نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۱۰، شماره ۱، بهار۱۴۰۲، ص: ۸۱- ۱۰۲

J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 1, 2023: 81−102

DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3

بررسی کاربرد انواع نانو مواد به‌عنوان افزودنی در روان‌کارهای صنعتی برای بهبود خواص تریبولوژیکی آن‌ها

نوید کریمی بابا احمدی[۱] و عباس تقی‌پور[۲و*]

۱- دانشجو، گروه مهندسی مکانیک، واحددزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، navidkb92@gmail.com
۲ *- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحددزفول، 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 پیشرانه الکتریکی یکپارچه در مقیاس بزرگ در ناوهای هواپیمابر. کاربرد نانو مواد به عنوان افزودنی در روغن‌های روان‌کننده 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 روغن‌های روان‌کار تمرکز دارد و به طور جامع ویژگی‌های تریبولوژیکی این مواد را به عنوان افزودنی مورد مقایسه قرار می‌دهد. در پایان، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی در زمینه نانو مواد به منظور افزودنی در روغن‌های روان‌کننده، عنوان شده است. این بررسی به درک کلی استفاده از نانو مواد در روغن‌های روان‌کننده کمک نموده و دستیابی به طرحی بسیار خوب از نانو افزودنی‌ها با عملکردهای تریبولوژیکی برجسته را ارتقا می‌دهد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** taghipoor@iaud.ac.

کلمات کلیدی: : نانومواد، افزودنی، اصطکاک، روانکاری، سایش.

۱- مقدمه

به علت وجود اصطکاک در همه مکانیزم‌ها، انرژی زیادی جهت غلبه بر آن تلف می‌شود. در حال حاضر، منبع انرژی صنعت حمل و نقل عمدتاً سوخت‌های فسیلی بوده که بخش قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای موجود را تولید می‌کند. در مقیاس جهانی، سالانه ۱۰۰ میلیون تراژول انرژی، به دلیل تماس‌های تریبولوژیکی مصرف می‌شود و موجب انتشار ۷۰۰۰ میلیون تن گازهای گلخانه‌ای در سال می‌گردد [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 فناوری‌های مدرن از اهمیت بالایی برخوردار است و تاکنون یکی از مؤثرترین رویکردها در صنعت، روان‌کاری با روغن‌های روان‌کننده است [۳] که معمولاً در محیط‌های متنوع پایدار هستند. مواد افزودنی موجود در روغن پایه می‌توانند به کاهش اصطکاک و خواص ضد سایش عالی در سطوح اصطکاکی درگیر دست یابند [۴]. افزودنی‌های موجود را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: اصلاح کننده‌های اصطکاک آلی، پلیمرهای کاربردی، افزودنی‌های آلی محلول در روغن و نانو مواد [۵]. به عنوان یک دسته جدید از مواد، نانو مواد در زمینه بهبود خواص تریبولوژی کاربرد دارند

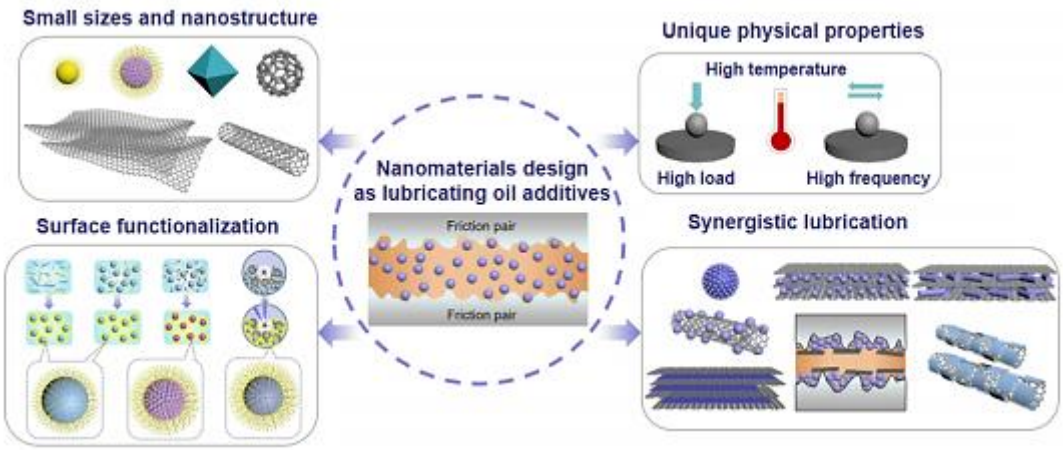
نحوه استناد به این مقاله: نوید کریمی بابا احمدی، عباس تقی پور. بررسی کاربرد انواع نانو مواد به عنوان افزودنی در روان‌کارهای صنعتی برای بهبود خواص تریبولوژیکی آن‌ها. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۱) :۸۱-۱۰۲.
DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

و عملکرد روان‌کاری مطلوبی به عنوان افزودنی در روغن‌های روان‌کننده ارائه می‌دهند [۶]. درسال‌های اخیر با اینکه تحقیقات زیادی در دهه‌های گذشته صورت گرفته است، توجه فزاینده‌ای به اکتشاف نانو مواد به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده وجود داشته است [۷]. این بررسی بر روی کاربرد های نانو مواد در انواع روغن‌های روان‌کننده، افزودنی‌های نانومواد با ابعاد متفاوت، مشکلات موجود و چشم انداز نانو مواد به‌عنوان افزودنی متمرکز است و هدف آن ارائه توصیه‌ای کاربردی برای انتخاب یک افزودنی نانو ماده مناسب، با توجه به شرایط کاری مختلف است.

