مهمی در تعیین خواص غلتک‌ها دارند [۷]. پارک و همکاران نشان دادند که مقاومت به سایش و زبری سطح غلتک‌های HSS با افزایش کاربید MC یا کسر کاربید کل افزایش می‌یابد. با توجه به این نتیجه، عوامل ریزساختاری اصلی بهبود مقاومت به سایش و زبری سطح به ترتیب کسر و توزیع کاربیدهای MC است. افزایش کربن معادل اثرات سودمندی بر مقاومت در برابر سایش و زبری سطح به دلیل افزایش کسر

کاربید کل و تشکیل مارتنزیت صفحه‌ای تمپر شده در زمینه ایجاد می‌کند. هنگامی که تنگستن معادل افزایش یابد، مقاومت به سایش و زبری سطح به دلیل افزایش کسری از کاربیدهای MC به طور همگن توزیع شده افزایش می‌یابد. کاهش محتوای وانادیوم برای مقاومت سایش و زبری سطح مضر گزارش شده است، زیرا توزیع بیشتر کاربیدهای MC در امتداد مرز دانه‌ها رخ می‌دهد [۷].

نیلسون و همکاران [۸] به مقایسه سه فولاد HSS, HCr, IC پرداختند. فولاد تندبر (HSS) و فولاد با کروم بالا (HCr) در پایه‌های اولیه و (indefinite chill iron (IC) در دو یا سه پایه آخر دستگاه‌های نورد داغ استفاده می‌شود. به طور کلی، ریزساختار HSS و HCr از یک زمینه بینیت-مارتنزیت تمپر شده با توزیع پیچیده کاربیدها تشکیل شده است. IC نیز حاوی کاربیدها و گرافیت آزاد است. در همه مواد، عناصر تشکیل دهنده کاربید مانند V, Cr, Mo و W نقش مهمی در ریزساختار حاصل و عملکرد مواد دارند. در HSS، کاربیدهای سخت مانند M_6C , M_2C , M_7C_3 و MC در شبکه ناپیوسته تری نسبت به HCr و IC یافت می‌شوند. دو مورد اخیر، محتوای کاربید بالاتری نسبت به HSS دارند. HCr دارای کاربیدهایی از نوع M_7C_3 است، در حالی که IC دارای کاربیدهایی از نوع M_3C است و همچنین مقدار گرافیت برای اطمینان از اثر روانکاری، قابل توجه است [۹]. هر دو غلتک IC و HCr امروزه با استفاده از سایر عناصر کاربیدساز نظیر نیوبوم برای تشکیل MC تقویت می‌شوند.

پارک و همکاران [۱۰] دریافتند که غلتک‌های HSS سه تا چهار برابر مقاومت سایشی بیشتری نسبت به غلتک‌های HCr دارند (که اغلب به عنوان مقدار محصول نورد شده به ازای مقدار مواد رول استفاده شده، با استفاده از واحد تن در میلی‌متر ارزیابی می‌شود). تحقیقات اخیر نشان داده است که غلتک‌های HCr را می‌توان ۷۴۰۰ تن در میلی‌متر استفاده کرد، در حالی که غلتک‌های HSS را می‌توان ۲۲۸۰۰ تن در میلی‌متر استفاده کرد. هوانگ و همکاران [۱۱] برای افزایش بیشتر مقاومت به سایش HSS، افزایش سختی زمینه مارتنزیتی سخت شده و تشکیل مقدار زیادی کاربید سخت را توصیه می‌کنند. بلزونس و همکاران [۱۲] مشاهده کردند که ضریب اصطکاک بالای HSS مانع استفاده از آن‌ها در آخرین پایه‌های تکمیلی دستگاه نورد می‌شود. جایی که دما پایین‌تر است، بار نورد بسیار زیاد و مکانیزم سایش خراشان است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تمام سطوح پس از سایش، شیارهایی را در جهت نورد نشان می‌دهند که نشان دهنده ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک، سایش خراشان و چسبان است. علاوه بر این، غلتک کار IC در اثر سایش تعداد زیادی حفره در سطح را نشان می‌دهد، در حالی که غلتک کار HCr شبکه‌ای از ترک‌ها را در سطح آشکار می‌سازد. غلتک کار اخیر نیز ظاهر نواری با نوارهای تیره و روشن‌تر را نشان می‌دهد. علی‌رغم این

