

## رفتار سایشی فولادهای متخلخل تهیه شده از طریق فرایند متالورژی پودر

حسن عبدوس

دانشکده نانوفناوری، گروه مهندسی نانو مواد، پردیس علوم و فناوری نوین، دانشگاه سمنان، سمنان

h.abdoos@semnan.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

رفتار سایشی  
فولادهای متالورژی پودر  
تخلخل  
ریزساختار  
عملیات حرارتی

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۳  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

کاربرد قطعات متالورژی پودر تفجوشی شده به ویژه در صنعت خودرو و سایر صنایع به دلایل تکنیکی و اقتصادی در حال گسترش است. امروزه بسیاری از اجزای اتومبیل، تجهیزات ماشین‌های اداری، برخی از قطعات با کاربرد در صنایع هوایی و به طور کلی بسیاری از قطعات با شکل‌های پیچیده و دقت ابعادی بالا، می‌توانند به صورت اقتصادی و از طریق فرایند متالورژی پودر تهیه شوند. در شرایط واقعی و در حین سرویس دهی، بسیاری از این قطعات مانند چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها، حرکت نسبی در مقابل سایر اجزا را تجربه می‌نمایند. در مقاله حاضر، پاسخ فولادهای تفجوشی شده در مقابل بارگذاری‌های سایشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که رفتار سایشی این مواد بسیار پیچیده می‌باشد به گونه‌ای که برای ارزیابی و پیش‌بینی رفتار سایشی این مواد، تسلط بر عوامل مؤثر و دخیل دانستن همه آن‌ها نظیر چگالی، مشخصات حفرات، سختی، نیروی اعمالی، سرعت لغزش، ریزساختار و شرایط روانکاری ضروری است.

## ۱ مقدمه

یکی از زمینه‌های اصلی کاربرد قطعات متالورژی پودر بکارگیری آن‌ها در شرایط تحت سایش می‌باشد که به طور گسترده در صنعت اتومبیل‌سازی، اجزای ماشین‌های اداری و سایر صنایع رو به گسترش است. در سال‌های اخیر تقاضا برای تولید قطعات فولادی از طریق فرایند متالورژی پودر به دلیل جنبه‌های اقتصادی آن مورد توجه واقع شده است [۱-۳]. قطعات تولیدی بدین روش، اجزایی هستند که اغلب در معرض بارهای مکانیکی زیاد و نیروهای پیچیده قرار می‌گیرند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به اجزای موتور، چرخ‌دنده‌های انتقال نیرو، اجزای اکسترودرهای تزریق پلاستیک و برخی قطعات دارای کاربرد در صنایع هوا فضا اشاره کرد [۴، ۵].

رفتار مکانیکی فولادهای تفجوشی شده اصولاً با آزمون‌های کشش، سختی و خستگی تعیین می‌شود [۶]. بهر حال تقاضا برای تولید قطعاتی که در حین سرویس در تماس با یکدیگر و یا سایر قطعات قرار دارند، رو به افزایش است. این موضوع تلاش محققان را جهت افزایش کارایی قطعات متالورژی پودر تحت شرایط دینامیکی برمی‌انگیزد. عمر کاری و دوام بسیاری از قطعات متالورژی پودر با فرایند سایش محدود می‌شود. به همین دلیل بررسی رفتار سایشی و تریبولوژیکی به همراه سایر خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم و یا چقرمگی شکست، مهم است. مواد متالورژی پودر به طور گسترده جهت تولید اجزایی که در شرایط کاری تحت لغزش، غلتش، سایش خراشان و سایش تماسی قرار دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین فهم کامل رفتار تریبولوژیکی آن‌ها به منظور افزایش گستره کاربردی آنها ضروری به نظر می‌رسد [۴]. ترکیب شیمیایی، مواد افزودنی، تخلخل، عملیات حرارتی،

عملیات سطحی، روانکاری و متغیرهای بارگذاری سایشی از مهم‌ترین عواملی هستند که مقاومت به سایش فولادهای تفجوشی شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۷، ۸]. رفتار سایشی فولادهای با چگالی کامل به طور مفصل مورد مطالعه واقع شده و داده‌های نسبتاً وسیعی برای انواع فولادها، تحت شرایط مختلف و محیط‌های گوناگون سایشی جمع‌آوری شده و موجود می‌باشد. در مقابل رفتار سایشی مواد متالورژی پودر کمتر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. حضور حفرات و سایر خصوصیات ریزساختاری که مختص فولادهای متخلخل تفجوشی شده می‌باشد منجر به پیچیده‌تر شدن رفتار سایشی این مواد در مقایسه با مواد با چگالی کامل شده است [۲]. از طرفی دامنه کاربرد این فرایند برای تولید قطعات تحت بارهای دینامیکی نیز در دو دهه اخیر انجام مطالعات سیستماتیک و دقیق در خصوص رفتار تریبولوژیکی این نوع قطعات را به همراه داشته است.

با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت که حفرات، افزودنی‌های آلیاژی، متغیرهای فرایند سایش، عملیات حرارتی و عملیات سطحی از مهم‌ترین عواملی هستند که تاکنون مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته‌اند. در مقاله حاضر تلاش شده است که از میان عوامل مذکور نقش و تأثیر حفرات، متغیرهای فرایند سایش (مانند میزان نیرو و سرعت اعمالی) و عملیات حرارتی، بر رفتار سایشی فولادهای متالورژی پودر بررسی شود.