۲- دسته بندی انواع طرح‌های نانو مواد به عنوان افزودنی‌های روغن‌های روان‌کننده

نانو مواد به یکی از شاخه‌های مورد توجه در علوم فیزیک، شیمی، زیست شناسی و علم مواد تبدیل شده است[۸]. توسعه و پیشرفت نانو مواد منجر به توسعه افزودنی‌های روغن روان‌کننده گردیده است. طیف گسترده‌ای از مطالعات برای بررسی پتانسیل نانو مواد و نانوکامپوزیت‌ها به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده انجام شده است[۹]. اهداف اصلی از کاربرد نانو مواد به‌عنوان افزودنی روغن روان‌کننده چیست؟ چگونه نانو مواد با طرح‌های مختلف می‌توانند به بهبود عملکرد تریبولوژیکی روان‌کارها کمک کند؟ دسته‌بندی انواع طرح‌های 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 طرح‌ها شامل موارد زیر است :

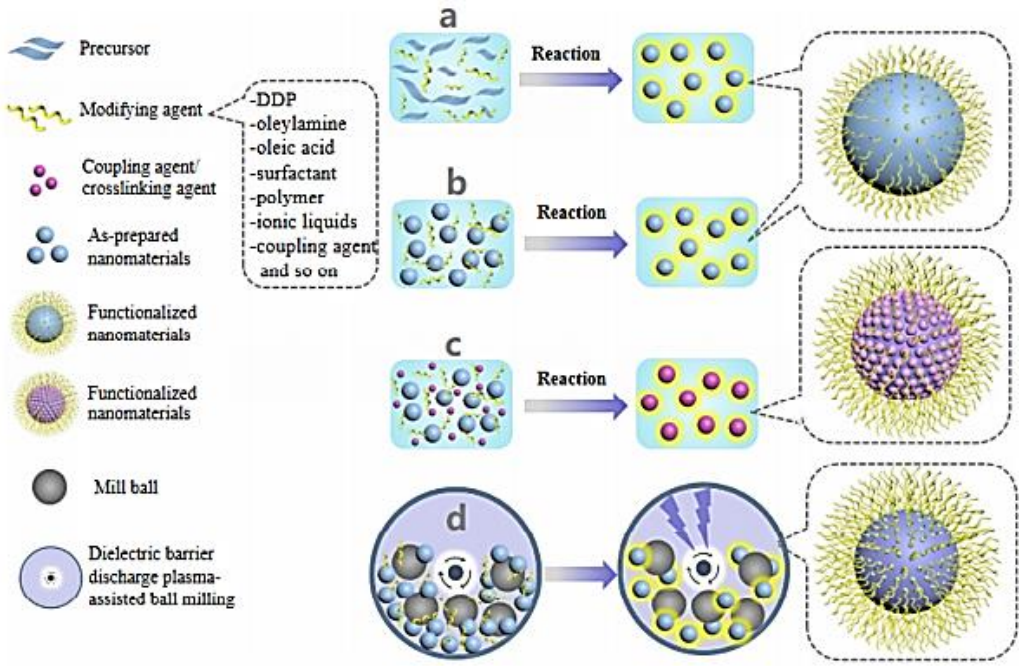
۱) اندازه‌های کوچک و نانو ساختار. اندازه نانو مواد در محدوده نانومتر می‌باشد که از ۱ تا ۵۰۰ نانومتر است [۵]. با حرکت براونی، نانو مواد عامل‌دار یا کوچک می‌توانند در روغن پراکنده شوند و بدون مزاحمت از فیلترها عبور کنند [۴]، یا حتی به راحتی می‌توانند در خلل و فرج سطوح تماس وارد شده و اصطکاک را کاهش دهند 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، لوله‌ای یا لایه‌ای یکی دیگر از موارد اساسی در طرح‌های نانو مواد است، زیرا به‌طور مستقیم با فشاری که نانو مواد در طول بارگذاری تحت تاثیر آن قرار می‌گیرند، ارتباط دارد [۱۱]. به ویژه، نانو مواد کروی می‌توانند ظرفیت بالایی از تحمل بار و فشار را نشان دهند.

۲) خواص فیزیکی منحصربه فرد. پژوهش‌های متعدد نشان داده است که یک ماده در اندازه‌های کوچک ممکن است ویژگی‌های خاصی از خود نشان دهد که مواد در اندازه بزرگ نشان نمی‌دهند. 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 روان‌کننده کمک می‌کند. با توجه به

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

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 نظرحرارتی پایدار هستند و برای دوام روغن روان‌کننده امری ضروری است [۱۶].



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

۳) 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[1] کمتری برای کاهش مقاومت اولیه دارند. با این‌حال، بیشتر نانو موادها بدون عامل مستعد تجمع در روغن غیرقطبی [۱۹] هستند که با فرایند هم زدن مکانیکی قابل تغییر نیست. دسته‌بندی‌های عامل‌سازی 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 عامل‌دار شدن سطح به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتد.

[1] - yield stress

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

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

۴) روان‌کاری هم‌افزایی[1]. یکی از روش‌های بالقوه برای بهبود خواص تریبولوژیکی نانو مواد و بهره‌گیری از مزایای ذکر شده جهت کاربردهای گسترده، تهیه نانوکامپوزیت‌ها است که می‌تواند اثر هم افزایی را در مرز فیلم نازک نشان دهد [۲۰].

