

نقش افزودنی‌های پودری بر رفتار تریبولوژیک کامپوزیت‌های پلیمری بر پایه رزین فنولیک

مهدی پاکروان^۱ و سیدرضا غفاریان^۲

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

این مقاله به بررسی نقش افزودنی‌های پودری شامل روانسازهای جامد (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید)، پلی تترافلورو اتیلن و فیلر سرامیکی SiC بر رفتار تریبولوژیک یک پلیمر ویژه، رزین فنولیک، می‌پردازد. نمونه‌هایی از جنس کامپوزیت‌های پلیمری با استفاده از روش قالب گیری فشاری گرم ساخته شده و مشخصات سایشی و اصطکاکی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از یک دستگاه تریبومتر پین روی دیسک تحت شرایط لغزش خشک و دمای محیط استفاده شده و مقادیر ضریب اصطکاک و میزان سایش نمونه‌ها تعیین گردید. یک پین از جنس فولاد سخت AISI 52100 به عنوان سطح مقابل انتخاب شد. آزمایش‌های متعددی با تغییر در نوع و کسر وزنی فیلر به کار رفته در ساخت نمونه کامپوزیتی انجام گرفت. درصد‌های وزنی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ برای روان‌سازهای جامد (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید)، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ در مورد پلی تترافلورو اتیلن و ۵ و ۱۰ برای فیلرهای سرامیکی SiC به کار گرفته شد. در مورد SiC تأثیر اندازه ذرات نیز مورد مطالعه قرار گرفت که بدین منظور دو نوع فیلر با اندازه‌های ۵ و ۳۸ میکرومتر انتخاب گردید. نتایج نشان می‌دهد افزودن فیلرهای با ساختار لایه ای (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید) موجب کاهش میزان اصطکاک و افزایش مقدار سایش می‌گردد. در حالی که پودر پلیمر پلی تترافلورو اتیلن (PTFE) از طریق کاهش میزان سایش و ضریب اصطکاک هر دو ویژگی تریبولوژیک را بهبود می‌بخشد. فیلر سرامیکی سیلیکون کارباید، رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. در این مورد اندازه ذرات فیلر نقش مؤثری بر رفتار سایشی دارند، به گونه‌ای که ذرات درشت تر ($38 \mu\text{m}$) محافظت بهتری از ماتریس پلیمری در برابر فرایند سایش به عمل آورده و میزان سایش را کاهش می‌دهند، در حالی که ذرات ریزتر ($5 \mu\text{m}$) باعث افزایش جزئی در مقدار سایش می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: تریبولوژی، رزین فنولیک، گرافیت، مولیبدن دی سولفاید، پلی تترافلورو اتیلن، سیلیکون کارباید.

Role of particulate fillers in the modification of the tribological behavior of polymer composites in dry sliding

M. Pakravan and R. Ghaffarian

1. Department of Chemistry, Isfahan University of Technology

Department of polymer engineering Amirkabir University of Technology

Abstract: This paper discusses the role of fillers including solid lubricants (graphite and molybdenum disulfide), polytetrafluoroethylene and silicon carbide on the tribological behavior of a specific polymer, Phenolic Resin. Polymeric composite material samples are manufactured by compression molding and are evaluated for their friction and wear properties. Using a pin-on-disc apparatus, dry sliding wear behavior under ambient conditions was studied which measured friction coefficient of samples. The counterface was made from hardened steel, AISI 52100. A number of experiments were performed using different filler types and weight percents including: graphite and molybdenum disulfide (10, 15 and 20%), polytetrafluoroethylene (5, 10, 15 and 20%) and Silicon Carbide (5 and 10%). In silicon carbide case, two different particle sizes ($5, 38 \mu\text{m}$) were tested as well. Results showed that addition of fillers with layer structure (graphite and MoS_2) decrease the friction coefficient and wear resistance but PTFE powder improves both tribological behaviors. Ceramic filler of SiC exhibited different effect. In this case particle size affects the wear property. Large particles (of about $38 \mu\text{m}$) found to protect the polymer matrix better than small particles (of about $5 \mu\text{m}$), which partially increase the wear rate.

Keywords: Tribology, Polymer, Particulate Filler, Composite, Phenolic Resin

E-mail of corresponding author (s): mpakravan@cc.iut.ac.ir

مقدمه

اکسیدهای فلزی نیز نقش ویژه‌ای در کاهش نرخ سایش پلیمرها از خود نشان داده اند [۹-۱۲]. طی سال‌های اخیر پژوهش‌گران مختلف، بسیاری از انواع فیلرهای معدنی را به عنوان ماده افزودنی به پلیمرها اضافه کرده و رفتار سایشی و اصطکاکی آنها را مورد مطالعه قرار داده اند، نتایج به دست آمده در بعضی موارد غیر معمول و متناقض بوده است، تعدادی از ترکیبات باعث افزایش مقاومت سایشی شده در حالی که تعدادی دیگر مقدار سایش را افزایش داده‌اند. ورت و همکاران^۱ نشان دادند که CuO و PTFE باعث کاهش میزان سایش ماتریس پلی اتراکتون (PEEK) می‌شود [۹]، بهادر و همکاران^۲ نیز طی یک سری مطالعه دریافتند مقدار سایش با افزودن CuS و CuF_2 به PEEK [۱۳]، CuS به نایلون ۱۱ [۱۴] و CuO و CuS به پلی فنیلن سولفاید (PPS) [۱۵] کاهش می‌یابد. نتایج کارهای یو و همکاران^۳ [۱۱] در افزودن Ag_2S و NiS به PPS و بهادر و همکاران [۱۵] در افزودن CaF_2 و ZnF_2 به PPS کلاً در تضاد با یافته‌های فوق است.

با توجه به این موارد، هم‌چنان مکانیزم واقعی فیلرها در تغییر خواص سایشی و اصطکاکی پلیمرها، درصد مناسب و بهینه افزودن فیلر برای دستیابی به بالاترین ترکیب خواص مکانیکی و تریبولوژیک و به ویژه نوع فیلر مناسب جهت دستیابی به خواص مورد نظر برای ماتریس خاص به خوبی شناخته شده نیست [۱۶ و ۱۳ و ۱۲]. بررسی نقش عملکرد فیلرهای مختلف در خواص سایشی پلیمرها از مواردی است که توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده و نظریات مختلفی در این رابطه پیشنهاد شده است. تاناکا^۴ طی یک مقاله جامع، توضیح داد که نرخ سایش PTFE در اثر افزودن فیلر، به علت جلوگیری از تخریب ساختار پیوسته PTFE کاهش پیدا می‌کند [۱۷].