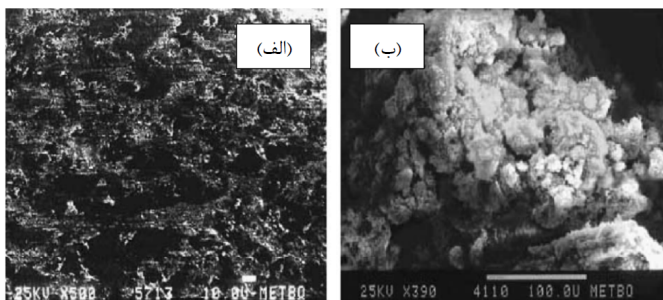
## ۲ نقش حفرات

بررسی‌های صورت‌پذیرفته در خصوص ارزیابی تأثیر حفرات، نشان‌دهنده نقش پیچیده آن‌ها در مقاومت به سایش نمونه‌های فولادی تهیه شده از طریق

گیرد؛ بلکه کروی شدن حفرات از طریق افزایش دمای تفجوشی، علی‌رغم کاهش سختی می‌تواند منجر به بهبود مقاومت سایشی شود. نتایج حاکی از این نکته است که مقاومت به سایش فولادهای متخلخل تابع پیچیده‌ای از ریزساختار، سختی و حفرات می‌باشد. به هر حال تفسیر نقش تخلخل بر رفتار سایشی بسته به موارد مختلف چالش برانگیز است. پیشنهاد شده است که حفرات در میزانی که وابسته به نیروی اعمالی است، می‌تواند نقش مثبتی در افزایش مقاومت به سایش نمونه‌های تفجوشی شده از طریق کاهش فشار تماسی و همچنین کاهش تغییر فرم پلاستیک در اطراف حفرات ارائه دهند. از اینرو وجود حفرات، به مقدار مناسب در افزایش مقاومت به سایش نقش خواهد داشت. شایان ذکر است که در مورد فولادهای متالورژی پودر و با توجه به شرایط سرویس دهی، مقدار بهینه حفرات می‌بایست با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند ریزساختار، سختی، متغیرهای سایشی و غیره تعیین شود. می‌توان بیان کرد که میزان بهینه حفرات به منظور مقاومت به سایش مناسب نمی‌بایست بیشتر از حدی گردد که به موجب آن ساختار و مورفولوژی آن‌ها از حالت بسته (حفرات منفصل) به باز (حفرات متصل) تبدیل شود.

### ۳ تأثیر متغیرهای فرایند سایش

سرعت لغزش و میزان نیروی اعمالی از مهم‌ترین متغیرهای فرایند سایش تلقی می‌شوند که تأثیر آنها بر رفتار سایشی چشمگیر و مهم است. تغییر در سرعت لغزش و یا نیروهای اعمالی می‌تواند منجر به تغییر در سازوکارهای سایش شده و به تبع آن منجر به مقاومت‌های سایشی متفاوتی شود. به طور کلی می‌توان گفت که افزایش نیروی اعمالی، سایش شدیدتری را به دنبال دارد و در سرعت‌های لغزش کمتر، کاهش وزن کمتری قابل مشاهده است. به طور کلی نشان داده شده که در نیروهای کم، سایش معتدل با اکسایش هر دو سطح درگیر، توأم است که منجر به نرخ سایش کم می‌گردد. در حالی که در نیروهای بالاتر سایش فلزی شدید با نرخ سایش بالا مشاهده می‌شود [۱۰]. برای آزمون‌های سایش در نیروهای اعمالی پایین (مثلاً ۵ و ۱۰ نیوتن) سازوکار سایش شامل اکسیداسیون ملایم است [۴] (شکل ۱). این مکانیزم تحت نیروهای اعمالی و نرخ سایش پایین در خصوص سایر مواد متالورژی پودر نیز قابل مشاهده است. سطوح سایش در نیروهای بالاتر (۲۰ نیوتن)؛ شامل حضور شیارهایی موازی در جهت سایش و خرده‌های پولکی<sup>۳</sup> شکل می‌باشد که نشان‌دهنده مکانیزم سایش ورقه‌ای در این مواد است (شکل ۲).



شکل ۱: (الف) سطح ساییده‌شده و (ب) خرده‌های سایش حاصل از آزمون سایش در نیروهای ۵ و ۱۰ نیوتن [۴].

متالورژی پودر می‌باشد. به هر حال این نقش به دلیل وابستگی شدید تأثیر حفرات بر شرایط آزمون تریبولوژیکی تا حدودی ناشناخته است [۹]. حفرات، سایش را با سازوکار نسبتاً پیچیده‌ای تحت تأثیر قرار داده [۱۰] و به نظر می‌رسد که برای بهترین رفتار سایشی می‌بایست مشخصات آن‌ها بهینه شود. حضور حفرات می‌تواند ناشی از کاهش سرعت سایش مثبت باشد، چون حفرات می‌تواند به عنوان ذخایر روانکار در لغزش تر و یا به عنوان مکان‌هایی جهت به دام افتادن خرده‌های سایش در لغزش خشک عمل کنند [۹]. از این لحاظ، رفتار سایشی مواد متخلخل در مقایسه با مواد با چگالی کامل مناسب‌تر است. کاهش نرخ سایش به دلیل به دام افتادن خرده‌های حاصل از سایش در حفرات قطعات متخلخل به موارد ذیل مرتبط می‌شود [۲]:

(الف) کاهش فشار تماسی در مقایسه با ماده متخلخل با حفرات باز<sup>۱</sup> که امکان به دام افتادن خرده‌ها در آن وجود ندارد.