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از اثر روان‌کاری هم‌افزایی، ترکیب دو یا چند نانو مواد دارای رفتار تریبولوژیکی بهتری نسبت به نانو مواد مجزا است. با توجه به مکانیزم‌های هم‌افزایی مختلف، نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند کاهش اصطکاک و ویژگی‌های ضد سایش، خاصیت ضد اکسیداسیون، پراکندگی روغن و ظرفیت باربری بالاتری را نشان دهند [۲۱]. افزودنی‌های نانو مواد می‌توانند افزودنی‌های ترکیب آلی و افزودنی‌های جامد روان‌کننده را به خوبی ادغام کنند.

۳- افزودنی‌های نانو مواد با ابعاد متفاوت

۳-۱ نانو مواد صفر بعدی (0D)

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

۳-۱-۱ فلزات

نانو فلزات به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده، 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 کرده‌اند [۲۴] و می‌توانند به طور قابل توجهی ویژگی‌های تریبولوژیکی روغن روان‌کننده را بهبود بخشند. در مقایسه با نانوذرات Coو Fe، افزودنی‌های نانوذرات مس می‌توانند اتلاف انرژی را کاهش دهند [۲۵] و برا ی اصطکاک و سایش، زمانی‌که 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 رو ی سطوح مالشی بود. با این حال، لایه روان کننده روغن قطبی روی سطح تماس فلز با فلز می‌تواند 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 اولفین‌ها (PAO[2]) می‌توانند در اندازه‌های مختلف نانو تنظیم شوند و پراکندگی خوبی داشته باشند. به دلیل انتشار نانو هسته‌های نیکل دارای فعالیت بالا و یک لایه محافظ پایدار که توسط نانوذرات نیکل با اندازه کوچک تشکیل شده است، نانو روان‌کننده 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 می‌تواند به پراکندگی مناسب نانوذرات در روغن دست یابد.

[1]- Synergistic lubrication
[2]-polyalphaolefins

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

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 روان‌کننده 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 روان‌کننده به‌وسیله‌ی عامل‌دار کردن سطح با مولکول‌های آلی ضروری است (مولکول‌های آلی شامل DDP ، پلی اتیلن گلیکول[1](PEG) ، اولیل آمین[2]، اولئیک اسید[3]، لیگاندهای تیوله[4] 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. هنگامی‌که 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 روان‌کننده است. در موتورها، احتمالاً یکی از مهم‌ترین عوامل خراب شدن روغن روان‌کار، وجود فلزات است. آزمایش‌های بسیاری برای ارزیابی اثر فلزات مختلف بر زوال روغن روان‌کننده ابداع شده است. با این‌حال، 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 روان‌کار باید در نظر گرفته شود.

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

در میان مطالعات انجام شده از کاربرد اکسیدها، سولفیدها، نیتریدها 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 روان‌کننده استفاده می‌شوند[۳۶]. به طور معمول برس‌های پلیمری محلول در روغن دارای پیوند با SiO_2 و TiO_2 به طور پیوسته در PAOپراکنده 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 فلوئورو اتیلن SiO_2@(PTFE) [۳۷] مشاهده گردید. همچنین مشخص شد کهSiO_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 روان‌کننده با اندازه یکنواخت، خواص تریبولوژیکی بهتری را نشان می‌دهند [۳۸]. سایر اکسیدها و سولفیدها شامل [۳۹] CuO، [۴۰] Al_2O_3، [۴۱]

[1]-polyethylene glycol
[2]-oleylamine
[3]- oleic acid
[4]- thiolated ligands

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

ZnO، [۴۲] Fe_3O_4،[۴۳] ZrO_2، [۴۴] CeO_2 ، [۴۵] WO_3، [۱۹] Y_2O_3، [۴۶] ZnS ، [۴۷] PbS ، [۴۸] CuS برای دستیابی به پراکندگی مناسب، پراکنده کننده‌ها و عامل‌دار کردن سطوح به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفتند [۴۹].

سولفیدها به دلیل عنصر فعال S یک نقطه ضعف مشترک دارند که می‌تواند منجر به خوردگی اکسیداسیونی سیستم‌های مکانیکی و آلودگی محیطی شود[۵۰]. با این‌حال، به دلیل خواص تریبولوژیکی برجسته MoS_2 به طور گسترده به عنوان یک افزودنی روان‌کننده مهم برای مدت طولانی مورد استفاده قرار گرفته است. چهار نوع مختلف از MoS_2 شبیه به فولرن (C_{60}) سنتز و آزمایش شدند، و مشخص شد که همه آنها دارای خواص مطلوب کاهش اصطکاک در روان‌کاری شدید مرزی هستند[۵۱]. با این‌حال، عملکرد تریبولوژیکی فولرن همانند MoS_2 با ساختار داخلی تغییر می‌کند. با استفاده از ذرات کاملاً کروی و متبلور C60-MoS_2ظرفیت تحمل بار بالای و فشار تماسی بالاتری به دست می‌آید. خواص تریبولوژیکی خوبی هنگام استفاده از نانو ذرات ضعیف کریستالی C60-MoS_2 مشاهده می‌شود، زیرا می‌توان آن ها را به راحتی لایه برداری کرد تا ورقه‌ها تولید شود و لایه به لایه انباشته شده و تریبوفیلم تشکیل می‌شود. به طور مشابه، وجود نقص و ساختارهای توخالی در ذرات نیز لایه برداری را آسان‌تر و تشکیل سریع‌تر تریبوفیلم را تسهیل می‌کند [۵۲]. این نتیجه همچنین به طور غیرمستقیم ویژگی‌های تریبولوژیکی مختلف میان صفحات و ذرات MoS_2 را نشان می‌دهد. در مورد فلوریدها و نیتریدها، نتایج گزارش شده نشان داد که نانو ذرات CeF_3[۵۳]، LaF_3 [۵۴] و نیترید بورBN [۵۵] می‌توانند ظرفیت تحمل بار، کاهش اصطکاک و خاصیت ضد سایش را بهبود بخشند.

