مروری بر کاربرد فناوری نانو در روانکارها

نجمه فرزین‌نژاد[۱،*]، سید جمال حسنی‌راد[۲]

۱. دکتری شیمی تجزیه و عضو هیئت علمی، گروه پژوهش روغن، پژوهشکده توسعه فناوری‌های پالایش و فرآورش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲. کارشناس ارشد مهندسی شیمی، گروه پژوهش روغن، پژوهشکده توسعه فناوری‌های پالایش و فرآورش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

دریافت: ۹۳/۱/۲۰ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۲

چکیده

روانکاری نقش مهمی در انجام حرکت به نحو صحیح، مداوم و اقتصادی در سطوح در تماس با یکدیگر ایفا می‌کند. امروزه کلیه روانکارهای با پایه معدنی و سنتزی، برای داشتن کارآیی مفید، نیازمند افزودنی‌هایی هستند که بتوانند خواص موردنظر را در آن‌ها ایجاد نمایند. در سال‌های اخیر، با بهره‌گیری از فناوری نانو و سنتز نانو مواد، نوع جدیدی از افزودنی‌ها برای روانکارها به دلیل خواص منحصر به‌فردشان پدیدار گشته‌اند. این افزودنی‌های جدید به سبب داشتن خواص بی‌نظیر و به دلیل صرفه‌جویی انرژی که سبب می‌شوند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در این مقاله بر اساس مطالعه تحقیقاتی انجام شده روی نتایج کارهای ارائه شده در این زمینه، به معرفی و بررسی نانو افزودنی‌های به کار گرفته شده در روانکارها پرداخته شده است. با استفاده از این افزودنی‌ها، می‌توان بسیاری از خواص اساسی روغن مانند نقطه اشتعال، گرانروی، نقطه ریزش و مقاومت در مقابل اصطکاک را بهبود بخشید.

کلمات کلیدی: روانکارها، افزودنی‌ها، نانو مواد، سایش، اصطکاک

مقدمه

اصطکاک یکی از عوامل مهم اتلاف انرژی در قطعات مکانیکی می‌باشد. عدم روانکاری صحیح و منظم ماشین‌آلات علاوه بر کاهش راندمان، موجب فرسایش بیش از حد و از کار افتادگی زودرس می‌گردد. همچنین انتخاب روانکار مناسب تأثیر ویژه‌ای بر عملکرد ماشین‌ها دارد. روانکارها با ایجاد یک لایه نازک

*farzinnejadn@ripi.ir

مناسب روی سطوح دارای اصطکاک، آن‌ها را از یکدیگر جدا، گرما و ذرات سایشی ایجاد شده را برطرف می-نمایند. اخیراً تحقیقات بسیار زیادی روی روش‌های گوناگون، به منظور بهبود خواص روانکاری روغن پایه اختصاص یافته است. یکی از روش‌های بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی روانکارهای پایه، بهره-گیری از مواد افزودنی مختلف با خواص منحصر به فرد می‌باشد. در این راستا به منظور افزایش و بهبود عملکرد روان کننده‌ها از فناوری نانو نیز بهره برده شده است. به عبارتی کارایی یک روانکار به مقدار زیادی به نوع و مقدار ماده افزودنی مورد استفاده در روغن پایه بستگی دارد. مقاله حاضر آنچه را که در مورد افزایش نانومواد به روانکارها بیان می‌نماید صرفاً حاصل مطالعه انجام شده روی فعالیت‌های تحقیقاتی پژوهشگران مختلف می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از نانو مواد در روان کننده‌ها به دلیل بهبود خواص سطحی و قابلیت انتقال حرارت، افزایش بازده موتور و کاهش هزینه‌های تعمیرات، به عنوان یک ایده‌ی نو بسیار مورد توجه واقع شده است [۱]. سنتز نانو ذرات و جایگزینی مولکول‌های آلی با ذرات بسیار کوچک مواد جامد به آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد. همچنین به دلیل آن‌که محلول‌های کلوئیدی اساساً ناپایدار هستند بهره‌گیری از این فناوری را در روانکارها با چالش بزرگی روبه‌رو کرده است. پژوهشگران انواع مختلفی از نانومواد ساخته شده از مواد فلزی، آلی و معدنی را برای ساخت نانو روانکارها مورد استفاده قرار داده‌اند [۱-۸]. مهم‌ترین مزیت استفاده از نانو مواد در روانکارها به دلیل اندازه کوچک آن‌ها می‌باشد. در محدوده نانومتری، تغذیه کامل سطح مشترک غلتکی صورت پذیرفته و همچنین سنتز ذرات کامپوزیت با ویژگی‌های مختلفی چون کاهش اصطکاک، سایش و خوردگی امکان‌پذیر می‌باشد. نانو افزودنی‌ها نسبت به افزودنی‌های معمول، تا حدودی به دما حساس نیستند و واکنش‌های اصطکاکی در آن‌ها بسیار محدود می‌باشد. همچنین اندازه نانومتری این مواد موجب افزایش سطح تماس آن‌ها می‌گردد و در دمای محیط نیز کارآمد می‌باشند. مکانیسم ضد سایشی نانو افزودنی‌ها به دو صورت شکل می‌گیرد: نانو ذرات ممکن است ذوب شوند و به سطح اصطکاکی بپیوندند و یا این‌که با واکنش با سطح تشکیل یک لایه محافظ دهند.

بحث و نتایج

۱. روانکارها

روان‌کننده‌های مورد مصرف در صنعت را می‌توان به روان‌کننده‌های گازی، روان‌کننده‌های مایع، روان‌کننده‌های نیمه جامد و روان‌کننده‌های جامد دسته بندی نمود. اصلی‌ترین وظایف روانکارها شامل روانکاری، انتقال حرارت، حفاظت از سطوح، ضربه‌گیری، انتقال ذرات و آب‌بندی می‌باشد. کلیه روانکارها از دو قسمت روغن پایه و مواد شیمیایی موسوم به مواد افزودنی تشکیل شده‌اند.

۲. مواد افزودنی روانکارها

برای این‌که روغن‌های روان‌کننده همه خواص لازم را داشته باشند و بتوانند وظایف خود را به طور کامل انجام دهند، به آن‌ها مواد افزودنی اضافه می‌شود. مهم‌ترین موادی که به منظور تأمین ویژگی‌های مناسب به روغن پایه افزوده می‌شوند عبارتند از [۵]:

