



بررسی کاربرد انواع نانو مواد به عنوان افزودنی در روان کارهای صنعتی برای بهبود خواص تریبولوژیکی آنها

نوید کریمی بابا احمدی^۱ و عباس تقی پور^{۲*}

۱- دانشجوی، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، navidkb92@gmail.com

۲- *استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، taghipoor@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲

چکیده

پدیده اصطکاک و سایش در همه جا وجود دارد، از سیستم های نانو الکترومکانیکی در پزشکی تا پیشران الکتریکی یکپارچه در مقیاس بزرگ در ناوهای هواپیمابر. کاربرد نانو مواد به عنوان افزودنی در روغن های روان کننده در حال توسعه و پیشرفت است و در کنترل اصطکاک و سایش از اهمیت بالایی برخوردار است. این بررسی بر روی کاربرد انواع نانو مواد در روغن های روان کار تمرکز دارد و به طور جامع ویژگی های تریبولوژیکی این مواد را به عنوان افزودنی مورد مقایسه قرار می دهد. در پایان، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی در زمینه نانو مواد به منظور افزودنی در روغن های روان کننده، عنوان شده است. این بررسی به درک کلی استفاده از نانو مواد در روغن های روان کننده کمک نموده و دستیابی به طرحی بسیار خوب از نانو افزودنی ها با عملکردهای تریبولوژیکی برجسته را ارتقا می دهد.

*عهده دار مکاتبات: taghipoor@iaud.ac.

کلمات کلیدی: نانو مواد، افزودنی، اصطکاک، روان کاری، سایش.

۱- مقدمه

به علت وجود اصطکاک در همه مکانیزم ها، انرژی زیادی جهت غلبه بر آن تلف می شود. در حال حاضر، منبع انرژی صنعت حمل و نقل عمدتاً سوخت های فسیلی بوده که بخش قابل توجهی از گازهای گلخانه ای موجود را تولید می کند. در مقیاس جهانی، سالانه ۱۰۰ میلیون تراژول انرژی، به دلیل تماس های تریبولوژیکی مصرف می شود و موجب انتشار ۷۰۰۰ میلیون تن گازهای گلخانه ای در سال می گردد [۱]. بنابر اجتناب ناپذیر بودن پدیده اصطکاک، این چالشی بزرگ برای دستیابی به کربن خنثی است [۲]. بر این اساس، کنترل اصطکاک و کاهش سایش در فناوری های مدرن از اهمیت بالایی برخوردار است و تاکنون یکی از مؤثرترین رویکردها در صنعت، روان کاری با روغن های روان کننده است [۳] که معمولاً در محیط های متنوع پایدار هستند. مواد افزودنی موجود در روغن پایه می توانند به کاهش اصطکاک و خواص ضد سایش عالی در سطوح اصطکاکی درگیر دست یابند [۴]. افزودنی های موجود را می توان به چهار دسته تقسیم کرد: اصلاح کننده های اصطکاک آلی، پلیمرهای کاربردی، افزودنی های آلی محلول در روغن و نانو مواد [۵]. به عنوان یک دسته جدید از مواد، نانو مواد در زمینه بهبود خواص تریبولوژی کاربرد دارند

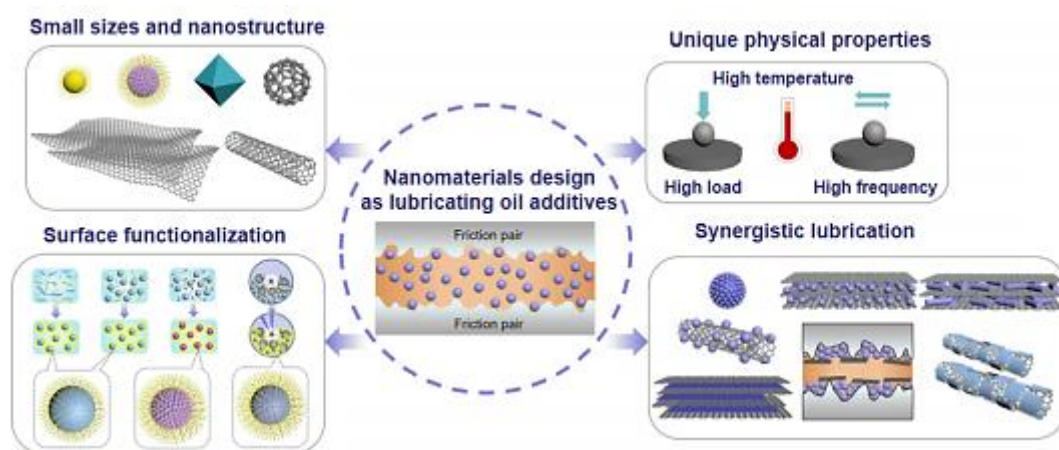
نحوه استناد به این مقاله: نوید کریمی بابا احمدی، عباس تقی پور. بررسی کاربرد انواع نانو مواد به عنوان افزودنی در روان کارهای صنعتی برای بهبود خواص تریبولوژیکی آنها. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲؛ ۱۰ (۱): ۸۱-۱۰۲.

DOR: [20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3](https://doi.org/10.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3)

و عملکرد روان کاری مطلوبی به عنوان افزودنی در روغن های روان کننده ارائه می دهند [۶]. در سال های اخیر با اینکه تحقیقات زیادی در دهه های گذشته صورت گرفته است، توجه فزاینده ای به اکتشاف نانو مواد به عنوان افزودنی های روغن روان کننده وجود داشته است [۷]. این بررسی بر روی کاربرد های نانو مواد در انواع روغن های روان کننده، افزودنی های نانو مواد با ابعاد متفاوت، مشکلات موجود و چشم انداز نانو مواد به عنوان افزودنی متمرکز است و هدف آن ارائه توصیه ای کاربردی برای انتخاب یک افزودنی نانو ماده مناسب، با توجه به شرایط کاری مختلف است.

۲- دسته بندی انواع طرح های نانو مواد به عنوان افزودنی های روغن های روان کننده

نانو مواد به یکی از شاخه های مورد توجه در علوم فیزیک، شیمی، زیست شناسی و علم مواد تبدیل شده است [۸]. توسعه و پیشرفت نانو مواد منجر به توسعه افزودنی های روغن روان کننده گردیده است. طیف گسترده ای از مطالعات برای بررسی پتانسیل نانو مواد و نانوکامپوزیت ها به عنوان افزودنی های روغن روان کننده انجام شده است [۹]. اهداف اصلی از کاربرد نانو مواد به عنوان افزودنی روغن روان کننده چیست؟ چگونه نانو مواد با طرح های مختلف می توانند به بهبود عملکرد تریبولوژیکی روان کارها کمک کند؟ دسته بندی انواع طرح های نانو مواد به طور خلاصه در شکل ۱ نشان داده شده است.



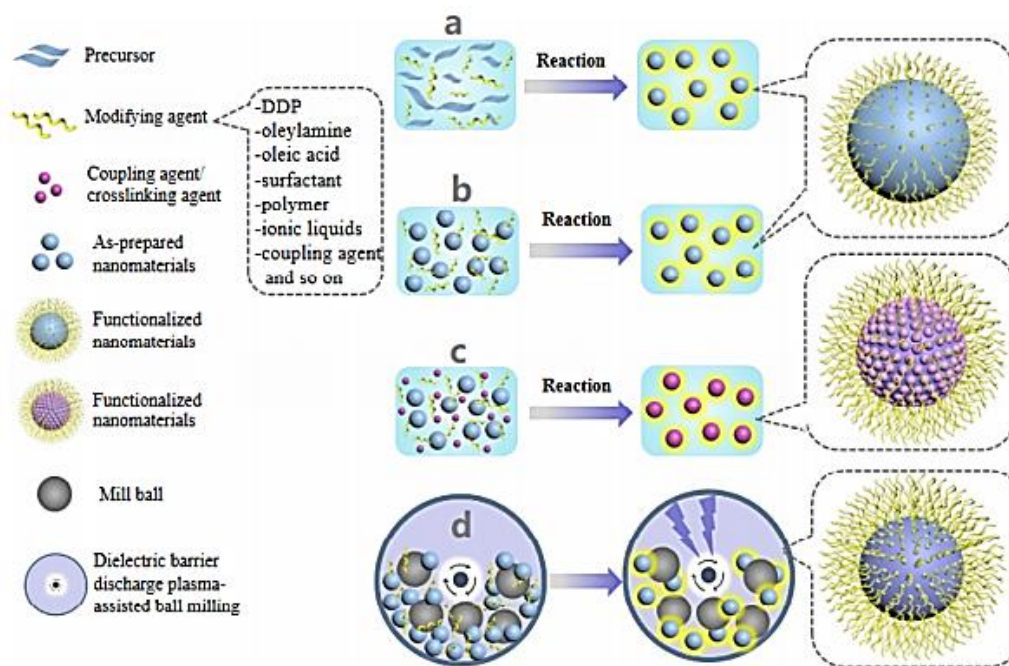
شکل ۱ : دسته بندی برای طراحی نانومواد به عنوان افزودنی های روغن روان کننده.

این طرح ها شامل موارد زیر است :

(۱) اندازه های کوچک و نانو ساختار. اندازه نانو مواد در محدوده نانومتر می باشد که از ۱ تا ۵۰۰ نانومتر است [۵]. با حرکت براونی، نانو مواد عامل دار یا کوچک می توانند در روغن پراکنده شوند و بدون مزاحمت از فیلترها عبور کنند [۴]، یا حتی به راحتی می توانند در خلل و فرج سطوح تماس وارد شده و اصطکاک را کاهش دهند و با تشکیل تریبوفیلم، مکانیزم غلتش یا اصلاح سطح و غیره از سایش سطوح اصطکاکی جلوگیری کنند. [۱۰]. علاوه بر آن، نانو ساختار کروی شکل، لوله ای یا لایه ای یکی دیگر از موارد اساسی در طرح های نانو مواد است، زیرا به طور مستقیم با فشاری که نانو مواد در طول بارگذاری تحت تاثیر آن قرار می گیرند، ارتباط دارد [۱۱]. به ویژه، نانو مواد کروی می توانند ظرفیت بالایی از تحمل بار و فشار را نشان دهند.

(۲) خواص فیزیکی منحصربه فرد. پژوهش های متعدد نشان داده است که یک ماده در اندازه های کوچک ممکن است ویژگی های خاصی از خود نشان دهد که مواد در اندازه بزرگ نشان نمی دهند. بیشتر نانو مواد دارای خواص متمایز از جمله، سطح ویژه بزرگ [۱۲]، استحکام مکانیکی بالا و ظرفیت تحمل بار [۱۳]، هستند که به بهبود عملکرد روغن روان کننده کمک می کند. با توجه به

سطح ویژه بزرگ، نانو مواد با جذب قوی می‌توانند با ترکیب چندین ماده، پراکندگی خوبی در روان‌کننده به دست آورند و یا نانوکامپوزیت‌ها را تشکیل دهند [۱۴]. علاوه بر این، بخشی از نانو مواد لایه‌ای با برهمکنش ضعیف بین لایه‌ای، می‌توانند نیروی برشی سطحی کمی را از خود نشان دهد که برای کاهش اصطکاک مفید است [۱۵]. از سوی دیگر، بیشتر نانو مواد دارای رسانایی حرارتی بالایی هستند [۶] که باعث آزاد شدن گرمای ناشی از اصطکاک می‌شود و با پایداری سیستم‌های اصطکاک ارتباط دارد. در مقایسه با افزودنی‌های روغن آلی، نانو مواد در دماهای افزایش یافته، از نظر حرارتی پایدار هستند و برای دوام روغن روان‌کننده امری ضروری است [۱۶].



شکل ۲: چهار روش آماده سازی نانومواد عامل دار (DDP: dialkildithiophosphate)

عامل سازی سطح. نانو مواد به‌عنوان بستر میزبان برای گروه‌ها و گونه‌های شیمیایی عامل دار شده مختلف، امکان ایجاد پیوند گروه‌های هدف و توسعه انواع جدیدی از نانوکامپوزیت‌ها را فراهم می‌کنند که عملکردهای پیشرفته یا جدیدی را در مقایسه با نمونه‌های اصلی خود نشان می‌دهند [۱۷]. بنابراین، مطلوب است که بتوان اندازه، عامل دار کردن و ترکیب نانو مواد را کنترل نمود. برای چنین توانایی باید به تنظیم سیستماتیک خواص نانو مواد دست پیدا نمود [۱۸]. توجه داشته باشید که عامل سازی سطحی نانو مواد می‌تواند به طور مؤثر، پایداری پراکندگی و توزیع همگن در روغن پایه را افزایش دهد و نانوسیال‌هایی که به خوبی پراکنده شده‌اند، تنش تسلیم^۱ کمتری برای کاهش مقاومت اولیه دارند. با این حال، بیشتر نانو مواده‌ها بدون عامل مستعد تجمع در روغن غیرقطبی [۱۹] هستند که با فرایند هم زدن مکانیکی قابل تغییر نیست. دسته‌بندی‌های عامل سازی سطحی متنوع هستند و روش‌های اولیه در چهار فرآیند خلاصه می‌شوند که در شکل ۲ نمایش داده شده است:

(۱) پیش‌ساز نانو مواد تحت فرایند تعیین شده با عامل اصلاح‌کننده واکنش می‌دهد و آماده‌سازی نانو مواد و عامل دار شدن سطح به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتد.

