

بررسی پارامترهای ساخت و خواص تریبولوژیکی مواد اصطکاکی سینتر شده زمین آهنی

مظفر رحیمی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

حمید رضا قاسمی منفرد راد

دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

رضا محمودی

استاد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

محمد قمبری

استادیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۷/۱۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۳/۲۴، تاریخ تصویب ۸۴/۶/۲۶)

چکیده

در این تحقیق رفتار تریبولوژیکی مواد اصطکاکی سینتر شده زمین آهنی با استفاده از آزمایش سایش پین روی دیسک مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها با ترکیبهای مختلف تهیه شده و پس از متراکم سازی در سه سیکل مختلف تحت اتمسفر کنترل شده سینتر شده‌اند. مقادیر ضریب اصطکاک، میزان سایش نمونه‌ها و دیسکهای چدنی در بارها و سرعتهای مختلف اندازه‌گیری گردید. مورفولوژی سطوح ساییده شده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که نمونه‌های پودرهای تهیه شده با آسیاب گلوله‌ای و نیز نمونه‌های پودرهای درشت آهن استحکام کافی نداشته و بدلیل انبساط زیاد، در حین سینترینگ یا پس از آن متلاشی می‌شوند. در مورد نمونه‌های دیگر نیز مشخص گردید که ضریب اصطکاک و میزان سایش پین و دیسک به شدت به رفتار سطوح تماس بستگی دارد. در این نمونه‌ها با افزایش بار و سرعت لغزش، ضریب اصطکاک و میزان سایش دیسک کاهش می‌یابد. مواد اصطکاکی زمین آهنی با ترکیب FM-1 رفتار اصطکاکی بهتر و پایداری در شرایط سخت سایشی از خود نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: مواد اصطکاکی، سایش، ضریب اصطکاک، زبری سطح

مقدمه

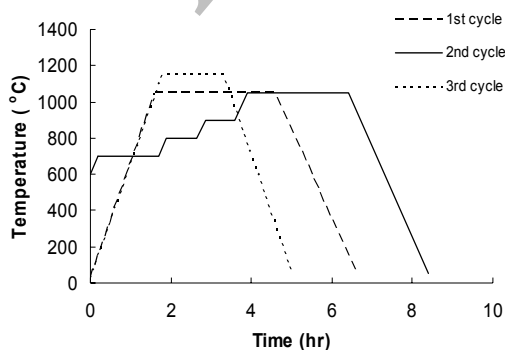
می‌شود، در اجزاء ترمز برای کاربردهای خاص مورد استفاده واقع می‌شوند [۴،۳]. مواد اصطکاکی زمین آهنی در این میان به دلیل خواصی چون سختی، استحکام، مقاومت گرمائی و انعطاف پذیری مناسب، زمینه‌ای با نطقه ذوب بالا و هزینه پائین مواد اولیه نسبت به مواد زمینه مسی، کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند [۵]. مواد زمینه آهنی دمای کاری ۹۰۰°C و در برخی موارد تا ۱۱۰۰°C را تحمل می‌کنند و لذا دچار مجموعه‌ای از دگرگونی‌های فیزیکی - شیمیایی و فیزیکی- مکانیکی حاصل از تغییرشکل‌ها، دگرگونی‌های فازی و نفوذ در خود تک تک فازهای موجود در ترکیب شده و با تشکیل فیلم‌های سطحی با ترکیب‌های شیمیایی بسیار پیچیده، در هنگام ترمزگیری از وارد آمدن ضربه ناگهانی به سطح لنت

مواد پایه آزبستی مدت‌ها به عنوان مواد اصطکاکی در اجزاء بکار رفته در کلاچ و ترمز اتومبیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت. این مواد به دلیل خطرات زیست محیطی و از دست دادن خواص اصطکاکی خود بخصوص در شرایط کاری سخت، کارائی خود را به تدریج از دست می‌دهند. بنابراین برای کاربردهای خاص ماده‌ای با رسانائی و مقاومت گرمائی بالا مورد نیاز است.