۳-۱-۳ کربن

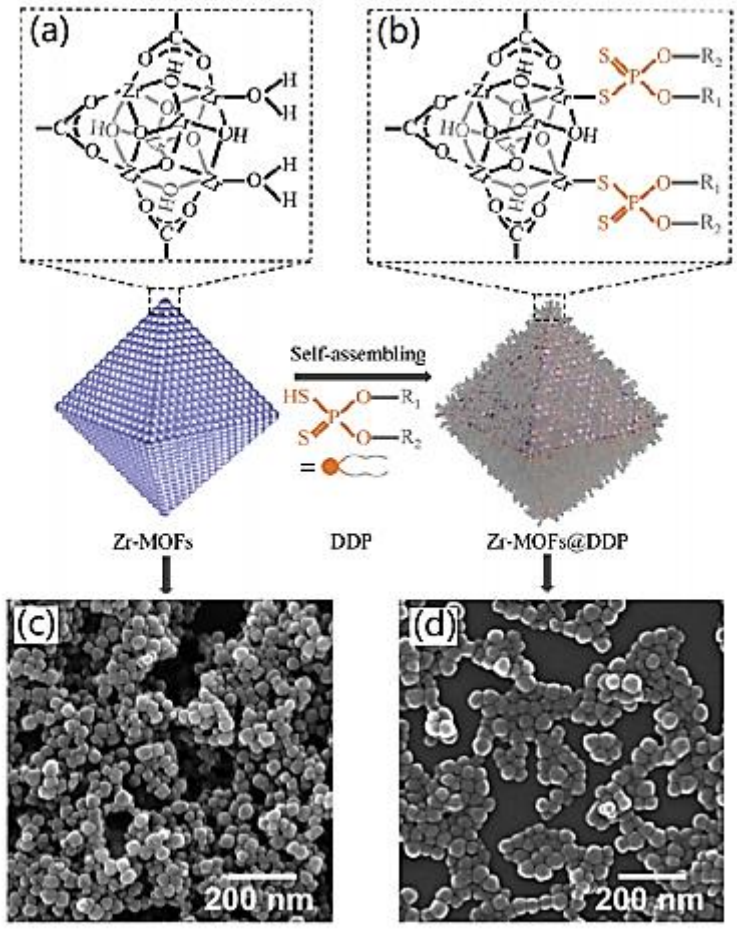
در بیشتر مطالعات کاربرد نانو مواد در روانکاری روغن، نانو مواد مبتنی بر کربن مانند نانوالماس (ND)، C60 ، نقاط کربنی (CDs)، CSs، نانولوله‌های کربنی (CNTs)، گرافن (G) و اکسید گرافن (GO) مورد تأکید قرار گرفته‌اند. با توجه به عدم مسمومیت و پایداری شیمیایی ND، استفاده از آنها در روان‌کاری مرزی و مقاومتشان در برابر فشار بالا، موضوعی قابل توجه در چندین سال اخیر بوده است. ویسکوزیته، رابطه رئولوژیکی، دینامیکی، گشتاور اصطکاکی، افزودن ثانویه، و رفتار حرارتی روان‌کننده ND-پراکنده مورد بررسی قرار گرفته است [۵۶] که پایه و اساس شناخت مکانیزم‌های 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]. Csهای زیرمیکرون بسیار صیقلی به عنوان یک افزودنی روغن روان‌کار کارآمد نشان داده شده است، و اندازه ذرات از ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر متغیر بود [۵۷]. به طور کلی، اندازه CS بر عملکرد اصطکاک تأثیرگذار است. با این‌حال، 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 افزودنی‌های روغن روان‌کننده، با توجه به اندازه کوچک آنها (کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر) اختصاص یافته است که برای حل مشکل پایداری پراکندگی حائز اهمیت است. علاوه بر این، سازگاری خو ب CDs ها با روغن پایه را می‌توان مستقیماً در فرآیند سنتز به دست آورد [۵۹]. متعاقباً، اولیلامین [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]، کربن‌های پیاز- مانند[۶۴] و غیره [۶۵] نشان داده شده‌اند. خواص حرارتی و رئولوژیکی روان‌کننده های مخلوط شده با نانوساختار های کربنی مختلف مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت [۶۶]. نتایج نشان داد که رسانایی حرارتی تمامی روغن‌های نمونه بیشتر از روغن پایه است. ذرات CS بیشترین تأثیر مثبت را بر هدایت حرارتی و نقطه اشتعال نشان دادند، اما نانوصفحات G بیشترین اثر بهبود را در نقطه ریزش داشتند. علاوه بر این، ویسکوزیته تمام روغن‌های نمونه با افزایش غلظت نانو مواد و کاهش دما، افزایش می‌یابد، اما ساختارهای مختلف تأثیر کمی داشتند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

