در دسترس بصورت الکترونیک @ www.jscw.icrc.ac.ir

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۸، شماره ۳، (۱۳۹۷) ۵۳-۴۱

مروری بر پوشش‌های روان‌کننده

مرضیه کریمی[۱]، فرهنگ عباسی[۲*]، محمد مهدویان احدی[۳*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران، صندوق‌پستی: ۱۹۹۶-۵۱۳۳۵.

۲- استاد، دانشکده مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران، صندوق‌پستی: ۱۹۹۶-۵۱۳۳۵.

۳- استادیار، گروه پوشش‌های سطح و خوردگی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۸ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۷/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۸ در دسترس به‌صورت الکترونیک:۹۷/۰۹/۰۷

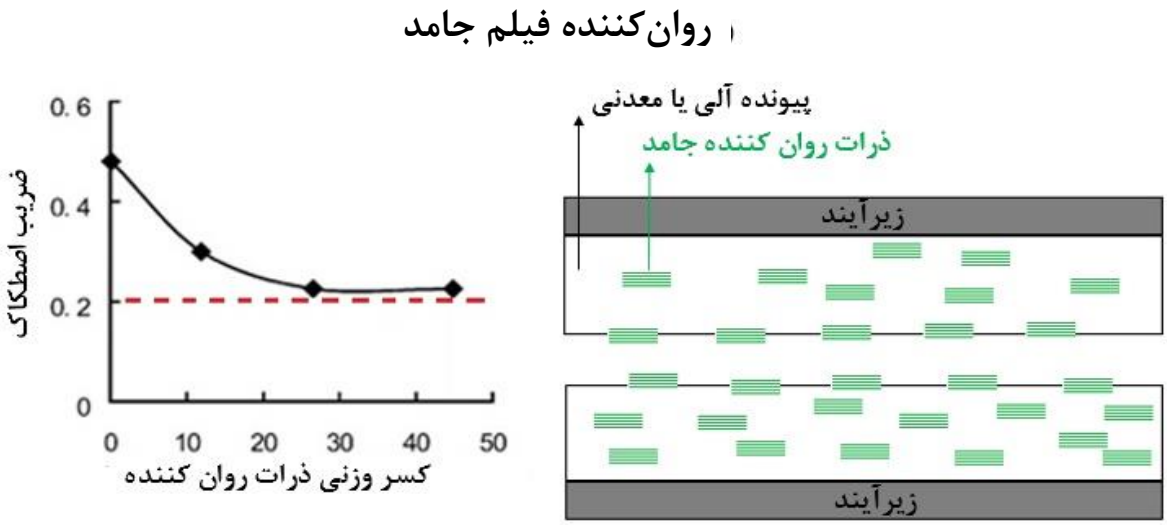
چکیده

مشکل اساسی بسیاری از تولیدات صنعتی اعم از خودرو، هوافضا، لوازم خانگی، الکترونیک و غیره، ضریب اصطکاک بالای سطوح تماسی است. بسیاری از فرآیندها در صنعت بدون استفاده از پوشش‌های روان‌کننده معروف به روان‌کننده‌های فیلم‌جامد برای سطوح درگیر در حال حرکت، غیرممکن است. از طرفی برخی از روان‌کننده‌های فیلم‌جامد سمی و اشتعال‌پذیرند، بنابراین استفاده از روان‌کننده‌های فیلم‌جامد با توجه به مزایای متعدد این مواد یک مسئله مهم مرتبط با محیط‌زیست، امنیت و سلامت است. روان‌کننده‌های فیلم‌جامد سامانه‌ای از مواد جامد هستند که برای کاهش اصطکاک بین دو سطح استفاده می‌شوند. مواد متعددی به‌عنوان روان‌کننده‌های خودروان‌کار فیلم‌جامد مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین روش‌های مختلفی برای اعمال پوشش‌های خودروان‌کار وجود دارد. روان‌کننده‌های فیلم‌جامد و گریس‌ها عمدتاً از یک یا چند ذره جامد روان‌کننده که در یک اتصال‌دهنده پخش شده‌اند تشکیل شده‌اند و توسط یک حلال رقیق می‌شوند تا روی سطح اعمال شوند. در این مقاله به مطالعه روان‌کننده‌های فیلم جامد و همچنین دو طبقه اصلی آن‌ها یعنی روان‌کننده‌های معدنی و آلی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی

روان‌کننده فیلم جامد، دی‌سولفیدمولیبدن، گرافیت، گرافن، پوشش، سایش، اصطکاک.

چکیده تصویری



*نویسنده مسئول: f.abbasi@sut.ac.ir, mahdavian-m@icrc.ac.ir

Ministry of Science, Research and Technology
Institute for Color Science and Technology

Available online @ www.jscw.icrc.ac.ir

Journal of Studies in Color World, Vol. 8, No. 3, (2018) 41-53

نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ
Journal of Studies in Color World
www.jscw.icrc.ac.ir