به دنبال توسعه فن‌آوری، صنایع مختلف در جستجوی موادی سبک‌تر، با استحکام بیشتر، با امکان تولید سریع و ایمن جهت برآورده کردن نیازهای خود در طراحی سازه‌ها و مکانیزم‌های مختلف با مزیت اقتصادی مناسب هستند. در این میان، در دنیای پیشرفته کنونی نمی‌توان از مواد پلیمری چشم‌پوشی کرد. با این وجود پلیمرهای خالص به دلیل استحکام و سفتی پایین جهت قطعات سازه‌ای مناسب نمی‌باشند. به منظور افزایش دامنه کاربرد مواد پلیمری، کامپوزیت‌های بر پایه این مواد از طریق افزودن مواد تقویت‌کننده مختلف به آنها رشد و توسعه یافته‌اند [۱]. به گونه‌ای که هم‌اکنون مواد کامپوزیتی پلیمری به دلیل مجموعه‌ای از خواص مختلف مانند خودروان‌سازی، مقاومت در برابر خوردگی و ضربه، چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، عملکرد بدون سر و صدا به علت جذب ارتعاشات و صدا، فرایند آسان، سرعت تولید بالا و قیمت پایین، در کاربردهای گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که در بسیاری از موارد توسط فلزات، سرامیک‌ها و پلیمرهای خالص به تنهایی قابل انجام نیست [۲-۴]. بهبود رفتار سایشی و اصطکاکی مواد پلیمری از طریق وارد ساختن ترکیبات مختلف به صورت ذرات پودری به ترکیب مواد پلیمری منجر به نتایج قابل توجه و امیدوارکننده‌ای شده است [۵ و ۶]، به گونه‌ای که امروزه آنها را به عنوان جایگزین بسیاری از مواد فلزی سنتی در قطعات و اجزای لغزشی به کار می‌برند [۷ و ۸]. بدین منظور بسیاری از فیلرها مانند پودرهای فلزی، ترکیبات معدنی، روان‌سازهای جامد و نمک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پودرهای فلزی معمولاً برای بهبود خواص الکتریکی، حرارتی و تریبولوژیکی پلیمرها به کار می‌روند. توانایی فیلرهای معدنی نیز برای افزایش خواصی مانند سفتی، سختی، مقاومت گرمایی، انبساط حرارتی، رفتار الکتریکی، چگالی، رنگ و در بعضی موارد رفتار تریبولوژیک به اثبات رسیده است، هم‌چنین

1- Voort et al

2- Bahadur et al

3- Yu et al

4- Tanaka

پودری به کار رفته شامل گرافیت و مولیبدن دی سولفاید، با توجه به ساختار لایه ای شناخته شده آنها، پو پلی تترافلورواتیلن (PTFE) به عنوان پلیمری با ویژگی های خود روان کنندگی و اصطکاکی مناسب و فیلر سرامیکی سیلیکون کار باید با مشخصات سایشی خوب، با دو اندازه ذرات مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی های انجام شده نشان می دهد که تا کنون گزارش علمی منتشر شده ای در زمینه استفاده از این فیلرها در مورد رزین فنولیک ارائه نگردیده است. در این راستا کامپوزیت های متعددی با درصدهای مختلف از فیلرهای فوق ساخته شده و نقش نوع و درصد هر یک از آنها بر رفتار تریبولوژیک نمونه مطالعه شد.

روش تحقیق

مواد اولیه

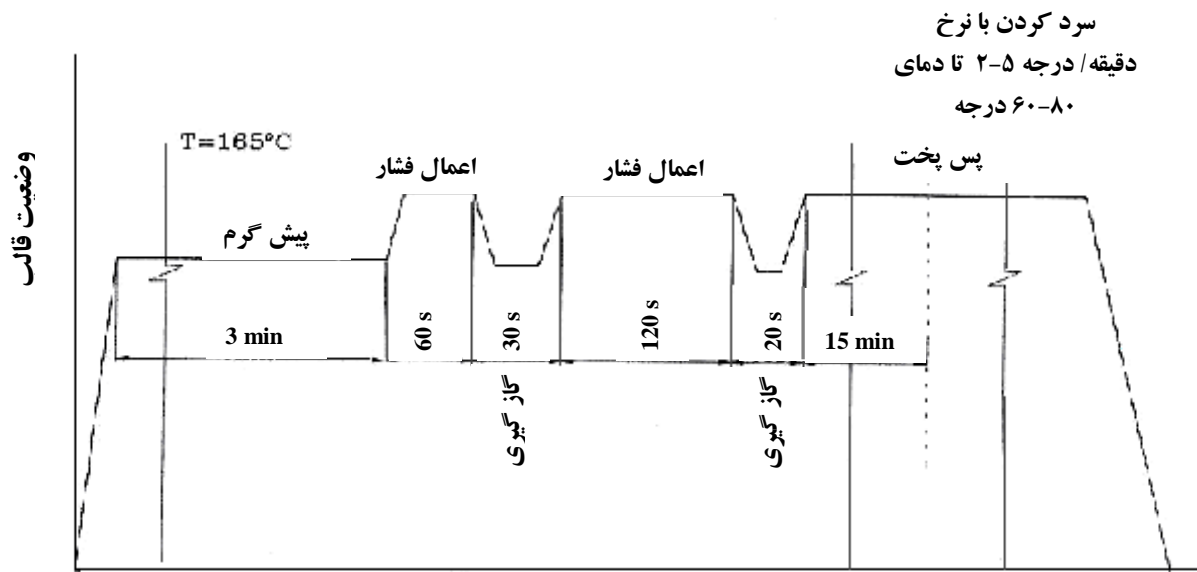
در این تحقیق از رزین فنولیک دو جزئی (نوالاک) ساخت شرکت رزیتان ایران به صورت ذرات پودری جامد با میانگین اندازه ذرات $90 \mu\text{m}$ و نقطه ذوب $110 - 100^\circ\text{C}$ به عنوان ماتریس پلیمری استفاده شد. گرافیت با میانگین اندازه ذرات $38 \mu\text{m}$ محصول چین، مولیبدن دی سولفاید با میانگین اندازه ذرات $38 \mu\text{m}$ ساخت آلمان و پودر پلی تترافلورواتیلن میکرونیزه محصول شرکت Ausimont ایتالیا به عنوان روان سازهای جامد مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین سیلیکون کارباید با میانگین اندازه ذرات $38 \mu\text{m}$ محصول شرکت Carborundum انگلیس و با میانگین اندازه ذرات $5 \mu\text{m}$ محصول شرکت Bohler آمریکا به عنوان فیلرهای سرامیکی تهیه گردید.

ساخت نمونه ها

از یک همزن تیغه ای کوچک با دور متوسط جهت اختلاط مواد بکار رفته در هر ترکیب استفاده شد. با انجام تست DSC (کالریمتری رویشی دیفرانسیلی) و ساخت نمونه های آزمایشی اولیه، دمای پخت 165°C و فشار 25 MPa

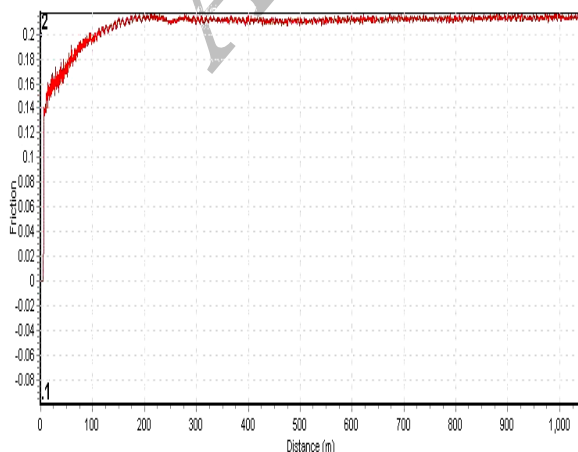
ماده معدنی و احیای آن به فلز مربوطه [۱۳] و انجام واکنش های تریبو شیمیایی بین فلز و سطح مقابل، از جمله فرضیاتی است که برای بررسی نقش فیلرها در این مورد ارائه گردیده است. در فرضیه اخیر بهادر و همکارانش، بنا بر شواهد به دست آمده از کارهای خود [۱۹ و ۱۳]، نشان دادند که واکنش شیمیایی بین فیلر و Fe (در سطح مقابل) باعث ایجاد ترکیبات بین سطحی جدیدی می شود که این مواد از طریق افزایش مقدار سازگاری بین فیلم انتقالی (Transfer Film) ایجاد شده بین سطحی با سطح مقابل، موجب افزایش چسبندگی آن می شوند. حفاظت این فیلم از سطح پلیمر در برابر ناهمواری های سطح مقابل به عنوان عامل افزایش مقاومت سایشی شناخته می شود [۱۸].