(ب) کاهش احتمال تشکیل و تجمع ذرات ساییده بزرگ در حین لغزش (ج) تنزل میزان تغییر فرم پلاستیک احتمالی در حوالی حفرات که منجر به تشکیل خرده‌های فلزی می‌گردد.

شایان ذکر است که تأثیر حفرات بر رفتار سایشی به شرایط سایش وابسته است، بدین مفهوم که در شرایط متفاوت کاربردی، حفرات می‌تواند تأثیر مفید و یا مخربی بر تخریب سایشی بر جای گذارند. سازوکار به دام افتادن خرده‌های سایش در حفرات به شدت به میزان حفرات بستگی خواهد داشت. به‌گونه‌ای که در اثر وجود حفرات بزرگ و یا تجمع حفرات<sup>۲</sup> بی‌اثر می‌گردد و بدون وجود حفرات نیز میسر نمی‌باشد [۱۰]. به هر حال توجه به این نکته لازم است که رفتار سایشی قطعات متالورژی پودر کاملاً به میزان حفرات حساس است. نشان داده شده است که سایش خشک در قطعات با بیش از ۱۰ الی ۱۲ درصد تخلخل، نزدیک دو برابر قطعاتی است که حاوی تخلخل کمتر از ۵٪ می‌باشند. دلیل این تفاوت تبدیل حفرات از حالت بسته و منفرد به حالت کاملاً باز با افزایش میزان تخلخل است [۱۱]. پیشنهاد شده است که میزان بهینه حفرات برای کمترین مقدار سایش خشک در آهن ساده متالورژی پودر حدود ۱۰ درصد می‌باشد [۱۲]. نرخ سایش عمدتاً توسط میزان حفرات تحت تأثیر قرار می‌گیرد. کاهش چشمگیر نرخ سایش با افزایش چگالی برای فولادهای کم‌آلیاژ حاوی نیکل، مس و مولیبدن گزارش شده است [۱].

برای فولادهای حاوی مولیبدن نشان داده شده است که افزایش دمای تفجوشی منجر به مقاومت سایشی بیشتر به ازای همه نیروهای اعمالی می‌گردد [۴]. این موضوع علی‌رغم کاهش در سختی ماده مورد مطالعه، مشاهده شده است که احتمالاً به دلیل کاهش میزان حفرات به ازای تفجوشی در دماهای بالاتر پدید می‌آید. همچنین افزایش دمای تفجوشی می‌تواند به واسطه تشویق مدور شدن حفرات و در نتیجه کاهش اثر تمرکز تنش مفید بوده و اثر مثبتی بر مقاومت به سایش بر جای گذارد. بنابراین بهینه‌سازی مورفولوژی حفرات از طریق انتخاب توزیع اندازه ذرات پودر اولیه، نوع روانکار مورد استفاده، روش فشردن و همچنین متغیرهای تفجوشی مانند تفجوشی در فاز مایع و دما و زمان آن می‌تواند رفتار سایشی را متأثر سازد.

نتایج نشان می‌دهند که سختی تنها خاصیتی نیست که می‌بایست در انتخاب مواد مقاوم به سایش لغزشی فولادهای تفجوشی‌شده، مدنظر قرار

<sup>1</sup>open porosity    <sup>2</sup>pore clusters    <sup>3</sup>flake

نیرو عمل کرده و موجب حفاظت سطح می‌شوند. همچنین ضریب اصطکاک را نیز کاهش می‌دهند. در مقادیر کم  $p \times V$  سایش چسبان نیز به همراه سایش اکسیداسیون اصلی مشاهده می‌شود. با افزایش مقدار  $p \times V$  مثلاً سرعت ۲ متر بر ثانیه و نیروی ۵۰ نیوتن سطوح ساییده‌شده، خشن می‌شوند که نشان‌دهنده سایش چسبان و خراشان می‌باشد. در این حالت بدلیل وجود سایش خراشان نرخ سایش افزایش می‌یابد. در این شرایط سه مکانیزم سایش اکسیداسیون، چسبان و خراشان توأمان وجود دارند. با افزایش بیشتر مقدار  $p \times V$ ، حرارت سطح افزایش می‌یابد و پین در حین سایش گداخته می‌شود. در این شرایط نرخ سایش به شدت افزایش یافته، سختی سطح پین کاهش و ضریب اصطکاک نیز به دلیل روغن‌کاری فلز مذاب، کاهش می‌یابد. هنگامی که نیروی عمودی و سرعت سایش بیشتر افزایش یابند فرایندهای سایش ذوبی پدید می‌آیند. در این موارد جرقه‌هایی در حین سایش قابل مشاهده است و پین در مدت کمی ساییده می‌شود.