مواد اصطکاکی سینتر شده زمین فلزی به دلیل رسانائی و مقاومت گرمایی بالا، خواص تریبولوژیکی خوب و قابلیت کاربرد در شرایط خاص، در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده‌اند [۲،۱]. این مواد که اغلب زمینه آن‌ها را آهن یا مس تشکیل می‌دهد و برخی روانکارها و ذرات ساینده برای اصلاح خواص اصطکاکی به آن‌ها افزوده

شدند. نمونه‌ها پس از اندازه‌گیری چگالی خام تحت عملیات سینتر قرار گرفتند. سینترینگ نمونه‌ها در کوره لوله‌ای و تحت اتمسفر محافظ گاز آرگون خالص در ۳ سیکل مختلف از نظر دما و زمان سینترینگ انجام شد. سیکل‌های سینترینگ در شکل (۱) آورده شده‌اند. در سیکل اول، پس از قرار گرفتن نمونه‌ها در کوره و رسیدن دمای کوره به 1050°C ، نمونه‌ها به مدت سه ساعت در این دما نگاه داشته شدند. پس از رسیدن دمای کوره به دمای محیط، نمونه‌ها از کوره خارج گردیدند. در سیکل دوم، کوره در دمای 600°C شارژ گردید. نمونه‌ها به مدت یک ساعت و ۳۰ دقیقه در دمای 800°C و برای مدت ۴۵ دقیقه در دمای 900°C و سپس به مدت دو ساعت و ۳۰ دقیقه در دمای 1050°C نگاه داشته شدند و سپس با رسیدن دمای کوره به دمای محیط، از کوره خارج گردیدند. در روش سوم، پس از شارژ کوره، دمای کوره در 1150°C به مدت ۹۰ دقیقه ثابت نگاه داشته شد و سپس با سرد شدن کوره، نمونه‌ها در دمای محیط از کوره خارج گردیدند.

چگالی پس از سینتر نمونه‌ها جهت بررسی تغییرات حاصله در اثر سینترینگ اندازه‌گیری شد. قبل از شروع آزمایش‌های سایش، سطح تمام نمونه‌ها برای داشتن زبری یکسان، سنباده‌زنی گردید. آزمایش سایش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پین روی دیسک در سرعت‌ها و بارهای مختلف برای مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر بر روی دیسک در حال چرخش از جنس چدن خاکستری و با زبری سطحی مشابه نمونه‌های استاندارد انجام گرفت. نرخ سایش هر یک از نمونه‌ها و نیز دیسک‌ها با اندازه‌گیری وزن آن‌ها، قبل و بعد از هر آزمایش با ترازوی به دقت 0.0001 گرم محاسبه گردید.



شکل ۱: سیکل‌های سینترینگ مواد اصطکاکی.

جلوگیری می‌کنند [۶،۵].

تولید مواد اصطکاکی پایه آهنی بسیار پیچیده بوده و در حین فرآوری برخی فرآیندهای نفوذی و واکنش‌های شیمیایی در مرحله سینترینگ رخ می‌دهد که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص نهایی دارند. در طول مدت سینترینگ فاز مایع، بر اثر تغییرات ریزساختاری و تغییرات در میزان تخلخل‌ها، میزان چگالی و اندازه دانه‌ها، خواص تریبولوژیکی حاصله تغییر می‌کند [۶].

در گسترش این مواد سه مشکل عمده وجود دارد که عبارتند از نحوه انتخاب مواد اولیه، نوع واکنش‌های موجود بین اجزاء تشکیل دهنده هنگام سینترینگ و نحوه بهینه کردن فرمولاسیون ماده [۷]. انتخاب اجزاء ترکیب، اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، میزان فشار تراکم، دما و زمان سینترینگ در فرآوری و خواص نهایی از عوامل مهم و تأثیرگذار می‌باشد. فرایندهای ساخت و نوع مواد مورد استفاده در ساخت مواد اصطکاکی در تحقیقات قبلی مورد بررسی قرار گرفته است [۴،۳،۱]. در این تحقیق تأثیر برخی فرایندهای ساخت بر خواص تریبولوژیکی مواد اصطکاکی زمینه آهنی مورد بررسی واقع شده است.

روش انجام آزمایش

مراحل آزمایش به ترتیب شامل مراحل آماده سازی مواد خام، مخلوط سازی، متراکم سازی، سینترینگ، سنباده‌زنی، آزمایش‌های تریبولوژیکی و در نهایت بررسی سطوح سایش می‌باشد.