تفاوت‌ها، میانگین مقدار زبری سطح (R_a) در غلتک‌های کاری مختلف مورد بررسی، در محدوده ۱/۵-۱ میلی‌متر بود که نشان‌دهنده وجود سایش پیوسته به جای سایش ناشی از براده‌برداری در مقیاس بزرگ و شکستگی سطح است [۸].

سختی بالای کاربیدها برای مقاومت در برابر سایش مطلوب است، اما درصد زیاد کاربیدها تمایل به ترک خوردن و براده‌برداری را افزایش می‌دهد. همچنین، وجود کاربیدهای بزرگ، مناطق غنی از کاربید و شبکه‌های کاربیدی باعث کاهش مقاومت در برابر خستگی ریزساختار می‌شود. در نتیجه، مقدار عناصر تشکیل دهنده کاربید و همچنین فرآیند ساخت باید کنترل شود تا یک ریزساختار بهینه با کاربیدهای ریز و با توزیع خوب حاصل شود [۸]. از آغاز دهه ۱۹۹۰، غلتک‌های ریخته‌گری شده از فولاد نیمه سریع (SHSS) مورد آزمایش قرار گرفتند. Mo ، V ، Cr عناصر آلیاژی اصلی این فولادها هستند. ساختار مواد پس از عملیات حرارتی ویژه دو مرحله‌ای شامل زمینه مارتنزیت- بینیت و کاربیدهای وانادیم (VC)، مولیدن (Mo_2C)، کروم ($Cr_{17}C_3$) و همچنین کاربیدهای مخلوط از نوع M_6C است. سختی توسط زمینه مارتنزیت - بینیت که با کروم، وانادیم و مولیدن آلیاژ می‌شود، ایجاد می‌گردد، در حالی که کاربیدهای ویژه با سختی بسیار بالا (تا 3000 HV) مشخص می‌شوند و در نتیجه مقاومت سایشی بالایی را برای مواد ایجاد می‌کنند. این ساختار را می‌توان تنها از طریق عملیات حرارتی به‌دست آورد [۱۳]. ترکیبات شیمیایی فولادهای SHSS برای غلتک‌های نورد بسته به تولیدکنندگان مختلف متفاوت است. درصد کروم، مولیدن و تنگستن به ترتیب از ۴ تا ۱۰ درصد، از ۲ تا ۸ درصد و از ۲ تا ۱۰ درصد متفاوت است [۱۴].

اسکریپکین و همکاران [۱۴] نشان دادند که ریزساختار فولاد SHSS مورد استفاده در غلتک‌ها شامل مارتنزیت پراکنده و آستنیت باقیمانده است که توسط شبکه ناهموار کاربیدهای اولیه (یوتکتیک) در امتداد مرز دانه‌ها و توسط کاربیدهای ثانویه پراکنده در داخل دانه‌ها سخت می‌شود. کاربیدهای یوتکتیک به صورت MC ، M_2C و M_7C_3 ارائه می‌شوند. نتایج نشان داده است که کاربیدهای اولیه درشت که به شکل صفحات کشیده یا شکل چند وجهی نامنظم هستند، عمدتاً حاوی کروم و مقدار کمتری از مولیدن و وانادیم، علاوه بر آهن، کربن و سیلیسیوم می‌باشند.