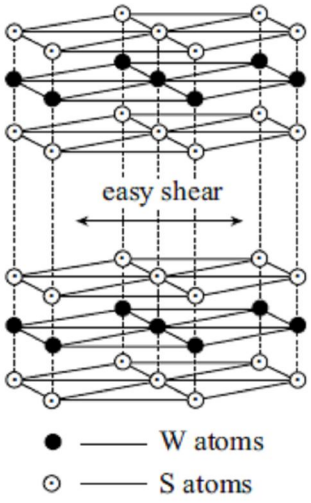
- پاک کننده‌ها و معلق کننده‌ها[1]: این مواد افزودنی با روغن پایه مخلوط می‌شوند تا قطعات موتور را تمیز کرده، آلودگی‌ها را رفع نموده و ذرات حاصل از احتراق را به صورت معلق در روغن نگهدارند. نتیجه این عمل جلوگیری از تشکیل لجن و ایجاد رسوب، روی قطعات مختلف موتور می‌باشد. مواد افزودنی پاک‌کننده که در روغن موتور به کار برده می‌شوند، از نوع ترکیبات آلی- فلزی (فلزات کلسیم، باریم و منیزیم) می‌باشند. مواد معلق‌کننده مورد استفاده در روغن موتور از نوع مواد پلیمری بدون خاکستر است.
- مواد افزودنی ضد سایش[2]: این مواد افزودنی از سایش قطعات موتور که در اثر تماس فلز با فلز رخ می‌دهد، جلوگیری می‌کنند.
- مواد افزودنی ضد اکسیداسیون[3]: این مواد از حمله اکسیژن به روغن پایه که باعث اکسید شدن روغن پایه و در نتیجه افزایش گرانروی آن می‌شود، جلوگیری می‌کنند. اکسید شدن روغن، باعث تولید اسیدهای آلی و در نتیجه ایجاد خوردگی در یاتاقان‌های از جنس مس- سرب خواهد شد.
- مواد افزودنی بهبود دهنده شاخص گرانروی[4]: این دسته مواد افزودنی باعث کم شدن تغییرات گرانروی در برابر تغییرات درجه حرارت می‌گردند. این مواد در کاهش مصرف سوخت، بهبود خواص جریان در درجه حرارت‌های پایین و جلوگیری از تشکیل کریستال‌های واکس در روغن نقش دارند.
- مواد افزودنی ضد زنگ‌زدگی و ضد خوردگی[5] : این مواد از طریق خنثی کردن اسیدهای آلی و جلوگیری از رسیدن رطوبت به سطوح فلزی باعث کاهش زنگ‌زدگی و خوردگی می‌شوند.
- مواد ضد کف[6] : این مواد افزودنی، کشش سطحی روغن را کم کرده و اجازه می‌دهند که هوای حبس شده در روغن، از درون آن فرار کند. همچنین این مواد به علت کم کردن تماس روغن با اکسیژن، تا حدودی از اکسید شدن روغن نیز جلوگیری می‌کنند.
- بهبود دهنده اصطکاک[7] : این دسته از مواد باعث کاهش اصطکاک داخلی روغن شده و در نتیجه با کم شدن اصطکاک، مصرف سوخت نیز کاهش می‌یابد.
- مواد افزودنی پایین‌آورنده نقطه ریزش[8] : این مواد از تشکیل کریستال در روغن جلوگیری کرده و باعث می‌شوند که روغن در درجه حرارت‌های پایین یخ نزده و به خوبی جریان داشته باشد.

[1]Detergents and Dispersants
[2]Anti-Wear
[3]Anti-Oxidant
[4]VI-Improver
[5]Anti-Rust & Anti-Corrosion
[6]Anti–Foam
[7]Friction Modifiers
[8]Pour Point Depressant

۳. نانو افزودنی‌های مورد استفاده در روانکارها

۱.۳. نانو ذرات WS_2

نانو افزودنی IF-WS_2[1] را به عنوان روان‌کننده جامد نه تنها در شرایط متعارف بلکه تحت شرایط دشوار، مانند دما و فشار بالا، بار زیاد، خلأ زیاد، تابش و محیط خورنده می‌توان به کار برد. این نانو افزودنی دارای ساختار لایه‌ای بسته شش ضلعی است که در شکل ۱ نشان داده شده است. هر اتم تنگستن به دو اتم سولفور متصل است. اتم تنگستن و سولفور با پیوندهای قوی شیمیایی به یکدیگر متصل شده‌اند در حالی که اتم‌های سولفور با پیوند ضعیف مولکولی به یکدیگر اتصال دارند. نانو افزودنی WS_2 یک ترکیب شیمیایی بی-اثر می‌باشد که به سختی در محیط‌هایی مثل آب، روغن، الکل و اسید حل می‌گردد ولی به گاز فلوئور، سولفوریک اسید داغ و فلوئوریدریک اسید حساس می‌باشد. این ترکیب غیر سمی بوده و موجب زنگ‌زدگی و خوردگی فلزات نمی‌شود. همچنین دارای مقاومت حرارتی بالایی بوده و نسبت به اکسید شدن مقاوم می-باشد [۶].



شکل ۱. ساختار کریستالی WS_2 [۶]

بررسی اثر افزودن IF-WS_2 به روغن‌های پایه در محدوده گسترده‌ای از شرایط عملیاتی برحسب فشار تماس، سرعت لغزشی و ویسکوزیته توسط گرینبرگ[2] و همکارانش صورت پذیرفته است [۷]. افزایش نانوذرات IF-WS_2 به روغن‌های پایه، باعث کاهش ۵۰ درصدی ضریب اصطکاک در شرایط مختلف روانکاری می‌گردد. بنابراین WS_2 دارای خصوصیات برجسته‌ای می‌باشد که می‌توان در زیر ذکر نمود:

- WS_2 دارای قابلیت نفوذ بسیار خوبی در منافذ بسیار ریز است [۸].
- WS_2 مانع تخریب سطوح در تماس با یکدیگر می‌شود [۸،۶].

[1] Inorganic Fullerene-WS_2
[2] Greenberg

• WS_2 باعث ایجاد سطوح خود روان‌کننده می‌گردد [۸،۶].

راپوپورت[1] و همکارانش در تحقیقات خود، مشخصات اصطکاکی ذرات IF در روغن را به سه عامل زیر نسبت دادند [۹-۱۱]:

۱) شکل کروی IF عاملی برای امکان مکانیسم غلتکی اصطکاک می‌باشد.
۲) نانو ذرات IF به عنوان یک جداکننده به کار می‌روند، به طوری که موجب حذف تماس فلز- فلز و چسبندگی در سطح می‌شوند.
۳) جسم سوم موجب انتقال مواد می‌شود.

جسم سوم می‌تواند به عنوان مخلوطی از روغن، نانو ذرات روانکار جامد و ذرات سایشی در نظر گرفته شود [۱۲]. در شرایط بارگذاری کم به دلیل آن‌که شکل نانو ذرات IF حفظ می‌شود، اصطکاک غلتکی مکانیسم غالب می‌باشد. تحت شرایط بارگذاری بیش‌تر، فیلم IF تشکیل می‌شود که موجب کاهش تماس مستقیم نامطلوب و افزایش مقاومت در مقابل سایش می‌گردد [۱۲]. همچنین با افزایش بارگذاری، نانو ذرات IF به سطح مشترک نفوذ کرده و سطوح اصطکاکی را از تماس مستقیم حفظ می‌نمایند. بنابراین نانو ذرات IF موجب افزایش توان تحمل اعمال بار می‌شوند.

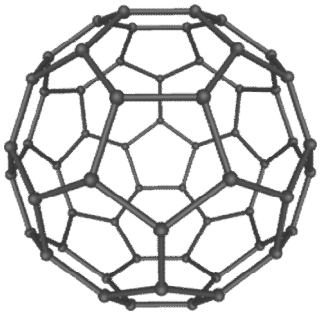
شاشنگ[2] و همکارانش از فیلم کامپوزیت WS_2-Ni برای بهبود خواص تریبولوژی و مقاومت استفاده نمودند [۱۳]. آنها دریافتند که فیلم کامپوزیت حاوی مقادیر کم نیکل (۵٪) دارای مقاومت سایشی بالاتری نسبت به فیلم WS_2 است. همچنین مشخص گردید که مقادیر بالای نیکل (۱۰/۳٪) دارای نتیجه معکوس بوده و باعث کم‌تر شدن مقاومت سایشی نسبت به فیلم WS_2 می‌گردد. در مطالعه دیگری این محقق و همکارانش از فیلم کامپوزیت WS_2-Ag برای بهبود خواص تریبولوژی و مکانیکی استفاده نمودند [۱۴]. آنها دریافتند که فیلم کامپوزیت حاوی ۹٪ نقره از مقاومت سایشی و قدرت چسبندگی بهتری نسبت به فیلم WS_2 برخوردار است.