^۱ - yield stress

- ۲) نانو مواد آماده شده با عامل اصلاح کننده مخلوط می شوند. پس از فرآیند واکنش، نانو مواد عامل دار تولید می شوند.
- ۳) عامل جفت کننده / عامل اتصال عرضی (یا سایر) برای اتصال نانو مواد آماده شده و عامل اصلاح کننده، استفاده می شود.
- ۴) نانو مواد آماده شده با عامل اصلاح کننده مخلوط می شوند. پس از تخلیه سد دی الکتریک آسیاب گلوله ای به کمک پلاسما، نانو مواد عامل دار تولید می شوند.

۴) روان کاری هم افزایی^۱. یکی از روش های بالقوه برای بهبود خواص تریبولوژیکی نانو مواد و بهره گیری از مزایای ذکر شده جهت کاربردهای گسترده، تهیه نانو کامپوزیت ها است که می تواند اثر هم افزایی را در مرز فیلم نازک نشان دهد [۲۰].

نتایج به دست آمده نشان می دهد که با بهره گیری از اثر روان کاری هم افزایی، ترکیب دو یا چند نانو مواد دارای رفتار تریبولوژیکی بهتری نسبت به نانو مواد مجزا است. با توجه به مکانیزم های هم افزایی مختلف، نانو کامپوزیت ها می توانند کاهش اصطکاک و ویژگی های ضد سایش، خاصیت ضد اکسیداسیون، پراکندگی روغن و ظرفیت باربری بالاتری را نشان دهند [۲۱]. افزودنی های نانو مواد می توانند افزودنی های ترکیب آلی و افزودنی های جامد روان کننده را به خوبی ادغام کنند.

۳- افزودنی های نانو مواد با ابعاد متفاوت

۳-۱ نانو مواد صفر بعدی (0D)

تا به امروز، بسیاری از نانو ذرات به عنوان افزودنی های روغن برای بهبود خواص تریبولوژیکی به ویژه، ذرات مس، نیکل، آهن، کبالت، قلع، اکسیدها و سولفیدهای کروی شکل، نانوذرات معدنی طبیعی با اشکال نامنظم، کربن های کروی (CSs) و غیره (همه آنها در این بررسی به عنوان نانو مواد صفر بعدی در نظر گرفته می شوند و همگی ابعادی در مقیاس نانو دارند) استفاده شده اند.

۳-۱-۱ فلزات

نانو فلزات به عنوان افزودنی های روغن روان کننده، دارای خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی مانند: عدم خوردگی [۲۲]، خنثی بودن شیمیایی [۲۳]، تنش برشی کم و نقطه ذوب پایین [۱۴] هستند. بنابراین، توانایی عالی کاهش اصطکاک، ضد سایش و خود ترمیم کنندگی آنها به خوبی اثبات شده است. نانوذرات مس به دلیل خواص ویژه، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده اند [۲۴] و می توانند به طور قابل توجهی ویژگی های تریبولوژیکی روغن روان کننده را بهبود بخشند. در مقایسه با نانوذرات Fe و Co، افزودنی های نانوذرات مس می توانند اتلاف انرژی را کاهش دهند [۲۵] و برای اصطکاک و سایش، زمانی که به صورت جداگانه اضافه شوند، مؤثرتر هستند. با این حال، توجه به نوع روغن ضروری است. در روغن غیرقطبی، نانوذرات مس به عنوان اصلاح کننده اصطکاک و عوامل ضد سایش برای هر غلظت و باری قابل توجه بودند که به علت رسوب نانو ذرات مس بر روی سطوح مالشی بود. با این حال، لایه روان کننده روغن قطبی روی سطح تماس فلز با فلز می تواند توسط نانو ذرات مس از بین برود. استفاده از نانو ذرات نیکل به عنوان نانو افزودنی بسیار جالب است. چن و همکاران [۲۶] گزارش دادند که نانو ذرات نیکل سنتز شده در پلی آلفا اولفین ها (PAO^۲) می توانند در اندازه های مختلف نانو تنظیم شوند و پراکندگی خوبی داشته باشند. به دلیل انتشار نانو هسته های نیکل دارای فعالیت بالا و یک لایه محافظ پایدار که توسط نانوذرات نیکل با اندازه کوچک تشکیل شده است، نانو روان کننده های سنتزی مخلوط شده با نانو ذرات نیکل رفتارهای ضد اصطکاک و ضد سایش خوبی از خود نشان دادند. این، روشی برای تهیه نانو ذرات فلزی محلول در روغن است که می تواند به پراکندگی مناسب نانوذرات در روغن دست یابد.

^۱- Synergistic lubrication

^۲-polyalphaolefins

تغییر خواص تریبولوژیکی با افزودن نانو ذرات فلزی برای محققان جذابیت زیادی داشته است. به غیر از نانو ذرات مس و نیکل، از نانو ذرات فلزی مختلفی به عنوان افزودنی‌های روغن روان کننده از جمله [۲۷] Ag، [۲۸] Sn، [۲۸] Fe، [۲۹] Co، [۳۰] Pb، [۳۱] Au، [۳۲] Bi، [۳۳] Mo، [۳۳] W، [۳۴] Ga استفاده می‌شود. از سوی دیگر، باید پذیرفت که نانو ذرات اصلاح نشده، تمایل به تجمع در روغن غیرقطبی دارند. بهبود پراکندگی نانو ذرات در روغن روان کننده به وسیله‌ی عامل‌دار کردن سطح با مولکول‌های آلی ضروری است (مولکول‌های آلی شامل DDP، پلی اتیلن گلیکول^۱ (PEG)، اولیل آمین^۲، اولئیک اسید^۳، لیگاندهای تیوله^۴ و غیره). نکته مهم این است که نانو ذرات عامل‌دار دارای خواص کاهش اصطکاک و ضد سایش بهتری نسبت به اصلاح نشده است. اصطکاک و سایش نیز تحت تأثیر سختی افزودنی‌های نانوذرات قرار می‌گیرد. هنگامی که از نانو ذرات قلع، آهن و مس به عنوان مواد افزودنی استفاده می‌شود که دارای سختی کمتری نسبت به سطوح اصطکاکی هستند، می‌توان فیلمی با سختی اندک در ناحیه تماس ایجاد نمود [۲۷]. بعد از مقایسه رفتارهای تریبولوژیکی، به این نتیجه رسیدیم که نانو ذرات سخت، رفتارهای تریبولوژیکی متفاوتی از خود نشان می‌دهند و مکانیزم‌های اصطکاک نانو ذرات سخت (مانند Mo و W) یا نرم (مانند سرب، قلع، نقره، مس، نیکل، آهن و Co) نیز متفاوت بودند [۳۲]. برای نانو ذرات فلزی نرم، خاصیت ضد سایش آنها با افزایش سختی و مدول برشی مهم‌تر می‌شود، اما تأثیر کمی بر بهبود کاهش اصطکاک دارد، زیرا مکانیزم‌های ضد سایش و کاهش اصطکاک آنها هر دو به تشکیل لایه‌های مرزی فلزی، بر روی سطوح فرسوده مربوط است. برای نانو ذرات فلزی سخت‌تر، دو اثر وجود دارد که باید در نظر گرفته شود: یکی بهبود توسط نانو ذرات برای تشکیل یک لایه محافظ یا رفتار غلتکی و دیگری اختلال در تداوم و پایداری فیلم روغن. رفتارهای تریبولوژیکی به این بستگی دارد که کدام اثر غالب است. مشکل دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد تأثیر منفی ذرات فلزی بر پایداری اکسیداسیون روغن روان کننده است. در موتورها، احتمالاً یکی از مهم‌ترین عوامل خراب شدن روغن روان کار، وجود فلزات است. آزمایش‌های بسیاری برای ارزیابی اثر فلزات مختلف بر زوال روغن روان کننده ابداع شده است. با این حال، آهن، مس و سرب به عنوان کاتالیزورهای شناخته شده برای زوال در نظر گرفته می‌شوند. نه تنها نمک‌های مس، بلکه مس‌های تجمعی نیز مؤثر می‌باشند [۳۵]. علاوه بر این، تاکنون کاتالیزورهای مبتنی بر فلز بسیاری گزارش شده‌اند که می‌توانند به طور مؤثر، تجزیه اکسیدی روغن را کاتالیز کنند. بنابراین، خواص تریبولوژیکی و تأثیر ذرات فلزی بر پایداری اکسیداسیون روغن روان کار باید در نظر گرفته شود.

۳-۱-۲ اکسیدها/ سولفیدها/ نیتrideها/ فلوریدها

در میان مطالعات انجام شده از کاربرد اکسیدها، سولفیدها، نیتrideها و فلوریدها، بیشترین استفاده از اکسیدها و سولفیدها بود. به دلیل فعالیت سطحی بالا، هزینه کم و ظرفیت تحمل بار، SiO_2 و TiO_2 به طور گسترده، به عنوان افزودنی در روغن روان کننده استفاده می‌شوند [۳۶]. به طور معمول برس‌های پلیمری محلول در روغن دارای پیوند با SiO_2 و TiO_2 به طور پیوسته در PAO پراکنده شدند و هیچ تغییری پس از نگهداری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵۵ روز مشاهده نشد. کاهش قابل توجه SiO_2 و TiO_2 محلول در روغن در حجم سایش سطح دیسک و ساچمه بدست آمد. روش آماده‌سازی عامل‌دار کردن مطابق با شکل (c) ۲ است. پراکندگی مشابهی نیز با استفاده از پلی تترا فلورو اتیلن $(\text{PTFE})@ \text{SiO}_2$ [۳۷] مشاهده گردید. همچنین مشخص شد که SiO_2 با اندازه کوچکتر عملکرد تریبولوژیکی برجسته‌ای را در فرکانس‌های پایین نشان می‌دهد. SiO_2 با اندازه بزرگتر عملکرد بهتری در ویژگی‌های کاهش اصطکاک تحت فرکانس بالاتر دارد و افزودنی‌های روغن روان کننده با اندازه یکنواخت، خواص تریبولوژیکی بهتری را نشان می‌دهند [۳۸]. سایر اکسیدها و سولفیدها شامل CuO [۳۹]، Al_2O_3 [۴۰]، [۴۱]