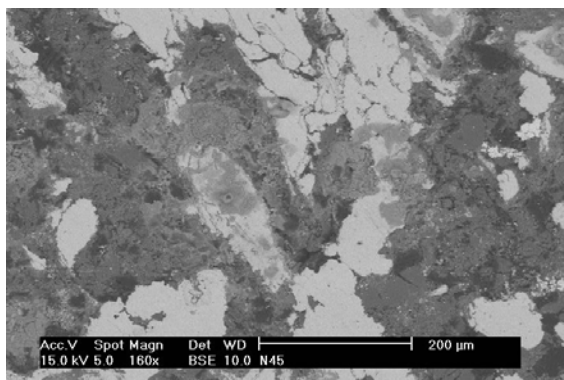
پودرهای تجاری آهن با اندازه‌های مختلف به عنوان زمینه ماده اصطکاکی سینتر شونده و پودر قلع بسیار ریز به عنوان عامل سینترینگ فاز مایع مورد استفاده قرار گرفت. کاربرد سیلیسیم برای بهینه کردن رفتار اصطکاکی و گرافیت نیز به عنوان روانکار داخلی انتخاب گردید. ۳ نوع ترکیب شیمیایی مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است.

همگن سازی پودرها با استفاده از مخلوط کن و به مدت ۵ ساعت صورت گرفت. علاوه بر این پودرهای ترکیب FM-1 نشان داده شده در جدول (۱) برای بررسی مورفولوژی و اثر اندازه دانه به مدت ۸ ساعت تحت آسیاب گلوله‌ای قرار گرفت. جهت فشردن پودرهای مخلوط شده، از پرس هیدرولیک استفاده گردید و نمونه‌ها تحت بارهای ۵ تا ۲۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع متراکم

جدول ۱: ترکیبهای مختلف مواد اصطکاکی پایه آهنی ساخته شده به روش متالورژی پودر.

ترکیب	Cu	Fe	Sn	Pb	G	BaSO ₄	Al ₂ O ₃	SiC
FM-1	۱-۵	بقیه	-	-	۲-۶	۱۰-۱۵	-	-
FM-2	۵-۱۰	بقیه	-	-	۲-۶	۱۰-۱۵	۲-۶	-
FM-3	۱-۵	بقیه	۱-۵	۲-۶	۲-۶	-	-	۵-۱۰

شکل (۳) نیز که ساختار ترکیب FM-2 را نشان می‌دهد، نقاط خاکستری رنگ در این تصویر مربوط به Al₂O₃ می‌باشد که در حین سینترینگ تغییری در آن رخ نمی‌دهد.



شکل ۳: ریز ساختار میکروسکوپ الکترونی ترکیب FM-2.

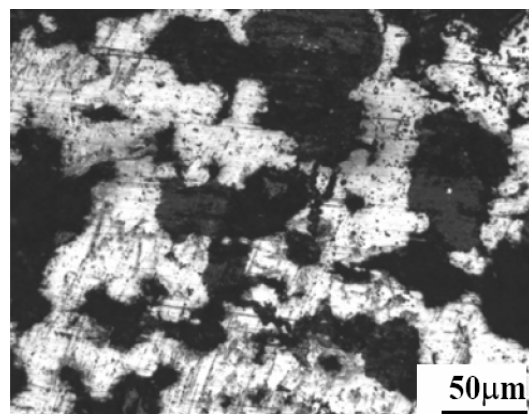
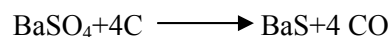
لازم به ذکر است نمونه‌های ساخته شده از پودرهای آسیاب گلوله‌ای شده و برخی نمونه‌های ترکیب (FM-3) پس از سینترینگ متلاشی گردیدند. علت این امر انرژی کرنشی بالای ذرات و اکتیویتهٔ بیش از حد پودرهای آسیاب گلوله‌ای شده و لذا از هم گسیختگی آنان قبل از رسیدن به دمای بالا و شروع سینترینگ می‌باشد. در دمای پائین، ذرات با آزاد کردن انرژی داخلی خود برای رسیدن به سطح انرژی پائین‌تر، ترک خورده، از هم گسیخته می‌شوند. در نمونه‌های FM-3 علت متلاشی شدن وجود قلع در این ترکیب است. قلع در دماهای پائین‌تر ذوب شده و در مرزهای آهن نفوذ می‌کند. با بالا رفتن دما و به دلیل وجود اکسیژن در اتمسفر، ذرات قلع بخار شده و از مرزها خارج می‌شوند. در اینجا ذرات آهن از هم جدا شده و در دمای بالا نفوذ بین آن‌ها به کندی صورت گرفته و لذا به دلیل عدم اتصال کافی بین ذرات گسیختگی برخی نمونه‌ها صورت گرفته است.