تأثیر پوشش بر مقاومت سایشی غلتک‌های نورد

امروزه بسیاری از فرآیندهای اصلاح سطح به عنوان گزینه‌هایی برای محافظت از سطوح فلزی در برابر اثرات محیطی و کاهش اثرات سایش، اصطکاک، خوردگی و خستگی که در طول استفاده در معرض آن‌ها قرار می‌-

گیرند، در دسترس هستند [۱۵]. یکی از ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین راه‌ها برای بهبود خواص مکانیکی سطح یک ماده، سخت شدن سطحی است. پوشش‌های پاشش حرارتی، رسوب‌دهی شیمیایی بخار (CVD)، رسوب‌دهی فیزیکی بخار (PVD)، روش‌های ترموشیمیایی (کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی، بوردهی) و نفوذ واکنشی حرارتی (TRD) از جمله رایج‌ترین فرآیندهای سخت‌سازی سطحی هستند [۱۶]. همه این روش‌ها نسبت به یکدیگر برتری و معایبی دارند. از عملیات نفوذ ترموشیمیایی می‌توان برای تشکیل نیتrideها، کاربیدها یا بوریدها بر سطح مواد استفاده نمود تا سطوح آن‌ها را سخت‌تر و مقاوم‌تر در برابر سایش سازد. از آنجایی که این فرآیندها تغییر کمی در ساختار داخلی مواد ایجاد می‌کنند، چقرمگی بالا و جذب انرژی بالا تحت بارهای دینامیکی را می‌توان حفظ کرد. یکی از ویژگی‌های مهم بوردهی، رشد یک پوشش سخت، مقاوم در برابر خوردگی و سایش است که می‌تواند خواص خود را در دماهای بالای 1000°C حفظ کند [۱۶].

گونن و همکاران غلتک‌های نورد را توسط فرآیند تیتانیزاسیون پوشش دادند. شکل ۳ تصاویر SEM پس از آزمون سایش را نشان می‌دهد. ورقه‌ای شدن مکانیزم غالب سایش بود که در مسیرهای سایش نمونه‌های تیتانیزه شده مشاهده می‌شد [۱۶]. کاتو [۱۷] مکانیزم سایش ورقه‌ای را در ۴ مرحله توصیف می‌کند: (الف) تغییر شکل پلاستیک در سطح مواد، (ب) جوانه زنی ترک‌ها در زیر سطح، (ج) رشد ترک‌ها و ادغام آن‌ها با سایر ترک‌ها، (د) بیرون کشیدن ذرات سایش چند لایه از سطح مواد.

انتقال چسبان و همچنین سختی و مقاومت سایشی غلتک‌ها به شدت به ترکیب شیمیایی سطوح غلتک مرتبط است [۱۸]. دلماره و همکاران [۱۹] نشان دادند که نرخ بالای کاربیدهای ریز و سخت در پوشش سطح غلتک برای تشکیل یک لایه انتقال روان کننده (برخلاف یک لایه ناهموار و با اصطکاک بالا) در نورد فولاد زنگ نزن بسیار مطلوب است. آروشیما و جیمبو [۲۰] برای فولادهای کربنی به نتیجه مشابه رسیدند. مطمئناً چسبندگی کم فولاد به کاربیدها دلیل این بهبود عملکرد بوده است. بر اساس این ایده، سوبوچی و همکاران پیشنهاد کردند که یک لایه ضخیم از یک کامپوزیت زمینه فلزی مبتنی بر پودر سوپرآلیاژ به همراه NbC توسط جوشکاری قوس الکتریکی با پلاسما، بر روی غلتک‌های نورد گرم، رسوب داده شود. غلتک‌های سرامیکی کامل، یا غلتک‌هایی با تقویت کننده‌های سرامیکی، برای نورد سرد فولاد زنگ نزن نیز پیشنهاد شده‌اند [۲۱].

راه حل دیگر، اعمال پوشش‌های سطحی نازک است. پوشش‌هایی که منجر به چسبندگی نمی‌شوند در صنعت نورد به خوبی شناخته شده‌اند. آبکاری کروم سخت برای مدت طولانی در نورد فولاد کربنی و نوارهای آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفته است. سایش غلتک‌های نورد را می‌توان با استفاده از پوشش‌های سخت، به ویژه کروم سخت کاهش داد. اخیراً، به دلیل خطرات زیست محیطی ناشی از حضور کروم سه ظرفیتی در طی

رسوب کروم سخت، علاقه در استفاده از تکنیک‌های سخت شدن جایگزین بر سطوح غلتک‌ها وجود دارد [۱۸].