^۱-polyethylene glycol

^۲-oleylamine

^۳- oleic acid

^۴- thiolated ligands

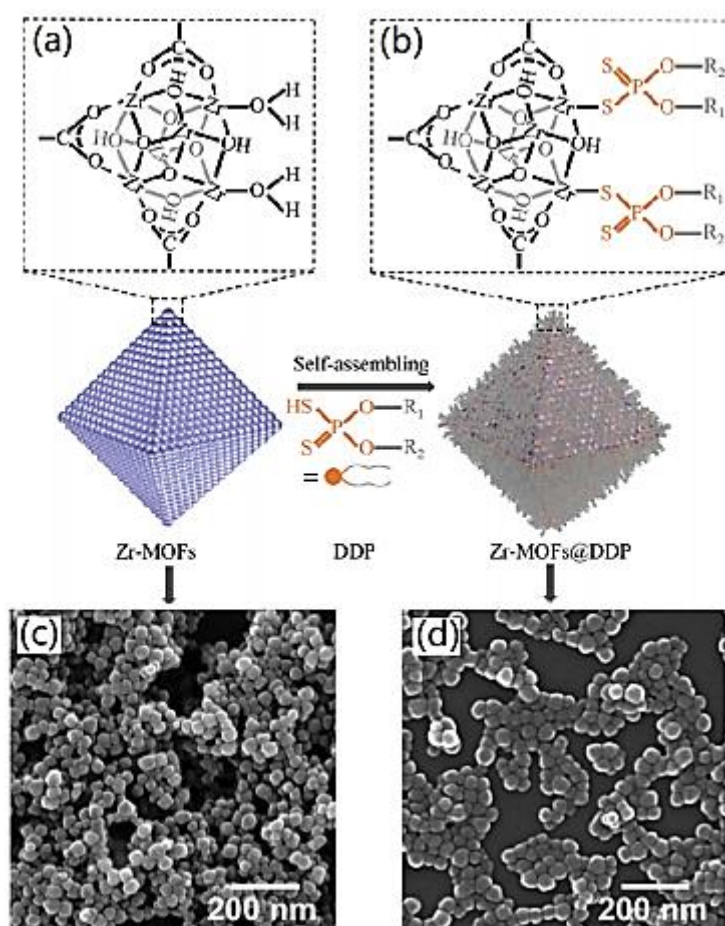
ZnO, Fe₃O₄ [۴۲], ZrO₂ [۴۳], CeO₂ [۴۴], WO₃ [۴۵], Y₂O₃ [۴۶], ZnS [۴۷], PbS [۴۸], CuS [۴۹] برای دستیابی به پراکندگی مناسب، پراکنده کننده ها و عامل دار کردن سطوح به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند [۴۹]. سولفیدها به دلیل عنصر فعال S یک نقطه ضعف مشترک دارند که می تواند منجر به خوردگی اکسیداسیونی سیستم های مکانیکی و آلودگی محیطی شود [۵۰]. با این حال، به دلیل خواص تریبولوژیکی برجسته MoS₂ به طور گسترده به عنوان یک افزودنی روان کننده مهم برای مدت طولانی مورد استفاده قرار گرفته است. چهار نوع مختلف از MoS₂ شبیه به فولرن (C₆₀) سنتز و آزمایش شدند، و مشخص شد که همه آنها دارای خواص مطلوب کاهش اصطکاک در روان کاری شدید مرزی هستند [۵۱]. با این حال، عملکرد تریبولوژیکی فولرن همانند MoS₂ با ساختار داخلی تغییر می کند. با استفاده از ذرات کاملاً کروی و متبلور C₆₀-MoS₂ ظرفیت تحمل بار بالای و فشار تماسی بالاتری به دست می آید. خواص تریبولوژیکی خوبی هنگام استفاده از نانو ذرات ضعیف کریستالی C₆₀-MoS₂ مشاهده می شود، زیرا می توان آن ها را به راحتی لایه برداری کرد تا ورقه ها تولید شود و لایه به لایه انباشته شده و تریبو فیلم تشکیل می شود. به طور مشابه، وجود نقص و ساختارهای توخالی در ذرات نیز لایه برداری را آسان تر و تشکیل سریع تر تریبو فیلم را تسهیل می کند [۵۲]. این نتیجه همچنین به طور غیرمستقیم ویژگی های تریبولوژیکی مختلف میان صفحات و ذرات MoS₂ را نشان می دهد. در مورد فلوریدها و نیتریدها، نتایج گزارش شده نشان داد که نانو ذرات LaF₃ [۵۳]، CeF₃ [۵۴] و نیترید بور BN [۵۵] می توانند ظرفیت تحمل بار، کاهش اصطکاک و خاصیت ضد سایش را بهبود بخشند.

۳-۱-۳ کربن

در بیشتر مطالعات کاربرد نانو مواد در روان کاری روغن، نانو مواد مبتنی بر کربن مانند نانوالماس (ND)، C₆₀، نقاط کربنی (CDs)، CSs، نانولوله های کربنی (CNTs)، گرافن (G) و اکسید گرافن (GO) مورد تأکید قرار گرفته اند. با توجه به عدم مسمومیت و پایداری شیمیایی ND، استفاده از آنها در روان کاری مرزی و مقاومتشان در برابر فشار بالا، موضوعی قابل توجه در چندین سال اخیر بوده است. ویسکوزیته، رابطه رئولوژیکی، دینامیکی، گشتاور اصطکاکی، افزودن ثانویه، و رفتار حرارتی روان کننده ND-پراکنده مورد بررسی قرار گرفته است [۵۶] که پایه و اساس شناخت مکانیزم های عملکرد تریبولوژیکی را فراهم نمود. کره کربن (CS) که دارای ساختار کروی منظم است، برخلاف نانو ذرات فلزی، قطری بیش از ۱۰۰ نانومتر دارد [۵۷]. CS های زیرمیکرون بسیار صیقلی به عنوان یک افزودنی روغن روان کار کارآمد نشان داده شده است، و اندازه ذرات از ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر متغیر بود [۵۷]. به طور کلی، اندازه CS بر عملکرد اصطکاک تأثیر گذار است. با این حال، برای SC دوپ شده با نیتروژن-فسفر، اندازه نسبتاً بزرگ CS تأثیری بر عملکرد شگرف آنها نداشت [۵۸]. مطالعات متعددی نیز به کاربرد CDs به عنوان افزودنی های روغن روان کننده، با توجه به اندازه کوچک آنها (کوچک تر از ۱۰ نانومتر) اختصاص یافته است که برای حل مشکل پایداری پراکندگی حائز اهمیت است. علاوه بر این، سازگاری خوب CDs ها با روغن پایه را می توان مستقیماً در فرآیند سنتز به دست آورد [۵۹]. متعاقباً، اولیامین [۶۰]، پلی الکترولیت [۶۱] و پلی CDs پیوند عرضی شده (مایع یونی) [۶۲] مورد مطالعه قرار گرفتند. سایر مواد کربن 0D نیز مانند C₆₀ [۶۳]، کربن های پیاز-مانند [۶۴] و غیره [۶۵] نشان داده شده اند. خواص حرارتی و رئولوژیکی روان کننده های مخلوط شده با نانو ساختارهای کربنی مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت [۶۶]. نتایج نشان داد که رسانایی حرارتی تمامی روغن های نمونه بیشتر از روغن پایه است. ذرات CS بیشترین تأثیر مثبت را بر هدایت حرارتی و نقطه اشتعال نشان دادند، اما نانوصفات G بیشترین اثر بهبود را در نقطه ریزش داشتند. علاوه بر این، ویسکوزیته تمام روغن های نمونه با افزایش غلظت نانو مواد و کاهش دما، افزایش می یابد، اما ساختارهای مختلف تأثیر کمی داشتند.

۳-۱-۴ نمک های فلزی / مواد معدنی طبیعی

در میان نمک های فلزی مورد مطالعه، بیشترین استفاده در طول دهه گذشته را بورات ها به خود اختصاص داده اند. نانو ذرات بورات کلسیم محلول در روغن اصلاح شده با اولئیک اسید و لوریک اسید آماده شدند [۶۷]. بورات های کلسیم اصلاح شده دارای خواص ضد سایش و کاهش اصطکاک خوبی بودند و در طی فرآیند لغزش، یک فیلم مقاوم به سایش متشکل از رسوبات و محصولات واکنش تریبوشیمیایی تشکیل دادند. نانوذرات CaCO_3 نیز مورد مطالعه قرار گرفتند، اما خواص تریبولوژیکی آنها به شرایط آزمایش وابسته بود. فقط تحت بار کمتر، فرکانس بالاتر و دمای پایین تر، محصول واکنش تریبوشیمیایی (CaO) تولید شد و لایه ای روی سطح فرسوده تشکیل شد. سولفونات ها و یا سالیسیلات های کلسیم بیش از پیش و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند [۶۸]. به عنوان مثال، مواد شوینده سولفونات کلسیم بر پایه سولفات های کلونییدی هستند که در آنها نانو ذرات CaCO_3 در روغن توسط ملکول های کلسیم آلکیل بنزن سولفونات پایدار می شوند. آنها به طور گسترده در موتورهای دریایی و خودرو برای خنثی کردن محصولات اسیدی و جلوگیری از ایجاد رسوب استفاده می شوند [۶۸]. در ضمن به عنوان افزودنی های روغن، می توانند خواص تریبولوژیکی روغن را بهبود بخشند. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، از نمک های فلزی دیگری نیز می توان در روغن روانکاری استفاده نمود.



شکل ۳: تصویر شماتیک برای عملکرد سطحی Zr-MOFs@DDP . ساختارهای شیمیایی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از Zr-MOFs و Zr-MOFs@DDP به ترتیب در (a, b) و (c, d) نشان داده شد [۷۱].

۳-۱-۵ ساختار فلزی-آلی (MOF)

MOF با سنتز شبکه‌ای از طریق اتصال با واحدهای معدنی و آلی و پیوندهای شیمیایی مستحکم تهیه می‌شوند. هنگامی که به واحدهای حاوی فلز متصل می‌شوند، ساختارهای کریستالی قوی ایجاد می‌شود [۶۹]. به طور خاص، هندسه، اندازه و عامل‌سازی MOF را می‌توان به طور دقیق کنترل و طراحی کرد. از این رو، اخیراً استفاده از MOFs در روغن روان کننده به موضوعی قابل توجه تبدیل شده است. با این حال، تنها چند مطالعه در خصوص MOFs به عنوان افزودنی‌های روغن روان کننده گزارش شده است. ساختارهای ایمیدازولات زئولیتی (ZIFs) زیرمجموعه‌ای از MOF ها هستند که دارای سطح بزرگ، منافذ حجیم و پایداری شیمیایی و حرارتی بالایی هستند. ZIF-8 (نمک روی -۲ متیل ایمیدازول) و ZIF-67 (نمک کبالت -۳ متیل ایمیدازول) که ابتدا به عنوان مواد افزودنی در روغن روان کننده استفاده شد، خاصیت ضد سایش و توانایی حمل بار بسیار خوبی را نشان داد [۷۰]. بررسی MOF مبتنی بر Zr اصلاح شده با DDP (Zr-MOFs) از طریق خود-سامانی به عنوان افزودنی‌های روغن روان کننده بسیار جالب است [۷۱]. به دلیل وجود مناطق فلزی غیراشباع، Zr-MOFs راحتی قابل عامل‌سازی هستند. علاوه بر مزایای قبلی روی دی آلکیل دی تیوفسفات (ZDDP)، کاهش ضریب اصطکاک (COF) و کاهش حجم سایش بدست آمد و زمان القای اکسیداسیون روغن مخلوط شده با Zr-MOFs@DDP بسیار طولانی‌تر شد. فرآیندهای عامل‌سازی مرتبط و نتایج Zr-MOFs@DDP در شکل ۳ آورده شده است.

۳-۱-۶ ILs

ILs از کاتیون‌ها و آنیون‌های دارای ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله ظرفیت جذب بالا، فراریت کم و پایداری حرارتی بالا تشکیل شده‌اند. از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱، ILs عمدتاً به عنوان روان کننده‌های پایه مورد بررسی قرار گرفتند. کو و همکاران [۷۲] برای مدت طولانی به تحقیق در مورد IL های محلول در روغن به عنوان افزودنی‌های روان کننده پرداختند. در سال ۲۰۱۲، IL تری هگزیل تترادسیل فسفونیوم بیس (۲-اتیل هگزیل) فسفات با حلالیت خوب در روغن غیر قطبی به عنوان افزودنی روغن مورد بررسی قرار گرفت. نرخ سایش به طور شگفت آوری با ۳ مرتبه بزرگی کاهش یافت که به یک تریوفیلیم محافظ مرزی نسبت داده شد. به طور مشابه، IL تری هگزیل تترا دسیل فسفونیوم بیس (۴،۴،۴ تری متیل پنتیل) فسفینات نیز مورد بررسی قرار گرفت. رتبه بندی اثربخشی در رفتار ضد سایش برای آنیون‌های IL خلاصه شد [۷۳] و اثر هم افزایی بین فسفونیوم-آلکیل فسفات IL و ZDDP نشان داده شد. علاوه بر این، ILs چند منظوره محلول در روغن سنتز و ارزیابی شدند، که ویژگی‌های عالی حلالیت، ضد خوردگی، ضد زنگ، ضد سایش و ظرفیت حمل بار بالایی را نشان دادند. ILs همچنین عملکردهای تریبولوژیکی برتری نسبت به ZDDP نشان دادند [۷۴].

ویسکوزیته روغن روان کننده نیز تحت تأثیر ویسکوزیته ILs قرار می‌گیرد و متعاقباً بر رفتارهای تریبولوژیکی تأثیر می‌گذارد. ویسکوزیته IL با وجود محدوده نسبتاً کم چگالی ($0.1 - 1.6 \text{ g/mm}^3$) به طور قابل توجهی متفاوت است زیرا رفتار رئولوژیکی به طور قابل توجهی تحت تأثیر ساختارهای کاتیونی و آنیونی قرار می‌گیرد. بر این اساس با توجه به تنوع آنیونی و کاتیونی و پیچیدگی ساختار مولکولی آنها، قانون مشخصی از تأثیر بر ویسکوزیته ایجاد نشده است (عوامل تأثیرگذار موجود عبارتند طول، ساختار و تقارن زنجیره آلکیل، پیوند هیدروژنی میان یون‌ها و غیره) [۷۵]. ویسکوزیته در مناطق مختلف روان کاری اثرات متفاوتی دارد و ILs مناسب را می‌توان با توجه به شرایط کاری مورد نیاز طراحی کرد. انواع ILs محلول در روغن طی ۱۰ سال گذشته سنتز و بهینه شده‌اند و توسعه ILs محلول در روغن، بسیاری از مشکلات از جمله خوردگی، ناپایداری حرارتی، مسمومیت، هزینه بالا و غیره را مرتفع کرده است. از سوی دیگر، بهبود رفتار ضد سایش روغن پایه بسیار مؤثر است که نتایج تجربی زیادی آن را تأیید می‌کند. از این رو، ویژگی‌های منحصر به فرد ILs به عنوان افزودنی‌های روغن روان کننده، پتانسیل کاربردهای صنعتی آینده را نشان می‌دهد [۷۵].