همچنین برای بررسی تغییرات زبری سطوح، زبری نمونه‌های مختلف قبل و بعد از آزمایش‌های سایش توسط دستگاه Hommelwerke T-8000 اندازه‌گیری گردید. سپس سطوح سائیده شده، جهت بررسی مکانیزم سایش و آنالیز لایه‌های تشکیل شده با استفاده از SEM مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

بررسی‌های ریز ساختاری

شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب ریز ساختار میکروسکوپی نمونه‌های ساخته شده از ترکیب‌های FM-2 و FM-1 پس از سینترینگ را نشان می‌دهد. زمینهٔ روشن در شکل (۲) مربوط به آهن می‌باشد. با توجه به دیاگرام فازی آهن-مس می‌توان گفت که در دمای بالا (۱۰۵۰°C) مس در آهن حل شده و سپس با سرد شدن نمونه‌ها تا دمای محیط، ذرات مس در زمینه باز پس زده می‌شوند و در زمینه بصورت فاز مسی باقی می‌مانند. فاز تیره‌تر در این شکل مربوط به BaS می‌باشد. مقداری از گرافیت موجود در ترکیب طبق واکنش زیر اکسید شده و BaS به جای می‌ماند.



شکل ۲: ریز ساختار میکروسکوپ الکترونی ترکیب FM-1.

جدول ۲: مقایسه چگالی خام و پس از سینتر در فشارهای مختلف متراکم سازی.

FM-3	FM-2	FM-1	شرایط	فشار تراکم (kg/cm ²)
۴/۱	۴/۳	۴/۹۸	خام	۵
۳/۱۲	۳/۸۳	۴/۴۶	سینتر شده	
۴/۳۶	۴/۶۵	۵/۲	خام	۱۰
۳/۴	۳/۸۸	۴/۶	سینتر شده	
۴/۴۶	۴/۹۳	۵/۷	خام	۱۵
۳/۷۴	۴/۲۶	۵/۰۴	سینتر شده	
۴/۴۹	۵/۱۴	۵/۹۲	خام	۲۰
۳/۹۸	۴/۳۸	۵/۰۶	سینتر شده	

برد می‌تواند تشکیل شده از اکسید آهن و گرافیت و در بعضی از نمونه‌ها با مقادیری از SiC و Al₂O₃ همراه باشد. با افزایش سرعت لغزش، به نظر می‌رسد نرخ برداشت مواد در اثر سایش بیشتر از نرخ تشکیل آن بوده و بنابراین نرخ سایش افزایش یافته است. در صورتی که نرخ ایجاد این لایه از نرخ برداشت لایه در اثر سایش بیشتر باشد، لایه اصطکاکی به عنوان محافظ عمل کرده و این می‌تواند کاهش نرخ سایش را به همراه داشته باشد.

شکل‌های (۶) و (۷) لایه‌های تشکیل شده را برای دو نمونه FM-1 و FM-2 نشان می‌دهد. با تشکیل چنین لایه‌ای به دلیل قطع تماس فلز با فلز نرخ سایش دیسک چدنی نیز به عنوان عضو سایشی مقابل کاهش نشان می‌دهد. آنالیز لایه تشکیل شده در شکل (۶) با استفاده از آنالیز EDS، نشان داد که ترکیبی شامل اکسید آهن و BaS و اکسید مس در این لایه حضور دارند. در شکل (۷) علاوه بر موارد نامبرده، آلومینا نیز در ترکیب حضور دارد.

