مروری بر نقش انواع افزودنی‌های نانو روان‌کار بر بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کارها

عباس تقی‌پور [۱*]

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

*نویسنده مسئول : taghipoor@iaud.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸

چکیده:

استفاده از نانوافزودنی‌ها در روان‌کننده‌ها یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل اصطکاک و سایش است که برای حفظ انرژی، کاهش آلاینده‌ها و حفاظت از محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. با رشد علم و فناوری، پیشرفت‌های زیادی در زمینه افزودنی‌های نانو روان‌کار در تحقیقات علمی و کاربردهای صنعتی حاصل شده است. در این تحقیق به طور خلاصه به دسته بندی مواد افزودنی نانو روان‌کار و بررسی خواص تریبولوژیکی این افزودنی‌ها پرداخته شده است. بر اساس عناصر تشکیل دهنده نانو مواد، افزودنی‌های نانو روان‌کار برای سه گروه افزودنی‌ها بر پایه نانو فلزات، افزودنی‌ها بر پایه نانو کربن و افزودنی‌ها بر پایه نانوکامپوزیت تشریح گردیدند. علاوه بر این انواع مکانیزم‌های روان‌کاری افزودنی‌های نانو روان‌کار شامل تشکیل تریبو فیلم، عملکرد خود ترمیم کننده و اثر هم افزایی نیز بیان شده است. درنهایت، چالش‌ها و چشم انداز افزودنی‌های نانو روان‌کارها بیان شده است که طراحی و سنتز افزودنی های جدید با خاصیت روان کنندگی و ضدسایش در آینده را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: افزودنی نانو روان‌کار، پایداری پراکندگی، خواص تریبولوژیکی، مکانیزم روان‌کاری.

مقدمه

روان‌کاری یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کنترل اصطکاک و سایش است که در حفظ انرژی، کاهش آلاینده‌ها و حفاظت از محیط زیست اهمیت زیادی دارد[۱]. روش‌های مختلفی برای به حداقل رساندن اصطکاک و سایش برای صرفه جویی در انرژی وجود دارد. روان کننده‌هایی که عمدتاً شامل روان کننده‌های جامد و روان کننده‌های مایع هستند، به طور گسترده برای روان‌کاری استفاده می‌شوند. روان کننده‌های جامد پیشرفته متفاوتی وجود دارند، با این حال، خواص تریبولوژیکی آنها مستقیماً تحت تأثیر اصطکاک محیط است و پس از استفاده طولانی مدت، مستعد خرابی و فرسودگی هستند. روان کننده‌های مایع می‌توانند یک فیلم روانکاری هیدرودینامیکی یا الاستو هیدرودینامیکی بر روی سطوح اصطکاک، در حین اصطکاک لغزشی تشکیل دهند. بنابراین به‌طور گسترده در صنعت مکانیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. به غیر از روغن‌های روان کننده، گاهی مایعات یونی نیز می‌توانند به عنوان روان کننده‌های مایع استفاده شوند[۲]. هنگامی‌که تجهیزات مکانیکی در مراحل راه اندازی و خاموشی و یا تحت شرایط اصطکاک شدید هستند، روان کننده‌های مایع قادر به تشکیل یک فیلم روان‌کننده پایدار بین سطوح اصطکاکی نیستند. در چنین شرایطی، روان‌کاری مرزی و حالت‌های روان‌کاری مخلوط رخ می‌دهد و منجر به اصطکاک و سایش شدید می‌گردد. استفاده از افزودنی‌های روان کننده یکی از مؤثرترین راه‌ها برای کاهش اصطکاک و سایش تحت روان‌کاری مرزی است. افزودنی های روان کننده سنتی مانند فسفات‌های آلی، سولفیدهای آلی و ترکیبات فلزی آلی، دارای پایداری پراکندگی و خواص تریبولوژیکی خوبی هستند، اما همه آنها درجات مختلفی از مشکلات مانند مسمومیت، آزاد کردن خاکسترهای سولفاته، فسفر و گوگرد و همچنین خوردگی شیمیایی دارند. نانو

موادها به علت اندازه‌های اتمی و اثرات سطح، خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی از خود نشان می‌دهند و به طور گسترده در زمینه تریبولوژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. استفاده از نانو مواد به عنوان افزودنی‌های روان کننده، می‌تواند خواص تریبولوژیکی روغن روان کننده را تا حد زیادی بهبود دهد و تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی و حفاظت از محیط زیست داشته باشد[۳]. بنابراین در این تحقیق مروری بر روی توسعه افزودنی‌های نانو روان‌کار عمدتاً شامل افزودنی‌ها بر پایه نانو فلزات، بر پایه نانوکربن، و بر پایه نانوکامپوزیت تمرکز شده است. علاوه بر آن در این بررسی مکانیسم روان‌کاری شامل تشکیل تریبو فیلم، عملکرد خود ترمیمی و اثر هم‌افزایی به صورت خلاصه بیان می‌شود. در نهایت چالش‌ها و چشم اندازهای افزودنی‌های نانو روان‌کار ارائه می‌گردد.