۳-۲ نانو مواد یک بعدی

نانومواد یک بعدی دارای دو بعد در مقیاس نانو با نسبت ابعاد طول به قطر بزرگ هستند. در این بخش، پیشرفت تحقیقات نانو مواد یک بعدی به عنوان افزودنی‌های روغن روان کننده به طور خلاصه ارائه می‌شود. نانو لوله‌های کربنی (CNTs)، اکسیدها، سولفیدها، نانو لوله‌های رسی هالوزیت (HNTs) و نانو بلورهای سلولز عمدتاً در این بخش آورده شده‌اند.

۳-۲-۱ CNTs

به‌عنوان یکی از اشکال نانو مواد یک بعدی، CNT یا CNT چند جداره (MWCNT) به دلیل رفتارهای اصطکاک عالی خود به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با ویژگی‌های ساختاری متمایز گرافن استوانه‌ای هم محور با لایه‌های مختلف، که لایه‌ها می‌تواند نسبتاً در امتداد محور متحدالمرکز گرافن استوانه‌ای حرکت کنند. تئوری مدل سازی، نیروی برشی سطحی فوق العاده کمی را بین لایه‌های CNTs دوجداره پیش بینی کرده است. با این وجود، برای لایه‌های غیر متمرکز، وجود نقص در ساختار به طور قابل توجهی باعث افزایش نیروی برشی می‌شود و به طور یکنواخت، طول نانو لوله‌های کربنی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، بی اثر بودن شیمیایی نانو لوله‌های کربنی باعث جذب کمی در سطوح مورد نظر می‌شود. پیشرفت قابل توجهی در زمینه CNT در سال‌های اخیر حاصل شده است. برای غلبه بر بی اثری شیمیایی CNT عامل دار کردن سطحی گسترده توسط استئاریک اسید [۷۶]، Co [۷۷]، کربوکسیل [۷۸] و غیره انجام شده است و چگالی اصلاح کننده سطح بر رفتار اصطکاک آنها تاثیرگذار است. نکته قابل توجه این است که، MWCNT اصلاح شده با آریل فسفات‌های پلیمری (PAPs) می‌توانند به طور چشمگیری عملکرد کاهش اصطکاک (۶۰٪) و ضد سایش (۹۵٪) را به مقدار ۰/۰۸ درصد وزنی بهبود بخشند [۷۹]. مکانیزم و رفتار رئولوژیکی CNTs نیز مورد مطالعه قرار گرفته است و افزودنی‌های CNTs در موتور بررسی شدند. نتیجه‌گیری نشان داد که افزودنی‌های CNT در روغن موتور منجر به کاهش (۷٪) در گشتاور موتور می‌شود. علاوه بر این، در طول عملکرد عادی، پراکندگی نانو لوله‌های کربنی در موتور به طور مؤثری با روغن برش بهبود یافت و رسوبات نانو لوله‌های کربنی به سرعت توسط سیستم فیلتراسیون روغن حذف شدند.

۳-۲-۲ اکسیدها/ سولفیدها

پیشرفت‌هایی در تهیه نانو لوله‌های دی کالکوژنید فلزی حاصل شده است. در مقایسه با نانو لوله‌های کربنی، آنها می‌توانند عملکردهای تریبولوژیکی خوبی را به دلیل دارا بودن شکل استوانه‌ای لایه‌ای نشان دهند. نانو سیم‌های Mo₆S₄Si₄Mo₆S₃Si₆ [۸۰] و Mo₆S₃Si₆ [۸۱] خواص کاهش اصطکاک خوبی را نشان دادند و ضریب اصطکاک هر دو به مقدار ۰/۰۴ رسیدند. MoS₂ در منطقه تماس در طول فرآیند اصطکاک تشکیل شد. با این حال، این دو نتیجه تقریباً به صورت یکسان بود، بنابراین فرمول‌های شیمیایی مختلف عامل مورد گمان بودند. با سولفوریزاسیون، نانو لوله‌های MoS₂ را می‌توان از نانو سیم‌های Mo₆S₂Si₈ سنتز کرد و مشخص شد که نانو لوله‌های MoS₂ به طور قابل توجهی ضریب اصطکاک و اتلاف سایش را کاهش می‌دهند [۸۲]. به طور مشابه، سولفوریزاسیون تریبوشیمیایی در محل (in-situ) با استفاده از نانو لوله‌های MoO₃ به عنوان افزودنی در روغن پایه با وجود افزودنی‌های روان کننده حاوی گوگرد و در نتیجه تشکیل لایه‌ای غنی از MoS₂ بودند. ظرفیت تحمل بار این تریبوفیلیم بسیار بالاتر از نانو لوله‌های معمولی MoS₂ بود. به دلیل سولفوریزاسیون مداوم نانو لوله‌های MoO₃ در طول تماس لغزشی، نانو لوله‌های معمولی MoS₂ به تدریج تخریب شده و روان کاری خود را به دلیل اکسیداسیون از دست دادند. گوگردسازی-درمحل (in-situ) نانو لوله‌های MoO₃، حد حساسیت دمایی نانو لوله‌های MoS₂ را شکست و عملکرد تریبولوژیکی فوق العاده‌ای را تا بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد کرد [۸۳]. از سوی دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که پایداری اکسیداسیون MoS₂ ضعیف است. نانو میله‌های WS₂ [۸۴] و CuS [۸۵] نیز تهیه و بررسی شدند و خواص ضد اکسیداسیون آنها مناسب نبود. احتمالاً روش سولفوریزاسیون تریبوشیمیایی درجا (in-situ) برای غلبه بر این مشکل مؤثر است، اما عنصر گوگرد اجتناب ناپذیر است.

۳-۳ نانو مواد دو بعدی

با ابعاد طولی فوق العاده نازک، نانو مواد دو بعدی می توانند مقاومت برشی بین سطوح لغزشی تماسی را کاهش داده و در نتیجه شرایط عملکرد را بهینه کنند [۱۵]. علاوه بر این، پیوندهای کووالانسی قوی و برهم کنش های لایه-لایه ضعیف تر در نانو مواد دو بعدی، پایداری مکانیکی نانو ساختار را تضمین می کند [۸۶]. در این بخش پیشرفت های اخیر تحقیقات در مورد افزودنی های نانو مواد دو بعدی در روغن را به صورت خلاصه بیان می کند که معمولاً شامل GO ، G ، MoS_2 ، هیدروکسیدهای دو لایه (LDH)، فسفر سیاه (BP) و ساختارهای آلی کووالانسی (CFs) هستند.

۳-۳-۱ کربن

در چند سال گذشته، مقدار زیادی از نانو مواد لایه ای مبتنی بر گرافن از جمله G ، GO [۸۷]، فلوئورو گرافن FG [۸۸] و اکسید گرافن کاهش یافته (rGO) به روغن پایه اضافه شده اند تا خواص ضد سایش و کاهش اصطکاک آنها را برای سطح ویژه بالا، نانو صفحه های کوچک دارای ضخامت نانومتر ۱۵۶ و توانایی ورود آسان به سطح تماس بهبود دهند. با این حال، به دلیل تقاضای زیاد برای محلول اسیدی آبی و آب، فرآیند سنتز نانو مواد مبتنی بر گرافن اقتصادی و زیست محیطی نیست [۱۳]. نانو مواد لایه ای مبتنی بر گرافن خالص به دلیل بی اثر بودن شیمیایی که می توان با اصلاح فیزیکی یا شیمیایی از آن جلوگیری کرد، در بیشتر روغن ها پراکنده نمی شوند. آن ها توسط اسید اولئیک [۸۹]، LLs [۹۰]، دو دسیلامین [۹۱] فسفونیوم-ارگانوفسفات [۹۲] و غیره عامل دار شدند. همچنین چندین نوع روش برای بهبود پراکندگی وجود دارد.

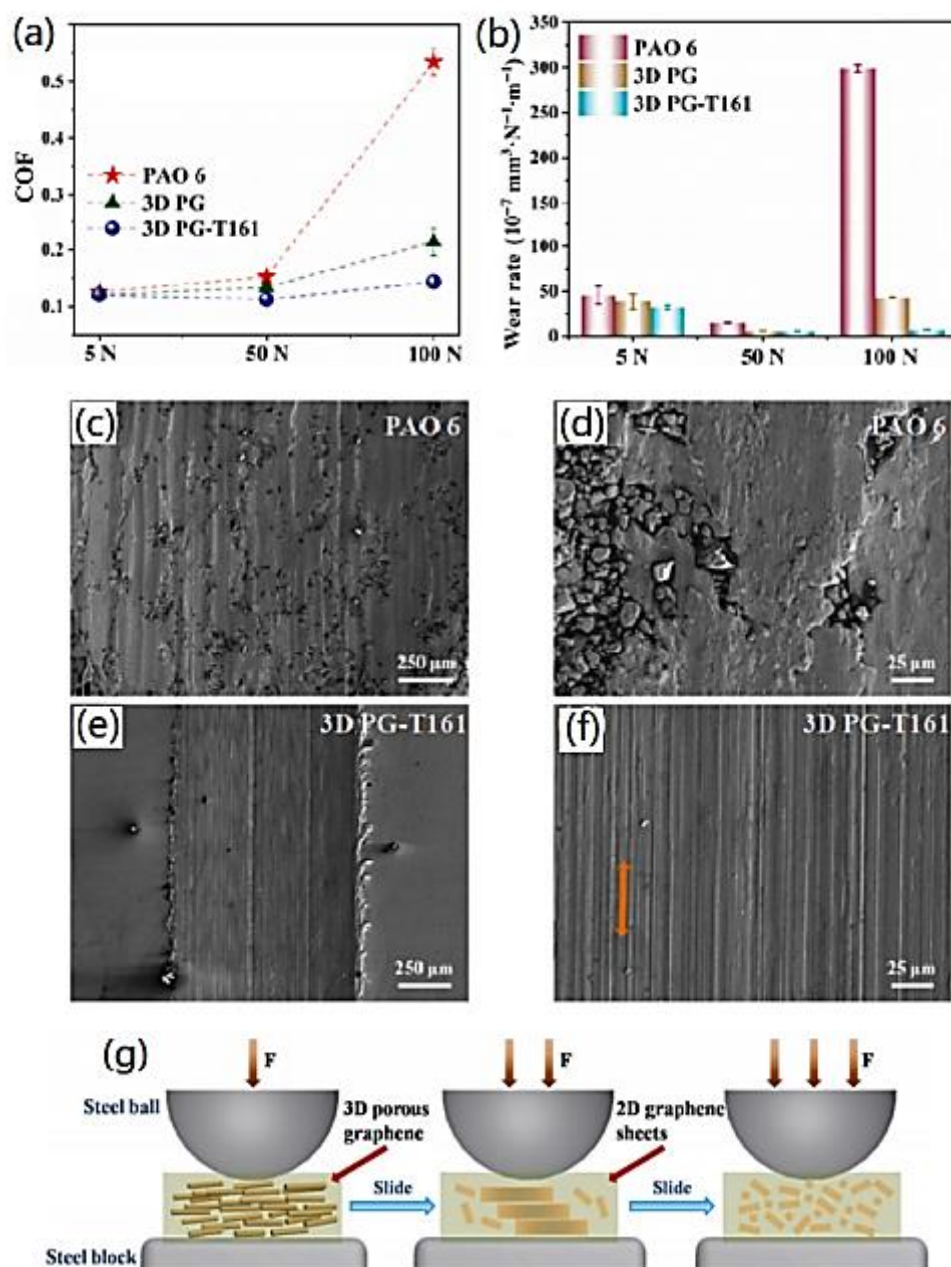
G اکسیژن زدایی شده و کم نقص توسط لایه برداری گرافیت اکسید بر اساس تابش الکترومغناطیسی متمرکز خورشیدی تهیه شد. همچنین مشاهده شد که خواص کاهش ضریب اصطکاک، ضد سایش و فشار شدید افزایش یافته است [۹۳]. G متخلخل سه بعدی و پلی ایزوبوتیلن سوکسینیمید با وزن مولکولی بالا ($T161$) به عنوان افزودنی های هیبرید پیشنهاد شده است [۹۴]. افزودنی های هیبرید می توانند به طور مؤثر ضریب اصطکاک و نرخ سایش $ASS\ 316$ را 73% و 97% کاهش دهند. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. علاوه بر این، روش های آسیاب گلوله ای، لایه برداری الکتروشیمیایی، لایه برداری فاز مایع و تخلیه قوس نیز برای تهیه افزودنی ها با کارایی بالا استفاده شد. قابل توجه است که عملکردهای تریبولوژیکی نانوصفحات گرافیتی و اکسید گرافیت احیا شده لایه برداری شده که توسط آسیاب گلوله ای به دست آمد، هر دو مطلوب بودند و گروه های عاملی را می توان با آسیاب گلوله ای روی سطح G پیوند زد [۹۵]. بدیهی است که آسیاب گلوله ای روشی مؤثر برای تولید نانو مواد لایه ای مبتنی بر کربن با کارایی بالا به عنوان افزودنی های روغن روان کننده است.