با این وجود، هم چنان تحقیقات در این زمینه به منظور شناخت کامل نقش فیلرها در کارایی سایشی کامپوزیت های پلیمری و ارائه روشی جهت پیش بینی رفتار تریبولوژیک آنها در حال انجام است [۱۶ و ۶ و ۵]. هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی تأثیر فیلرهای جامد پودری بر خواص سایشی و اصطکاکی کامپوزیت های بر پایه رزین فنولیک به منظور دستیابی به خواص مواد ضد اصطکاکی خود روان کننده (ضریب اصطکاک پائین و مقاومت سایشی بالا) جهت استفاده در کاربردهایی نظیر بوش، یاتاقان، رینگ و سایر قطعات مشابه بوده است. برتری خواص سایشی تعدادی از پلیمرها در مقایسه با سایر آنها موضوعی اثبات شده است [۳ و ۴]. در این بین عملکرد اصطکاکی و سایشی پلیمر ترموست رزین فنولیک در تماس با فولاد، بسیار عالی و قابل توجه است به گونه ای که از این ماده به صورت گسترده برای ساخت انواع قطعات اصطکاکی مانند لنت ترمز و صفحه کلاچ استفاده می شود [۲۲-۲۰]. نتایج حاصل از انجام مهندسی معکوس روی تعدادی از قطعات ضد اصطکاکی مورد استفاده در صنعت نیز نشان دهنده استفاده از این پایه پلیمری در ترکیب آنها بود. به همین دلیل در این پژوهش رزین فنولیک به عنوان پایه پلیمری برای ساخت نمونه های کامپوزیتی انتخاب گردید. فیلرهای



شکل ۱- عملیات حرارتی به کار رفته در پخت قطعات

۹۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ (به ترتیب) انجام گرفته و سپس نمونه ها و بین توسط یک پارچه آغشته به استن به خوبی تمیز شدند [۲۳]. سرعت خطی حرکت بین 0.75 m/s و 0.1 بار عمودی برابر 6 Kg برای همه نمونه ها انتخاب شد. خواص سایشی و اصطکاکی تا طول نهایی یک کیلومتر تعیین گردید. منحنی ضریب اصطکاک به صورت پیوسته توسط کرنش سنج و سیستم جمع آوری اطلاعات متصل به بین توسط نرم افزار طراحی شده به همین منظور ترسیم گردید. شکل (۲) یک نمونه از این منحنی ها را در مورد نمونه کامپوزیت حاوی ۲۰ درصد گرافیت نشان می دهد.



شکل ۲- رفتار اصطکاکی نمونه حاوی ۲۰ درصد گرافیت تحت بار 6 Kg

به عنوان شرایط فرایندی ساخت نمونه ها انتخاب گردید [۲۳]. به توجه به این آزمون ها، چرخه عملیات حرارتی به کار رفته در مورد هر نمونه، شامل مراحل پیش گرم کردن، گازگیری، پخت و زمان های هر مرحله، به طور ثابت در مورد تمامی نمونه ها اعمال شد. شکل (۱) چرخه حرارتی استفاده شده در ساخت نمونه ها را نشان می دهد. با استفاده از دستگاه پرس گرم 25 ton ساخت شرکت Unimolder انگلیس، نمونه های دیسکی شکل با قطر 100 mm و ضخامت 3 mm جهت انجام آزمون های سایش و اصطکاک ساخته شدند.

آزمون های تریبولوژیک

خواص سایشی و اصطکاکی نمونه های دیسکی شکل تهیه شده توسط یک دستگاه تریبومتر بین روی دیسک مطابق استاندارد ASTM G99 ساخت شرکت پرسایش ایران مشخص گردید. از یک بین با قطر 5 mm و شعاع عرقچین 4 mm و از جنس فولاد بلبرینگ AISI 52100 با سختی HRC ۶۳-۶۵ به عنوان سطح مقابل استفاده شد. قبل از انجام آزمون، عملیات آماده سازی سطح نمونه ها جهت یکنواخت کردن آنها با استفاده از کاغذ سنباده های

استفاده شدند. روان سازه های جامد (گرافیت و مولیبدن دی سولفاید) با درصدهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰، پلی تترافلورو اتیلن با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ و فیلر سرامیکی SiC با دو ترکیب درصد ۵ و ۱۰ به ماتریس پلیمری افزوده شدند. هر دو ویژگی سایشی و اصطکاکی کامپوزیت های حاوی روان ساز جامد و مشخصات سایشی نمونه های کامپوزیت SiC مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج و بحث

اثر روان سازه های جامد

شکل های (۳) و (۴) عملکرد تریبولوژیک نمونه های حاوی مولیبدن دی سولفاید را در مقایسه با رزین خالص نشان می دهد. افزودن MoS₂ به ترکیب رزین موجب افزایش میزان سایش و کاهش ضریب اصطکاک شده است. ساختار لایه ای MoS₂ موجب می شود در اثر حرکت پین، به راحتی ساییده شده و ذرات سایشی (wear debris) بسیار ریزی را بر روی سطح ایجاد کند. افزایش درصد MoS₂ در ترکیب کامپوزیت نیز به دلیل افزایش این ذرات، باعث افزایش بیشتر میزان سایش شده است. شکل (۴) نشان می دهد افزودن این ماده باعث کاهش قابل توجه در مقدار ضریب اصطکاک نمونه می شود. علت این کاهش، تشکیل یک فیلم انتقالی از ذرات MoS₂ بر روی سطح مقابل و در نتیجه تبدیل برهم کنش سایشی از فلز-کامپوزیت به MoS₂-کامپوزیت می باشد. تشکیل این فیلم انتقالی فدا شونده که از طریق ایجاد ذرات سایشی بیشتر تجدید می شود، به عنوان عامل اصلی کاهش نیروی اصطکاکی شناخته می شود [۲۶-۲۵ و ۱۲]. افزایش فیلر از ۱۵ به ۲۰ درصد مقدار اصطکاک را اندکی افزایش داده است. به نظر می رسد در درصدهای فیلر بالاتر، حضور بسیار زیاد ذرات سایش، موجب تغییر در ماهیت فیلم انتقالی بین سطحی می شود. در این حالت به جای تشکیل یک فیلم نازک روی سطح مقابل یک لایه ضخیم از پودرفیلر بین دو سطح ایجاد می شود که این فیلم مقدار