۲.۳. نانو ذرات فولرن[3]

فولرن‌ها، خانواده‌ای از کربن‌های چند شکل با شبکه سه بعدی از این اتم‌ها هستند. فولرن انواع گوناگون و متعددی دارد و می‌تواند به صورت کره، بیضی‌گون، یا استوانه باشد. مولکول‌های فولرن معمولاً به صورت قفسه‌هایی متشکل از ۶۰ اتم می‌باشند که به صورت شش ضلعی و پنج ضلعی به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل ۲ ساختار سه بعدی فولرن را نشان می‌دهد. فولرن یا C_{60} می‌تواند به عنوان افزودنی در روغن‌های روان‌کننده به کار برده شود. مولکول‌های فولرن سبب جدا کردن سطوح در حال تماس از یکدیگر می‌شوند.

[1] Rapoport
[2] Shusheng
[3] Fullerene

این دسته از ترکیبات به دلیل مقاومت و پایداری بالا، در شرایط بارگذاری زیاد نیز خصوصیات چرخش بلبرینگ مانند خود را حفظ می‌نمایند.



شکل ۲. ساختار سه بعدی فولرن

لی[1] و همکارانش، به بررسی اثر افزودن نانو ذرات فولرن C_{60} روی ویژگی‌های روان‌کنندگی روغن معدنی بر اساس غلظت حجمی نانو ذرات پرداختند. در این مطالعه خواص روانکاری با اندازه‌گیری دمای سطح اصطکاک و ضریب اصطکاک از طریق آزمون دیسک روی دیسک[2] انجام شد. این آزمون تحت بارهای عمودی و غلظت‌های حجمی مختلف نانو ذرات فولرن صورت گرفت. نتایج بیانگر نقش ویژه نانو ذرات فولرن با غلظت حجمی بالاتر می‌باشد. حضور این نانو ذرات، ضریب اصطکاک کوچک‌تر و سایش کم‌تری را موجب شده است. بنابراین خصوصیات روانکاری روغن معدنی با افزودن نانو ذرات فولرن بهبود یافته است [۴]. همچنین کو[3] و همکارانش، نقش نانو ذرات فولرن افزوده شده به روغن معدنی را مورد ارزیابی قرار دادند. آزمون‌های چهار ساچمه و دیسک روی دیسک با اعمال بارهای عمودی مختلف، انجام گرفت. نتایج حاکی از بهبود قابل ملاحظه خواص روانکاری روغن حاوی این نانو ذرات نسبت به روغن معدنی بود [۳].

میبو[4] و همکارانش از روغن حاوی فولرن C_{60} برای بهبود عملکرد کمپرسورهای یخچالی خانگی استفاده نمودند [۱۵]. با تحقیق انجام شده مشخص گردید که ضریب اصطکاک نانو روغن با افزایش غلظت نانو ذرات در روغن پایه معدنی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۳.۳. نانو الماس‌ها[5]

نانو الماس‌ها معمولاً با انفجار ناگهانی تری‌نیتروتولوئن در یک محفظه بسته به‌دست می‌آیند [۱۶]. متوسط اندازه این نانو ذرات ۴-۶ nm بوده و دارای سطح ویژه $m^2/g_{\text{الماس}}$ ۳۵۰-۴۰۰ می‌باشند. هدف از به کار بردن

[1] Lee
[2] Disk-on-disk tester
[3] Ku
[4] Meibo
[5] Nano diamonds

نانو الماس‌ها به عنوان افزودنی روان‌کننده‌ها، اندودکاری سطوح لغزشی می‌باشد. این اندودکاری موجب افزایش مقاومت در مقابل سایش، توانمند سازی روانکاری لغزشی میان سطوح و کاهش اصطکاک می‌شود [۱۸،۱۷]. نانو الماس‌ها با پوشش سطح تماس موجب کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک می‌گردند. پوشش نانو الماس موجب کاهش سطح تماس شده و لذا نیروی کششی میان فصل مشترک دو سطح نیز کم می‌شود. نانو الماس به عنوان یک ماده افزودنی به روغن موتور، موجب کاهش مصرف بنزین و افزایش عمر موتور می‌گردد [۱۹].

چو[1] و لی با افزودن ppm ۱۵۰-۵۰ نانو الماس به روان‌کننده‌ها، کاهش سایش در آزمون میله روی صفحه[2] را مشاهده نمودند [۱۷]. در مطالعه‌ای که توسط صداقت حسینی و همکارانش صورت گرفت به ارزیابی نقش افزودن نانو الماس‌ها روی ویژگی‌های روغن‌های موتور و سایش بخش‌های داخلی موتور پرداختند. این محققین به این نتیجه رسیده‌اند که افزودن نانو الماس، موجب بهبود چشم‌گیر خواص و عملکرد روغن موتور نسبت به نمونه روغن موتور بدون نانو ذرات الماس گردیده است [۲۰].

هیون - سو[3] و همکارانش خواص تریبولوژیکی مایع پارافین حاوی نانو الماس را روی مقدار سایش و افزایش طول عمر قطعات بررسی نمودند [۲۱]. این محققین دریافتند که با افزایش ذرات نانو الماس به پارافین ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار ساختار کروی و هشت ضلعی این ذرات می‌باشد که همانند یک عنصر تماس حلقوی بین دو سطح عمل می‌نمایند.

۴.۳. نانو ذرات فلزی

براساس نتایج اکثر محققین، دسته دیگر از نانو افزودنی‌های مورد استفاده در روانکارها، نانو ذرات فلزی گروه ۱B (طلا، نقره و مس) می‌باشد. نانو ذرات فلزی ناپایدار بوده و به راحتی به شکل توده در می‌آیند. به عبارت دیگر نانو ذرات در اثر تماس با یکدیگر، به هم چسبیده و رشد کرده و ساختار نانومتری و خواص منحصر به فرد خود را از دست می‌دهند. هنگامی که این نانو ذرات به روغن افزوده می‌گردند، رسوب می‌کنند. پایداری، قابلیت انحلال و توزیع ضعیف این سه نانو ذره در روغن‌های روان‌کننده، کاربرد مضاعف آن‌ها را به عنوان ماده افزودنی در فرمولاسیون روان‌کننده‌ها محدود کرده است. یکی از روش‌های انحلال مؤثر، پوشش دادن آن‌ها با لایه‌ای از مولکول‌های آلی است؛ به صورتی‌که ترکیبی از یک گروه قطبی و یک زنجیره بلند آلکیل ایجاد شود. گروه قطبی پوشش باید توانایی جذب شیمیایی بسیار قوی ترکیب فعال سطحی[4] را که روی سطح نانو هسته‌های معدنی وجود دارد داشته باشد. در صورتی که زنجیره بلند آلکیلی پوشش باید طول و ساختار مناسبی داشته باشد تا نانو ذرات معدنی در روغن قابل حل باشند [۸].

[1] Chou
[2] pin-on-disk
[3] Hyun-Soo
[4] Surfactant

غالب عامل‌های پوششی، تیول‌های آلکیلی بلند زنجیر [۲۳،۲۲]، اسید اولئیک [۲۴] و آمین‌ها [۲۵] می‌باشند. تحقیقات بسیار زیادی به ارزیابی ویژگی‌های روان‌کنندگی نانو ذرات مس پوشش داده شده اختصاص یافته است. نانو افزودنی مس پوشش‌دار شده به طور چشم‌گیری می‌تواند سبب بهبود مقاومت سایشی، افزایش توان تحمل اعمال بار روغن و نیز موجب کاهش ضریب اصطکاک گردد. ژو[1] و همکارانش به بررسی نقش اندازه و مقدار نانو ذرات مس روی خصوصیات روان‌کنندگی آن‌ها پرداختند. بر مبنای این نتایج که در جدول ۱ نشان داده شده است، نانو ذرات مس با اندازه ذرات ۲ و ۵ نانومتر که با دی‌آلکیل دی-تیوفسفات[2] پوشش دار شده‌اند، خواص ضد سایشی پارافین مایع را بهبود بخشیده‌اند. درحالی که نانو ذرات مس با اندازه ذرات ۱۲ nm موجب کاهش این بهبود خاصیت گردیده‌اند. یک استدلال منطقی از این پدیده را شاید بتوان به اندازه کوچک‌تر نانو ذرات مس نسبت داد که دارای نقطه ذوب پایین‌تر و واکنش پذیری بالاتر می‌باشند. نانو ذرات کوچک‌تر می‌توانند با سطوح تماسی برهم‌کنش بیش‌تری داشته و در نتیجه لایه فیلمی تشکیل دهند که موجب بهبود خواص ضد سایشی گردند [۲۲].