ضریب اصطکاک نمونه‌ها

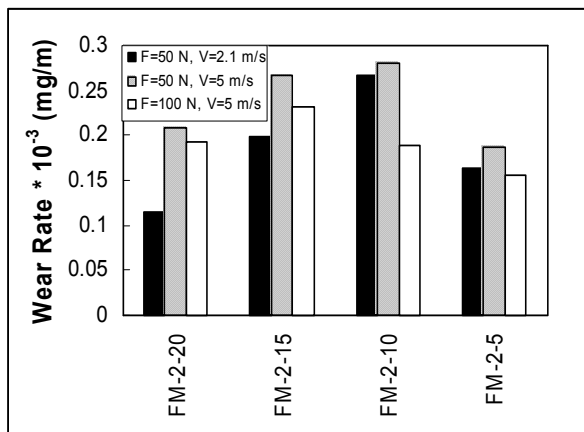
شکل‌های (۸) و (۹) ضریب اصطکاک نمونه‌های FM-1 و FM-2 را با افزایش سرعت در بار ثابت نشان می‌دهد. با افزایش سرعت در بار ثابت ۵۰ نیوتن، در هر دو ترکیب ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. علت این امر کاهش

بررسی تغییرات چگالی نمونه‌ها پس از سینترینگ

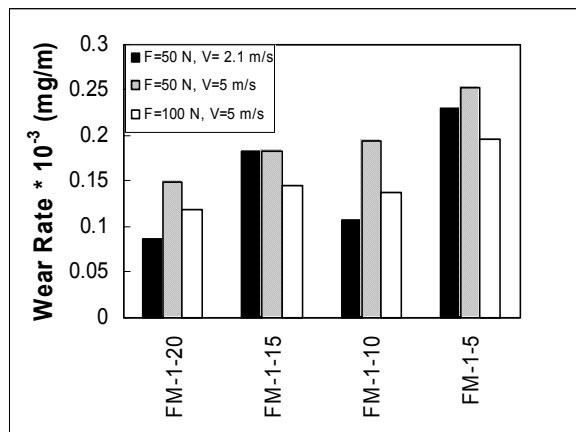
جدول (۲)، چگالی خام و پس از سینتر نمونه‌ها را بر حسب فشار تراکم نشان می‌دهد. با افزایش فشار تراکم، چگالی خام و پس از سینتر نمونه افزایش دارند. اما، چگالی پس از سینتر نمونه‌ها نسبت به چگالی خام مقدار کمتری را نشان می‌دهد. علت این امر حضور مس در ترکیب نمونه‌ها و انبساط بر اثر نفوذ مس در مرز آهن است. با سرد شدن نمونه‌ها تا دمای اتاق، مس از مرزها بیرون زده شده و لذا حجم نمونه افزایش می‌یابد. از طرف دیگر به دلیل سوختن کربن و افزایش تخلخل مقداری از وزن نمونه‌ها کاسته شده و لذا چگالی کاهش یافته است.

نتایج تست‌های سایش

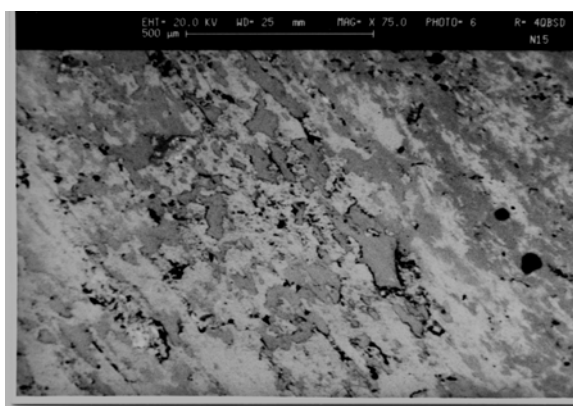
شکل‌های (۴) و (۵)، نرخ سایش نمونه‌ها را در شرایط مختلف سایش نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها با افزایش سرعت لغزش سایش در بار ثابت افزایش و با افزایش نیرو کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت لغزش و یا بار اعمالی، دمای سطح تماس و بنابراین نرخ تشکیل لایه‌های سطحی می‌تواند افزایش یابد. این لایه‌های سطحی که از آن می‌توان به عنوان لایه‌های اصطکاکی نام



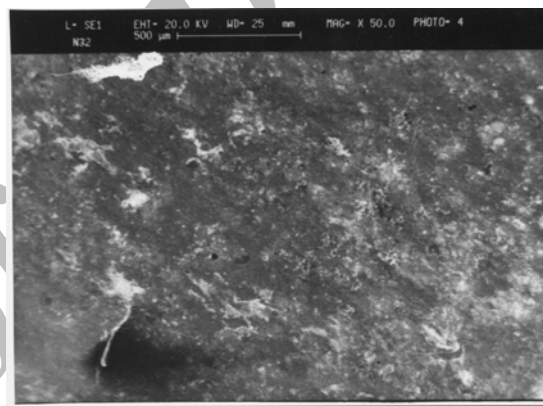
شکل ۵: میزان نرخ سایش در نمونه های ترکیب FM-2 در شرایط مختلف سایشی.