پوشش‌های سرامیکی رسوب یافته توسط روش‌های PVD و PECVD با موفقیت برای بهبود مقاومت در برابر سایش، کاهش اصطکاک و افزایش عمر ابزار مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۲]. سختی این پوشش‌ها به مراتب بالاتر از فولاد HSS بوده و طیف گسترده‌ای از ضرایب اصطکاک را ارائه می‌دهند [۲۳]. آزوшіما و جیمبو [۲۰] TiN را به عنوان یک پوشش غلتک‌های نورد روی نوارهای فولادی کم کربن نورد سرد مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که در مقایسه با غلتک‌های بدون پوشش، می‌تواند در طول عمرهای بیشتر به کار رود. TiN به خوبی کروم سخت عمل می‌کند. همچنین پوشش TiN در نورد نوارهای فولادی با کربن بالا بررسی شد. نتایج نشان داد که سایش چسبان با TiN در بارهای مشابه غلتک‌های HSS بدون پوشش و به طور قابل توجهی کمتر از غلتک‌های روکش کروم رخ می‌دهد، که نشان می‌دهد TiN اجازه نمی‌دهد کاهش بزرگ در حجم ماده در اثر وقوع سایش در نورد انجام شود. با مقایسه این نتایج، به نظر می‌رسد عملکرد پوشش نسبت به ماهیت نوار نورد حساس است [۲۳].

به طور کلی پوشش‌های سرامیکی می‌توانند راه حل خوبی برای غلتک‌های دستگاه‌های نورد باشند. پوشش در نظر گرفته شده برای این استفاده باید به دلیل ماهیت سیکلی تنش حین نورد، مقاومت سایشی چسبان، خراشان و مقاومت در برابر خستگی خوب را نشان دهد [۲۳، ۲۰]. اولدا و همکاران [۱۸] به مقایسه سه پوشش CrN، TiN و TiBN برای نورد نوار فولاد زنگ نزن پرداختند. در شکل ۴ تصاویر نمونه‌های پوشش داده شده پس از تست صفحه روی حلقه نشان داده شده است. از نظر مقاومت در برابر سایش چسبان، TiBN کارایی کمتری نسبت به فولاد بدون پوشش نشان داد، در حالی که TiN و CrN دارای ظرفیت‌های ضد چسبندگی عالی بودند. این امر نشان دهنده بهبود قابل توجهی در کاهش حجم ماده در اثر سایش یا به عبارتی حداقل میزان سایش است. TiN هم در برابر انتقال ماده به سطح مقابل (مکانیزم سایش چسبان) و هم در برابر خستگی سطحی مقاومت می‌کند و به عنوان یک پوشش PVD مناسب برای غلتک‌ها ارزیابی می‌شود و باعث می‌گردد بهره‌وری به طور قابل توجهی نسبت به غلتک‌های فولادی بدون پوشش برای نورد سرد نوار فولادی زنگ نزن افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

(۱) پاسخ تریبولوژیکی غلتک‌های نورد با جنس مختلف به شدت به ریزساختار ماده وابسته است. مکانیزم‌های سایش تحت تأثیر وجود کاربیدها و شبکه‌های گرافیت در ریزساختار غلتک‌ها هستند.