جدول ۱. عملکرد ضدسایشی نانو ذرات مس پوشش داده شده با DDP [۲۲]

		اندازه نانو ذرات مس (nm)		
نمونه	پارافین مایع	۲	۵	۱۲
AWS (mm^2)	۰/۴۴۸	۰/۲۶۱	۰/۳۹۳	۰/۶۰۲

در تحقیق دیگری که توسط وانگ[3] و همکارانش انجام شد آن‌ها با استفاده از احیای فاز مایع، نانو ذرات مس را سنتز نمودند. براساس نتایج حاصله، ذرات مس با اندازه ۲۰nm پراکندگی بهتری در روغن روان‌کننده داشته و در نتیجه عملکرد بهتری را از خود نشان داده‌اند [۲۶]. وو[4] و همکارانش، نقش نانو ذرات CuO، TiO_2 و نانو الماس را در خواص روانکاری روغن موتور API-SF و روغن پایه مورد بررسی قرار دادند. براساس تحقیقات آن‌ها، روغن SF حاوی نانو ذرات، دارای ویسکوزیته بالاتری نسبت به روغن SF فاقد نانو ذرات بوده است که جزئیات آن در جدول ۲ بیان گردیده است. روغن SF حاوی نانو ذرات TiO_2 دارای بالاترین ویسکوزیته نسبت به سایر روغن‌ها بوده و همچنین پایین‌ترین ضریب اصطکاک را در دمای ۴۰ °C از خود نشان داده است [۲۷].

همچنین این محققین آزمایش‌های اصطکاک و سایش را به کمک یک دستگاه لغزشی رفت و برگشتی انجام داده‌اند. نتایج نشان داده است که نانو ذرات افزوده شده به روغن‌های پایه، تأثیر به سزایی در کاهش اصطکاک و سایش دارند. ضریب اصطکاک در روغن موتور API-SF و روغن پایه حاوی نانو ذرات CuO به

[1] Zhou
[2] Dialkyldithiophosphate (DDP)
[3] Wang
[4] Wu

ترتیب ۱۸/۴٪ و ۵/۸٪ کاهش یافته است. علاوه بر این، میزان شکاف‌های سایشی به ترتیب ۱۶/۷ و ۷۸/۸ درصد در مقایسه با روغن‌های فاقد نانو ذرات CuO کاهش یافته است [۲۷]. این نتایج حاکی از تشکیل یک لایه محافظ روی سطح سایشی می‌باشد که از تماس مستقیم سطوح جلوگیری کرده و موجب کاهش ضریب اصطکاک و رفع چسبندگی سطوح تماسی می‌شود.

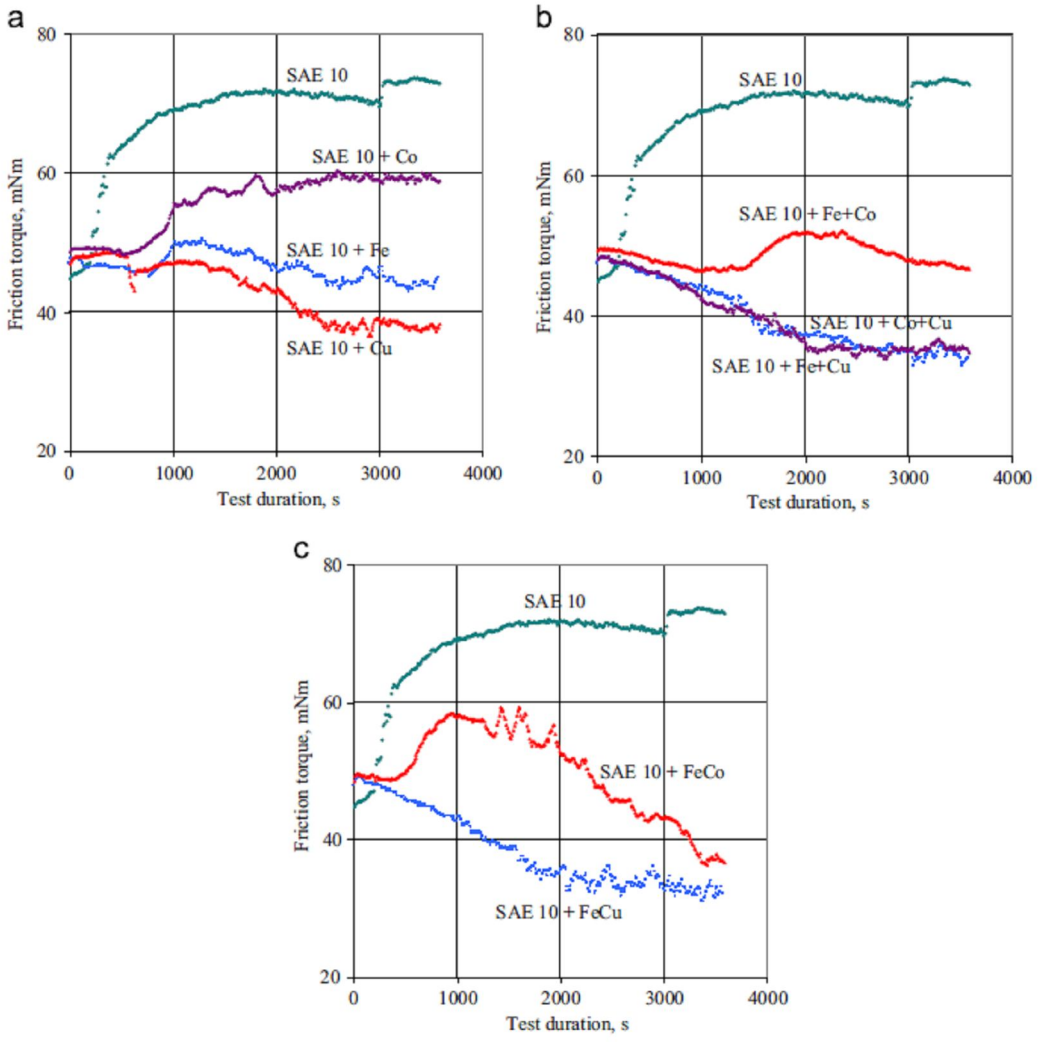
جدول ۲. ویسکوزیته روغن موتور API-SF و روغن پایه با و بدون نانو ذرات [۲۷]

افزودنی‌ها	ویسکوزیته (Pa.s)			
	روغن موتور SF		روغن پایه	
	۴۰ °C	۶۰ °C	۴۰ °C	۶۰ °C
CuO	۰/۱۱۰۸	۰/۰۴۷۲۶	۰/۰۹۱۹	۰/۰۴۰۶
TiO_2	۰/۱۴۲۵	۰/۰۵۰۸۶	NA	NA
Nano-Diamond	۰/۱۰۵۲	۰/۰۴۲۹۹	۰/۰۹۰۴	۰/۰۳۴۲
None	۰/۱۰۳۶	۰/۰۴۱۹۴	۰/۰۸۹۳	۰/۰۳۶۶

ویسکوزیته بالاتر عدد سومرفلد[1] را افزایش می‌دهد، به صورتی که رژیم روانکاری ممکن است از شرایط مرزی به روانکاری درهم یا هیدرودینامیک تغییر کند. بنابراین در دماهای پایین، کاهش در ضریب اصطکاک می‌تواند مشاهده گردد و در دماهای بالاتر به دلیل آن‌که ویسکوزیته روغن خیلی پایین است، برقراری لایه روغنی میان سطوح اصطکاکی آسان نمی‌باشد [۲۷].