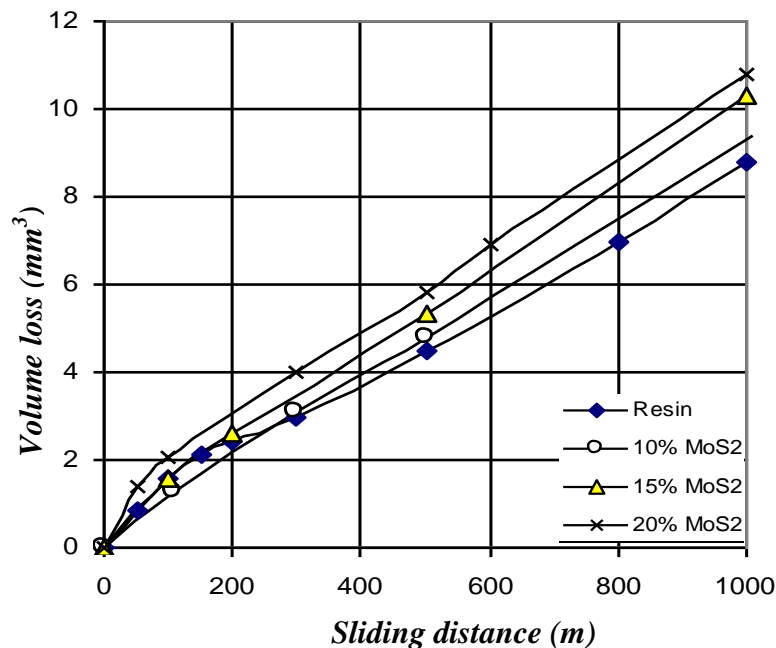
نمودارهای مزبور به منظور امکان پذیر شدن انجام مقایسه، پس از حذف نوسانات طبیعی موجود (از طریق در نظر گرفتن مقدار متوسط بین پیک ها) دوباره ترسیم شده اند. مقدار سایش نیز از طریق اندازه گیری کاهش وزن نمونه در فواصل مشخص و با استفاده از یک ترازوی دقیق با دقت یک دهم میلی گرم تعیین گردید و سپس منحنی های مشخصه سایش (Wear Characteristic Curve) برای نمونه های مختلف رسم شد. به منظور بررسی دقیق رفتار سایشی نمونه ها، با توجه به اختلاف چگالی موجود بین نمونه های مختلف منحنی های مشخصه سایش بر حسب میزان کاهش حجم نمونه کامپوزیت در طول مسافت سایش رسم شد. بدین منظور مقدار چگالی همه نمونه ها بر اساس روش غوطه وری و مطابق استاندارد DIN 53479 تعیین گردید [۲۴]. نمونه کامپوزیتی در هوا و آب با استفاده از یک ترازوی چهار رقمی وزن گردیده و سپس چگالی آن با کمک فرمول شماره (۱) تعیین گردید، که در آن ρ_c چگالی نمونه، ω_w وزن نمونه در آب، ω_a وزن نمونه در هوا و ρ_w چگالی آب می باشد که با استفاده از پیکنومتر بدست آمد.

$$\rho_c = \frac{\omega_a}{\omega_a - \omega_w} \cdot \rho_w \quad (1)$$

پس از تعیین چگالی هر نمونه، از تقسیم مقدار کاهش وزن نمونه بر چگالی آن، میزان کاهش حجم نمونه های کامپوزیتی مشخص گردید.

روش ها

در این پژوهش تأثیر نوع و درصد فیلرهای مختلف بر رفتار تریبولوژیک کامپوزیت های بر پایه رزین فنولیک مطالعه شد. بدین منظور مواد در دو گروه اصلی فیلرهای پودری با ویژگی روان سازی جامد شامل گرافیت، مولیبدن دی سولفاید و پلی تترافلورو اتیلن و فیلر سرامیکی سیلیکون کار باید (در دو نوع با اندازه ذرات ۳۸ و ۵ میکرون)



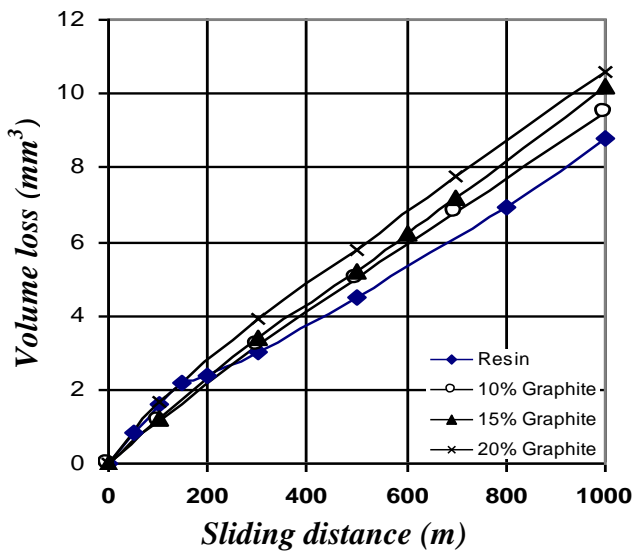
شکل ۳- رفتار سایشی نمونه های حاوی مولیبدن دی سولفاید، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

چسبنده روی سطح مقابل است. قرار گرفتن این فیلم روی سطح پین فلزی، از تماس ناهمواری ها و برجستگی های خشن سطح فلز با نمونه کامپوزیت جلوگیری کرده و باعث افزایش مقاومت سایشی آن می شود [۲۸ و ۱۷]. میزان سایش تا ۲۰ درصد، روند کاهشی خود را حفظ کرده که عکس نتایج بدست آمده از دو فیلر قبلی است. در این مورد نیز رفتار اصطکاکی مشابهی با افزایش فیلر از ۱۵ به ۲۰ مشاهده می شود، افزایش ضخامت فیلم PTFE و کندگی آن از روی سطح می تواند علت این مورد باشد. مقایسه کلی انجام گرفته در زمینه نحوه تأثیر نوع و درصد فیلهای با ویژگی روان سازی جامد بر رفتار سایشی و اصطکاکی کامپوزیت در شکل های (۹) و (۱۰) آمده است. نتایج بیانگر آن است که در همه موارد، گرافیت و مولیبدن دی سولفاید، مقدار سایش را افزایش داده ولی وارد کردن PTFE به ترکیب، موجب کاهش آن نسبت به رزین خالص شده است. همچنین کارایی سایشی مولیبدن دی سولفاید نیز در مقایسه با گرافیت بیشتر است ولی عملکرد اصطکاکی گرافیت مناسب تر از مولیبدن دی سولفاید می باشد.

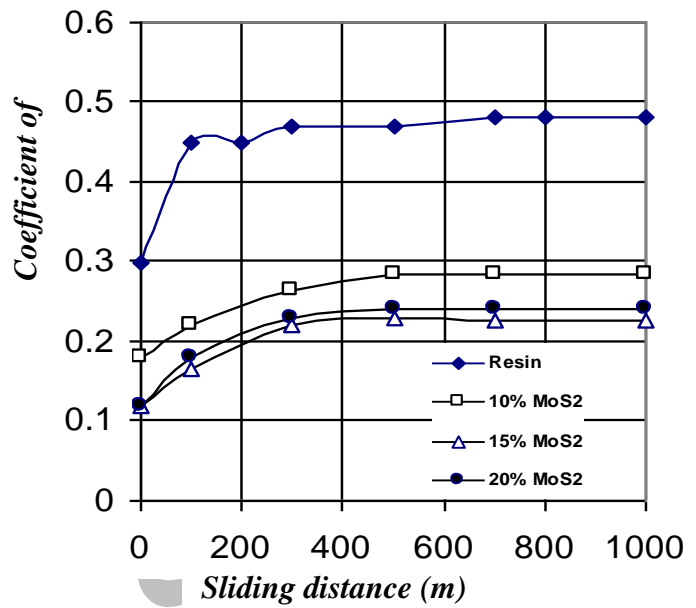
ضریب اصطکاک را افزایش می دهد. افزایش ضخامت این فیلم باعث کاهش چسبندگی آن به سطح مقابل و افزایش امکان کنده شدن و ترک خوردن و در نتیجه لایه برداری آن می گردد که منجر به افزایش مقدار سایش می شود [۱۸ و ۱۶].