افزودنی‌های نانو روان‌کار

با گسترش نانوتکنولوژی، نانو مواد به یکی از زمینه‌های قابل توجه در علم فیزیک، شیمی و مواد تبدیل شده است. نانو مواد به عنوان افزودنی در روان کننده‌ها به دلیل اندازه های کوچک خود، به آسانی وارد سطوح تماس اصطکاکی شده و می‌توانند تریبوفیلم محافظتی تشکیل دهند، در نتیجه از ساییدگی سطوح اصطکاکی جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، نانو مواد دارای فعالیت سطح بالایی هستند که می‌توانند پایداری تشکیل فیلم تریبوفیلم محافظتی را با اثرات جذب فیزیکی و یا شیمیایی بهبود دهند. سه گروه اساسی از افزودنی‌های نانو روان‌کار وجود دارد که عبارت هستند از: افزودنی‌ها بر پایه نانو فلز، بر پایه نانوکربن، و بر پایه نانوکامپوزیت

.

افزودنی‌های روان‌کننده‌ها بر پایه نانو فلز

افزودنی‌های روان کننده بر پایه نانو فلز عمدتاً شامل فلزات خالص، اکسیدهای فلز، سولفیدهای فلز، هیدروکسیدهای فلز و نمک‌های فلز است. تحقیقات فعلی نیز خواص تریبولوژیکی بهبود یافته را با افزودن نانوذرات فلزی مانند نیکل، آهن، پالادیم و غیره تأیید کرده‌اند[۶-۴]. مطالعات انجام شده نشان داد که اکسیدهای فلزی مانند اکسیدروی، دی اکسییید تیانیوم واکسید زیرکونیوم خواص روان‌کنندگی خوبی دارند و خواص اکسیدهای نانو فلز، ارتباط نزدیکی با اندازه ذرات، سختی و غلظت دارند. زارع و همکاران[۷] با بررسی ماده افزودنی نانو ذرات آلومینا به ماده روان‌کار در فرآیند شکل‌دهی عمیق، به‌منظور کاهش سایش قالب و کاهش نیروی شکل‌دهی و افزایش شکل‌پذیری ورق دریافتند که افزودن ٪۰/۵ وزنی نانو ذرات آلومینا سبب بهبود قابل‌ملاحظه خاصیت روان‌کاری می‌شود که در مقایسه با روان‌کار معمولی نیروی شکل‌دهی و زبری سطح به ترتیب به میزان ٪۱۶/۳۹ و ٪۱۹/۴۳ کاهش می‌یابد. همچنین دریافتند که با استفاده از روان‌کار حاوی نانو ذرات ٪۲۳/۹۴ حداکثر ضخامت در نقطه بحرانی کاهش می‌یابد. گرینبرگ و همکاران[۸] در پژوهش خود تحت عنوان اثر نانو ذرات تنگستن سولفید بر کاهش اصطکاک در روان‌کارها، به این نتیجه رسیدند که اضافه نمودن این نانوذره به روغن پایه سبب کاهش ٪۵۰ ضریب اصطکاک می‌شود. شکرریز و همکاران[۹] با بررسی نانوذره نیکل پوشش‌دار و ترکیب آن با روغن روان‌کار نتایج مشابهی در بهبود خواص ضد سایش روان‌کار گرفتند. آن‌ها ارایه نمودند که با افزایش حداکثر ٪۱ نانوذره نیکل پوشش‌دار خاصیت ضد سایش به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. واو و همکاران [۱۰] خواص روان‌کاری دو نوع روغن شامل روغن‌موتور API-SF و روغن پایه حاوی نانو ذرات اکسیدمس و دی اکسید تیتانیوم، و نانو الماس را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانو ذرات افزوده‌شده به روغن‌ها تأثیر بسزایی در کاهش اصطکاک و سایش داشته است. به‌گونه‌ای که ضریب اصطکاک در روغن موتور و روغن پایه، حاوی نانو ذرات به ترتیب ٪۱۸/۴و ٪۵/۸ کاهش و علاوه بر این عمق شکاف‌های سایشی به ترتیب ۱۶/۷ و ٪۷۸/۸ در مقایسه با روغن فاقد نانو ذرات اکسیدمس کاهش یافت. بر اساس یافته‌های جیاوو[۱۱] خواص ضد سایشی آلومینا در مقایسه با سیلیکا کمتر است ولی خاصیت نفوذپذیری آلومینا بهتر می‌باشد. اگرچه هرکدام از این نانو ذرات به‌تنهایی خواص روان‌کاری برابری دارند و انتظار می‌رود که ترکیب این دو ماده باهم خواص بهتری را ارائه دهد. خرم‌شاهی و تقی‌پور[۱۲] درپژوش خود اثر نانو ذرات اکسید مس را به‌عنوان افزودنی بر بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کارها بررسی کردند. بر اساس نتایج، کم‌ترین ضریب اصطکاک، کم‌ترین میزان سایش و بیشترین ضریب رسانایی گرمایی مربوط به مخلوط نانو روان‌کار حاوی

۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات اکسید مس می‌باشد. میزان کاهش ضریب اصطکاک این مخلوط نانو روان‌کار در مقایسه با روغن پایه ٪۳۷/۱، میزان کاهش سایش ٪۵۸/۳ و میزان افزایش رسانایی گرمایی در مقایسه با روغن پایه ٪۳/۸۴ بود. نتایج گویای نقش مثبت نانو ذرات اکسید مس به عنوان افزودنی در بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کار می‌باشد. سینگ و همکاران[۱۳] در پژوهشی به بررسی اثر غلظت نانو ذرات اکسیدروی به عنوان مواد افزودنی به روغن Euphorbia Lathyris و خصوصیات تریبولوژیکی آن‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته روغن با اصلاح شیمیایی و افزایش غلظت نانوذرات، افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش با ٪۸ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. با افزودن نانوذرات، نقطه اشتعال نیز افزایش یافت، اما با افزایش غلظت ذرات نانوکاهش نقطه جوش مشاهده گردید. در طول تجزیه و تحلیل رفتار جریان، تمام نمونه‌های روان‌کننده نانو با ارائه یک رابطه خطی بین نرخ برش و تنش برشی، رفتار نیوتنی را نشان دادند. در طول بررسی، غلظت ٪۰/۵ نانوذرات اکسیدروی به ترتیب میزان کاهش ضریب اصطکاک و سایش به ترتیب حدود ۸/۲۳ و ۵/۱۳ درصد را نشان داد. به دلیل روان‌کاری مؤثر روی سطح، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح بهتر را با غلظت ۰/۵درصد نشان داد.

افزودنی‌های روان‌کننده‌ها بر پایه نانوکربن

در مقایسه با افزودنی‌های سولفید فلزی، مواد نانوکربنی با داشتن پایداری شیمیایی خوب و خواص مکانیکی عالی، خواص تریبولوژیکی مطلوب همراه با عملکردهای سازگار با محیط زیست، آینده‌ای پایدار از خود نشان می‌دهند. افزودنی‌های روان‌کننده نانوکربن، حاوی کربن خالص و پلیمر هستند که ساختار آن‌ها بر اساس عناصر شیمیایی می باشند.

اتفاقی و همکاران[۱۴] نانو ذرات کربن نانو بال را با استفاده از آسیای گلوله‌ای درون روغن موتور بهران پیشتاز پراکنده کرده و سپس با انجام آزمون‌های تجربی دریافتند که ضریب هدایت حرارتی روغن حاوی ذرات نانو بال با غلظت ٪۰/۱وزنی، ۱۸٪ نسبت به روغن پایه افزایش یافته و همچنین بر اساس آزمون چهار ساچمه، میزان سایش در روغن حاوی نانو ذرات به میزان ۵٪ نسبت به روغن فاقد نانو ذرات کاهش یافته است. نانو بیوچار[1] یک ماده غنی از کربن محسوب شده که در طی فرآیند تجزیه حرارتی[2] و در اثر کربونیزه شدن توده زیستی[3] شکل می‌گیرد. بیوچار از هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه شکل گرفته است که در آن شش اتم کربن به شکل حلقوی در ارتباط با هم هستند. وجود چنین ساختار آروماتیکی موجب پایداری بیوچار در برابر تغییرات بیولوژیکی و شیمیایی است. بیوچار علاوه بر کربن از عناصر دیگری چون هیدروژن و اکسیژن تشکیل شده است. بسته به نوع ماده اولیه‌ای که بیوچار از آن شکل می‌گیرد، مواد معدنی مختلفی (نیتروژن، فسفر، گوگرد و غیره) نیز می‌تواند در آن وجود داشته باشد. سو و همکاران[۱۵] در تحقیقاتی تأثیر نانو لوله کربن روی خواص تریبولوژیکی روغن‌های زیستی را بررسی کردند. دستگاه آزمون سایش از نوع پین روی دیسک بود. نانولوله کربن از نوع چند دیواره با اندازه‌های مختلف و غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۲۵ درصد وزنی استفاده شد. نتایج نشان داد این نانو ذرات می‌توانند کاهش اصطکاک و خاصیت ضد سایشی روغن را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشد. همچنین با توجه به نتایج حاصل بهترین ترکیب با غلظت ٪۰/۰۵ بود.