پادگورسکاس[2] و همکارانش تأثیر افزودن نانو ذرات فلزی آهن، مس، کبالت و ترکیب آن‌ها را به روغن معدنی مورد بررسی قرار دادند [۲۸]. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که افزودن هر کدام از این نانو ذرات موجب کاهش قابل توجه اصطکاک و سایش می‌شود. همچنین نانو ذرات Cu، بیش‌ترین نقش را در کاهش ضریب اصطکاک نشان می‌دهند. شکل ۳ نمودارهای گشتاور اصطکاک روغن فاقد افزودنی و روغن‌های محتوی نانو ذرات کبالت، آهن، مس و ترکیب آن‌ها را در آزمون سایشی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از نانو ذرات آهن پوشیده شده با نانو ذرات مس باعث کاهش نزدیک به ۵۰ درصدی در ضریب اصطکاک نسبت به روغن پایه گردیده است. بنابراین می‌توان این اثر را به نقش پر رنگ مس در تشکیل لایه بسیار نازک روانکاری و کاهش سطح تماس نسبت داد. بنابراین می‌تون درک نمود که استفاده از مخلوط نانو ذرات بسیار مؤثرتر از نانو ذرات خالص می‌باشد.

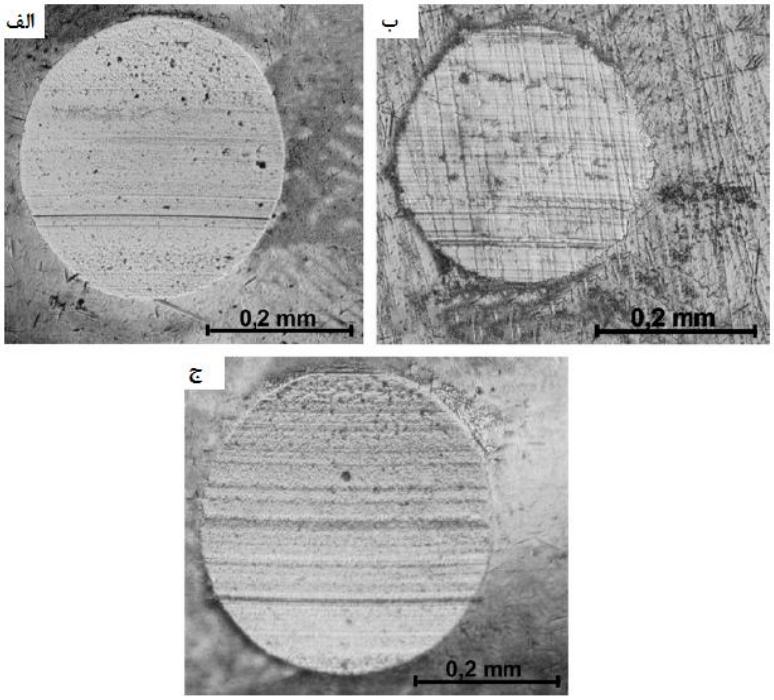
[1]Sommerfeld
[2]Padgurskas



شکل ۳. نمودارهای گشتاور اصطکاک روغن فاقد افزودنی و روغن‌های محتوی نانو افزودنی‌ها: (a) با نانوذرات فلزی؛ (b) با مخلوط نانوذرات و (c) نانوذرات آهن پوشیده شده با مس و کبالت [۲۸]

تصاویر SEM خراش‌های سایشی مربوط به روغن‌ها با افزودنی نانو ذرات فلزی: (الف) نانو ذرات آهن، (ب) نانو ذرات مس و (ج) نانو ذرات کبالت در شکل ۴ نشان داده شده است. این تصاویر، تشکیل یک لایه فیلم متشکل از عناصر نانو ذرات را تأیید می‌نماید. بررسی میکروسکوپی سطح نشان می‌دهد هنگامی که از نانو افزودنی‌ها استفاده می‌گردد، سطوح سایشی مختلفی شکل می‌گیرد. این تصاویر حاکی از آن است که هنگامی که از نانو افزودنی مس در روغن استفاده شده است، مکانیسم کاهش اصطکاک متفاوتی اتفاق افتاده است که نشان از نقش مؤثرتر خاصیت ضد سایشی مس نسبت به سایر نانو افزودنی‌ها می‌باشد. در واقع نانو

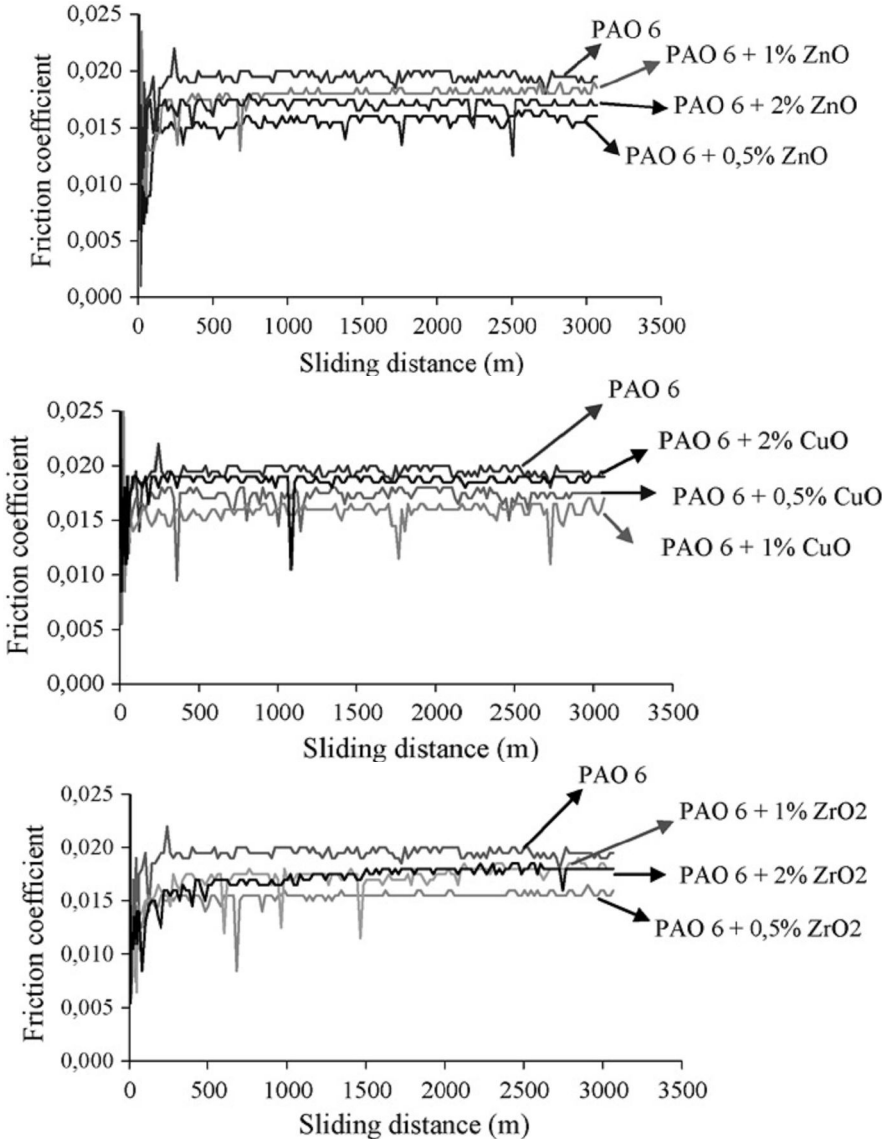
ذرات مس نقش بارزتری در منطقه تماس ایفا می‌کنند. استفاده از نانو افزودنی‌ها، موجب کاهش فشار تماسی و جایگزینی اصطکاک لغزشی[1] با تأثیر غلتشی[2] در منطقه تماس می‌گردد [۲۸].