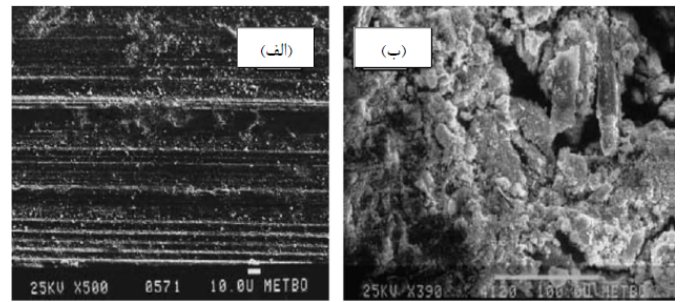
سازوکارهای محتمل در حین سایش خشک فولادهای متخلخل با افزایش فشار و سرعت لغزش به ترتیب شامل سایش اکسیداسیون، سایش چسبان، سایش خراشان و سایش ذوبی می‌باشند؛ البته تعیین شرایط سایش از قبیل فشار و سرعتی که این سازوکارها در آن بوقوع می‌پیوندند؛ بستگی به خصوصیات ماده تحت آزمون (مانند حفرات، ترکیب شیمیایی و غیره) خواهد داشت.

به طور کلی سرعت لغزش و میزان نیروی اعمالی با توجه به اثراتی که بر سازوکارهای سایش برجای می‌گذارند تأثیر مهمی بر رفتار و مقاومت به سایش نمونه‌های فولادی تف-جوشی شده، اعمال می‌نمایند؛ به گونه‌ای که در عمل نیرو و سرعت لغزش می‌بایست به منظور جلوگیری از سایش شدید به دقت مورد توجه قرار گیرند. نتایج بررسی آزمون‌های سایش در شرایط مختلف نشان می‌دهد که این دو مقدار می‌بایست در شرایط سایش خشک حداقل باشند.

#### ۴ تأثیر عملیات حرارتی

بسیاری از فولادهای کم‌آلیاژ متالورژی پودر نمی‌توانند پس از تف‌جوشی مستقیماً مورد استفاده قرار گیرند، به همین دلیل اعمال عملیات حرارتی پس از تف جوشی به منظور ایجاد استحکام فرایندی معمول و مرسوم می‌باشد. از آنجایی که ماکروسختی فولادهای تف‌جوشی شده پایین می‌باشد، عملیات حرارتی عمدتاً جهت افزایش سختی و بهبود رفتار سایشی بخصوص در ارتباط با فولادهای کم‌آلیاژ، توصیه می‌شود [۱، ۲، ۱۱، ۱۳-۱۵]. عملیات حرارتی می‌تواند باعث افزایش یکنواخت خواص از طریق تغییر در ریزساختار زمینه و همگنی آن گردد. بنظر می‌رسد که مقاومت سایشی با افزایش استحکام زمینه از طریق عملیات حرارتی افزایش می‌یابد [۱]. به همین دلیل ایجاد فازهای سخت در ریزساختار روش معمول جهت ارتقای خواص سایشی بخصوص برای فولادهای کم‌آلیاژ می‌باشد. مقاومت سایشی ریزساختارهای مختلف را می‌توان از مقاوم به ضعیف به ترتیب: کاربیدی، مارتنزیتی، بینیتی و پرلیت لایه‌ای دسته‌بندی کرد [۲].

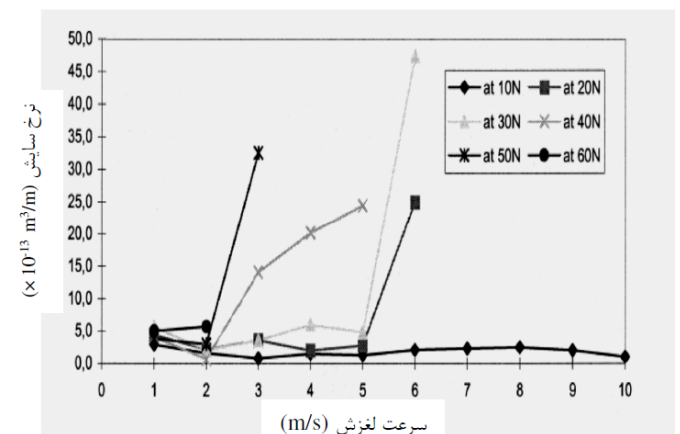
امکان استحکام‌دهی برخی از فولادهای متالورژی پودر با سرعت آرام سرد



شکل ۲: (الف) سطح ساییده‌شده و (ب) خرده‌های سایش ورقه‌ای شکل حاصل از آزمون سایش در نیروی ۲۰ نیوتن [۴].

همچنین اثر سرعت لغزش و نیروی عمودی بر رفتار سایشی فولاد حاوی ۳/۵ درصد مولیبدن تحت مطالعه قرار گرفته است [۱۳]. شکل ۳ نرخ سایش را به صورت تابعی از فاصله لغزش در چندین نیرو برای فولاد تف‌جوشی شده در  $1220^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد.

در نیروی ۱۰ نیوتن تغییرات نرخ سایش در محدوده سرعت لغزش ۱ الی ۱۰ متر بر ثانیه کم می‌باشد. در نیروی ۲۰ و ۳۰ نیوتن نرخ سایش تا قبل از سرعت لغزش ۵ متر بر ثانیه تغییرات زیادی ندارد. ولیکن در سرعت‌های لغزش بالای ۵ متر بر ثانیه، سرعت سایش به شدت افزایش می‌یابد. آنچه جالب است اینکه در نیروهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ نیوتن نرخ سایش در سرعت‌های لغزش بین ۲ الی ۵ متر بر ثانیه تغییری نمی‌کند و ثابت است. ولیکن در نیروهای بالاتر شامل ۴۰، ۵۰ و ۶۰ نیوتن نرخ سایش افزایش چشمگیری را در سرعت لغزش بیش از ۲ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. اعمال نیروهای عمودی بیشتر، سرعت لغزش قابل تحمل را که در سرعت‌های کمتر از آن نرخ سایش تقریباً کم و ثابت است را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر با اعمال نیروهای عمودی بیشتر نرخ سایش در سرعت‌های کمتر، افزایش چشمگیری را به همراه دارد.