۳-۱-۴ نمک های فلزی / مواد معدنی طبیعی

در میان نمک‌های فلزی مورد مطالعه، بیشترین استفاده در طول دهه گذشته را بورات‌ها به خود اختصاص داده‌اند. نانو ذرات بورات کلسیم محلول در روغن اصلاح شده با اولئیک اسید و لوریک اسید آماده شدند[۶۷]. بورات‌های 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 پایین‌تر، محصول واکنش تریبوشیمیایی (CaO) تولید شد و لایه‌ای روی سطح فرسوده تشکیل شد. سولفونات‌ها و یا سالیسیلات‌های کلسیم بیش از پیش و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶۸]. به عنوان مثال، مواد شوینده سولفونات کلسیم بر پایه سولفات‌های کلوئیدی هستند که در آن‌ها نانو ذرات $CaCO_3$ در روغن توسط ملکول‌های کلسیم آلکیل بنزن سولفونات پایدار می‌شوند. آن‌ها به طور گسترده در موتورهای دریایی و خودرو برای خنثی کردن محصولات اسیدی و جلوگیری از ایجاد رسوب استفاده می‌شوند [۶۸]. در ضمن به عنوان افزودنی‌های روغن، می‌توانند خواص تریبولوژیکی روغن را بهبود بخشند. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، از نمک‌های 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].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

۳-۱-۵ ساختار فلز ی-آلی (MOF)

MOF با سنتز شبکه‌ای از طریق اتصال با واحدهای معدنی و آلی و پیوندهای شیمیایی مستحکم تهیه می‌شوند. هنگامی‌که 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 روان‌کننده 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 -۲متیل ایمیدازول) و ZIF-67 (نمک کبالت -۳متیل ایمیدازول) که ابتدا به عنوان مواد افزودنی در روغن روان‌کننده 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 روان‌کننده بسیار جالب است [۷۱]. به دلیل وجود مناطق فلزی غیراشباع، Zr-MOFs به 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. ازسال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ ، ILs عمدتاً به عنوان روان‌کننده‌های 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. درسال 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 تریبوفیلم محافظ مرزی نسبت داده شد. به طور مشابه، IL تری هگزیل تترا دسیل فسفونیوم بیس (۴،۴،۲ 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 وZDDP 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 روان‌کننده نیز تحت تأثیر ویسکوزیته ILs قرار می‌گیرد و متعاقباً بر رفتارهای تریبولوژیکی تأثیر می‌گذارد. ویسکوزیته IL با وجود محدوده نسبتاً کم چگالی (g/mm^3 ۱/۶- ۰/۱) 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 روان‌کاری 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 این‌رو، ویژگی‌های منحصر به فرد ILs به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده، پتانسیل کاربردهای صنعتی آینده را نشان می‌دهد[۷۵].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

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 روان‌کننده به طور خلاصه ارائه می‌شود. نانو لوله‌های کربنی (CNTs)، اکسیدها، سولفیدها، نانو لوله‌های رسی هالویزیت (HNTs) و نانو بلورهای سلولز عمدتاً در این بخش آورده شده‌اند.

CNTs ۱-۲-۳

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 مدل‌سازی، 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 درسال‌های اخیر حاصل شده است. برای غلبه بر بی اثری شیمیاییCNT عامل‌دار 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) می توانند به طور چشمگیری عملکرد کاهش اصطکاک (٪۶۰~) و ضد سایش (٪۹۵~) را به مقدار ۰/۰۸درصد 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 افزودنی‌هایCNT 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.

اکسیدها/ سولفیدها ۲-۲-۳

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 Mo6S4.5I4.5 [۸۰] و Mo6S3I6 [۸۱] خواص کاهش اصطکاک خوبی را نشان دادند و ضریب اصطکاک هر دو به مقدار ۰/۰۴رسیدند. MoS_2 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 MoS_2 را می‌توان از نانو سیم‌های Mo6S2I8 سنتز کرد و مشخص شد که نانو لوله‌های MoS_2 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 MoO_3 به عنوان افزودنی در روغن پایه با وجود افزودنی‌های روان‌کننده حاوی گوگرد و در نتیجه تشکیل لایه‌ای غنی از MoS_2 بودند. ظرفیت تحمل بار این تریبوفیلم بسیار بالاتر از نانو لوله‌های معمولی MoS_2 بود. به دلیل سولفوریزاسیون مداوم نانو لوله‌های MoO_3 در طول تماس لغزشی، نانو لوله‌های معمولی MoS_2 به تدریج تخریب شده و روان‌کاری خود را به دلیل اکسیداسیون از دست دادند. گوگردسازی-درمحل (in-situ) نانو لوله‌های MoO_3، حد حساسیت دمایی نانو لوله‌های MoS_2 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 MoS_2 ضعیف است. نانو میله‌های WS_2[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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

۳-۳ نانو مواد دو بعدی

با ابعاد طولی فوق العاده نازک، نانو مواد دو بعدی می‌توانند 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 برهم‌کنش‌های لایه-لایه ضعیف‌تر در نانو مواد دو بعدی، پایداری مکانیکی نانو ساختار را تضمین می‌کند[۸۶]. در این بخش پیشرفت‌های اخیر تحقیقات در مورد افزودنی‌های نانو مواد دو بعدی در روغن را به صورت خلاصه بیان می‌کند که معمولاً شامل G، GO ،MoS_2 ، هیدروکسیدهای دو لایه (LDH) ، فسفر سیاه (BP) و ساختارهای آلی کوولانسی (CFs) هستند.