G نوعی نانو مواد دوبعدی انعطاف پذیر است. زیرا از نظر انعطاف پذیری، عملکرد تریبولوژیکی آنها تا حد زیادی تحت تأثیر شرایط کاری قرار می گیرد. به ویژه، تحت روان کاری مخلوط، ورقه های G لایه برداری شده تمایل داشتند در ناحیه سایش به دام افتاده و اثر "چروکیدن" را القا کنند. سپس، استحکام مکانیکی بالای آنها منجر به ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به روغن پایه شد. علاوه بر این، در زمان اصطکاک، یکنواختی و پراکندگی، نامطلوب شده و تجمع آنها تشدید شد. بر این اساس، تشکیل فیلم جذب به سختی اتفاق می افتد که برای عملکرد تریبولوژیکی آنها نامطلوب بود [۹۶].

۳-۳-۲ اکسیدها/ سولفیدها

MoS_2 که دارای نانوساختار ساندویچ مانند $S-Mo-S$ است، توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. همان طور که ذکر شد، MoS_2 می تواند به شکل های مختلف نانو، مانند نانو ذرات، نانو لوله ها، نانوصفحات و ساختار $C60$ مانند سنتز شود. علیرغم هندسه های مختلف، نانوصفحات MoS_2 دارای خواص تریبولوژیکی بهتری هستند که در نتیجه توانایی تشکیل تریبو فیلم خطی و عملکرد شناوری بر روی سطح دارند [۹۷]. به جز نانو لایه ها ی Fe_3O_4 اکسیدهای کمی با ساختار نانو لایه به عنوان افزودنی

های روغن روان کننده مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوصفحات MoS_2 که توسط آسیاب گلوله‌ای و با مخلوط شدن MoO_3 و S سنتز می‌شوند، می‌توانند به شدت سطح زیرلایه‌ها را برای تشکیل تریبو فیلم پایدار جذب کنند [۹۸]. نانوصفحات بسیار نازک MoS_2 تهیه شده توسط روش سنتز معمولی، واکنش حالت جامد یا لایه برداری الکتروشیمیایی هر دو به عنوان افزودنی‌های روغن روان کننده خواص ضد اصطکاک و ضد سایش افزایش یافته را تأیید کردند. نانوصفحات MoS_2 با غلظت بالا برتری قابل توجهی نسبت به ZDDP در کاهش اصطکاک و سایش در بار زیاد نشان دادند [۹۹].



شکل ۴: (الف، ب) تغییرات در ضریب اصطکاک متوسط و نرخ سایش؛ (ج) تصاویر SEM از سطوح مسیر سایش و (ز) نمودار شماتیک... [۹۴].

۳-۳-۳ مواد معدنی طبیعی

به عنوان نوعی از ماده معدنی طبیعی، LDHs را می توان توسط سنتز شیمیایی در آزمایشگاه نیز ساخت که از یون های فلزی واقع در مرکز بلور شش ضلعی لایه ها و یون های هیدروکسید که رؤس را اشغال می کنند، تشکیل شده اند [۱۰۰]. یون های فلزی موجود در HDL ها شامل Zn^{2+} ، Cu^{+} ، Fe^{3+} ، Co^{2+} ، Ni^{2+} ، Al^{3+} و Mg^{2+} و غیره می باشند. به دلیل ساختار نانوکریستالی منحصر به فرد، تنوع ترکیب شیمیایی، اندازه و همچنین شکل، LDHs به طور گسترده در زمینه های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

$Zn/Mg/Al-LDHs$ و $Mg/Al-LDHs$ ، $Zn/Al-LDHs$ ، $[Co-Al-CO_3]_{10}$ LDHs مورد مقایسه و مطالعه قرار گرفتند و $Mg/Al-LDHs$ دارای بهترین روان کاری بود. علاوه بر این، LDH با یون های فلزی و ویژگی های هندسی مختلف (کروی، صفحه-مانند و گل مانند) مورد بررسی قرار گرفتند [۱۰۲]. مشخص شد که به جای ترکیبات شیمیایی مختلف، مورفولوژی تأثیر بیشتری بر رفتارهای تریبولوژیکی داشت و HDL های گل-مانند با سطح ویژه بالا، بهترین عملکرد را نشان دادند.

۳-۳-۴ سایر موارد

زیرکونیوم فسفات (ZrP) با نانوساختار صفحه-مانند به عنوان افزودنی مؤثر بوده است. CFS پلیمرهای متخلخل کریستالی، کووالانسی هستند و به مونتاژ واحدهای آلی برای ایجاد اسکلت های طراحی شده، دست می یابند. FC مبتنی بر تریازین به عنوان افزودنی در روغن، پایداری حرارتی بالا، پراکندگی عالی و عملکرد تریبولوژیکی مطلوب از خود نشان دادند. چندین گروه از FC ساخته شده اند، اما هنوز چالش هایی در بررسی کاربرد افزودنی ها در روغن های روان کننده وجود دارد. علاوه بر این، چند مطالعه نیز کاربرد نانوصفحات BP را در تریبولوژی نشان داده اند. نانوصفحات BP تهیه شده توسط آسیاب گلوله ای می تواند ظرفیت باربری، کاهش اصطکاک و خواص ضد سایش را بهبود بخشد [۱۰۳].

۳-۴ نانوکامپوزیت ها

به دلیل اثر هم افزایی (سینرژیک)، نانوکامپوزیت ها معمولاً عملکرد تریبولوژیکی برتری نسبت به حالت اولیه دارند. باتوجه به نانوکامپوزیت های ترکیب شده با ابعاد مختلف، آنها به پنج بخش عمده تقسیم می شوند: ترکیب نانو مواد 0D ترکیب شده با نانو مواد 1D (0D/1D) و بقیه به صورت 0D/1D، 1D/2D، 0D/0D و 2D/2D تعیین می شوند.

۳-۴-۱ 0D/1D

نانوکامپوزیت های نانو ذرات MoS_2 ترکیب شده با انواع مختلف نانو مواد کربنی سنتز شدند [۲۰] و تایید شد که $MoS_2@CNT$ (0D/1D)، $MoS_2@G$ (0D/2D) و $MoS_2@C60$ (0D/0D) پایداری بهتری را در مقایسه با نانو ذرات MoS_2 در هنگام پراکندگی در PAG نشان داد و به طور قابل توجهی عملکرد تریبولوژیکی در مقایسه با رفتارهای PAG یا PAG که هر قسمت را جداگانه دارند، بهبود بخشید. به صورت مشابه، $MoS_2@CNT$ (0D/1D)، $MoS_2@GO$ (0D/2D) و $MoS_2@rGO$ (0D/2D) نیز مورد مقایسه قرار گرفتند [۱۰۴]. نانوکامپوزیت های $ZnO@CNTs$ با نسبت های جرمی و غلظت های متفاوت نشان دادند که نانوکامپوزیت ها کاهش اصطکاک و قابلیت ضد سایش بالاتری را نسبت به روغن خالص، ZnO تنها و نانو لوله های کربنی نشان می دهند [۱۰۵]. جالب توجه است که نانو لوله های هیدروکسید سیلیکات منیزیم که با نانو ذرات نیکل ترکیب شده اند، می توانند از طریق واکنش های تریبوشیمیایی که به کاهش اصطکاک (۱۵٪) و افزایش توانایی ضد سایش (۷۸٪) منجر شد، یک تریبو فیلم صاف تر تشکیل دهند [۱۰۶].

0D/2D ۲-۴-۳

نانومواد 0D که بیشتر در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، فلز و نانو ذرات اکسید/سولفید از جمله TiO_2 ، MoS_2 ، Ag ، Ni و SiO_2 هستند. مونتموریلونیتیک (Montmorillonite) کانی نازک و پر مغزی است که با هزینه کم پتانسیل بالایی به عنوان افزودنی‌های روغن روان کننده دارد. کامپوزیت‌های $\text{montmorillonite}/\text{MoS}_2$ به بهبود ضریب اصطکاک و از دست دادن سایش [۱۰۷] دست یافت که چشم انداز کاربرد مؤثر این کامپوزیت را به عنوان افزودنی‌های روان کننده نشان می‌دهد. به طور قابل توجهی، یک نانوساختار ساندویچ-مانند از نانوذرات Mn_3O_4 و صفحات G ($\text{Mn}_3\text{O}_4@\text{G}$) تهیه شد [۵۰]. حتی در غلظت کم ۰/۷۵ درصد وزنی و دمای بالای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد، ضریب اصطکاک و عمق سایش به ترتیب ۷۵٪ و ۹۷٪ کاهش یافت. علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های $\text{TiO}_2/\text{F-rGO}$ با پیوند نزدیک بین ذرات و ورقه‌ها، ضریب اصطکاک پایین و ظرفیت ضد سایش عالی را نشان می‌دهند که به اثر روان کنندگی هم افزایی نسبت داده می‌شود. شایان ذکر است که BP نشان‌گذاری شده با نانو ذرات نقره که از طریق رویکردی آسان تهیه شده است به طور قابل توجهی عملکرد تریبولوژیکی را افزایش می‌دهد، ضریب اصطکاک و نرخ سایش به ترتیب ۷۳٪ و ۹۲٪ کاهش یافت.

با ترکیب مزایای نانومواد 0D و 2D این نانوذرات کروی در بین نانولایه‌ها می‌توانند اصطکاک لغزشی را به اصطکاک غلتشی تبدیل کنند و به عنوان پوشش محافظ برای کاهش مؤثر اصطکاک و افزایش رفتارهای ضد سایش عمل کنند. بنابراین، مقدار زیادی از نانومواد ترکیب شده با 0D و 2D در ده سال گذشته انجام شده است. به عنوان مثال، $\text{MoS}_2/\text{montmorillonite}$ ، SiC/G ، Cu/GO [۱۱۲]، SiO_2/GO [۱۱۰]، Au/GO [۱۰۹]، Ni/GO [۹۷]، Ni/MoS_2 [۱۰۸]، CSs/MoS_2 ، Ag/MoS_2 [۱۱۳]، Cu/WS_2 [۱۱۴]، Cs/G [۱۱۵] و غیره.

1D/2D ۳-۴-۳

با روش مصنوعی ابتکاری، نانوکامپوزیت‌های هیبریدی $\text{MS}_2@\text{CNT}$ به دست آمد و سازگاری در روغن‌های غیرقطبی با پوششی از اولیل آمین به دست آمد [۱۱۶]. در این نوع نانوساختار، سطح بیرونی CNT با ۱ تا ۳ نانو صفحه MoS_2 پوشانده شد و به روان کاری سینرژیک منحصر به فرد دست پیدا کردند.

0D/0D ۴-۴-۳

در مقایسه با نانوذرات منفرد با عامل سازی یا آماده سازی به روش های خاص، نانوکامپوزیت های 0D/0D توانایی ضعیف تری دارند. ضریب اصطکاک و کاهش سایش اکثر نانوکامپوزیت‌های 0D/0D کم‌تر از ۵۰٪ بوده است، به عنوان مثال، ضریب اصطکاک و سایش نانو افزودنی‌های $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ به ترتیب ۵۰٪ و ۲۲٪ کاهش یافت [۱۱۷]، $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ۵۰٪ و ۳۰٪ [۱۱۸] و $\text{C}_3\text{N}_4/\text{Cu}$ ۳۵٪ و ۳۰٪ [۱۱۹]، $\text{serpantin}/\text{La}(\text{OH})_3$ ۲۵٪ و ۴۲٪ [۲۱۳]، $\text{TiO}_2/\text{C}_3\text{N}_4$ ۲۳٪ و ۱۷٪ [۱۲۰] بودند. شایان ذکر است که ضریب اصطکاک و سایش $\text{MoS}_2/\text{C}_{60}$ به ترتیب تقریباً ۲۵٪ و ۹۷٪ کاهش یافت. با این حال، تحت شرایط یکسان، C_{60} با مساحت سطح کم‌تر نمی‌تواند نانوذرات MoS_2 را در برابر اکسیداسیون در طول فرآیند لغزش محافظت کند و تجمع، اثر هم افزایی آنها را ضعیف می‌کند [۲۰].