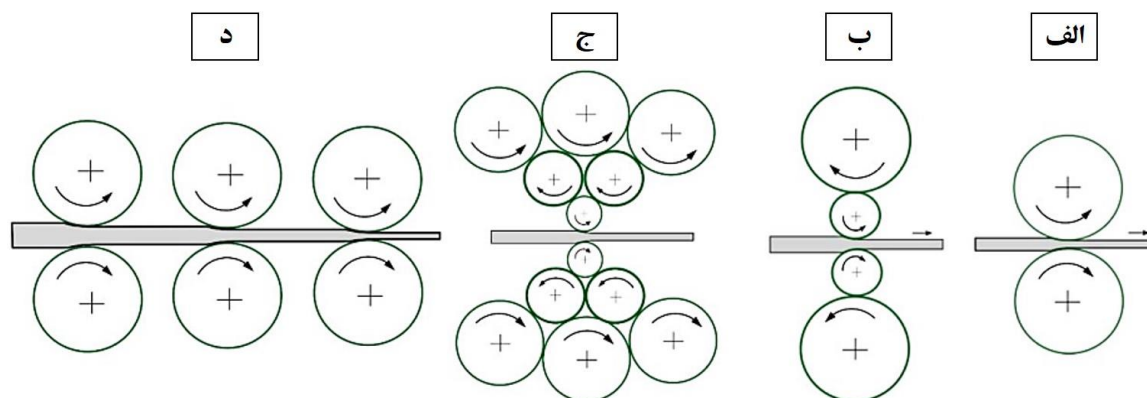
۲) مقاومت به سایش و زبری سطح با افزایش کاربرد MC یا کسر کاربرد کل افزایش می‌یابد. با توجه به این نتیجه، عوامل اصلی ریزساختاری در بهبود مقاومت به سایش و زبری سطح به ترتیب کسر و توزیع کاربیدهای MC می‌باشد.

۳) پوشش‌های فیزیکی بخار و ترموشیمیایی نتایج قابل توجهی در افزایش مقاومت به سایش غلتک‌های نورد از خود نشان داده‌اند. پوشش TiN با توجه به خواص ضد چسبندگی خود نتایج بهتری نسبت به پوشش‌های کروم سخت رایج که تأثیرات زیست محیطی مخرب نیز دارند، از خود نشان داده است.