۱-۳-۳ کربن

در چند سال گذشته، مقدار زیادی از نانو مواد لایه‌ای مبتنی بر گرافن از جمله G، GO [۸۷] ، فلوئورو گرافن FG [۸۸] و اکسید گرافن کاهش یافته (rGO) به روغن پایه اضافه شده‌اند تا خواص ضد سایش و کاهش اصطکاک آنها را برای سطح ویژه بالا، نانو صفحه‌های کوچک دارای ضخامت نانومتر ۱۵۶ و توانایی ورود آسان به سطح تماس بهبود دهند. با این‌حال، 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 لایه‌ای مبتنی بر گرافن خالص به دلیل بی اثر بودن شیمیایی که می‌توان با اصلاح فیزیکی یا شیمیایی از آن جلوگیری کرد، در بیشتر روغن‌ها پراکنده نمی‌شوند. آن‌ها توسط اسید اولئیک[۸۹]، LLs [۹۰]، دو دسیلامین [۹۱] فسفونیوم-ارگانوفسفات [۹۲] و غیره عامل‌دارشدند. همچنین چندین نوع روش برای بهبود پراکندگی وجود دارد.

G اکسیژن زدایی شده و کم نقص توسط لایه‌برداری 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 افزودنی‌های هیبرید پیشنهاد شده است [۹۴]. افزودنی‌های هیبرید می‌توانند به طور مؤثر ضریب اصطکاک و نرخ سایش ASS 316 را ٪۷۳/۱ و ٪۹۷/۸ کاهش دهند. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. علاوه بر این، روش‌های آسیاب گلوله‌ای، لایه برداری الکتروشیمیایی، لایه برداری فاز مایع و تخلیه قوس نیز برای تهیه افزودنی‌ها با کارایی بالا استفاده شد. قابل توجه است که عملکردهای تریبولوژیکی نانوصفحات گرافیتی و اکسید گرافیت احیا شده لایه برداری شده که توسط آسیاب گلوله‌ای به دست آمد، هر دو مطلوب بودند و گروه‌های عاملی را می‌توان با آسیاب گلوله‌ای روی سطح G پیوند زد [۹۵]. بدیهی است که آسیاب گلوله‌ای روشی مؤثر برای تولید نانو مواد لایه‌ای مبتنی بر کربن با کارایی بالا به‌عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده 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 می‌گیرد. به ویژه، تحت روان‌کاری مخلوط، ورقه‌های 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 می‌افتد که برای عملکرد تریبولوژیکی آنها نامطلوب بود[۹۶].