2D/2D ۵-۴-۳

مورفولوژی لایه اجازه رسوب در ناحیه لغزنده را می‌دهد و سطوح لغزنده را از تماس مستقیم محافظت می‌کند. علاوه بر این، به دلیل خواص مختلف نانو مواد دوبعدی، نانوصفحات کامپوزیت می‌توانند بر محدودیت‌ها غلبه کنند [۱۲۱]. نانوصفحات کامپوزیت MoS_2/G به عنوان مواد افزودنی مورد بحث قرار گرفت [۱۲۲] و عملکرد تریبولوژیکی برجسته آنها به لایه‌های مرزی سطحی پایدار که در طول لغزش تشکیل شده بودند مرتبط بود. علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های بوهمیت GO و

BN/G به عنوان افزودنی های روغن روان کننده، تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند که هر دو نسبت به نانو صفحه منفرد همگن، کاهش اصطکاک و خواص ضدسایش بهتری را نشان دادند [۱۲۱].

مقاومت اکسیداسیون ضعیف MoS_2 مشکلی جهت کاربرد آن است. ترکیب با سایر نانو مواد دارای مقاومت اکسیداسیون قوی تر یک روش مؤثر است. برای همه نانو مواد با مقاومت اکسیداسیون ضعیف، چهار روش وجود دارد: (۱) همان طور که در بالا ذکر شد، یک ماده با مقاومت اکسیداسیون قوی تر را برای تهیه کامپوزیت انتخاب کرده و مزایای آنها را ترکیب کنید. ماده ای با مقاومت اکسیداسیون ضعیف می تواند با پوشش ماده دیگری محافظت شود. بر این اساس، ویژگی های تریبولوژیکی ممکن است با افزودن مواد مختلف تغییر کند. (۲) آنتی اکسیدان های سنتی را به روغن اضافه کنید تا مقاومت اکسیداسیون را افزایش دهید که روشی آسان و مؤثر است. (۳) آنتی اکسیدان ها به عنوان گروه های اصلاح کننده سطح برای پوشش نانو موادی که به راحتی اکسید می شوند، مورد استفاده قرار می گیرند. به وسیله آن می توان به پراکندگی خوب نانو مواد نیز دست یافت. (۴) سولفوراسیون تریبوشیمیایی در-محل (in-situ) اکسیدها. اکسیدها را به عنوان مواد افزودنی در روغن پایه حاوی عنصر گوگرد انتخاب کنید و در حین لغزش سولفوریزاسیون تریبوشیمیایی در-محل رخ می دهد. ثابت شد که این روش مؤثر است و خواص تریبولوژیکی تریبو فیلم بهتر می باشد، اما عنصر گوگرد قابل اجتناب نیست.

۴- چشم انداز

تا به امروز، استفاده های بسیاری از نانو مواد به عنوان افزودنی های روغن روان کننده شده است که نشان از توسعه پر رونق در این حوزه دارد. پیشنهاد اولیه این مقاله برای انتخاب نانو مواد مناسب برای دستیابی به عملکرد تریبولوژیکی خوب ارائه شده است. با این حال، تجزیه و تحلیل فرآیند تجربی و داده ها نشان می دهد که هنوز چالش هایی در برنامه های کاربردی وجود دارد. موارد زیر ممکن است پیشنهادات مهم تحقیقات آینده در زمینه توسعه نانو مواد به عنوان افزودنی های روغن روان کننده باشد.

(۱) تحقیقات فرابعدی

در پژوهش های مختلف با استفاده از نانو مواد یکسان، ممکن است داده های تجربی مختلفی به دست آید که ممکن است به فرآیندهای آزمایشی مختلف، سطوح تماس و ساختار نانو مواد یا موارد دیگر مربوط باشد. برای توضیح این مشکل، تحقیقات فرا بعدی در تریبولوژی و مکانیزم مولکولی در عمق مورد نیاز است. بنابراین، شاید در نظر گرفتن چندین زمینه مورد نیاز باشد. (الف) کاربرد شبیه سازی دینامیک مولکولی [۱۲۳] رفتارهای تریبولوژیکی برای نانو مواد و ترکیبی از شبیه سازی مولکولی و آزمایش های تریبولوژیکی. (ب) تحقیق سیستماتیک در مورد نظم تبدیل فیلم روغن، سطح تماس، نانو مواد و انرژی در طول فرآیند اصطکاک و تغییر نظم عملکردهای تریبولوژیکی تحت شرایط کاری مختلف. (ج) سیستم برهم کنش مولکولی بین روغن، سطح تماس، نانو مواد و سایر افزودنی های معمولی.

(۲) طراحی نانوذرات

به طور کلی، محققان مطالعه نانو موادی که قبلاً یافته شده اند را ترجیح می دهند. بنابراین، تغییر الگوی سنتی تحقیق برای آشکارسازی و دستیابی به نانو مواد جدید با رفتارهای تریبولوژیکی هدفمند حائز اهمیت است. به عنوان مثال، هندسه، اندازه در مقیاس نانو و عامل سازی MOF و CF را می توان به صورت دقیق کنترل و طراحی کرد. ضمن آن که مطالعه کاربرد آنها در روغن روان کننده قابل توجه است. با این حال، مطالعه MOFs به عنوان افزودنی های روغن روان کننده در سال ۲۰۱۱ و CFs در سال ۲۰۱۷ آغاز شد. تحقیقات اندکی انجام شده است و همین امر در مورد ILS نیز صادق است. طراحی نانو مواد دشوار است اما ممکن است برای دستیابی به عملکردهای تریبولوژیکی بهتر، مؤثر باشد.

(۳) تهیه توسط روش برتر

بسیاری از روش‌های آماده‌سازی نانو مواد برای دست یابی به عملکرد تریبولوژیکی بهتر انجام شده‌اند اما برخی از مشکلات مانند هزینه بالا، تولید در مقیاس کوچک، تکرارپذیری ضعیف، نیاز به طولانی و غیره وجود دارد و در صنعت فعلی به سختی قابل دسترسی است. روش‌های یک مرحله‌ای و کم هزینه که می‌توانند به تهیه نانو مواد با عملکرد تریبولوژیکی خوب دست یابند، امید بخش هستند. از سوی دیگر، به دلیل منابع فراوان و هزینه کم، کانی‌های طبیعی ارزش کاوش در تریبولوژی را دارند. با این حال، تلاش‌های بیشتری برای بهینه‌سازی عملکرد تریبولوژیکی آنها مورد نیاز است.

(۴) تحقیق در مورد مکانیزم‌های هم افزایی

با استفاده از اثر روان‌کنندگی هم افزایی، ترکیب دو یا چند نانو مواد دارای رفتار تریبولوژیکی بهتری نسبت به نانو مواد منفرد تحت شرایط کاری یکسان است. از سوی دیگر، ادغام نانو مواد با سایر افزودنی‌های معمولی مؤثر و اجتناب ناپذیر است. با این حال، اثر روان‌کاری سینرژیک و مکانیزم مشارکتی به طور قطعی در سطح مولکولی تأیید نشده است، که این امر برای طراحی سیستم روان‌کاری ضروری است.

(۵) حفاظت از محیط زیست

به حداقل رساندن و حذف استفاده از گوگرد و فسفر موجود در افزودنی‌های روغن روان‌کننده امری ضروری است. شکی نیست که نانو مواد سازگار با محیط زیست به کاهش مصرف انرژی و اثر کربن کمک شایانی می‌نماید. افزودنی‌های نانو مواد سازگار با محیط زیست برای پایداری محیط مفید هستند و الزامات تریبولوژی سبز [۱۲۴] را برآورده می‌کنند، که زمینه جدیدی برای تریبولوژیست‌ها می‌باشد.

مراجع

- [1] Holmberg K, Siilasto R, Laitinen T, Andersson P, Jäsberg A. Global energy consumption due to friction in paper machines. *Tribol Int* 62: 58–77 (2013)
- [2] Zhang S W. Recent developments of green tribology. *Surf Topogr Metrol Prop* 4(2): 023004 (2016)
- [3] Holmberg K, Andersson P, Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribol Int* 47: 221–234 (2012)
- [4] Gulzar M, Masjuki H H, Kalam M A, Varman M, Zulkifli N W M, Mufti R A, Zahid R. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *J Nanoparticle Res* 18(8): 223 (2016)
- [5] Spikes H. Friction modifier additives. *Tribol Lett* 60(1): 5 (2015)
- [6] Zhu S Y, Cheng J, Qiao Z H, Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review. *Tribol Int* 133: 206–223 (2019)
- [7] Liu L C, Zhou M, Jin L, Li L C, Mo Y T, Su G S, Li X, Zhu H W, Tian Y. Recent advances in friction and lubrication of graphene and other 2D materials: Mechanisms and applications. *Friction* 7(3): 199–216 (2019)
- [8] Zelenák V, Saldan I. Factors affecting hydrogen adsorption in metal-organic frameworks: A short review. *Nanomaterials* 11(7): 1638 (2021)
- [9] Tang W W, Zhang Z, Li Y F. Applications of carbon quantum dots in lubricant additives: A review. *J Mater Sci* 56(21): 12061–12092 (2021)
- [10] Kogovšek J, Kalin M. Various MoS₂-, WS₂- and C-based micro- and nanoparticles in boundary lubrication. *Tribol Lett* 53(3): 585–597 (2014)
- [11] Yang H M, Li J S, Zeng X Q. Tribological behavior of nanocarbon materials with different dimensions in aqueous systems. *Friction* 8(1): 29–46 (2020)

- [12] Duan L L, Li H, Zhang Y T. Synthesis of hybrid nanoflowerbased carbonic anhydrase for enhanced biocatalytic activity and stability. *ACS Omega* 3(12): 18234–18241 (2018)
- [13] Duan L L, Wang H X, Liu J D, Zhang Y T. Three-dimensional self-assembled graphene oxide/enzyme in the presence of copper phosphate. *Biomed Phys Eng Express* 1(4): 045101 (2015)
- [14] Uflyand I E, Zhinzhiro V A, Burlakova V E. Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development. *Friction* 7(2): 93–116 (2019)
- [15] Spear J C, Ewers B W, Batteas J D. 2D-nanomaterials for controlling friction and wear at interfaces. *Nano Today* 10(3): 301–314 (2015)
- [16] Jin Y L, Li J, Cheng B X, Jia D, Tu J S, Zhan S P, Liu L, Duan H T. Thermal oxidation behavior of trimethylolpropane trioleate base oil when exposed to iron surfaces. *Ind Lubr Tribol* 72(3): 473–478 (2019)
- [17] Wang S Z, McGuirk C M, Ross M B, Wang S Y, Chen P C, Xing H, Liu Y, Mirkin C A. General and direct method for preparing oligonucleotide-functionalized metal–organic framework nanoparticles. *J Am Chem Soc* 139(29): 9827–9830 (2017)
- [18] Bhattacharjee S, Jang M S, Kwon H J, Ahn W S. Zeolitic imidazolate frameworks: Synthesis, functionalization, and catalytic/adsorption applications. *Catal Surv From Asia* 18(4): 101–127 (2014)
- [19] Yu L, Zhang L, Ye F, Sun M, Cheng X L, Diao G Q. Preparation and tribological properties of surface-modified nano-Y₂O₃ as additive in liquid paraffin. *Appl Surf Sci* 263: 655–659 (2012)
- [20] Gong K L, Lou W J, Zhao G Q, Wu X H, Wang X B. MoS₂ nanoparticles grown on carbon nanomaterials for lubricating oil additives. *Friction* 9(4): 747–757 (2021)
- [21] Bojarska Z, Kopytowski J, Mazurkiewicz-Pawlicka M, Bazarnik P, Gierlotka S, Rozeń A, Makowski Ł. Molybdenum disulfide-based hybrid materials as new types of oil additives with enhanced tribological and rheological properties. *Tribol Int* 160: 106999 (2021)
- [22] Chou R, Battez A H, Cabello J J, Viesca J L, Osorio A, Sagastume A. Tribological behavior of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles. *Tribol Int* 43(12): 2327–2332 (2010)
- [23] Sarno M, Mustafa W A A, Senatore A, Scarpa D. One-step “green” synthesis of dispersable carbon quantum dots/poly (methyl methacrylate) nanocomposites for tribological applications. *Tribol Int* 148: 106311 (2020)
- [24] Ali M K A, Hou X J, Abdelkareem M A A. Anti-wear properties evaluation of frictional sliding interfaces in automobile engines lubricated by copper/graphene nanolubricants. *Friction* 8(5): 905–916 (2020)
- [25] Choi Y, Lee C, Hwang Y, Park M, Lee J, Choi C, Jung M. Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil. *Curr Appl Phys* 9(2): e124–e127 (2009)
- [26] Chen Y F, Zhang Y J, Zhang S M, Yu L G, Zhang P Y, Zhang Z J. Preparation of nickel-based nanolubricants via a facile *in situ* one-step route and investigation of their tribological properties. *Tribol Lett* 51(1): 73–83 (2013)
- [27] Kumara C, Luo H M, Leonard D N, Meyer H M, Qu J. Organic-modified silver nanoparticles as lubricant additives. *ACS Appl Mater Interfaces* 9(42): 37227–37237 (2017)
- [28] Zhang S W, Hu L T, Feng D P, Wang H Z. Anti-wear and friction-reduction mechanism of Sn and Fe nanoparticles as additives of multialkylated cyclopentanes under vacuum condition. *Vacuum* 87: 75–80 (2013)
- [29] Padgurskas J, Rukuiza R, Prosyčėvas I, Kreivaitis R. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles. *Tribol Int* 60: 224–232 (2013)
- [30] Abad M D, Sánchez-López J C. Tribological properties of surface-modified Pd nanoparticles for electrical contacts. *Wear* 297(1–2): 943–951 (2013)
- [31] Beckford S, Cai J Y, Chen J Y, Zou M. Use of Au nanoparticle-filled PTFE films to produce low-friction and low-wear surface coatings. *Tribol Lett* 56(2): 223–230 (2014)
- [32] Flores-Castañeda M, Camps E, Camacho-López M, Muhl S, García E, Figueroa M. Bismuth nanoparticles synthesized by laser ablation in lubricant oils for tribological tests. *J Alloys Compd* 643: S67–S70 (2015)
- [33] Zhang S W, Li Y, Hu L T, Feng D P, Wang H Z. Antiwear effect of Mo and W nanoparticles as additives for multialkylated cyclopentanes oil in vacuum. *J Tribol* 139(2): 021607 (2017)