نحوه تأثیر فیلر گرافیت بر خواص سایشی رزین فنولیک در شکل های (۵) و (۶) مشخص شده است. در این مورد نیز افزودن این ماده به رزین، کاهش مقاومت سایشی و میزان اصطکاک نمونه ها را در پی داشته است. ساختار گرافیت تقریباً مشابه MoS_2 بوده و به همین دلیل تشابه رفتارهای ایجاد شده قابل انتظار است. مکانیزم عملکرد گرافیت نیز ناشی از همین ساختار است که با ایجاد فیلم انتقالی بین سطحی، مقدار ضریب اصطکاک ماتریس پلیمری را کاهش می دهد [۲۷ و ۱۸، ۱۲].

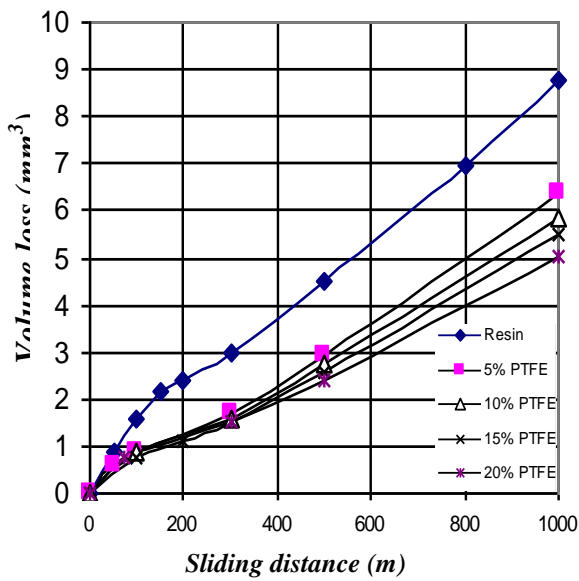
افزودن PTFE به رزین، باعث کاهش میزان سایش آن شده است (شکل ۷)، با افزایش درصد PTFE مقدار این کاهش، افزایش یافته است. در مورد PTFE نیز شواهد نشان دهنده تشکیل یک لایه فیلم انتقالی بسیار نازک و



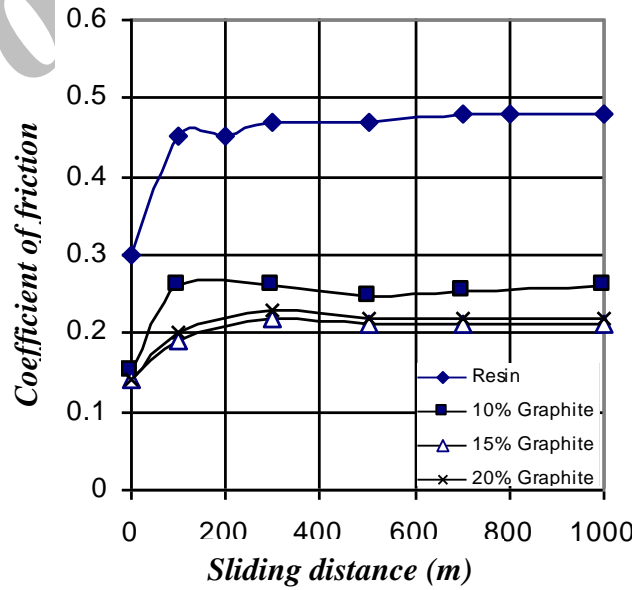
شکل ۵- رفتار سایشی نمونه های حاوی گرافیت،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



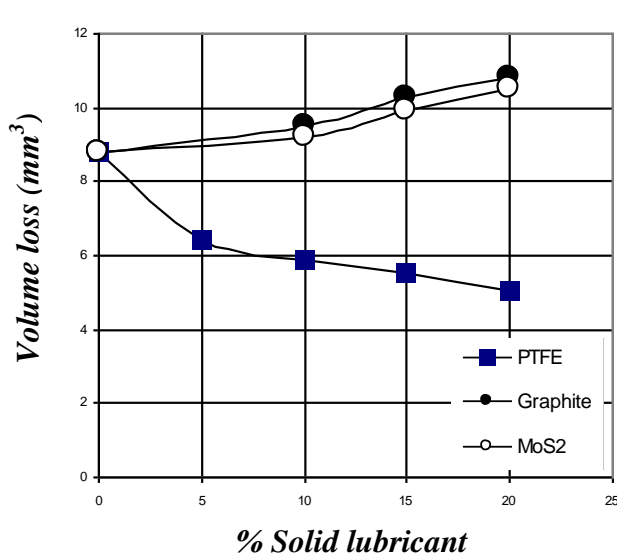
شکل ۴- رفتار اصطکاکی نمونه های حاوی مولیبدن دی سولفاید،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



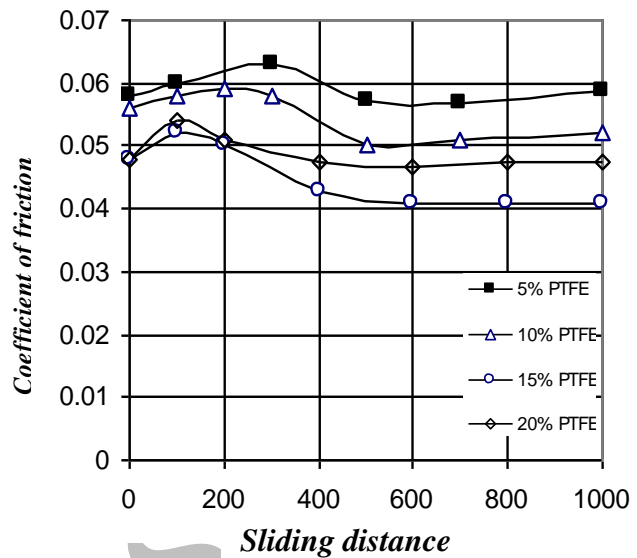
شکل ۷- رفتار سایشی نمونه های حاوی پلی تترا فلورو اتیلن،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



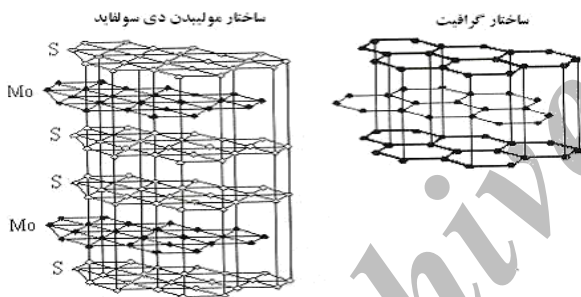
شکل ۶- رفتار اصطکاکی نمونه های حاوی گرافیت،
بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



شکل ۹- تاثیر روانسازهای جامد بر رفتار سایشی، طول لغزش ۱۰۰۰ m، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