شکل ۴: میزان نرخ سایش در نمونه های ترکیب FM-1 در شرایط مختلف سایشی.



شکل ۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده در نمونه FM-2.



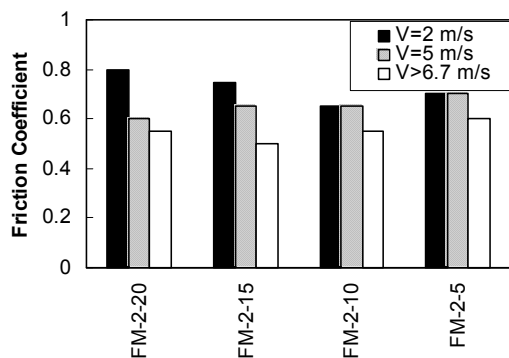
شکل ۶: تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح ساییده شده در نمونه FM-1.

ملاحظه می‌گردد بر اثر سایش در شرایط $F=100\text{ N}$ و $V=5\text{ m/s}$ ، زبری سطحی کاهش یافته است. قله‌ها موجود در سطح اولیه در اثر سایش کوتاه و پهن گردیده است. بدلیل وجود قله‌های تیز نشان داده شده در پروفیل زبری شکل (۱۲ - الف) (قبل از سایش)، تنش بالایی بر روی قله‌ها اعمال می‌گردد. این تنش‌ها بدلیل وجود قله‌های پهن تر در حین لغزش منجر به تنش‌های به مراتب کمتر می‌گردد. این می‌تواند سایش و اصطکاک پایداری را در حین لغزش، که می‌بایست در رفتار تریبولوژیکی مواد اصطکاکی وجود داشته باشد، ایجاد کند. R_a ، میانگین صافی سطح که عبارتست از میانگین حسابی قله‌ها و دره‌های سطح در کل فاصله اندازه‌گیری شده، در نمونه FM-1 از $1/8\ \mu\text{m}$ به $1/10\ \mu\text{m}$ و در نمونه FM-2 از $3/1\ \mu\text{m}$ به $0/5\ \mu\text{m}$ کاهش نشان داده است.

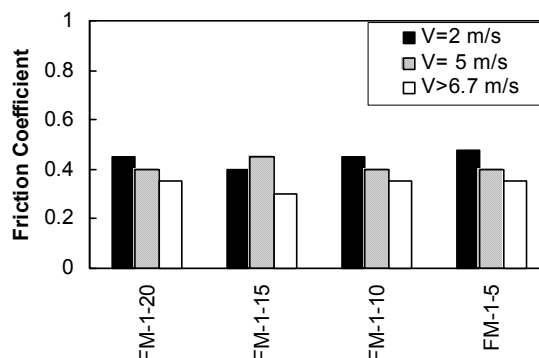
تماس فلز با فلز در اثر تشکیل لایه اصطکاکی می‌باشد. در ترکیب FM-2 به دلیل حضور Al_2O_3 به عنوان عضو ساییده که می‌تواند تأثیر مکانیزم خراشندگی را افزایش دهد، ضریب اصطکاک بالاتری را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، تغییرات ضریب اصطکاک با زمان سایش (مسافت لغزش) در بارهای متفاوت برای دو ترکیب FM-1 و FM-2 رسم شده است. ملاحظه می‌گردد که در هر دو ترکیب با افزایش زمان لغزش ضریب اصطکاک افزایش یافته است و سپس با تشکیل لایه محافظ اصطکاکی، ضریب اصطکاک ثابت باقی می‌ماند. افزایش ضریب اصطکاک می‌تواند به دلیل تاثیرات تنش‌های اصطکاکی که باعث افزایش سطح واقعی تماس در مراحل اولیه سایش می‌گردد، باشد [۸].