شکل ۳: رابطه بین نرخ سایش فولاد و سرعت لغزش در نیروهای مختلف [۱۳].

همچنین تغییر در سازوکار سایش نیز در سرعت‌ها و نیروهای عمودی مختلف مشاهده و گزارش شده است. در سرعت لغزش کم و نیروی عمودی پایین؛ مکانیزم سایش، اکسیداسیون فعال می‌باشد. این اکسیدها غالباً در مقادیر  $p \times V$  (حاصلضرب نیرو در سرعت) پایین‌تر به راحتی با توجه به شرایط ترمودینامیکی تولید می‌شوند. این نوع اکسیدها پس از آغاز فرایند بر سطح پین تشکیل شده و دارای سختی قابل توجهی می‌باشند و به عنوان تکیه‌گاه

در حالت کلی دمای تمپر شرایط تجزیه آستنیت باقی مانده را به مارتنزیت تمپر شده، تعیین می‌کند و از این رو رفتار سایشی را متأثر می‌سازد. همچنین سختی نهایی می‌تواند توسط دما و زمان تمپر کنترل شود [۱۵]. از دیدگاه متالورژیکی و در حالت معمولی در دماهای پایین تمپر، آستنیت باقی مانده کمتری به فریت تبدیل شده و کاربید و مارتنزیت تمپر شده دارای مقاومت به سایش بالایی در این نوع فولادها می‌شود. در دماهای بالای تمپر، فریت بیشتری از طریق تجزیه آستنیت باقی مانده بوجود آمده و سختی فولادهای مارتنزیتی تمپر شده در این دماها به وضوح کاهش می‌یابد و به تبع آن مقاومت به سایش افت می‌کند [۱۱].

بررسی نتایج تجربی مشخص می‌کند که نرخ سایش نمی‌تواند به سادگی به عملیات حرارتی مرتبط گردد، ولیکن می‌توان آن را با سختی به عنوان نتیجه نهایی عملیات حرارتی مرتبط دانست [۲]. می‌توان اظهار کرد که تأثیر سختی بر نرخ سایش مواد متالورژی پودر با عوامل مختلف مانند تخلخل، عملیات حرارتی و ترکیب شیمیایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نرخ سایش کمتر ماده کوئنچ و تمپر شده در  $450^{\circ}\text{C}$  در مقایسه با نمونه‌های تف‌جوشی شده می‌تواند توسط افزایش سختی و تغییر سازوکار سایش توجیه شود. سازوکار غالب در سایش این نمونه‌ها سایش اکسیداسیون در اثر اکسایش اجزای نرم‌تر تشکیل‌دهنده ریزساختار، می‌باشد. در مقابل سازوکار سایش برای نمونه‌های تمپر شده در  $200^{\circ}\text{C}$  شامل سایش ورقه‌ای شدن می‌باشد که توسط خرده‌های بزرگ و براق سایش قابل شناسایی و مشاهده است. موضوع مذکور عکس مطلبی است که در مورد عملیات تمپر از دیدگاه متالورژیکی در بالا به آن اشاره گردید. بنابراین مشاهده می‌گردد که عوامل مختلف قادرند توانان بر روی رفتار سایشی مؤثر باشند. بدین معنی که در عملیات حرارتی فولادهای متالورژی پودر و بررسی تأثیر آن بر رفتار سایشی علاوه بر تغییر ریزساختار، می‌بایست به عواملی همچون سختی حاصل از عملیات حرارتی و مکانیزم سایش نیز توجه کرد.

عملیات حرارتی شامل آستنیت کردن در  $850^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$  سپس کوئنچ در روغن و بازپخت به مدت ۶۰ دقیقه در دمای  $350^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد که نرخ سایش برای ماده مورد مطالعه در شرایط تف‌جوشی حدود دو برابر نرخ سایش همان ماده پس از عملیات حرارتی می‌باشد [۱].

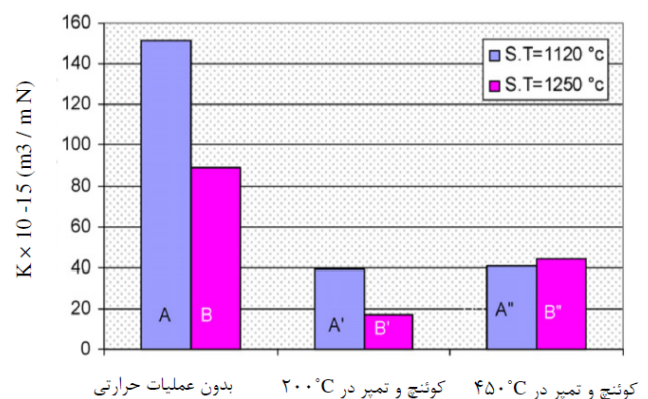
همچنین نشان داده شده است که نرخ سایش فولاد حاوی مولیبدن هنگامی که تحت عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر قرار می‌گیرد در مقایسه با نمونه بدون عملیات حرارتی افزایش می‌یابد [۱۷]. هنگامی که نمونه در شرایط تف‌جوشی شده است، سازوکارهای سایش چسبان و اکسیداسیون در حین فرایند رخ می‌دهد، در حالی که برای نمونه‌های کوئنچ و تمپر شده سایش خراشان به همراه سایش اکسیداسیون غالب است که نرخ سایش بالاتری را به دنبال دارد. این در حالی است که سختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده بالاتر می‌باشد. از این رو می‌توان دریافت که فاز مارتنزیتی برای مقاومت به سایش فولادهای مولیبدن‌دار با توجه به سختی بالاتر مفید بوده و در مورد انتخاب عملیات حرارتی برای این نوع فولادها در کاربردهای سایشی، می‌بایست دقت بیشتری صورت پذیرد.