افزودنی‌های روان کننده‌ها بر پایه نانوکامپوزیت

در مقایسه با افزودنی‌های روان‌کننده‌ها بر پایه فلز و کربن، افزودنی‌ها بر پایه نانوکامپوزیت خواص روان کنندگی فوق العاده ای دارند، زیرا این افزودنی‌ها می‌توانند یک تریبوفیلم ترکیبی در رابط‌های اصطکاک تشکیل دهند و اثر روان کنندگی هم افزایی داشته باشند. ژانگ و همکاران[۱۶] نانوکامپوزیت $Cu@SiO_2$ را سنتز کرده و نتایج نشان دادند که خواص تریبولوژیکی به طور قابل توجهی بهبود

[1] Nano Biochar
[2] Pyrolysis
[3] Biomass

یافته است. لئو و همکاران[۱۷] اثر روان کنندگی نانوکامپوزیت‌های $TiO_2@Al_2O_3$ به عنوان افزودنی‌های روان کننده را مورد بررسی قرار دادند و خواص تریبولوژیکی برتر نانوکامپوزیت‌ها را در مقایسه با نانوذرات آلومینا یا دی اکسید تیتانیوم خالص تأیید کردند. یو و همکاران[۱۸] کامپوزیت مایع یونی همراه با نانولوله کربنی چند لایه را در دمای اتاق سنتز کردند و نتایج خواص ضدسایش و کاهش اصطکاک خوبی را نشان داد. آزمایش‌های تریبولوژیکی نیز بر روی نانوکامپوزیت‌های دو بعدی انجام شده است. نانوکامپوزیت-های دو بعدی، کامپوزیت‌هایی با ساختار لایه‌ای، مانند نانوکامپوزیت‌های بر پایه گرافن و نانوکامپوزیت‌های بر پایه مولیبدن دی‌سولفید هستند و به عنوان یک ماده بهبود دهنده مناسب در افزودنی‌های روان‌کننده مؤثر آینده به شمار می‌روند.

مکانیزم روان‌کاری افزودنی‌های نانو روان‌کار

تشکیل تریبوفیلم، اثر هم افزایی و اثر ترمیم کننده سطح از جمله مکانیزم‌های روان‌کاری نانوذرات می‌باشند. جدول (۱) مکانیزم‌های روانکاری افزودنی‌های مختلف نانو روان‌کار را نشان می‌دهد.

تشکیل تریبوفیلم

به دلیل مقادیر بالای سطح ویژه و سطح انرژی، نانوذرات می‌توانند به آسانی یک لایه محافظ بر روی سطوح تماس توسط جذب یا واکنش‌های شیمیایی تشکیل دهند. تشکیل تریبوفیلم می‌تواند از تماس مستقیم فلز با فلز جلوگیری کند و نقش مهمی در روان‌کاری ایفا کند. قطبیت مولکول‌ها به طور قابل توجهی بر تشکیل فیلم اثرگذار است. افزودنی‌های نانو روان‌کار با فعالیت شیمیایی پایین مانند مس، نقره و گرافن همیشه یک تریبوفیلم جذب فیزیکی را تشکیل می‌دهند. دسانکر و همکاران[۱۹] فیلم جذب فیزیکی تشکیل شده توسط نانوذرات نقره رسوب شده را از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی و تجزیه و تحلیل‌های طیف سنج پراکندگی انرژی (EDS)[1] بررسی کردند. به غیر از فیلم جذب فیزیکی، نانوذرات حاوی اتم‌های قطبی قادر به تشکیل تریبوفیلم شیمیایی پایدارتری هستند که از طریق واکنش تریبوشیمیایی در طی فرآیند اصطکاک به دست می‌آید.