بررسی تغییرات زبری سطحی بر اثر سایش

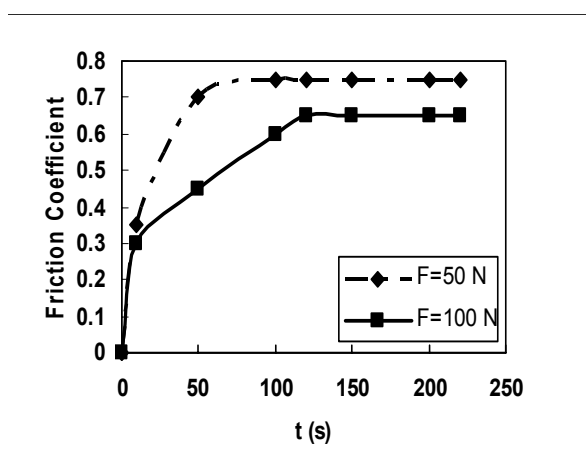
شکل (۱۲)، پروفیل زبری سطحی یک نمونه پایه آهنی را قبل و بعد از تست سایش نشان می‌دهد.



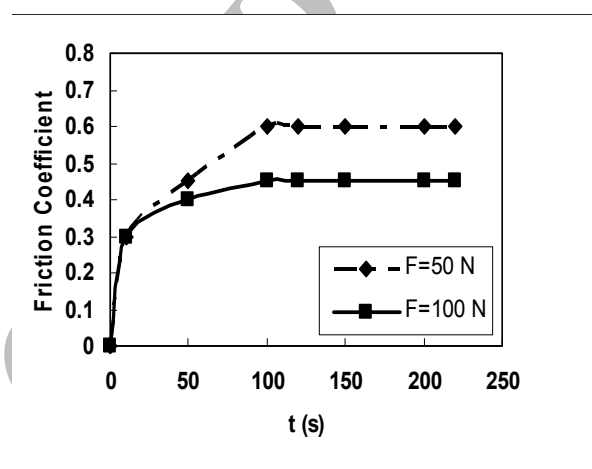
شکل ۹: تغییرات ضریب اصطکاک نمونه های ترکیب FM-2 با تغییر سرعت لغزش در $F=50\text{ N}$



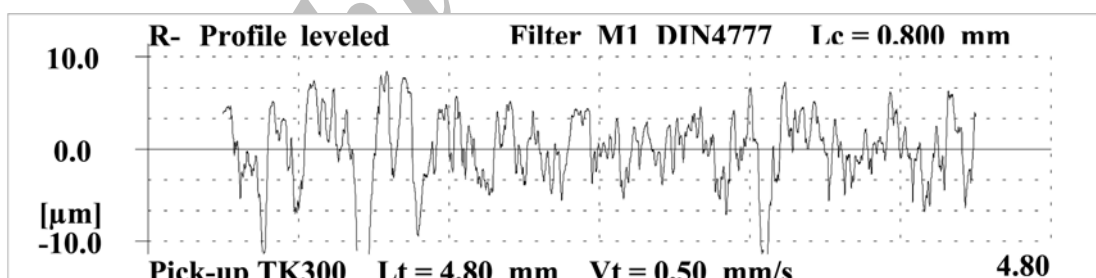
شکل ۸: تغییرات ضریب اصطکاک نمونه های ترکیب FM-1 با تغییر سرعت لغزش در $F=50\text{ N}$



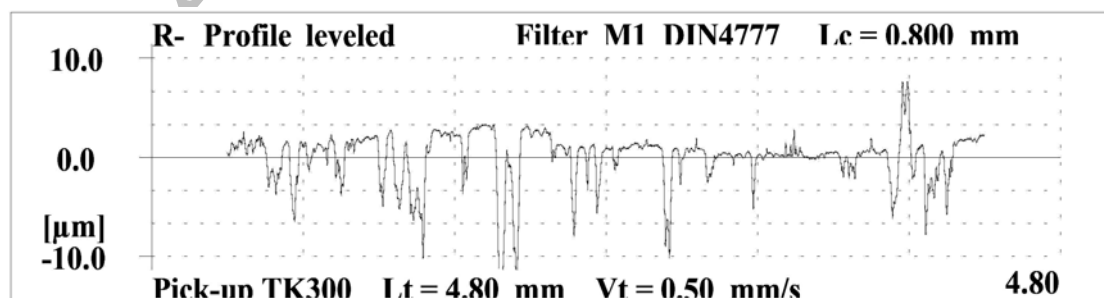
شکل ۱۱: تغییرات ضریب اصطکاک نمونه های ترکیب FM-2 با تغییر بار اعمالی در $V=2\text{ m/s}$