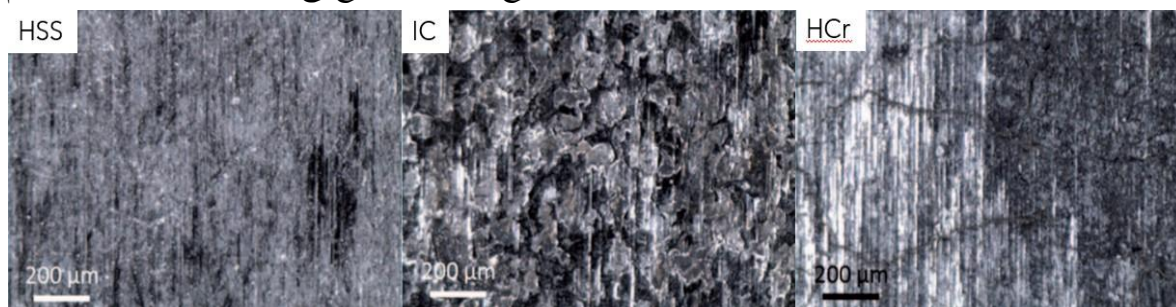
مراجع

1. Fisher. TW, Iezzi. RA, "Theoretical and practical considerations of sheet steel surface cleanliness".
2. P. Pathak, A. Singh, "Tribological approach for improvement in productivity and quality of flat rolled steel products: a review".
3. Pesci. C, Monfort. G, Torre. V, "Controlling wear and surface cleanliness during cold rolling (LOWWEAR)".
4. Melkamu. Awoke Mekicha, "Wear Particles Formation in cold rolling".
5. M. Ben Tkaya, M. Zidi, S. Mezlini, H. Zahouani, P. Kapsa, "Influence of the attack angle on the scratch testing of an aluminium alloy by cones", *Experimental and numerical studies*, Mater. Des. 29 (2008)
6. S. Spuzic, K.N. Strafford, "of hot rolling mill rolls: an overview"
7. Dae. Jin Ha, Hyo. Kyung Sung, "Effects of Alloying Elements on Microstructure, Hardness, Wear Resistance, and Surface Roughness of Centrifugally Cast High-Speed Steel Rolls"
8. M. Nilsson, M. Olsson, "An investigation of worn work roll materials used in the finishing stands of the hot strip mill for steel rolling"
9. Ziehenberger. KH, Windhager. M, "State of the art work rolls for hot rolling flat products", *In: Proceedings of the CONAC 2007 – 3rd steel industry conference and exposition*, Monterrey, Mexico, 2007.
10. Park. JW, Lee. HC, Lee. S, "Composition, microstructure, hardness, and wear properties of high-speed steel rolls", *Metallur Mater Trans A* 1999; 30A: 399–409.
11. Hwang. K, Lee. S, Lee. H, "Effects of alloying elements on microstructure and fracture properties of cast high speed steel rolls Part I: microstructural analysis", *Mater Sci Eng* 1998; A254: 282–295.
12. Belzunce. FJ, Ziadi. A, Rodriguez. C, "Structural integrity of hot strip mill rolling rolls", *Eng Fail Anal* 2004; 11: 789–797.
13. Gulakov A. A, Tukhvatullin I. Kh, Potapov M. G, "Experience of production of centrifugal cast sheet rolling rolls for hot rolling mills in the conditions of Kushvinsky Mill Roll Plant", *Chernaya metallurgiya. Bulletin nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii*. 2018. No. 5. pp. 75-81.
14. E. V. Skripkin, "Development of new composition for sHSS steel used for hot rolling mill rolls at Magnitogorsk Iron and Steel Works"

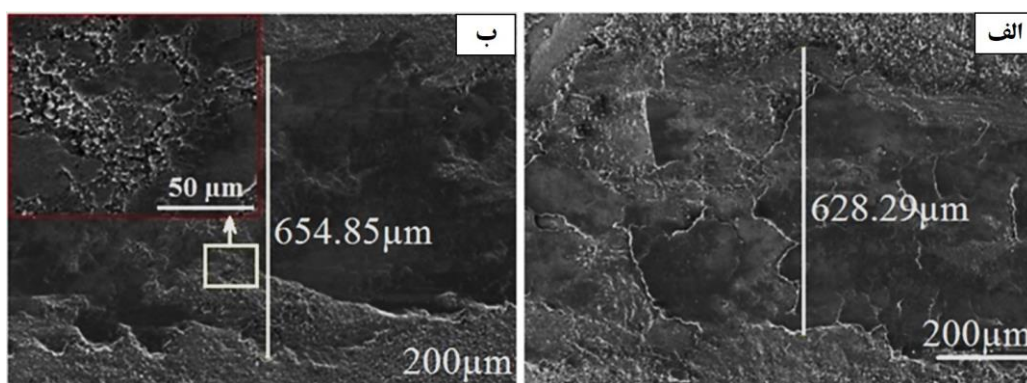
15. A. Günen, E. Kanca, M.S. Karakaş, V. Koç, M.S. Gök, A. Çürük, M. Demir, “Application of different coating methods to external cooling roller and characterization of applied coatings”, *3rd Iron and Steel Symposium (UDCS'17)*, 2017, pp. 206–211 (ISBN 978-605-9554-0-60).
16. Ali. Günen, Erdoğan. Kanca, “High temperature wear behavior of the surface-modified externally cooled rolls”. 2018
17. K. Kato, “Abrasive wear of metals. Tribol”. Int. 30 (5) (1997) 333–338.
18. Choumad. Oulda, Xavier. Badiche, “PVD coated mill rolls for cold rolling of stainless-steel strips—Tribological and mechanical laboratory tests”
19. Delamare. F, Kubié. J, “An evaluation of the PSCT. III. Experimental study of the friction test: the role of the metallurgical parameters of die and sheet”, *Journal of Lubrication Technology (Transactions of the ASME)* 1982; 104:538–44.
20. Jimbo. Y, Azushima. A, “Effect of carbide properties of roll materials on lubricity in cold sheet rolling of low-carbon steel”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2001; 41:347–60.
21. Tsubouchi. K, Akiyama. M, Tsumura. M, Amano. S, “Development of a wear-resistant surface layer for a tool to be used for high temperature stainless steel rolling”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J- Journal of Engineering Tribology* 1999;213: 473–80.
22. Zhang. ZG, “Elaboration of nanostructured coatings by magnetron cathodic sputtering as substitutes of electrolytic Cr”, *PhD dissertation, UTBM*; 2008
23. Ould. C, Gachon. Y, Montmitonnet. P, Badiche. X, “Tribological testing of anti-adhesive coatings for cold rolling mill rolls application to TiN-coated rolls”. In: *Proc. ESAFORM conf.* 2011. p. 1747–52.