هیو و همکاران[۲۰] اثر نانو ذرات مس را روی سطوح اصطکاکی با استفاده از روش دینامیک مولکولی بررسی نموده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تأثیر نانو ذرات مس روی کاهش اصطکاک در سرعت‌های پایین بیشتر از سرعت‌های بالا است که علت آن تشکیل فیلم نانو ذرات مس روی سطح می‌باشد. باس و همکاران[۲۱] اثر افزودنی‌های بور را روی عملکرد روغن‌موتور بررسی نمودند. این محققین از روغن‌های پایه حاوی دو نوع ترکیب بور با غلظت‌های مختلف استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده‌ی تشکیل یک تریبو فیلم در شرایط مرزی یا روان کاری مخلوط بود. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش ترکیبات بور، باعث کاهش ضریب اصطکاک از ۱۰ تا ۵۰ درصد در شرایط آزمایشی متفاوت می‌گردد. باسکار و همکاران[۲۲] به بررسی آزمایشگاهی رفتار روان‌کارهای زیستی حاوی نانو ذرات به روش چهار ساچمه پرداختند. درپژوهش ایشان، اکسید مس، دی‌سولفید تنگستن و دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان نانو ذرات افزودنی به روان‌کارهای زیستی در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اکسید مس، مشخصه‌های رفتار تریبولوژیکی روان‌کارهای را بیش از سایر مواد افزودنی بهبود می‌بخشد. فیلیپ و کوالیو[۲۳] خواص تریبولوژیکی روان کننده‌هایی که از دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان ماده افزودنی در آن‌ها استفاده شده است را بررسی کردند. در تحقیقات آنها از یک روش جدید برای آماده‌سازی روان کننده حاوی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم استفاده شد. نتایج نشان داد که روش جدید فرآوری روان کننده باعث می‌شود که اندازه متوسط نانو ذرات به ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر برسد و سطح آن‌ها از چربی‌دوست به چربی‌گریز تغییر کند. این تغییرات سبب بهبود خواص تریبولوژیکی روان کننده‌های حاوی دی‌اکسید تیتانیوم گردید که با این روش پیشنهادی تهیه شده‌اند. آزمن و همکاران[۲۴]پژوهشی تحت عنوان بررسی خواص تریبولوژیکی اکسید مس در روان‌کار با کمک دستگاه سایش پین روی دیسک

[1] Energy Dispersive Dpectrometer

انجام دادند روغن مورد استفاده نیز روغن SAE40 بود. نتایج کاهش ضریب اصکاک و میزان سایش را به ترتیب ٪۵۶ و ٪۴۸ نشان داد.

جدول ۱ : مکانیزم‌های روانکاری افزودنی‌های مختلف نانو روان‌کار[۲۵]

نوع	افزودنی‌ها	مکانیزم‌های روان‌کاری
افزودنی بر پایه نانو فلز	Cu	تشکیل تریبو فیلم، اثر ترمیم کننده سطح
	Ag	تشکیل تریبو فیلم، اثر هم افزایی
	Ni	تشکیل تریبو فیلم، اثر ترمیم کننده سطح
	Pd	تشکیل تریبو فیلم
	CuO	تشکیل تریبو فیلم، اثر ترمیم کننده سطح
	Al2O3	تشکیل تریبو فیلم
	ZnO	تشکیل تریبو فیلم، اثر ترمیم کننده سطح
	TiO2	تشکیل تریبو فیلم، اثر ترمیم کننده سطح
	MoS2	تشکیل تریبو فیلم، اثر ترمیم کننده سطح
	WS2	تشکیل تریبو فیلم
	LaF3	تشکیل تریبو فیلم
	CaCO3	تشکیل تریبو فیلم
	CeBO3	تشکیل تریبو فیلم
افزودنی بر پایه نانو کربن	Graphene	تشکیل تریبو فیلم
	CNT	تشکیل تریبو فیلم
	PTFE	تشکیل تریبو فیلم
افزودنی بر پایه نانو کمپوزیت	Cu@SiO2	تشکیل تریبو فیلم، اثر ترمیم کننده سطح
	Al2O3@SiO2	اثر هم افزایی
	Cu@GO	اثر هم افزایی
	Au@GO	اثر هم افزایی
	Mn3O4@G	اثر هم افزایی
	GNS@MoS2	اثر هم افزایی
	SOCNTs@MoS2	تشکیل تریبو فیلم، اثر هم افزایی
	Co(ReO4)2@MoS2	تشکیل تریبو فیلم