- [34] He B L, Liu S, Zhao X Y, Liu J X, Ye Q, Liu S J, Liu W M. Dialkyl dithiophosphate-functionalized gallium-based liquidmetal nanodroplets as lubricant additives for antiwear and friction reduction. *ACS Appl Nano Mater* 3(10): 10115–10122 (2020)
- [35] Denison G H, Condit P C. Oxidation of lubricating oils. *Ind Eng Chem* 37(11):1102–1108 (1945)
- [36] Dassenoy F, Jenei I Z, Pavan S, Galipaud J, Thersleff T, Wieber S, Hagemann M, Ness D. Performance and lubrication mechanism of new TiO₂ nanoparticle-based high-performance lubricant additives. *Tribol Trans* 64(2): 325–340 (2021)
- [37] Wang N, Wang H G, Ren J F, Gao G, Zhao G R, Yang Y W, Wang J Q. High-efficient and environmental-friendly PTFE@SiO₂ core-shell additive with excellent AW/EP properties in PAO6. *Tribol Int* 158: 106930 (2021)
- [38] Liu X Y, Xu N, Li W M, Zhang M, Chen L F, Lou W J, Wang X B. Exploring the effect of nanoparticle size on the tribological properties of SiO₂/polyalkylene glycol nanofluid under different lubrication conditions. *Tribol Int* 109: 467–472 (2017)
- [39] Peña-Parás L, Taha-Tijerina J, Garza L, Maldonado-Cortés D, Michalczewski R, Lapray C. Effect of CuO and Al₂O₃ nanoparticle additives on the tribological behavior of fully formulated oils. *Wear* 332–333: 1256–1261 (2015)
- [40] Luo T, Wei X W, Huang X, Huang L, Yang F. Tribological properties of Al₂O₃ nanoparticles as lubricating oil additives. *Ceram Int* 40(5): 7143–7149 (2014)
- [41] Mousavi S B, Heris S Z, Estellé P. Experimental comparison between ZnO and MoS₂ nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant. *Sci Rep* 10(1): 5813 (2020)
- [42] Zhou G H, Zhu Y F, Wang X M, Xia M J, Zhang Y, Ding H Y. Sliding tribological properties of 0.45% carbon steel lubricated with Fe₃O₄ magnetic nano-particle additives in baseoil. *Wear* 301(1–2): 753–757 (2013)
- [43] Battez A H, González R, Viesca J L, Fernández J E, Díaz Fernández J M, Machado A, Chou R, Riba J. CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants. *Wear* 265(3–4): 422–428 (2008)
- [44] Du P F, Chen G X, Song S Y, Chen H L, Li J, Shao Y. Tribological properties of muscovite, CeO₂ and their composite particles as lubricant additives. *Tribol Lett* 62(2): 29 (2016)
- [45] Xiong S, Liang D, Kong F X. Effect of pH on the tribological behavior of Eu-doped WO₃ nanoparticle in water-based fluid. *Tribol Lett* 68(4): 126 (2020)
- [46] Chen S, Liu W M. Characterization and antiwear ability of non-coated ZnS nanoparticles and DDP-coated ZnS nanoparticles. *Mater Res Bull* 36(1–2): 137–143 (2001)
- [47] Chen S, Liu W M. Oleic acid capped PbS nanoparticles: Synthesis, characterization and tribological properties. *Mater Chem Phys* 98(1): 183–189 (2006)
- [48] Kang X H, Wang B, Zhu L, Zhu H. Synthesis and tribological property study of oleic acid-modified copper sulfide nanoparticles. *Wear* 265(1–2): 150–154 (2008)
- [49] Osim W, Stojanovic A, Akbarzadeh J, Peterlik H, Binder W H. Surface modification of MoS₂ nanoparticles with ionic liquid-ligands: Towards highly dispersed nanoparticles. *Chem Commun* 49(81): 9311–9313 (2013)
- [50] Zhao J, Li Y R, He Y Y, Luo J B. *In situ* green synthesis of the new sandwichlike nanostructure of Mn₃O₄/graphene as lubricant additives. *ACS Appl Mater Interfaces* 11(40): 36931–36938 (2019)
- [51] Rabaso P, Ville F, Dassenoy F, Diaby M, Afanasiev P, Cavoret J, Vacher B, le Mogne T. Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS₂ nanoparticles on friction and wear reduction. *Wear* 320: 161–178 (2014)
- [52] Lahouij I, Bucholz E W, Vacher B, Sinnott S B, Martin J M, Dassenoy F. Lubrication mechanisms of hollow-core inorganic fullerene-like nanoparticles: Coupling experimental and computational works. *Nanotechnology* 23(37): 375701 (2012)
- [53] Qiu S Q, Dong J X, Chen G X. Tribological properties of CeF₃ nanoparticles as additives in lubricating oils. *Wear* 230(1): 35–38 (1999)

- [54] Li Z W, Hou X, Yu L G, Zhang Z J, Zhang P Y. Preparation of lanthanum trifluoride nanoparticles surface-capped by tributyl phosphate and evaluation of their tribological properties as lubricant additive in liquid paraffin. *Appl Surf Sci* 292: 971–977 (2014)
- [55] Reeves C J, Menezes P L, Lovell M R, Jen T C. The size effect of boron nitride particles on the tribological performance of biolubricants for energy conservation and sustainability. *Tribol Lett* 51(3): 437–452 (2013)
- [56] Chou C C, Lee S H. Rheological behavior and tribological performance of a nanodiamond-dispersed lubricant. *J Mater Process Technol* 201(1–3): 542–547 (2008)
- [57] Alazemi A A, Etacheri V, Dysart A D, Stacke L E, Pol V G, Sadeghi F. Ultrasooth submicrometer carbon spheres as lubricant additives for friction and wear reduction. *ACS Appl Mater Interfaces* 7(9): 5514–5521 (2015)
- [58] Ye Q, Liu S, Xu F, Zhang J, Liu S J, Liu W M. Nitrogen–phosphorus codoped carbon nanospheres as lubricant additives for antiwear and friction reduction. *ACS Appl Nano Mater* 3(6): 5362–5371 (2020)
- [59] Wang B G, Tang W W, Lu H S, Huang Z Y. Ionic liquid capped carbon dots as a high-performance friction-reducing and antiwear additive for poly(ethylene glycol). *J Mater Chem A* 4(19): 7257–7265 (2016)
- [60] Ye M T, Cai T, Zhao L N, Liu D, Liu S G. Covalently attached strategy to modulate surface of carbon quantum dots: Towards effectively multifunctional lubricant additives in polar and apolar base fluids. *Tribol Int* 136: 349–359 (2019)
- [61] Mou Z H, Wang B G, Lu H S, Quan H P, Huang Z Y. Branched polyelectrolyte grafted carbon dots as the high-performance friction-reducing and antiwear additives of polyethylene glycol. *Carbon* 149: 594–603 (2019)
- [62] Mou Z H, Wang B G, Lu H S, Dai S S, Huang Z Y. Synthesis of poly(ionic liquid)s brush-grafted carbon dots for high-performance lubricant additives of polyethylene glycol. *Carbon* 154: 301–312 (2019)
- [63] Yao Y L, Wang X M, Guo J J, Yang X W, Xu B S. Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive. *Mater Lett* 62(16): 2524–2527 (2008)
- [64] He C, Yan H H, Li X J, Wang X H. One-step rapid fabrication of high-purity onion-like carbons as efficient lubrication additives. *J Mater Sci* 56(2): 1286–1297 (2021)
- [65] Gu Y F, Fei J, Zheng X H, Li M, Huang J F, Qu M, Zhang L J. Graft PEI ultra-antiwear nanolayer onto carbon spheres as lubricant additives for tribological enhancement. *Tribol Int* 153: 106652 (2021)
- [66] Shahmohamadi H, Rahmani R, Rahnejat H, Garner C P, Balodimos N. Thermohydrodynamics of lubricant flow with carbon nanoparticles in tribological contacts. *Tribol Int* 113: 50–57 (2017)
- [67] Hao L F, Li J S, Xu X H, Ren T H. Preparation and tribological properties of a kind of lubricant containing calcium borate nanoparticles as additives. *Ind Lubr Tribol* 64(1): 16–22 (2012)
- [68] Bakunin V N, Suslov A Y, Kuzmina G N, Parenago O P, Topchiev A V. Synthesis and application of inorganic nanoparticles as lubricant components—A review. *J Nanopart Res* 6(2–3): 273–284 (2004)
- [69] Furukawa H, Cordova K E, O’Keeffe M, Yaghi O M. The chemistry and applications of metal–organic frameworks. *Science* 341(6149): 1230444 (2013)
- [70] Shi Q, Chen Z F, Song Z W, Li J P, Dong J X. Synthesis of ZIF-8 and ZIF-67 by steam-assisted conversion and an investigation of their tribological behaviors. *Angew Chem Int Ed* 50(3): 672–675 (2011)
- [71] Wu W, Liu J X, Li Z H, Zhao X Y, Liu G Q, Liu S J, Ma S H, Li W M, Liu W M. Surface-functionalized nanoMOFs in oil for friction and wear reduction and antioxidation. *Chem Eng J* 410: 128306 (2021)
- [72] Qu J, Bansal D G, Yu B, Howe J Y, Luo H M, Dai S, Li H Q, Blau P J, Bunting B G, Mordukhovich G, et al. Antiwear performance and mechanism of an oil-miscible ionic liquid as a lubricant additive. *ACS Appl Mater Interfaces* 4(2): 997–1002 (2012)
- [73] Zhou Y, Dyck J, Graham T W, Luo H M, Leonard D N, Qu J. Ionic liquids composed of phosphonium cations and organophosphate, carboxylate, and sulfonate anions as lubricant antiwear additives. *Langmuir* 30(44): 13301–13311(2014)
- [74] Huang G W, Yu Q L, Ma Z F, Cai M R, Zhou F, Liu W M. Oil-soluble ionic liquids as antiwear and extreme pressure additives in poly- α -olefin for steel/steel contacts. *Friction* 7(1): 18–31 (2019)