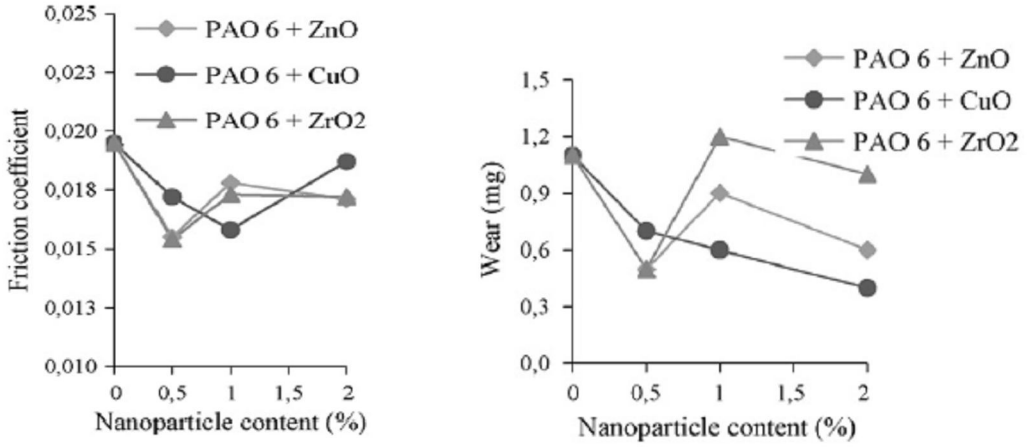
شکل ۴. تصاویر SEM خراش‌های سایشی بر روی توپ‌هایی که با روغن‌های دارای نانو ذرات فلزی: (الف) نانو ذرات آهن؛ (ب) نانو ذرات مس و (ج) نانو ذرات کبالت آماده شده است [۲۸]

هرناندز باتز[3] و همکارانش تأثیر سوسپانسیون نانو افزودنی‌های اکسید روی، مس و زیرکونیوم را در روان کننده‌های روغنی مورد بررسی قرار دادند که در شکل ۵ قابل مشاهده است [۲۹]. همچنین تأثیر افزایش نانو ذرات اکسید روی، مس و زیرکونیوم در کاهش ضریب اصطکاک و سایش روغن روان کننده پلی‌آلفااولفین[4] در شکل ۶ نشان داده شده است. تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزودن همه نانو ذرات، موجب کاهش اصطکاک و سایش نسبت به روغن پایه شده است. همچنین نقش نوع و مقدار نانو ذرات در کاهش ضریب اصطکاک و سایش نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکسید روی و زیرکونیوم رفتار ضد سایشی یکسانی را از خود نشان داده‌اند. همچنین محتوای ۰/۵٪ وزنی ZrO_2 و ZnO بهترین عملکرد را در کاهش ضریب اصطکاک و سایش دارا می‌باشند [۲۹].

[1]Sliding friction
[2]Rolling effect
[3]Hernandez Battez
[4]Poly alpha olefin (PAO 6)



شکل ۵. تأثیر افزایش نانو ذرات ZnO، CuO و ZrO_2 در آزمون اصطکاک روغن روان‌کننده PAO_6 [۲۹]



شکل ۶. نقش مقدار نانو ذرات ZnO، CuO و ZrO_2 در کاهش ضریب اصطکاک و سایش [۲۹]

طلا بهترین و مناسب‌ترین پوشش برای جداره داخلی سیلندرها می‌باشد ولی به دلیل قیمت بسیار بالای طلا و محدودیت در روش‌های ریزکردن آن، کم‌تر از آن استفاده می‌شود. به‌کارگیری نانو ذرات طلا در روانکارها موجب افزایش پایداری دمایی، افزایش پایداری شیمیایی، آب‌بندی بسیار مناسب به دلیل نرمی طلا، افزایش رسانایی حرارتی، افزایش قابلیت جذب سطحی و در نتیجه فعالیت بالاتر روانکارها گردیده است [۳۰].

کاهش اصطکاک و رفتارهای ضد سایشی نانو ذرات به اندازه، شکل و غلظت آن‌ها بستگی دارد. اندازه آن‌ها غالباً در محدوده ۱۲۰-۲۰ nm می‌باشد [۳۲،۳۱،۲۲،۱۱]. چیناس-کاستیلو[1] و اسپایکس[2] تأثیر اندازه ذرات را با استفاده از نانو ذرات طلای ۵ و ۲۰ نانومتر بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانو ذرات طلای ۲۰ نانومتری اثر بیش‌تری در کاهش اصطکاک و سایش نسبت به نانو ذرات طلای ۵ نانومتری دارا می‌باشند [۳۱].

چنگزی[3] و همکارانش اثر نانو ذرات مس را روی سطوح اصطکاکی با استفاده از روش دینامیک مولکولی بررسی نموده‌اند [۳۳]. نتایج تحقیق 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.

[1]Chinas-Castillo
[2]Spikes
[3]Chengzhi

تحقیق دیگری توسط یانگ[1] و همکارانش بر روی پایه سیلیکون با استفاده از فیلم اکتان تیول خودآرایی شده شبه ساندویچی حاوی نانو ذرات نقره صورت پذیرفته است [۳۴]. آزمایش‌های تریبولوژی انجام شده نشان دهنده تشکیل یک فیلم سه لایه‌ای است. این فیلم سه لایه‌ای به علت ساختار شبه ساندویچی خود باعث کاهش اصطکاک و سایش می‌گردد. لایه درونی این فیلم سه لایه‌ای به عنوان 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 اکتان تیول خود آرایی شده است که نرم بوده و می‌تواند تنش برشی را کاهش دهد.

۵.۳. نانو ذرات جامد کلوئیدی

مکانیسم کاهش اصطکاک و خواص ضد سایشی نانو ذرات در روان‌کننده‌ها به صورت تأثیر کلوئیدی، تأثیر غلتشی، لایه محافظ و جسم سوم[2] گزارش شده است [۲۷]. چیناس-کاستیلو و اسپایکس مکانیسم عمل نانو ذرات جامد کلوئیدی را در روغن‌های روانکار بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که در فیلم نازک، نانو ذرات کلوئیدی به صورت تماس‌های هیدرودینامیک کشسانی[3] از طریق مکانیسم به تله افتادن مکانیکی نفوذ می‌کنند. آن‌ها همچنین دریافتند که کلوئیدها در سرعت‌های پایین تماس‌های غلتکی، لایه مرزی به ضخامت حداقل یک یا دو برابر اندازه ذره تشکیل می‌دهند [۳۱].

لیو[4] و همکارانش، محدوده وسیعی از نانو ذرات جامد کلوئیدی را با استفاده از آزمون چهار ساچمه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که رسوب محصولات واکنش اصطکاکی تولید شده توسط نانو ذرات در طول فرآیند می‌توانند منجر به تشکیل لایه مرزی و کاهش تنش برشی گردد [۳۵-۳۸].