لاد و همکاران[۲۶] پژوهشی با عنوان مطالعه خواص تریبولوژیکی نانوذرات به عنوان بهبود دهنده به روغن موتور چند درجه ای انجام دادند. نانو ذرات مورد استفاده اکسید تیتانیوم با غلظت ۱/۵ درصد وزنی بود. دستگاه آزمون سایش مورد استفاده پین روی دیسک بود و متغیرهای مستقل شامل بارگذاری‌های ۴۰، ۶۰ و ۹۰ نیوتن وارد بر پین در سرعت های لغزشی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متربرثانیه بود. نتایج بهبود معنی دار خواص تریبولوژیکی روغن را نشان داد. یانگ[۲۷] با بررسی روغن پایه سیلیکون و نانو ذرات نقره دریافت که

یک فیلم سه لایه‌ای شبیه ساختار ساندویچ باعث کاهش اصطکاک و سایش می‌گردد و لایه درونی به‌عنوان یک بستر اولیه برای چسبیدن نانو ذرات بر روی پایه سیلیکونی عمل می‌نماید. لایه وسطی که حاوی نانو ذرات نقره است قادر به افزایش ظرفیت حمل بار و لایه بیرونی، فیلم روغن خودآرایی شده است که نرم بوده و می‌تواند تنش برشی را کاهش دهد.

اثر هم افزایی

افزودنی‌های نانو روان‌کار در روغن روان‌کننده یا گریس جدا نمی‌شوند و اغلب با سایر افزودنی‌ها، روغن‌های روان‌کننده و سطوح اصطکاک اصلاح شده برای دستیابی به اثر هم افزایی همکاری می‌کنند. قائدنیا و همکاران[۲۸] نشان دادند که خواص تریبولوژیکی عالی نانوذرات نقره به اثر هم افزایی بین نانوذرات نقره و روان‌کننده‌های پایه نسبت داده می‌شود. جیائو و همکاران[۲۹] نشان دادند که نانوکامپوزیت‌های $Al_2O_3@SiO_2$ خواص تریبولوژیکی برتری نسبت به آلومینا یا دی اکسید سیلیسیم داشتند که به دلیل اثر هم افزایی این نانوکامپوزیت‌ها بود. به غیر از افزودنی‌های روان‌کننده بر پایه نانوکامپوزیت، یک اثر هم افزایی نیز می‌تواند بین افزودنی‌های نانو روان‌کار و سطوح اصلاح شده توسط عملیات‌های سطحی خاصی مانند نیترید کردن، پوشش دهی و بافت سازی مشاهده شود [۳۰-۳۲].

اثر ترمیم سطح

سطوح مالشی عموماً صاف هستند و می‌توانند مستقیماً با یکدیگرتماس داشته باشند و در روغن‌کاری مرزی، منجر به ضریب اصطکاک و نرخ سایش بالا می‌شود. نانوذرات می‌توانند عیوب سطحی ناشی از اصطکاک را ترمیم کنند و خواص تریبولوژیکی را بهبود بخشند. چو و همکاران[۳۳] دریافتند که افزودن نانوذرات الماس نقش اساسی در مقاومت در برابر سایش دارد. اثر پولیش ذرات نانوالماس باعث افزایش سختی سطح شده و سطوح مالشی بسیار صاف می‌شوند. علی و همکاران[۳۴] خواص ضد اصطکاک و ضد سایش نانوذرات آلومینا و دی اکسید تیتانیوم را در روغن موتور بررسی کردند. نتایج نشان داد که فشار متراکم و دمای بالا در طول اصطکاک باعث افزایش پخت نانوذرات بر روی سطوح و ترمیم خش‌ها وشیارها می‌شود که نتیجه آن بهبود خواص تریبولوژیکی است.