بعلاوه تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار سایش لغزشی خشک فولاد چگالی

شدن از دمای تف‌جوشی امکان‌پذیر است، ولیکن برای رسیدن به این شرایط استفاده از مقادیر زیادی عناصر آلیاژی مانند کروم، مولیبدن، نیکل، مس و غیره ضروری است. با افزودن این عناصر فازهای مستحکم از قبیل بینیت و مارتنزیت در ریزساختار ایجاد می‌شوند. در اغلب فولادهای کم آلیاژ متالورژی پودر، عملیات حرارتی معمول برای فولادهای کربنی متخلخل شامل کوئنچ و تمپر (سخت گردانی و بازپخت) است [۱۴، ۱۵]. فولادهای کوئنچ و تمپر شده تا سختی حداکثر، شامل زمینه مارتنزیتی به همراه کاربید می‌باشند. کاربیدها به دلیل اینکه سخت‌ترین فاز در فولادها محسوب می‌شوند، دارای نرخ سایش کمتری در مقایسه با زمینه بوده و تأثیر مهم و تعیین‌کننده‌ای را بر خواص سایشی فولادهای عملیات حرارتی شده اعمال می‌نمایند [۲]. برخی اوقات ایجاد ساختارهای کاملاً مارتنزیتی سرعت سایش را آن طور که مورد انتظار است، کاهش نمی‌دهند. فاز مارتنزیت در ریزساختار تحت نیرو به آسانی ترک خورده و به همین دلیل کاهش وزن از سطح افزایش می‌یابد. در این موارد آنیل بحرانی به عنوان عملیات حرارتی جایگزین به منظور بهبود رفتار سایشی فولادهای متالورژی پودر به کار می‌رود [۱۵، ۱۶].

یافته‌های متناقضی در خصوص تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار سایشی مواد مختلف گزارش شده است. برخی محققین به تأثیر مناسب عملیات حرارتی بر رفتار سایشی قطعات اشاره کرده‌اند و در مقابل برخی دیگر بر این عقیده اند که عملیات حرارتی مقاومت به سایش را کاهش می‌دهد. داده‌های محققین دو برابر شدن نرخ سایش را در مواد کار شده آهن داکتیل هنگامی که از حالت آستمپر شده به کوئنچ و تمپر در یک میزان سختی (۴۵۵ HV) تبدیل می‌شوند، گزارش کرده‌اند. همچنین نرخ‌های سرعت بالاتر برای فولادهای متالورژی پودر عملیات حرارتی شده در مقایسه با مواد تف‌جوشی شده گزارش شده است [۱۳].

تغییرات نرخ سایش با عملیات حرارتی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، عملیات حرارتی منجر به کاهش نرخ سایش در همه موارد گردیده است. نمونه‌های تف‌جوشی شده دارای کاهش وزن بیشتری در مقایسه با نمونه‌های عملیات حرارتی شده می‌باشند. عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر در  $450^{\circ}\text{C}$  تأثیر مطلوب‌تری بر کاهش نرخ سایش بر جای می‌گذارد. به عبارت دیگر نمونه‌هایی که در  $200^{\circ}\text{C}$  تمپر شده‌اند، نرخ سایش بالاتری در مقایسه با نمونه‌های تمپر شده در  $450^{\circ}\text{C}$  از خود بروز می‌دهند.



شکل ۴: تغییرات نرخ سایش با دمای تف‌جوشی و عملیات حرارتی [۲].



بالا، محتوی ۲ درصد وزنی نیکل و تخلخل زیر ۲ درصد که با دو میزان کربن مختلف تهیه شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهند که این فولادها در حالت تف‌جوشی دارای ساختار پرلیت ریز و در شرایط عملیات حرارتی دارای ریزساختار مارتنزیت تمپر شده می‌باشند. نرخ سایش برای فولاد با ۰/۴۷ درصد کربن حدود ۴ برابر و برای فولاد با ۰/۲ درصد کربن حدود ۵ برابر در اثر افزایش سختی، کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه رفتار سایشی این دو نوع ماده مشخص می‌شود که ماده با کربن بیشتر دارای مقاومت به سایش بهتری در مقایسه با ماده حاوی کربن کمتر می‌باشد. کربن سختی آهن را افزایش داده و در نتیجه قابلیت تحمل نیرو را نیز افزایش می‌دهد. این موضوع هنگامی که فرایند تخریب به لایه سطحی محدود می‌گردد، عامل مهمی در بهینه کردن رفتار سایشی می‌باشد [۱۷].