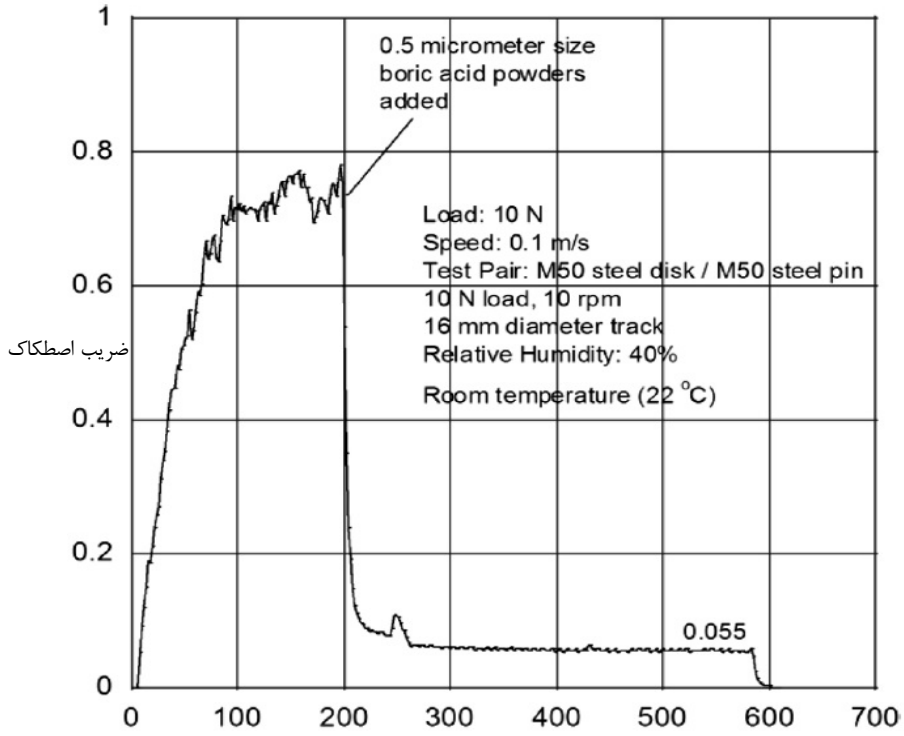
بایستی به این نکته نیز توجه نمود که همه محصولات واکنش در فرآیند روانکاری نمی‌توانند سبب بهبود مقاومت در مقابل سایش گردند. برای مثال نانو ذرات CeF_3 تحمل فشار بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند و عملکرد مناسبی نسبت به کاهش اصطکاک داشته‌اند، ولی خواص ضد خوردگی خوبی را دارا نمی‌باشند. دلیل این رفتار سطح اتم‌های F^- در CeF_3 می‌باشد که خاصیت شیمیایی فعال‌تری داشته و در نتیجه خوردگی افزایش می‌یابد [۳۹].

۶.۳. نانو افزودنی اسید بوریک[5]

ساختار لایه‌ای- بلوری اسید بوریک موجب خاصیت خود روان‌کنندگی آن می‌شود. اردمیر[6] آزمون‌های اصطکاک و سایش را با قرص‌های اسید بوریک توسط دستگاه میله روی صفحه انجام داد. پاشش پودرهای

[1]Padgurskas
[2]Third body
[3]Elastohydrodynamic (EHD)
[4]Liu
[5]Boric acid (H_3BO_3)
[6]Erdemir

اسید بوریک به سطوح لغزشی به‌طور چشم‌گیری موجب کاهش ضریب اصطکاک گردیده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که پاشش پودرهای اسید بوریک به سطوح تماسی، موجب کاهش ضریب اصطکاک از ۰/۸ به کم‌تر از ۰/۰۵ شده است [۴۰].

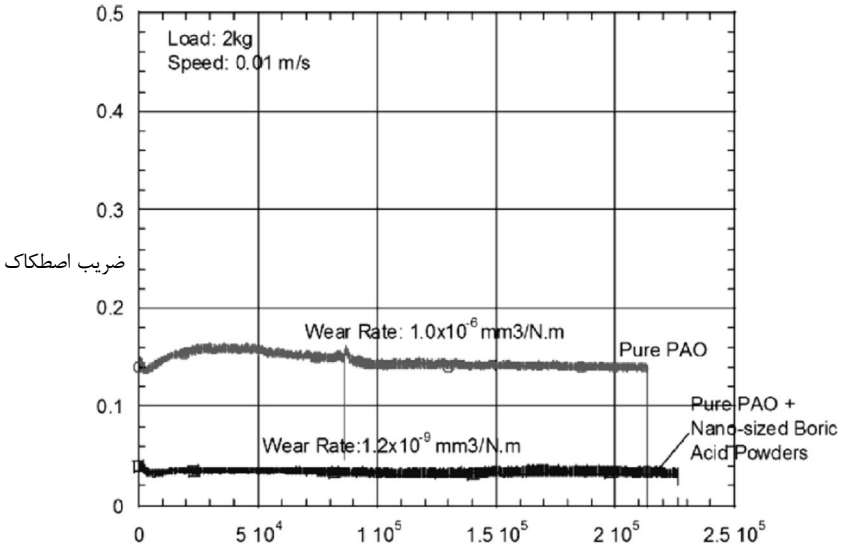


شکل ۷. تأثیر افزایش اسید بوریک در آزمون اصطکاک روغن روان‌کننده [۴۰]

همچنین شکل ۸ عملکرد روانکاری نانو ذرات اسید بوریک که در روغن‌های معدنی و PAO[1] توزیع شده است را نشان می‌دهد. در این شکل، عملکرد روانکاری از طریق اندازه‌گیری ضریب اصطکاک توسط آزمایش میله روی صفحه تعیین شده است. هنگامی که از PAO خالص استفاده شده، متوسط ضریب اصطکاک حدود ۰/۱۵ بوده است، ولی هنگامی که از ۵ درصد وزنی نانو ذرات اسید بوریک استفاده گردیده ضریب اصطکاک به ۰/۰۴ کاهش یافته است [۸].

باس[2] و همکارانش اثر افزودنی‌های بور را روی عملکرد روغن موتور بررسی نمودند [۴۱]. این محققین از روغن پایه‌های حاوی دو نوع ترکیب بور با غلظت‌های مختلف استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده تشکیل یک تریبو فیلم در شرایط مرزی یا روانکاری مخلوط است. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزایش ترکیبات بور، باعث کاهش ضریب اصطکاک از ۱۰ تا ۵۰ درصد در شرایط آزمایشی متفاوت می‌گردد. غلظت بهینه ۴٪ برای بوریک اسید و نیز نیترید بور شش وجهی به‌دست آمد.

[1]Poly alpha olefin
[2]Bas



شکل ۸. تأثیر افزایش نانو ذرات اسید بوریک در آزمون اصطکاک روغن روان‌کننده [۸]

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مطالعه تحقیقاتی، بررسی تأثیر افزودنی‌های نانو روی خواص روانکارها بوده است. با تحقیقات انجام شده مشخص گردید که نانو افزودنی‌های متعددی نظیر نانو ذرات WS_2، نانو ذرات فولرن، نانو الماس‌ها، نانو ذرات فلزی، نانو ذرات جامد کلوئیدی و نانو افزودنی اسید بوریک در سال‌های اخیر در روانکارها مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است. طبق مطالعه تحقیقاتی انجام شده روی نتایج ارائه شده توسط محققین، به‌کارگیری افزودنی‌های نانو در روانکارها باعث کاهش اصطکاک و سایش، کاهش مصرف سوخت و انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود عملکرد روانکارها می‌گردد که علت آن را می‌توان در ساختار خاص و منحصر به فرد این دسته از مواد افزودنی دانست. بررسی و تحقیق وسیع در زمینه استفاده از این دسته از افزودنی‌ها در روغن‌ها و به طور شاخص روغن‌های موتور امری لازم و ضروری در رابطه با کاهش سایش قطعات موتور، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و کاهش واردات سوخت می‌باشد. مسیر مطالعات آینده به طور شاخص، بررسی بهبود عملکرد روانکارها و در نهایت کاهش مصرف سوخت با استفاده از نانوافزودنی‌های تجارتی موجود می‌باشد.