نتیجه گیری و چشم انداز

استفاده از نانومواد به عنوان افزودنی در روان‌کننده‌ها برای حفظ انرژی، کاهش آلاینده‌ها و حفاظت از محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. با افزودن نانو افزودنی‌ها در روان کننده‌ها، خواص تریبولوژیکی روان کننده‌ها به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. با توجه به عناصر سازنده نانوذرات، سه دسته از افزودنی‌های روان‌کننده نانو شامل افزودنی‌هایی بر پایه نانو فلز، بر پایه نانوکربن و افزودنی‌هایی بر پایه نانوکامپوزیت در این بررسی مورد بحث قرار گرفتند. علاوه بر این، مکانیزم‌های روان‌کاری افزودنی‌های روان‌کننده شامل تشکیل تریبوفیلم، اثرات هم افزایی و ترمیم کننده نیز بررسی گردیدند. در نهایت، برای تسهیل استفاده از نانومواد به عنوان افزودنی‌های روان کننده، در موارد مطالعاتی آینده باید به این نکات توجه گردد. اولاً، افزودنی‌های روان کننده آلی و معدنی سنتی همیشه حاوی گوگرد و فسفر هستند. اجزایی که به آسانی با آزاد کردن SAPS باعث آلودگی محیطی می‌شوند. بنابراین، توسعه نانومواد روان‌کاری سبز و پایدار ضروری است و در میان این مواد، نانومواد بر پایه نانوکربن، به ویژه گرافن و نانومواد شبیه به گرافن، به عنوان موارد بالقوه در نظر گرفته شوند. همچنین، مطالعه افزودنی‌های روان کننده جدید در شرایط اصطکاک شدید حائز اهمیت است. با توسعه سریع تجهیزات صنعتی پیشرفته، شرایط کار ماشین آلات با شرایط سخت مانند فشاربالا، سرعت بالا و دمای بالا مواجه خواهند شد. بسیاری از افزودنی‌های روان‌کننده با راندمان بالا در دما ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه می‌شوند و نقطه اشتعال آنها بیش از ۱۰۰درجه سانتی‌گراد نیست. بنابراین، جست و جوی افزودنی‌های روان‌کننده جدید با عملکرد تریبولوژیکی بالا به ویژه درشرایط سخت، پایه تحقیقات و کاربردهای اساسی در آینده خواهد بود.

منابع

[1] Luo, J. B., Zhou, X., (2020), Superlubricitive engineering—Future industry nearly getting rid of wear and frictional energy consumption. Friction, 8(4), pp. 643–665.
[2] Hua, J, Björling, M, Larsson, o., Shi, Y J., (2020), Controllable Friction of Green Ionic Liquids via Environmental Humidity, Advanced Engineering Materials, 22(5), 1901253.
[3] Uflyand, I. E., Zhinzhilo, V. A., Burlakova, V. E., (2019), Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development. Friction, 7(2), pp. 93–116.
[4] Padgurskas, J., Rukuiza R., Prosyčevas, I., Kreivaitis, R., (2013), Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles, Tribology International, 60, pp. 224–232.
[5] Zhang S. W., Hu, L. T., Feng, D. P., Wang, H. Z., (2013), Anti-wear and friction-reduction mechanism of Sn and Fe nanoparticles as additives of multialkylated cyclopentanes under vacuum condition. Vacuum, 87, pp. 75–80.
[6] Sánchez-López J. C., Abad M. D., Kolodziejczyk L., Guerrero E., Fernández A., (2011), Surface-modified Pd and Au nanoparticles for anti-wear applications, Tribology International, 44(6), pp. 720–726.
[7] Zare, D., Abbaszade, B. Davoudi, M. B., (2015), Improve lubrication in the deep drawing process using the nanoparticle additiv, Modares Mechanical Engineering, 15(1), pp. 317-322. (In Persia n)
[8] Greenberg, R. Halperin, G., Etsion, I., Tenne, R., (2004), The Effect of WS_2 Nanoparticles on Friction Reduction in Various Lubrication Regimes, Tribology Letters, 17(2), pp. 179-186.
[9] Shekarriz, M., Hagi Ali Akbari, F., Ebrahim Pour Ziaei, E., (2014), Synthesis of coated nickel Nanoparticle and its application as Nanolubricants, Petroleum Research, 24(80), pp. 54-62. (In Persian)
[10] Wu, Y., Tsuia, W., Liub, T., (2007), Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives, Wear, 262(7-8), pp. 819-825.
[11] Jiao, D., Zheng, S., (2011), The tribology properties of alumina/silica composite nanoparticles as lubricant additives, Elsevier Applied Surface Science, 257(13), pp. 5720–5725.
[12] Khoram Shahi, B, N., Taghipoor, A, (2022), Improving the Tribological Properties of Lubricants with The Addition Copper Oxide (CuO) Nanoparticles, Specialized scientific journal of mechanical energy conversion engineering, 9, pp. 61-76. (In Persian)
[13] Singh, Y., Singh, N. K., Sharma, A., Singla, A., Singh, D., Abd Rahim, E., (2021), Effect of ZnO nanoparticles concentration as additives to the epoxidized Euphorbia Lathyris oil and their tribological characterization. Fuel, 285, 119148.
[14] Etefaghi, E., Ahmadi, H., Rashidi, A., Mohtasebi, S.S., Soltani, R., (2011), Effects of nano-particles on Properties of Engine Oil and its Functionality Rate on Wear Reduction, Engine Research, 24(24), pp. 3-12.
[15] Su, Y., Tang, Zh., Wang, G., Wan, R., (2018), Influence of carbon nanotube on the tribological properties of vegetablebased Oil, Advances in Mechanical Engineering, 10(5), pp. 1–11.
[16] Zhang, C. L., Zhang, S. M., Yu, L. G., Zhang, Z. J., Wu, Z. S., Zhang, P. Y., (2012), Preparation and tribological properties of water-soluble copper/silica nanocomposite as a water-based lubricant additive, Applied Surface Science, 259, pp. 824–830.
[17] Luo, T., Wei, X. W., Zhao, H. Y., Cai, G. Y., Zheng, X. Y., (2014), Tribology properties of Al2O3/TiO2 nanocomposites as lubricant additives, Ceramics International, 40(7), pp. 10103–10109.
[18] Yu, B., Liu, Z. L., Zhou, F., Liu, W. M., Liang, Y. M., (2008), A novel lubricant additive based on carbon nanotubes for ionicliquids, Materials Letters, 62(17–18), pp. 2967–2969.
[19] Desanker, M., Johnson, B., Seyam, A. M., Chung, Y. W., Bazzi, H. S., (2016), Delferro M, Marks T J, Wang Q J. Oil-soluble silver-organic molecule for in situ deposition of lubricious metallic silver at high temperatures, ACS applied materials & interfaces, 8(21), pp. 13637–13645.