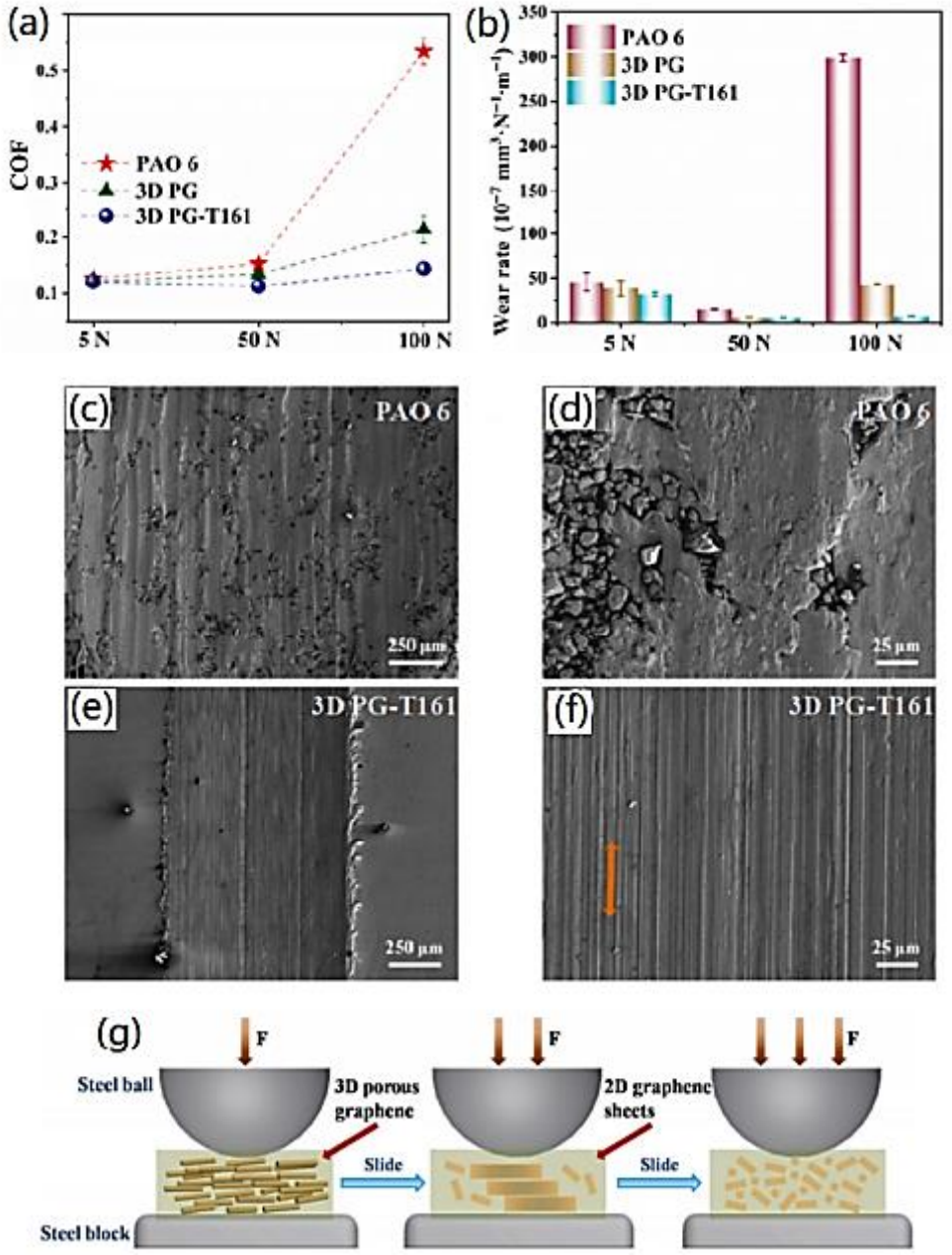
۲-۳-۳ اکسیدها/ سولفیدها

MoS_2 که دارای نانوساختار ساندویچ مانند S–Mo–S است، توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. همان‌طور که ذکر شد، MoS_2 می‌تواند به شکل‌های مختلف نانو، مانند نانو ذرات، نانو لوله‌ها ، نانوصفحات و ساختار C60-مانند سنتز شود. علیرغم هندسه‌های 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 لایه‌ها ی Fe_3O_4 اکسیدهای کمی با ساختار نانو لایه به عنوان افزودنی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

های روغن روان‌کننده مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوصفحات MoS_2 که توسط آسیاب گلوله‌ای و با مخلوط شدن MoO_3 و Sسنتز می‌شوند، می‌توانند به شدت سطح زیرلایه‌ها را برای تشکیل تریبو فیلم پایدار جذب کنند[۹۸]. نانوصفحات بسیار نازک MoS_2تهیه شده توسط روش سنتز معمولی، واکنش حالت جامد یا لایه برداری الکتروشیمیایی هر دو به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده 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].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

۳-۳-۳مواد معدنی طبیعی

به عنوان نوعی از ماده معدنی طبیعی، LDHs را می‌توان توسط سنتز شیمیایی در آزمایشگاه نیز ساخت که از یون‌های فلزی واقع در مرکز بلور شش ضلعی لایه‌ها و یون‌های هیدروکسید که رئوس را اشغال می‌کنند، تشکیل شده‌اند [۱۰۰]. یون‌های فلزی موجود در HDL ها شامل Zn^{2+}+ ، Cu^{+}، Fe^{3+}، Co^{2+}، Ni^{2+}، Al^{3+}، Mg^{2+} و غیره می‌باشند. به دلیل ساختار نانوکریستالی منحصر به فرد، تنوع ترکیب شیمیایی، اندازه و همچنین شکل، LDHs به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

Co–Al–CO_3- LDHs[۱۰۱]، Mg/Al-LDHs, Zn/Al-LDHs, و Zn/Mg/ Al-LDHs مورد مقایسه و مطالعه قرار گرفتند و Mg/Al-LDHs دارای بهترین روان‌کاری بود. علاوه بر این، LDH با یون‌های فلزی و ویژگی‌های 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.

۴-۳-۳ 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 اسکلت‌های طراحی شده، دست می‌یابند. 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 شده‌اند، اما هنوز چالش هایی در بررسی کاربرد افزودنی‌ها در روغن‌های روان‌کننده وجود دارد. علاوه بر این، چند مطالعه نیز کاربرد نانوصفحات BP را در تریبولوژی نشان داده‌اند. نانوصفحاتBP تهیه شده توسط آسیاب گلوله‌ای می‌تواند ظرفیت باربری، کاهش اصطکاک و خواص ضد سایش را بهبود بخشد[۱۰۳] .

۴-۳ نانوکامپوزیت ها

به دلیل اثر هم‌افزایی (سینرژیک)، نانوکامپوزیت‌ها معمولاً عملکرد تریبولوژیکی برتری نسبت به حالت اولیه دارند. باتوجه به نانوکامپوزیت‌های ترکیب شده با ابعاد مختلف، آنها به پنج بخش عمده تقسیم می‌شوند: 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 می‌شوند.

0D/1D ۱-۴-۳

نانوکامپوزیت‌های نانو ذرات MoS_2 ترکیب شده با انواع مختلف نانو مواد کربنی سنتز شدند [۲۰] و تایید شد کهMoS_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 رفتارهایPAG 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]. نانوکامپوزیت‌های ZnO@CNTs با نسبت‌های جرمی و غلظت‌های متفاوت نشان دادند که نانوکامپوزیت‌ها کاهش اصطکاک و قابلیت ضد سایش بالاتری را نسبت به روغن خالص، ZnO تنها و نانو لوله‌های کربنی نشان می‌دهند [۱۰۵]. جالب توجه است که نانو لوله‌های هیدروکسید سیلیکات منیزیم که با نانو ذرات نیکل ترکیب شده‌اند، می‌توانند از طریق واکنش‌های تریبوشیمیایی که به کاهش اصطکاک (۱۵٪) و افزایش توانایی ضد سایش (۷۸٪) منجر شد، یک تریبو فیلم صاف‌ترتشکیل دهند [۱۰۶].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