منابع

1. Vakili-Nezhaad G.R. and Dorany A., Investigation of the Effect of MultiWalled Carbon Nanotubes on the Viscosity Index of Lube Oil Cuts, Chemical Engineering Communications, 196, 2009, 997-1007.
2. Harish S. et al., Enhanced Thermal Conductivity of Ethylene Glycol with Single-Walled Carbon Nanotube Inclusions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, 2012, 3885-3890.

3. Ku B.C. et al., Tribological Effects of Fullerene (C_{60}) Nanoparticles Added in Mineral Lubricants According to Its Viscosity, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11, 2010, 607-611.
4. Lee J. et al., Enhancement of Lubrication Properties of Nano-Oil by Controlling the Amount of Fullerene Nanoparticle Additives, Tribology Letters, 28, 2007, 203-208.
۵. محمود ترکی، هوشنگ وثوق، راهنمای عملی روان کاری ماشین آلات، انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت، ۱۳۸۴.
6. Wang H. Xu B. and Liu J., Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication, Springer, 2012.
7. Greenberg R. et al., The Effect of WS_2 Nanoparticles on Friction Reduction in Various Lubrication Regimes, Tribology Letters, 17(2), 2004, 179-186.
8. Martin J.M. and N. Ohmae., Nanolubricants, Wiley, 2008.
9. Rapoport L. et al., Friction and Wear of Bronze Powder Composites Fullerene-Like WS_2 Nanoparticles, Wear, 249, 2001, 150–157.
10. Rapoport L. et al., Superior Tribological Properties of Powder Materials with Solid Lubricant Nanoparticles, Wear, 255, 2003, 794-800.
11. Rapoport L. et al., Inorganic Fullerene-Like Material as Additives to Lubricants: Structure–Function Relationship, Wear, 225–229, 1999, 975–982.
12. Rapoport L. et al., Tribological Properties of WS_2 Nanoparticles under Mixed Lubrication, Wear, 255, 2003, 785–793.
13. Shusheng Xu. et al., Nanostructured WS_2–Ni composite films for improved oxidation, resistance and tribological performance**,** Applied Surface Science, 288, 2014, 15–25.
14. Shusheng Xu. et al., Morphology evolution of Ag alloyed WS_2 films and the significantly enhanced mechanical and tribological properties**,** Surface and Coatings Technology, 238, 2014, 197–206.
15. Meibo Xing. et al., Application of fullerene C_{60} nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors, International Journal of Refrigeration, 40, 2014, 398–403.
16. Mochalin V.N. et al., The Properties and Applications of Nanodiamonds, Nature Nanotechnology, 7, 2012, 11-23.
17. Chou C.C. and Lee S.H., Tribological Behavior of Nanodiamond-Dispersed Lubricants on Carbon Steels and Aluminum Alloy, Wear, 269, 2010, 757–762.
18. Puzyr A.P. et al., Modified Nanodiamonds as Antiwear Additives to Commercial Oils, Tribology Transactions, 55, 2012, 149–154.
19. Sung J. et al., Diamond Nanotechnology: Synthesis and Applications, Pan Stanford, 2010.
20. Hosseini M.S. Rostami M. and Mohammadi A., Study of Effects of Nano-Diamond as an Oil Additive on Engine Oil Properties and Wear Rate of the Internal Parts of Agricultural Tractors Engines, Mechanical Engineering, 57A, 2013, 14443-14447.
21. Hyun-Soo K. et al., Tribological characteristics of paraffin liquid with nanodiamond based on the scuffing life and wear amount, Wear, 301, 2013, 763–767.
22. Zhou J. et al., Study on the Structure and Tribological Properties of Surface-Modified Cu Nanoparticles, Materials Research Bulletin, 34(9), 1999, 1361-1367.
23. Li B. et al., Tribochemistry and Antiwear Mechanism of Organic–Inorganic Nanoparticles as Lubricant Additives, Tribology Letters, 22(1), 2006, 79-84.
24. Bin W. et al., Tribological Investigation of Oleic Acid Modified Copper Nanoparticles, Journal of Beijing Jiaotong University, 30(3), 2006, 43-48.
25. He-long Y. et al., Research on the Preparation and Properties of Cu Nanoparticles Lubricant Addictive, Journal of Academy of Armored Force Engineering, 20(5), 2006, 86-89.

26. Wang X.L. et al., Preparation of Nano-Copper as Lubrication Oil Additive, Journal of Central University of Technology, 12, 2005, 203-206.
27. Wu Y. Tsuia W. and Liub T., Experimental Analysis of Tribological Properties of Lubricating Oils with Nanoparticle Additives, Wear, 262, 2007, 819-825.
28. Padgurskas J. et al., Tribological Properties of Lubricant Additives of Fe, Cu and Co Nanoparticles, Tribology International, 60, 2013, 224-232.
29. Hernandez Battez A. et al., CuO, ZrO_2 and ZnO Nanoparticles as Antiwear Additive in Oil Lubricants, Wear, 265, 2008, 422-428.
۳۰. حسن برگزین، گزارش تکمیلی بررسی افزودنی های نانو در روغن موتور و نقش آن در صرفه جویی انرژی، گروه نفت و انرژی مرکز مطالعات تکنولوژی دانشگاه صنعتی شریف، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، ۱۳۸۳.
31. Chinas-Castillo F. and Spikes H.A., Mechanism of Action of Colloidal Solid Dispersions, Trans. ASME, 125, 2003, 552–557.
32. Zhang Z.F. Liu W.M. and Xue Q.J., The Tribological Behaviors of Succinimide-Modified Lanthanum Hydroxide Nanoparticles Blended with Zinc Dialkyldithiophosphate as Additives in Liquid Paraffin, Wear, 248, 2001, 48–54.
33.Chengzhi Hu. et al., Molecular dynamics investigation of the effect of copper nanoparticle on the solid contact between friction surfaces, Applied Surface Science, 321, 2014, 302–309.
34.Yang Gu. et al., 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, 2014, 88–94.
35. Zhou J. et al., Study on an Antiwear and Extreme Pressure Additive of Surface Coated LaF_3 Nanoparticles in Liquid Paraffin, Wear, 249, 2001, 333–337.
36. Xue Q. Liu W. and Zhang Z., Friction and Wear Properties of a Surface Modified TiO_2 Nanoparticle as an Additive in Liquid Paraffin, Wear, 213, 1997, 29–32.
37. Liu W. and Chen S., An Investigation of the Tribological Behaviour of Surface Modified ZnS Nanoparticles in Liquid Paraffin, Wear, 238, 2000, 120–124.
38. Chen S. Liu W. and Yu L., Preparation of DDP-Coated PbS Nanoparticles and Investigation of the Antiwear Ability of the Prepared Nanoparticles as Additive in Liquid Paraffin, Wear, 218, 1998, 153–158.
39. Sunqing Q. Junxiu D. and Guoxu C., Tribological Properties of CeF_3 Nanoparticles as Additives in Lubricating Oils, Wear, 230, 1999, 35–38.
40. Erdemir A., Tribological Properties of Boric Acid and Boric Acid Forming Surfaces: Part1, Crystal Chemistry and Self-Lubricating Mechanism of Boric acid, Lubrication Engineering, 47,1991, 179–185.
41. Bas H. and Karabacak Y.E., Investigation of the effects of boron additives on the performance of engine oil, Tribology Transactions, 57, 2014, 740–748.