- [75] Zhou Y, Qu J. Ionic liquids as lubricant additives: A review. *ACS Appl Mater Interfaces* 9(4): 3209–3222 (2017)
- [76] Chen C S, Chen X H, Xu L S, Yang Z, Li W H. Modification of multi-walled carbon nanotubes with fatty acid and their tribological properties as lubricant additive. *Carbon* 43(8): 1660–1666 (2005)
- [77] Cursaru D L, Andronesu C, Pirvu C, Ripeanu R. The efficiency of Co-based single-wall carbon nanotubes (SWNTs) as an AW/EP additive for mineral base oils. *Wear* 290–291: 133–139 (2012)
- [78] Kumar H, Harsha A P. Enhanced lubrication ability of polyalphaolefin and polypropylene glycol by COOHfunctionalized multiwalled carbon nanotubes as an additive. *J Mater Eng Perform* 30(2): 1075–1089 (2021)
- [79] Gong K L, Wu X H, Zhao G Q, Wang X B. Tribological properties of polymeric aryl phosphates grafted onto multi-walled carbon nanotubes as high-performances lubricant additive. *Tribol Int* 116: 172–179 (2017)
- [80] Joly-Pottuz L, Dassenoy F, Martin J M, Vrbanic D, Mrzel A, Mihailovic D, Vogel W, Montagnac G. Tribological properties of Mo–S–I nanowires as additive in oil. *Tribol Lett* 18(3): 385–393 (2005)
- [81] Dassenoy F, Joly-Pottuz L, Martin J M, Vrbanic D, Mrzel A, Mihailovic D, Vogel W, Montagnac G. Tribological performances of Mo6S3I6 nanowires. *J Eur Ceram Soc* 27(2–3): 915–919 (2007)
- [82] Kalin M, Kogovšek J, Remškar M. Mechanisms and improvements in the friction and wear behavior using MoS2 nanotubes as potential oil additives. *Wear* 280–281: 36–45 (2012)
- [83] Tomala A M, Ripoll M R, Michalczewski R. Tribological synergy between classical ZDDP and innovative MoS2 and MoO3 nanotube additives at elevated temperatures. *Proc Estonian Acad Sci* 68(2): 178–184 (2019)
- [84] Zhang L L, Tu J P, Wu H M, Yang Y Z. WS2 nanorods prepared by self-transformation process and their tribological properties as additive in base oil. *Mater Sci Eng A* 454–455: 487–491 (2007)
- [85] Chen L J, Zhu D Y. Preparation and tribological properties of unmodified and oleic acid-modified CuS nanorods as lubricating oil additives. *Ceram Int* 43(5): 4246–4251 (2017)
- [86] Xiao H P, Liu S H. 2D nanomaterials as lubricant additive: A review. *Mater Des* 135: 319–332 (2017)
- [87] Chen T D, Xia Y Q, Jia Z F, Liu Z L, Zhang H B. Synthesis, characterization, and tribological behavior of oleic acid capped graphene oxide. *J Nanomater* 2014: 654145 (2014)
- [88] Ci X J, Zhao W J, Luo J, Wu Y M, Ge T H, Xue Q J, Gao X L, Fang Z W. How the fluorographene replaced graphene as nanoadditive for improving tribological performances of GTL-8 based lubricant oil. *Friction* 9(3): 488–501 (2021)
- [89] Zhang W, Zhou M, Zhu H W, Tian Y, Wang K L, Wei J Q, Ji F, Li X, Li Z, Zhang P, et al. Tribological properties of oleic cid-modified graphene as lubricant oil additives. *J Phys D Appl Phys* 44(20): 205303 (2011)
- [90] Gusain R, Mungse H P, Kumar N, Ravindran T R, Pandian R, Sugimura H, Khatri O P. Covalently attached graphene–ionic liquid hybrid nanomaterials: Synthesis, characterization and tribological application. *J Mater Chem A* 4(3): 926–937 (2016)
- [91] Paul G, Shit S, Hirani H, Kuila T, Murmu N C. Tribological behavior of dodecylamine functionalized graphene nanosheets dispersed engine oil nanolubricants. *Tribol Int* 131: 605–619 (2019)
- [92] Gan C L, Liang T, Chen D L, Li W, Fan X Q, Tang G X, Lin B, Zhu M H. Phosphonium–organophosphate modified graphene gel towards lubrication applications. *Tribol Int* 145: 106180 (2020)
- [93] Eswaraiah V, Sankaranarayanan V, Ramaprabhu S. Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications. *ACS Appl Mater Interfaces* 3(11): 4221–4227 (2011)
- [94] Gu W C, Chu K, Lu Z B, Zhang G G, Qi S S. Synergistic effects of 3D porous graphene and T161 as hybrid lubricant additives on 316 ASS surface. *Tribol Int* 161: 107072 (2021)
- [95] Hou X B, Ma Y J, Bhandari G, Yin Z B, Dai L Y, Liao H F, Wei Y K. Preparation and tribological properties of graphene lubricant additives for low-sulfur fuel by dielectric barrier discharge plasma-assisted ball milling. *Processes* 9(2): 272 (2021)
- [96] Guimarey M J G, Viesca J L, Abdelkader A M, Thomas B, Battez A H, Hadfield M. Electrochemically exfoliated graphene and molybdenum disulfide nanoplatelets as lubricant additives. *J Mol Liq* 342: 116959 (2021)

- [97] Rajendhran N, Palanisamy S, Periyasamy P, Venkatachalam R. Enhancing of the tribological characteristics of the lubricant oils using Ni-promoted MoS₂ nanosheets as nano-additives. *Tribol Int* 118: 314–328 (2018)
- [98] Wu Z Z, Wang D Z, Wang Y, Sun A K. Preparation and tribological properties of MoS₂ nanosheets. *Adv Eng Mater* 12(6): 534–538 (2010)
- [99] Wu H X, Wang L P, Johnson B, Yang S C, Zhang J F, Dong G N. Investigation on the lubrication advantages of MoS₂ nanosheets compared with ZDDP using block-on-ring tests. *Wear* 394–395: 40–49 (2018)
- [100] Wang H D, Liu Y H, Liu W R, Wang R, Wen J G, Sheng H P, Peng J F, Erdemir A, Luo J B. Tribological behavior of NiAl-layered double hydroxide nanoplatelets as oil-based lubricant additives. *ACS Appl Mater Interfaces* 9(36):30891–30899 (2017)
- [101] Bai Z M, Wang Z Y, Zhang T G, Fu F, Yang N. Synthesis and characterization of Co–Al–CO₃ layered double-metal hydroxides and assessment of their friction performances. *Appl Clay Sci* 59–60: 36–41 (2012)
- [102] Wang H D, Wang Y, Liu Y H, Zhao J, Li J J, Wang Q, Luo J B. Tribological behavior of layered double hydroxides with various chemical compositions and morphologies as grease additives. *Friction* 9(5): 952–962 (2021)
- [103] Wang Q J, Hou T L, Wang W, Zhang G L, Gao Y, Wang K S. Tribological properties of black phosphorus nanosheets as oil-based lubricant additives for titanium alloy-steel contacts. *R Soc Open Sci* 7(9): 200530 (2020)
- [104] Wu H X, Wang L P, Dong G N. Origin of the tribofilm from MoS₂ nanoparticle oil additives: Dependence of oil film thickness on particle aggregation in rolling point contact. *Friction* 9(6): 1436–1449 (2021)
- [105] Vardhaman B S A, Amarnath M, Ramkumar J, Mondal K. Enhanced tribological performances of zinc oxide/MWCNTs hybrid nanomaterials as the effective lubricant additive in engine oil. *Mater Chem Phys* 253: 123447 (2020)
- [106] Qin Y, Wu M X, Yang G, Yang Y, Zhao L M. Tribological performance of magnesium silicate hydroxide/Ni composite as an oil-based additive for steel–steel contact. *Tribol Lett* 69(1): 19 (2021)
- [107] Cheng L H, Hu E Z, Chao X Q, Zhu R F, Hu K H, Hu X G. MoS₂/montmorillonite nanocomposite: Preparation, tribological properties, and inner synergistic lubrication. *Nano* 13(12): 1850144 (2018)
- [108] Alazemi A A, Dysart A D, Phuah X L, Pol V G, Sadeghi F. MoS₂ nanolayer coated carbon spheres as an oil additive for enhanced tribological performance. *Carbon* 110: 367–377 (2016)
- [109] Meng Y, Su F H, Chen Y Z. A novel nanomaterial of graphene oxide dotted with Ni nanoparticles produced by supercritical CO₂-assisted deposition for reducing friction and wear. *ACS Appl Mater Interfaces* 7(21): 11604–11612 (2015)
- [110] Meng Y, Su F H, Chen Y Z. Au/graphene oxide nanocomposite synthesized in supercritical CO₂ fluid as energy efficient lubricant additive. *ACS Appl Mater Interfaces* 9(45): 39549–39559 (2017)
- [111] Guo Y X, Guo L H, Li G T, Zhang L G, Zhao F Y, Wang C, Zhang G. Solvent-free ionic nanofluids based on graphene oxide–silica hybrid as high-performance lubricating additive. *Appl Surf Sci* 471: 482–493 (2019)
- [112] Meng Y, Su F H, Chen Y Z. Synthesis of nano-Cu/ graphene oxide composites by supercritical CO₂-assisted deposition as a novel material for reducing friction and wear. *Chem Eng J* 281: 11–19 (2015)
- [113] Luo T, Chen X C, Wang P, Li C C, Cao B Q, Zeng H B. Tribology properties: Laser irradiation-induced SiC@graphene sub-microspheres: A bioinspired core–shell structure for enhanced tribology properties. *Adv Mater Interfaces* 5(5): 1870021 (2018)
- [114] Xu Z, Lou W J, Zhao G Q, Zheng D D, Hao J Y, Wang X B. Cu nanoparticles decorated WS₂ nanosheets as a lubricant additive for enhanced tribological performance. *RSC Adv* 9(14): 7786–7794 (2019)
- [115] Radhika P, Sobhan C B, Chakravorti S. Improved tribological behavior of lubricating oil dispersed with hybrid nanoparticles of functionalized carbon spheres and graphene nano platelets. *Appl Surf Sci* 540:148402 (2021)
- [116] Altavilla C, Sarno M, Ciambelli P, Senatore A, Petrone V. New ‘chimie douce’ approach to the synthesis of hybrid nanosheets of MoS₂ on CNT and their anti-friction and anti-wear properties. *Nanotechnology* 24(12): 125601 (2013)

- [117] Jiao D, Zheng S H, Wang Y Z, Guan R F, Cao B Q. The tribology properties of alumina/silica composite nanoparticles as lubricant additives. *Appl Surf Sci* 257(13): 5720–5725 (2011)
- [118] Ali M K A, Hou X J, Turkson R F, Peng Z, Chen X D. Enhancing the thermophysical properties and tribological behaviour of engine oils using nano-lubricant additives. *RSC Adv* 6(81): 77913–77924 (2016)
- [119] Yang J, Zhang H T, Chen B B, Tang H, Li C S, Zhang Z Z. Fabrication of the g-C₃N₄/Cu nanocomposite and its potential for lubrication applications. *RSC Adv* 5(79): 64254–64260 (2015)
- [120] Ranjan N, Shende R C, Kamaraj M, Ramaprabhu S. Utilization of TiO₂/gC₃N₄ nanoadditive to boost oxidative properties of vegetable oil for tribological application. *Friction* 9(2): 273–287 (2021)
- [121] Liu Y C, Mateti S, Li C Q, Liu X, Glushenkov A M, Liu D, Li L H, Fabijanic D, Chen Y. Synthesis of composite nanosheets of graphene and boron nitride and their lubrication application in oil. *Adv Eng Mater* 20(2): 1700488 (2018)
- [122] Xu Y F, Peng Y B, Dearn K D, Zheng X J, Yao L L, Hu X G. Synergistic lubricating behaviors of graphene and MoS₂ dispersed in esterified bio-oil for steel/steel contact. *Wear* 342–343: 297–309 (2015)
- [123] Zhan S P, Xu H P, Duan H T, Pan L, Jia D, Tu J S, Liu L, Li J. Molecular dynamics simulation of microscopic friction mechanisms of amorphous polyethylene. *Soft Matter* 15(43): 8827–8839 (2019)
- [124] Zhang S W. Green tribology: Fundamentals and future development. *Friction* 1(2): 186–194 (2013)

Investigating the use of various types of nanomaterials as additives in industrial lubricants to improve their tribological properties

Navid Karimi Baba Ahmadi¹, Abbas Taghipoor^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

^{2*}Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: November 2022, Accepted: February 2022

Abstract

Friction and wear are ubiquitous, from nano-electro-mechanical systems in biomedicine to large-scale integrated electric propulsion in aircraft carriers. Applications of nanomaterials as lubricating oil additives have achieved great advances, which are of great significance to control friction and wear. This review focuses on the applications of nanomaterials in lubricating oil and comprehensively compares their tribological characteristics as lubricating oil additives. Finally, suggestions for future research on nanomaterials as lubricating oil additives are proposed. Hence, this review will promote a better fundamental understanding of nanomaterials for lubricating oil application and help to achieve the superior design of nanoadditives with outstanding tribological performances.

Keywords: nanomaterial, additive, friction, lubrication, wear.

*corresponding author: taghipoor@iaud.ac.ir

Cite this article as: Navid Karimi Baba Ahmadi, Abbas Taghipoor, Investigating the use of various types of nanomaterials as additives in industrial lubricants to improve their tribological properties. Journal of Energy Conversion, 2023, 10(1), 81-102. DOR: [20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3](https://doi.org/10.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3)