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، Cu، Ni و SiO_2 هستند. مونتموریلونیتیک(Montmorillonite) کانی نازک و پر مغزی است که با هزینه کم پتانسیل بالایی به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده دارد. کامپوزیت‌های montmorillonite/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 روان‌کننده نشان می‌دهد. به طور قابل توجهی، یک نانوساختار ساندویچ-مانند از نانوذرات Mn_3O_4 و صفحات G (Mn_3O_4@G) تهیه شد[۵۰]. حتی در غلظت کم ۰/۰۷۵درصد وزنی و دمای بالای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد، ضریب اصطکاک و عمق سایش به ترتیب ٪ ۷۵ و ٪ ۹۷ کاهش یافت. علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های TiO_2 /F-rGO با پیوند نزدیک بین ذرات و ورقه‌ها، ضریب اصطکاک پایین و ظرفیت ضد سایش عالی را نشان می‌دهند که به اثر روان‌کنندگی 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 ٪۹۲کاهش 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، MoS_2/montmorillonite، Ag/MoS_2، CSs/MoS_2 [۱۰۸]، Ni/MoS_2 [۹۷]، Ni/GO [۱۰۹]، Au/GO [۱۱۰]، SiO_2/GO [۱۱۱]، Cu/GO [۱۱۲]، SiC/G [۱۱۳]، Cu/WS_2 [۱۱۴]، Cs/G [۱۱۵] و غیره.

1D/2D ۳-۴-۳

با روش مصنوعی ابتکاری، نانوکامپوزیت‌ها ی هیبریدیMS_2@CNT به دست آمد و سازگاری در روغن‌های غیرقطبی با پوششی از اولیل آمین به دست آمد [۱۱۶]. در این نوع نانوساختار، سطح بیرونیCNT با ۱ تا ۳ نانو صفحه MoS_2 پوشانده شد و به روان‌کاری 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 Al_2O_3/SiO_2 به ترتیب ٪۵۰ و ٪۲۲ کاهش یافت[۱۱۷]، Al_2O_3/TiO_2 ٪۵۰ و ٪۳۰[۱۱۸] و C_3N_4/Cu ٪۳۵ و ٪۳۰ [۱۱۹]، serpantin/$La(OH)_3$ ٪۲۵ و ٪۴۲ [۲۱۳]، و TiO_2/C_3N_4 ٪۲۳ و ٪۱۷ [۱۲۰] بودند. شایان ذکر است که ضریب اصطکاک و سایش MoS_2/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 به‌عنوان 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

BN/G به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده، 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 قوی‌تر یک روش مؤثر است. برای همه نانو مواد با مقاومت اکسیداسیون ضعیف، چهار روش وجود دارد: ۱) همان‌طور که در بالا ذکر شد، یک ماده با مقاومت اکسیداسیون قوی‌تر را برای تهیه کامپوزیت انتخاب کرده و مزایای آن‌ها را ترکیب کنید. ماده‌ای با مقاومت اکسیداسیون ضعیف می‌تواند با پوشش ماده دیگری محافظت شود. بر این اساس، ویژگی‌های تریبولوژیکی ممکن است با افزودن مواد مختلف تغییر کند. ۲) آنتی اکسیدان‌های سنتی را به روغن اضافه کنید تا مقاومت اکسیداسیون را افزایش دهید که روشی آسان و مؤثر است. ۳) آنتی اکسیدان‌ها به عنوان گروه‌های اصلاح کننده سطح برای پوشش نانو موادی که به راحتی اکسید می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به وسیله آن می‌توان 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 می‌دهد. ثابت شد که این روش مؤثر است و خواص تریبولوژیکی تریبو فیلم بهتر می‌باشد، اما عنصر گوگرد قابل اجتناب نیست.

۴- چشم انداز

تا به امروز، استفاده‌های بسیاری از نانو مواد به‌عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده 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 داده‌ها نشان می‌دهد که هنوز چالش‌هایی در برنامه‌های کاربردی وجود دارد. موارد زیر ممکن است پیشنهادات مهم تحقیقات آینده در زمینه توسعه نانو مواد به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده باشد.

۱) تحقیقات فرابعدی

در پژوهش‌های مختلف با استفاده از نانو مواد یکسان، ممکن است داده‌های 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 شبیه‌سازی مولکولی و آزمایش‌های 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 برهم‌کنش مولکولی بین روغن، سطح تماس، نانو مواد و سایر افزودنی‌های معمولی.

۲) طراحی نانوذرات

به طور کلی، محققان مطالعه نانو موادی که قبلاً یافته شده‌اند را ترجیح می‌دهند. 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 عامل‌سازی MOF و CF را می‌توان به صورت دقیق کنترل و طراحی کرد. ضمن آن‌که مطالعه کاربرد آن‌ها در روغن روان‌کننده قابل توجه است. با این حال، مطالعه MOFs به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

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 این‌حال، 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] Zeleňák 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)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

[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, Zhinzhilo 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, Rożeń 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, Prosyčevas 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)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

[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 Al_2O_3 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, ZrO_2 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)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

[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. Ultrasmooth 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 highperformance 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)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

[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, Andronescu 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)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

[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 compositeas 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)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

[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)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

چکیده انگلیسی

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

Navid Karimi Baba Ahmadi [1], Abbas Taghipoor[2*]

[1]Department 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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1402.10.1.5.3]

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**