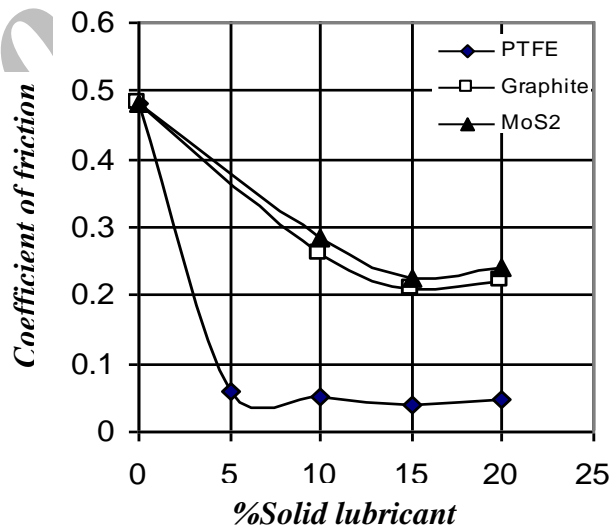


شکل ۸- رفتار اصطکاکی نمونه‌های حاوی پلی‌تترافلورو اتیلن، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



شکل ۱۱- ساختار مولکولی گرافیت و مولیبدن دی سولفاید [۲۹]

تفاوت رفتار ایجاد شده بین گرافیت و مولیبدن دی سولفاید با PTFE را نیز می‌توان به نحوه تشکیل و ساختار متفاوت فیلم‌های انتقالی تشکیل شده از این مواد نسبت داد. در دو مورد اول ذرات سایشی به صورت لایه‌هایی با صفحات موازی در راستای حرکت جهت داده می‌شوند، مطابق شکل (۱۲)، در حالی که در مورد PTFE، جریان یافتگی سرد (cold creep) پلیمر، یک فیلم کاملاً یکنواخت، پیوسته و چسبنده را روی سطح مقابل ایجاد می‌کند. شکل (۱۳) مکانیزم تشکیل فیلم و نحوه تغییر فرم زنجیرهای پلیمری و آرایش یافتگی آنها به صورت نوارهای (striae) برش یافته را نشان می‌دهد [۳۰]. طبق این



شکل ۱۰- تاثیر روانسازهای جامد بر رفتار اصطکاکی، طول لغزش ۱۰۰۰ m، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

علت این رفتار را می‌توان در ساختار متفاوت گرافیت نسبت به مولیبدن دی سولفاید دانست. شکل (۱۱) ساختار مولکولی این دو ماده را نشان می‌دهد. نیروهای بین‌لایه‌ای در گرافیت ضعیف‌تر بوده و در نتیجه در اثر تنش‌های وارد شده به راحتی برش خورده و سطوح آن از هم جدا می‌شوند. این موضوع خاصیت فداشوندگی آن را تقویت می‌کند و به همین علت سایش بالاتر و اصطکاک پایین‌تری در نمونه‌هایی که به آنها اضافه شده است، ایجاد می‌کند.

اثر فیلر سرامیکی

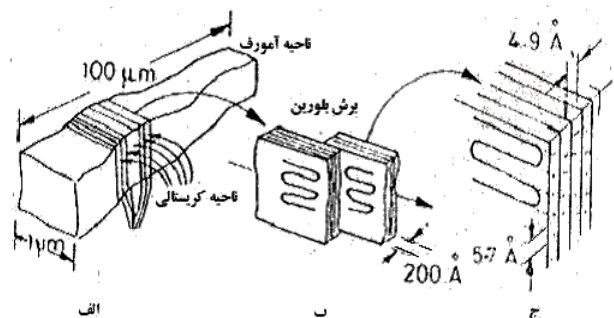
به منظور مطالعه تاثیر درصد و اندازه فیلرهای سرامیکی سخت بر رفتار سایشی پلیمرها، از ذرات سیلیکون کارباید استفاده شد. شکل های (۱۵ و ۱۶) مشخصات سایشی نمونه های حاوی SiC با اندازه ذرات ۳۸ و ۵ میکرون را نشان می دهد. نتایج به دست آمده نشان دهنده تاثیر کاملاً متفاوت این دو نوع فیلر است. در حالی که فیلر با اندازه ذرات ۳۸ میکرون (مش ۴۰۰) باعث کاهش قابل توجه در مقدار سایش رزین شده است، ذرات ریز فیلر با اندازه ۵ میکرون (مش ۲۵۰۰)، میزان سایش را افزایش داده است. این نتایج مؤید نقش مثبت ذرات درشت فیلر در م قایسه با ذرات ریزتر می باشد. علت این رفتار را می توان به مکانیزم سایش کامپوزیت های رزین فنولیک نسبت داد. به طور کلی چهار نوع فرایند سایش برای مواد پلیمری گزارش شده است: الف) ایجاد ترک های سطحی (Surface Cracking) در مورد پلیمرهای آمورف در حالت شیشه ای ب) کشیدگی و آرایش یافتگی مجدد (Stretching and Reorientation) ساختار مولکولی پلیمرهای نیمه بلورین ج) ایجاد فیلم انتقالی با آرایش یافتگی زیاد از ماکرومولکول ها بین دو سطح و د) فیلم ضخیم از لایه پلیمری مذاب در دماهای سطحی بالا. ماتریس کامپوزیت های مورد مطالعه، رزین فنولیک، از پلیمرهای ترموستی است. این ماده دارای رفتاری شکننده با پایداری حرارتی بالا می باشد که از شبکه ای بودن ساختار زنجیرها و عدم تحرک آنها ناشی می شود. مطالعات انجام شده نشان می دهد که این مواد عمدتاً بر اثر مکانیزم های خستگی سطحی و ترک خوردن سطح (مکانیزم الف) دچار سایش می شوند، با وجودی که به لحاظ ساختاری به گروه پلیمرهای آمورف شیشه ای تعلق ندارد [۳۱ و ۳۲].

به دلیل لغزش و وارد آمدن نیروی عمودی بر نمونه، برش ها یا قطعات بلورین از ساختار جدا می شوند، اتصال این برش ها به یکدیگر، موجب تشکیل الیاف پلیمری آرایش یافته شده و اتصال الیاف مجاور هم به یکدیگر نیز ایجاد فیلم جهت یافته پلیمری را بین دو سطح موجب می شود. مکانیزم کلی این تغییرات روی سطح نمونه لغزش یافته در شکل (۱۴) آمده است.

تفاوت ساختاری فیلم های تشکیل شده نشان می دهد که پایداری فیلم در مورد نمونه های حاوی PTFE بیشتر بوده و همین موضوع تغییر در عملکرد سایشی اصطکاکی آنها را موجب شده است [۱۲، ۱۷، ۲۸]. ماهیت متفاوت این فیلم باعث بهبود مشخصات اصطکاکی رزین نیز می شود، شکل (۸).