شکل ۱۰: تغییرات ضریب اصطکاک نمونه های ترکیب FM-1 با تغییر بار اعمالی در $V=2\text{ m/s}$



الف



ب

شکل ۱۲: پروفیل زبری سطحی نمونه FM-1 قبل از تست سایش (شکل الف) و بعد از تست سایش (شکل ب) در شرایط $F=100\text{ N}$ و $V=5\text{ m/s}$

نتیجه گیری

۶- مواد اصطکاکی زمینه آهنی برای کار برد در شرایط سخت سایشی رفتار مناسبی از خود نشان می دهد.

۱- کاهش بیش از حد اندازه ذرات در آسیاب گلوله‌ای، باعث افزایش انرژی درونی پودرها و در نتیجه از هم گسیختگی آن‌ها در حین فرآیند سینترینگ و قبل از شروع آن می باشد.

۲- افزایش فشار تراکم باعث افزایش چگالی و سختی نمونه‌ها و در نتیجه کاهش نرخ سایش می گردد.

۳- سیکل‌های مختلف سینترینگ انجام شده روی نمونه‌ها، باعث تأثیر خاصی بر ریز ساختار نهائی آن‌ها نمی گردد.

۴- نرخ سایش نمونه‌های پایه آهنی، در سرعت لغزش و بار اعمالی بالا، نسبت به سرعت و بار اعمالی کم، کاهش نشان می دهد. علت این امر تشکیل لایه محافظ اصطکاکی در نمونه‌ها می باشد.

۵- ضریب اصطکاک نمونه‌ها، با افزایش بار و سرعت سایش کاهش می یابد.

فهرست علائم

FM-1: کد شناسایی ماده اصطکاکی ۱ با ترکیب ذکر شده

در جدول ۱.

FM-2: کد شناسایی ماده اصطکاکی ۲ با ترکیب ذکر شده

در جدول ۱.

FM-3: کد شناسایی ماده اصطکاکی ۳ با ترکیب ذکر شده

در جدول ۱.

SEM: میکروسکوپ الکترونی روبشی

EDS: آنالیز شیمیایی به روش اسپکترومتری پراکندگی

انرژی

R_a : میانگین زبری سطحی

مراجع

- 1 - Ozsever, S. (1988). *Powder Metallurgy*. in Metals Handbook, ASM, 9th Ed., Vol. 7, PP. 701-703.
- 2 - Krishnadas, C. G., Dutta, D. and Mohan, G. (1993). "Development of metal/ceramic friction materials for aircraft brake." *Proceeding of Int. Conference on Advanced Composite Materials*, Wollongong, Aust., PP. 61-67.
- 3 - Ho, S., Ho, K., Wu, K. and Lin, Ch. (1991). "Friction properties of copper-based and iron-based friction materials." *Advances in Powder Metallurgy*, Vol. 5, PP. 229.
- 4 - Derkachera, G. M. and Panaiti, I. I. (1990). "Friction powder materials (review)." *Soviet Powder Metallurgy and Ceramics*, Vol. 28, No. 12, PP. 968.
- 5 - Talijan, N. M., Trifunovic, D. S. and Trifunovic, D. D. (2000). "The Influence of different iron powders on the friction properties of sintered friction materials based on iron." *Materials Letters*, Vol. 46, PP. 255-260.
- 6 - Huanser, H. H., Roll, K. H. and Johnson, P. K. (1970). "Friction & antifricion material." *Perspective in Powder Metallurgy*, Vol. 4, Plenum Press, New York.
- 7 - Lu, Y. (2003). "A golden section approach to optimization of automotive friction materials." *Journal of Materials Science*, Vol. 38, PP. 1081-1085.
- 8 - Hutchings, M. (1992). *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*. Edward Arnold, London, PP. 30-33.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Hommelwerke T-8000