علاوه بر کوئنچ و تمپر، عملیات آنیل بحرانی نیز از دیگر فرایندهای عملیات حرارتی است که به منظور افزایش مقاومت به سایش فولادهای متالورژی پودر مورد بررسی محققان واقع گردیده است. عملیات حرارتی آنیلینگ در دمای بحرانی<sup>۴</sup> شامل حرارت دادن فولاد کم آلیاژ هاپیو اتکتوئید بین دمای Ac1-Ac3 (دمای آنیل بحرانی) و تشکیل فازهای آستنیت و فریت و سپس سرد کردن سریع آن به منظور استحاله آستنیت به مارتنزیت می‌باشد [۱۵]. بررسی سختی قطعات پس از عملیات کوئنچ و تمپر و آنیل بحرانی نشان می‌دهد که تحت عملیات آنیل بحرانی سختی نمونه‌ها با افزایش دمای آنیل افزایش می‌یابد. افزایش ماکروسختی در اثر افزایش کسر حجمی مارتنزیت به ازای افزایش دمای آنیل می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که ماکروسختی نمونه‌های آنیل شده به‌وضوح از نمونه‌های کوئنچ و تمپر، بیشتر می‌باشد. بعلاوه در این نمونه‌ها میکروسختی مارتنزیت نیز بیشتر از نمونه‌های کوئنچ شده است. علی‌رغم وجود فریت نرم در ریزساختار نمونه‌های آنیل شده، دلیل ماکروسختی بالاتر را می‌توان به میکروسختی بالاتر مارتنزیت در آن‌ها نسبت داد. ثابت شده است که حجم مارتنزیتی که در زمینه فریتی در حین عملیات آنیل بحرانی تولید می‌شود در حین استحاله‌اش از آستنیت افزایش می‌یابد. از اینرو انبساط مارتنزیت از لحاظ حجمی منجر به تغییر فرم فاز فریت اطراف شده و افزایش چگالی نابعایی‌ها را در پی دارد. به همین دلیل، وجود دانسیته بالاتری از نابعایی‌ها منجر به افزایش سختی در فولادهای آنیل شده می‌شود. قابل ذکر است که در نمونه کوئنچ و تمپر شده سختی کمتر منجر به نرخ سایش بالاتر می‌شود. نکته قابل ذکر این است که مقادیر ماکروسختی نمونه آنیل شده در دمای ۷۲۸ °C کمتر از نمونه آنیل شده در ۷۹۰ °C می‌باشد و برخلاف ماکروسختی کمتر، این نمونه دارای مقاومت به سایش بهتری است. این موضوع به دلیل کسر حجمی کمتر مارتنزیت و در عوض سختی بالاتر آن در نمونه آنیل شده در ۷۲۸ °C توجیه می‌شود. لذا می‌توان دریافت که تأثیر سختی مارتنزیت بر روی سرعت سایش در مقایسه با مقدار آن عامل مهم‌تری بر رفتار سایشی است.

با کربن ثابت، سختی جزایر مارتنزیتی هنگامی که کسر حجمی مارتنزیت کاهش می‌یابد، افزایش یافته و این امر استحکام سایشی فولاد را بهبود می‌بخشد. بررسی فولادهای دو فازی نشان می‌دهد که اگر فولادهای دو فازی چقرمگی بالایی داشته باشند، دارای مقاومت به سایش بالایی می‌شوند. از این رو عموماً فولادهای دو فازی محتوی کسر حجمی مارتنزیت کمتر، مقاومت به سایش بالاتری دارند [۱۶]. بنابراین عموماً انجام عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر با توجه به ایجاد ریزساختارهای مستحکم و افزایش ماکروسختی می‌تواند گام مهمی در جهت بهبود مقاومت به سایش فولادهای متخلخل تف‌جوشی شده، محسوب شود. منتها در مورد فولادهای کم‌آلیاژ هاپیواتکتوئید ایجاد ساختارهای دو فازی مستحکم و داکتیل حاصل از عملیات آنیل بحرانی، در مقایسه با ریزساختارهای حاصل از کوئنچ و تمپر از نقطه نظر مقاومت به سایش، مشمتر است.

در برخی موارد نیز با توجه به ترکیب شیمیایی و شرایط بارگذاری سایشی ممکن است تغییر مکانیزم سایش به سایش خراشان در اثر افزایش سختی پدید آمده توسط عملیات حرارتی، رخ دهد که منجر به افزایش وزن ازدست‌رفته شده و کاهش مقاومت سایشی را به ارمغان آورد. از اینرو تصمیم‌گیری در خصوص انجام عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر می‌بایست طوری صورت پذیرد که منجر به تغییر مکانیزم به سایش خراشان در اثر افزایش سختی نگردد. بنابراین در این خصوص پیشنهاد می‌گردد که با توجه به پیچیده بودن سازوکار سایش این مواد و تأثیر متقابل عوامل مختلف بر یکدیگر، قبل از بکارگیری قطعات فولادی متالورژی پودر در شرایط سایشی، رفتار آن‌ها پس از انتخاب ترکیب شیمیایی مورد نظر، تحت شرایط سرویس، مورد آزمون قرار گرفته و سپس تمهیدات لازم مانند عملیات حرارتی مطابق با شرایط مطلوب اندیشیده شود.