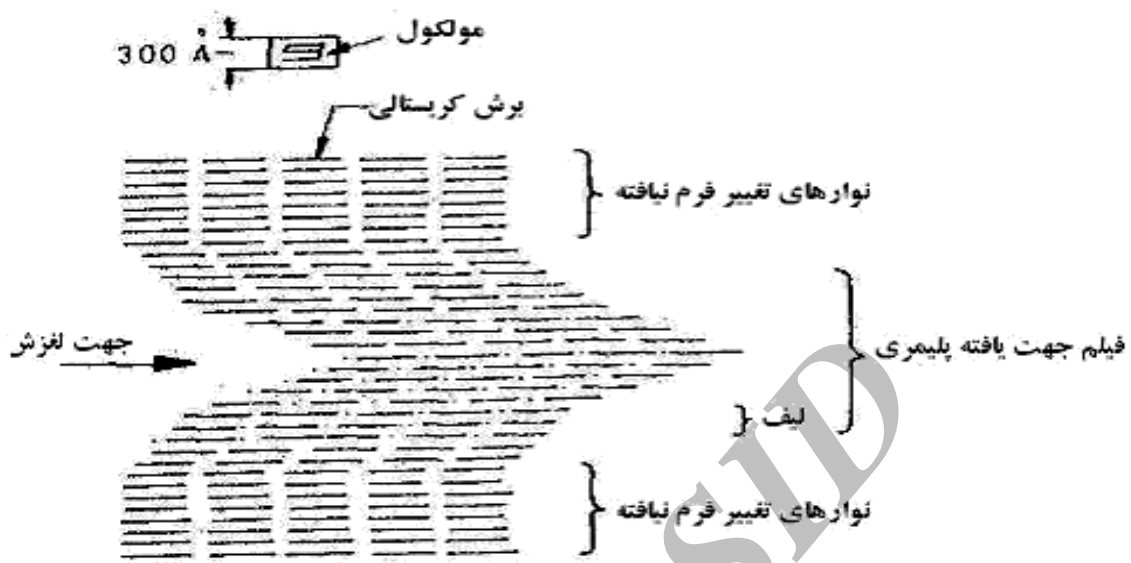


شکل ۱۲- جهت گیری ذرات گرافیت و مولبدن دی سولفاید بین دو سطح (پس از لغزش اولیه) و ایجاد فیلم انتقالی



شکل ۱۳- ساختار پلی تترا فلورو اتیلن و تغییرات آن هنگام تشکیل فیلم، الف) بلوک پلی تترا فلورو اتیلن ب) برش های بلورین یک نوار تشکیل شده پس از لغزش ج) نحوه قرارگیری زنجیرهای پلیمری

درون برش ها [۳۰]



شکل ۱۴- مکانیزم تشکیل فیلم پلی تترافلورو اتیلن بر اثر تغییر در ساختار آن [۳۰]

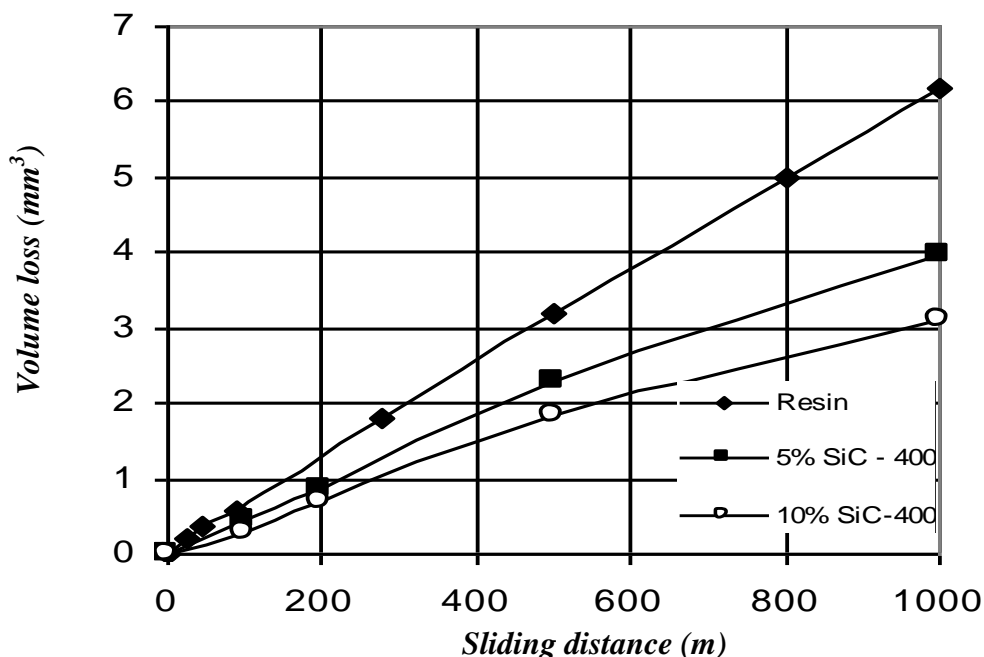
در اثر قرار گرفتن بین روی نمونه، یک میدان تنش فشاری زیر منطقه تماس ایجاد می شود که توسط یک میدان کششی احاطه شده است. تنش‌های کششی روی سطح بیشتر بوده و در لایه مرزی تماس ماکزیمم می شوند. به علت شکننده بودن ماتریس مورد استفاده و عدم توانایی تحمل تنش‌های کششی یک سری ترک از محل قرار گرفتن بین روی سطح به درون ماتریس گسترش می یابد. این ترک‌های عمود بر جهت لغزش پس از رشد، باعث موجی شدن سطح و در نهایت ایجاد ذرات سایش و ساییده شدن نمونه می شوند [۳۲]. فیلر با اندازه ذرات کوچک باعث از بین رفتن ترک های بزرگ در سطح کامپوزیت پلیمری می شود ولی شکل عمومی ترک های سطح تغییر نمی کند. این ذرات به راحتی در اثر ساییده شدن ماتریس از سطح جدا شده و در فضای بین دو سطح در تماس قرار می گیرند. سختی بسیار زیاد فیلرهای سرامیکی از تبدیل آنها به ذرات بسیار ریز ممانعت می کند. قرار گرفتن ذرات بین دو سطح باعث تغییر مکانیزم سایش به سایش خراشان سه جسمی گردیده و در نتیجه سطح کامپوزیت و مقابل هر دو دچار سایش شده و به همین علت افزایش در میزان

سایش نمونه‌ها مشاهده می شود [۳۲]، (شکل ۱۷). به نظر می‌رسد تأثیر اندازه ذرات سرامیکی به ضخامت لایه سطحی کامپوزیت که تحت تأثیر فرآیند سایش قرار گرفته و ذرات سایشی را می‌سازد بستگی دارد. ذرات بزرگتر از این ضخامت، تأثیر مثبت بر میزان سایش داشته و ذرات ریزتر باعث افزایش مقدار سایش می‌شوند.

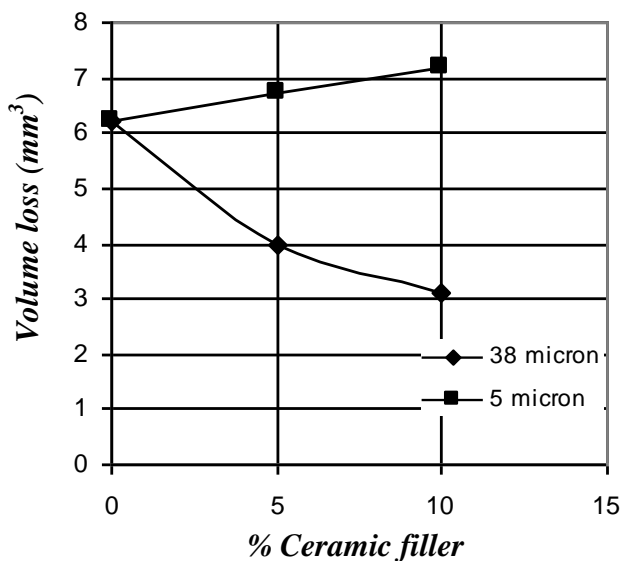
نتیجه‌گیری

بر اساس مشاهدات تجربی به عمل آمده و مباحث فوق نتایج زیر به دست آمده است:

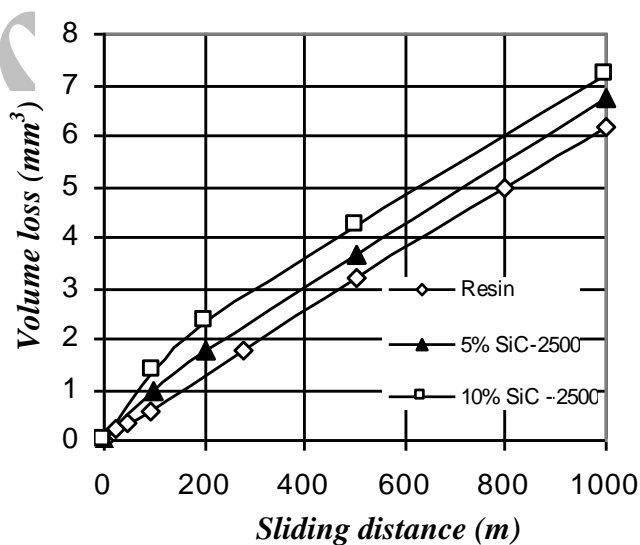
۱. افزودن فیلرهای مختلف باعث تغییر در رفتار سایشی و اصطکاکی پلیمرها می‌شود.
۲. گرافیت، مولیبدن دی سولفاید و پلی تترافلورو اتیلن به عنوان روان ساز جامد، مقدار ضریب اصطکاک سطح کامپوزیت را از طریق ایجاد فیلم‌های انتقالی با مکانیزم‌های مختلف کاهش می‌دهند.



شکل ۱۵- رفتار سایشی نمونه‌های حاوی سیلیکون کارباید با اندازه ذرات ۳۸ میکرون، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s



شکل ۱۷- تاثیر درصد و اندازه ذرات فیلر سیلیکون کارباید بر رفتار سایشی، طول لغزش ۱۰۰۰ m، بار ۶ kg



شکل ۱۶- رفتار سایشی نمونه‌های حاوی سیلیکون کارباید با اندازه ذرات ۵ میکرون، بار ۶ kg، سرعت لغزش ۰/۰۷۵ m/s

۲. تأثیر ذرات سرامیکی در رفتار سایشی به اندازه ذرات فیلر بستگی دارد.
۳. ذرات بزرگتر باعث محافظت از ماتریس در حین فرایند سایش شده و ذرات ریزتر با کنده شدن و قرار گرفتن بین دو سطح، میزان سایش را افزایش می‌دهند.

۱. پلی تترافلورو اتیلن بر خلاف گرافیت و مولیبدن دی سولفاید مقدار سایش را نیز کاهش می‌دهد. عملکرد گرافیت در بهبود رفتار اصطکاکی و مولیبدن دی سولفاید در افزایش مقاومت سایشی مناسب‌تر است.

- مراجع
13. Bahadur S, Gong D and Anderegg J.W., *The investigation of the action of fillers by XPS studies of the transfer films of PEEK and its composites containing CuS and CuF₂*, Wear, 160, 131-8, 1993
 14. Kapoor A. and Bahadur S., *Transfer film bonding and wear studies on CuS-nylon composite sliding against steel*, Tribology International., 27, 323-9, 1994
 15. Yu L. and Bahadur S., *An investigation of the transfer film characteristics and tribological behaviors of polyphenylene sulfide composites in sliding against tool steel*. Wear, 214, 245-51, 1998
 16. Friedrich K. and et al., *Effects of various fillers on the sliding of polymer composites*, Copm. Sci. & Tech., 65, 2329-43, 2005
 17. Tanaka K., *Effect of Various fillers on the friction and wear of PTFE-based composites*. In: Friedrich K, editor, *Friction and wear of polymer composites*, Elsevier, Amsterdam, 137-74, 1986
 18. Zhao Q. and Bahadur S., *The mechanism of filler action and the criterion of filler selection for reducing wear*, Wear, 225-229, 660-8, 1999
 19. Zhao Q. and Bahadur S., *A study of the modification of the friction and wear behavior of PPs by particulate Ag₂S and PbTe fillers*, Wear, 218 (1998), 62-72
 20. Gopal F., Dharani L.R. and Blum F.D., *Fade and wear characteristics of a glass-fiber-reinforced phenolic friction material*, Wear, 174, 119-27, 1994
 21. Pogolian A.K. and et al, *Investigation of the tribochemical and physico-chemical processes in sliding of mineral-filled formaldehyde copolymer composites against steel*, Wear, 260, 662-9, 2006
 22. Ho S.C. et al, *Effect of Phenolic content on tribological behavior of carbonized copper-phenolic based friction material*, Wear, 258, 1764-74, 2005
 23. Pakravan M., M.Sc. thesis, AmirKabir University of Technology, Tehran, 2002
 1. Ho K. and Jeng M.C., *Tribological characteristics of short glass fiber reinforced polycarbonate composites*, Wear, 206, 60-68, 1997
 2. Santner E. and Czichos H., *Tribology of polymers*, Tribol. Int., 22, 103-109, 1989
 3. Bohm H., Betz S. and A. ball, *The wear resistance of polymers*, Tribol. Int., 23, 399-406, 1990
 4. Mens J.W and Gee A.W., *Friction and wear behavior of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water*, Wear, 149, 255- 268, 1991
 5. Cho M.H., Bahadur S. and Pogolian A.K., *Friction and wear studies using Taguchi method on polyphenylene sulfide filled with a complex mixture of MoS₂, Al₂O₃ and other compounds*, Wear, 258, 1825-35, 2005
 6. Chang L. and Zhang Z., *Tribological properties of Epoxy nanocomposites*, Wear, 260, 869-78, 2006
 7. Friedrich K., Lu Z. and Hager A.M, *Recent advances in polymer composites' tribology*, Wear, 190, 139-144, 1995
 8. El-Sayed A.A. and et al., *Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications*, Wear, 184, 45-53, 1995
 9. Voort J.V. and Bahadur S., *Effect of PTFE addition on the transfer film, wear and friction of PEEK- CuO composite in: Tribology Symposium*, Ed. H. Masudi, ASME, Texas, 1995, 169
 10. Bahadur S. and Kapoor A., *The effect of ZnF₂, Zns and PbS fillers on the tribological behavior of nylon 11*, Wear, 155, 49-61, 1992
 11. Yu L., Liu W. and Xue Q., *Effect of various inorganic fillers on the friction and wear behaviors of PPS*, J. Appl. Polym. Sci., 68, 1643-50, 1998
 12. Bahadur S and Gong D, *The action of fillers in the modification of the tribological behaviour of polymers*, Wear, 158, 41-59, 1992

29. Lansdown A.R., *Molybdenum Disulphide Lubrication*, Elsevier, Amsterdam, 1999
30. Biswas S.K. and Vijayan K., *Friction and wear of PTFE - a review*, Wear, 158, 193-211, 1992
31. Hutchings I. M., *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, Great Britain, 1992
32. J.M. Durand, *Role of reinforcing ceramic particles in the wear behavior of polymer - based model composites*, Wear, 181-183, 833-9, 1995
24. *Testing of plastics and Elastomers, Determination of Density*, DIN 53479, 1976
25. Fusaro R.L., *Self-lubricating polymer composites and polymer transfer film lubrication for space application*, Tribology International., 23, 105-22, 1990
26. Lansdown A.R., *Molybdenum Disulphide Lubrication*, Elsevier, Amsterdam, 1999
27. Cho M.H. et al, *tribological properties of solid lubricants (Graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for automotive brake materials*, Wear, 260, 855-60, 2006
28. Biswas S.K. and Vijayan K., *Friction and Wear of PTFE- a review*, Wear, 158, 193-211, 1992

Archive of SID