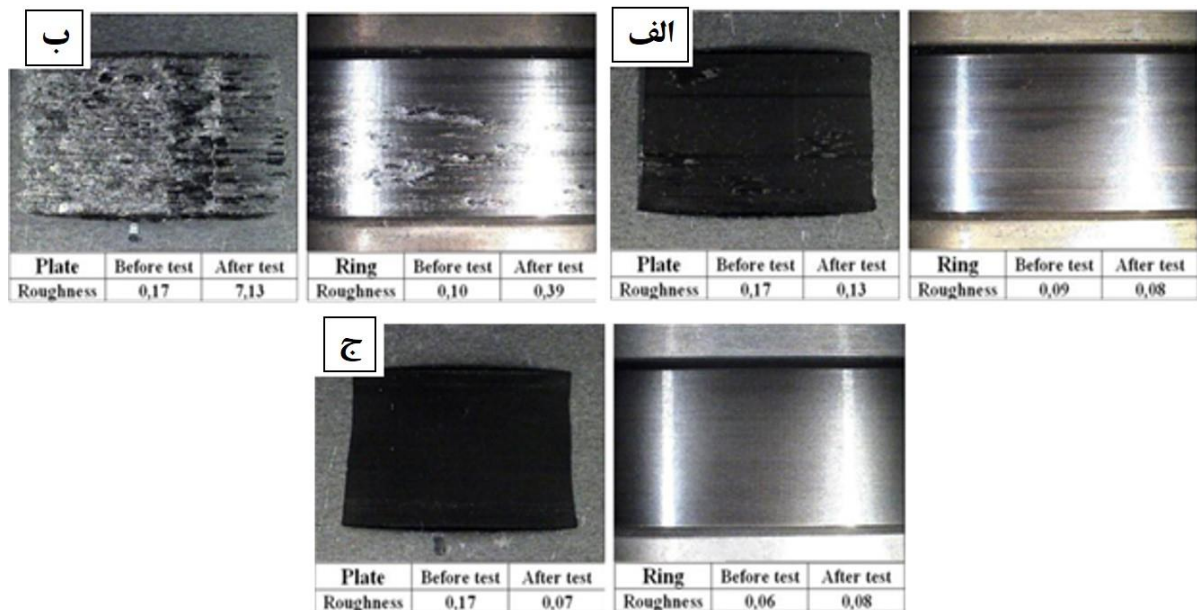
شکل ۱: شماتیکی از پیکربندی‌های معمولی دستگاه نورد: (الف) دو ارتفاع (ب) چهار ارتفاع (ج) خوشه (د) آسیاب پشت سر هم



شکل ۲: استریومیکروگراف‌ها که مورفولوژی سطوح ساییده شده در فولادهای HSS، IC و غلتک‌های کاری HCr را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تصاویر SEM از نمونه‌های تیتانیوم شده پس از آزمون سایش در دماهای (الف) ۲۵°C (ب) ۲۵۰°C



شکل ۴: وضعیت سطوح صفحات (چپ) و حلقه ها (راست) پس از آزمایش: حلقه پوشش داده شده با (الف) TiN (ب) TiBN و (ج) CrN