[20] Hu, Ch., Bai M., Lv J., Liu H., and jieLi X., (2014), Molecular dynamics investigation of the effect of copper nanoparticle on the solid contact between friction surfaces, Applied Surface Science, 321, pp. 302-309.
[21] Baş, H., and Karabacak Y. E., (2014), Investigation of the effects of boron additives on the performance of engine oil, Tribology Transactions, 57(4), pp. 740-748.
[22] Baskar, S., Sriram, G., Arumugam, S., (2015), Experimental Analysis on Tribological Behavior of Nano Based Bio-Lubricants using Four Ball Tribometer, Tribology in Industry, 37(4), pp.449-454.
[23] Filip, I., Covaliu, C., (2016), Tribological Properties of the Lubricant Containing Titanium Dioxide Nanoparticles as an Additive, Lubricants, 4(2), 12.
[24] Azman, N.F., Samion, S., Hakim Mat Sot, M.N., (2018), Investigation of tribological properties of CuO/palm oil nanolubricant using pin-on-disc tribotester, Green Materials, 6(1), pp.30–37.
[25] Zhao, J., Huang, Y., He, Y., Shi, Y. (2021), Nanolubricant additives: A review, Friction, 9, pp. 891-917.
[26] Laad, M., Ponnamma, D., Sadasivuni, K.K., (2017), Tribological Studies of Nanomodified Mineral based Multi-grade Engine Oil, International Journal of Applied Engineering Research, 12, pp. 2855-2861.
[27] Yang, G., Zhang, C., Zhang, Zhang, S., (2014), Preparation of sandwich-like self-assembled n-octanethiol film containing doped silver nanoparticles on silicon wafer and evaluation of its tribological properties, Materials Research Bulletin,55, pp. 88–94.
[28] Ghaednia, H., Hossain, M. S., Jackson, R. L., (2016), Tribological Performance of Silver Nanoparticle–Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants, Tribology Transactions, 59(4), pp. 585–592.
[29] Jiao, D., Zheng, S. H., Wang, Y. Z., Guan, R. F., Cao, B. Q., (2011), The tribology properties of alumina/silica composite nanoparticles as lubricant additives, Applied Surface Science, 257(13), pp. 5720–5725.
[30] Kalin, M., Kogovšek, J., Remškar, M., (2013), Nanoparticles as novel lubricating additives in a green, physically based lubrication technology for DLC coatings, Wear, 303(1–2), pp. 480–485.
[31] Kogovšek, J., Remškar, M., Kalin, M., (2013), Lubrication of DLC-coated surfaces with MoS2 nanotubes in all lubrication regimes: Surface roughness and running-in effects, Wear,303(1–2), pp. 361–370.
[32] Shi, S. C., Wu, J. Y., Huang, T. F., Peng, Y. Q., (2016), Improving the tribological performance of biopolymer coating with MoS2 additive, Surface and Coatings Technology,303, pp. 250–255
[33] Chu, H. Y., Hsu, W. C., Lin, J. F., (2010), Scuffing mechanism during oil-lubricated block-on-ring test with diamond nanoparticles as oil additive, Wear,268(11–12), pp. 1423–1433.
[34] Ali, M. K. A., Xianjun, H., Elagouz, A., Essa, F. A., Abdelkareem, M. A., (2016), Minimizing of the boundary friction coefficient in automotive engines using Al 2 O 3 and TiO 2 nanoparticles, Journal of Nanoparticle Research, 18, pp. 1-16.