## ۵ نتیجه‌گیری

- حفرات در سایش تر با حضور روانکار می‌تواند به عنوان ذخیره‌کننده‌های روغن و در سایش خشک بعنوان مکان‌هایی به منظور بدام افتادن خرده‌های سایش، عمل کنند. بنابراین حضور حفرات در قطعات متالورژی پودر تا حد معینی می‌تواند باعث افزایش مقاومت به سایش این قطعات گردد.
- افزایش سرعت لغزش و میزان نیروی اعمالی می‌تواند منجر به اعمال اثراتی بر سازوکارهای سایش شود به گونه‌ای که با افزایش این عوامل تغییر از سایش اکسیداسیون به سایش ذوبی در نیروها و سرعت لغزش بسیار بالا رخ می‌دهد. این دو مقدار می‌بایست در شرایط سایش خشک بمنظور جلوگیری از کاهش وزن زیاد، حداقل باشند.
- انجام عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر در اکثر موارد بهبود مقاومت به سایش را به همراه دارد، منتها در برخی حالات ایجاد ساختارهای ترد مارتنزیتی که به آسانی ترک می‌خورند، منجر به تغییر در سازوکار سایش و افزایش وزن از دست رفته می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهند که با کنترل شکل، اندازه و توزیع مارتنزیت در زمینه فریت، استحکام و داکتیلیته مطلوب و چقرمگی مناسب به وجود می‌آید. موادی که دارای فازهای سخت و داکتیل می‌باشند، به طور گسترده بعنوان مواد مقاوم به سایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. در یک فولاد

<sup>4</sup>intercritical annealing heat treatment

- [14] Tekeli, S. and Güral, A. Effect of intercritical annealing and quenching plus tempering heat treatments on microstructure of ni added powder metallurgy steels. *Materials & Design*, 28(4):1353 – 1357, 2007.
- [15] Tekeli, S. and Güral, A. Dry sliding wear behaviour of heat treated iron based powder metallurgy steels with 0.3 *Materials & Design*, 28(6):1923 – 1927, 2007.
- [16] Tekeli, S., Güral, A., and Özyürek, D. Dry sliding wear behavior of low carbon dual phase powder metallurgy steels. *Materials & Design*, 28(5):1685 – 1688, 2007.
- [17] Sudhakar, K.V, Sampathkumaran, P, and Dwarakadasa, E.S. Dry sliding wear in high density fe-2%ni based p/m alloys. *Wear*, 242(1):207 – 212, 2000.
- [1] Khorsand, H, Habibi, S.M, Yoozbashizadea, H, Janghorban, K, Reihani, S.M.S, Serajil, H [Rahmani, and Ashtari, M. The role of heat treatment on wear behavior of powder metallurgy low alloy steels. *Materials & Design*, 23(7):667 – 670, 2002.
- [2] Babakhani, A., Haerian, A., and Ghambri, M. Effect of heat treatment, lubricant and sintering temperature on dry sliding wear behavior of medium alloyed chromium pm steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1):192 – 198, 2008.
- [3] Prabu, S. Senthur, Prathiba, S., Asokan, M.A., Jain, Anshul, Jain, Neeraj Kumar, and Chourasiya, Pratyush Kumar. Investigations on dry sliding wear behaviour of sintered/extruded p/m alloy steels (fe-c-w-ti). *Procedia Engineering*, 97:2119 – 2126, 2014. 12th Global Congress on Manufacturing and Management GCMM - 2014.
- [4] Ceschini, Lorella, Palombarini, Giuseppe, Sambogna, Giuliano, Firrao, Donato, Scavino, Giorgio, and Ubertalli, Graziano. Friction and wear behaviour of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests. *Tribology International*, 39(8):748 – 755, 2006. 4th AIMETA International Tribology Conference.
- [5] Flodin, Anders and Hirsch, Michael. Wear investigation of finish rolled powder metal gears. in *4th International Conference on Powder Metallurgy in Asia (APMA)*, 2017.
- [6] Abdoos, H, Shahani, A R, and Khorsand, H. Cyclic behaviour of distaloy ae powder metallurgy steel with superimposed tensile mean stress. *Powder Metallurgy*, 54(3):263-268, 2011.
- [7] Dhanasekaran, S. and Gnanamoorthy, R. Dry sliding friction and wear characteristics of fe-c-cu alloy containing molybdenum di sulphide. *Materials & Design*, 28(4):1135 – 1141, 2007.
- [8] Li, Xinmin and Olofsson, Ulf. A study on friction and wear reduction due to porosity in powder metallurgic gear materials. *Tribology International*, 110:86 – 95, 2017.
- [9] Martin, F., García, C., and Blanco, Y. Influence of residual porosity on the dry and lubricated sliding wear of a powder metallurgy austenitic stainless steel. *Wear*, 328-329:1 – 7, 2015.
- [10] Grimanelis, D. and Eyre, T.S. Wear characteristics of a diffusion bonded sintered steel with short term surface treatments. *Wear*, 262(1):93 – 103, 2007.
- [11] Wang, Jun-an and Danninger, Herbert. Factors influencing the wear behavior of sintered steels. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 5(3):241-246, Sep 2001.
- [12] Simchi, A. and Danninger, H. Effects of porosity on delamination wear behaviour of sintered plain iron. *Powder Metallurgy*, 47(1):73-80, 2004.
- [13] Wang, Jun'an and Danninger, Herbert. Dry sliding wear behavior of molybdenum alloyed sintered steels. *Wear*, 222(1):49 – 56, 1998.