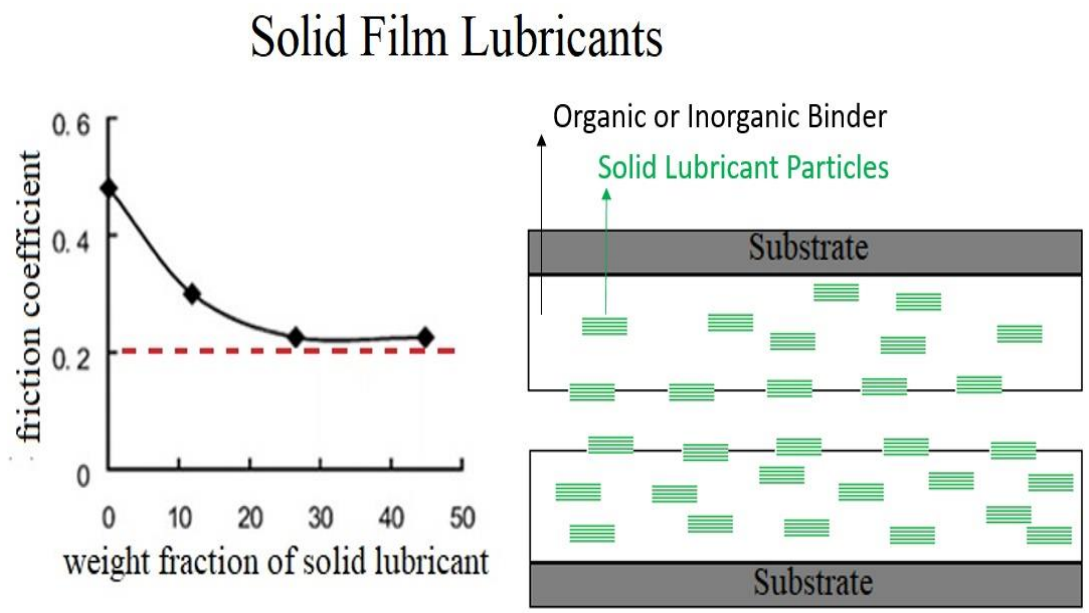
A Review on Lubricating Coatings

Marzieh Karimi[1], Farhang Abbasi[1*], Mohammad Mahdavian[2*]
1- Polymer Engineering Department, Sahand University of Technology, P. O. Box: 51335-1996, Tabriz, Iran.
2- Surface Coating and Corrosion Department, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

Abstract
High friction coefficient of contacting surfaces is one of essential problems in many industries, e.g. automotive, aerospace, home appliances, electronics, etc. It is almost impossible to perform lots of industrial processes without lubricating coatings known as solid film lubricants. On the other hand, some solid film lubricants are toxic and flammable which restricts their use considering health, environment and security. Solid fil lubricants are based on from solid systems used for reducing friction coefficient. Various materials have been used as solid film lubricants with different application methods. Solid film lubricants usually include one or two types of solid particle lubricants dispersed in binder diluted with a solvent to apply on a surface. This article provides are review on solid film lubricants and three main groups of them based on molybdenum sulfide, graphene and polytetrafluoroethylene.

Keywords
Solid film lubricants, Monybdenium sulfide, Graphite, Graphene, Coating, Wear, Friction.

Graphical abstract



Corresponding author: f.abbasi@sut.ac.ir, mahdavian-m@icrc.ac.ir

۱- مقدمه

از پوشش‌های سطح به‌منظور اهداف متفاوتی از قبیل حفاظت خوردگی سطح [۳-۱]، روان‌کنندگی، افزایش مقاومت سایشی و افزایش زیبایی بهره گرفته می‌شود که این نوشتار سعی در ارائه مروری بر پوشش‌های روان‌کننده فیلم‌جامد دارد. یک روان‌کننده جامد ماده‌ای است که به‌صورت پودر یا فیلم نازک روی سطح اعمال می‌گردد و موجب کاهش اصطکاک و سایش سطوح در حال حرکت، نسبی می‌شود و از آسیب رسیدن به سطح جلوگیری می‌کند. این نوع روان‌کننده با توجه به اثرات شکل ذرات، اندازه و ویژگی‌های بلورشناسی از روان‌کننده‌های مایع متمایز می‌گردد. شرط لازم برای عملکرد بسیاری از سامانه‌ها از جمله قطعات خودرو کاهش اصطکاک بین دو سطح که دارای حرکت نسبی هستند، می‌باشد. کاهش اصطکاک و سایش، توسط یک فیلم مایع یا گاز روان‌کننده و یا پوشش‌دهی سطح، توسط یک لایه روان‌کننده دارای مقاومت برشی کم انجام می‌گیرد [۴].

ویژگی‌هایی نظیر زیست‌سازگاری و بهره‌وری انرژی سامانه‌های تریبولوژیکی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه روش‌های پوشش‌دهی یک روان‌کننده فیلم جامد روی سطح بسیار متنوع است اما نتیجه کارکرد این روان‌کننده‌ها یکسان است؛ به این معنی که کاهش اصطکاک و سایش تحت شرایطی که دو سطح دارای حرکت نسبی هستند، در تمامی روش‌ها قابل حصول می‌باشد [۵].

روش‌های به حداقل رساندن تلفات ناشی از اصطکاک در سامانه‌های دارای حرکت نسبی اهمیت زیادی دارند. مواد معدنی و روغن‌های روان‌کننده رایج‌ترین مواد برای کاهش اصطکاک و سایش می‌باشند. برای به حداقل رساندن تلفات باید سطوح در حال حرکت نسبی با یک روان‌کننده فیلم جامد نازک جدا شوند، همچنین سرعت این سطوح درگیر با خواص فیلم روان‌کار سازگار باشد. به ارتباط سرعت حرکت سطوح دارای حرکت نسبی با خواص فیلم روان‌کار، روان‌کاری الاستوهیدرودینامیکی (EHL)[1] گفته می‌شود. در میان بسیاری از عوامل، عامل اصلی در EHL، گرانروی روان‌کننده است، با توجه به این‌که روان‌کنندگی بهینه، توسط روغن‌های روان‌کار قابل حصول نیست، در مواردی که روان‌کاری الاستوهیدرودینامیکی کارآمد نباشد، سطوح در تماس مستقیم باهم قرار می‌گیرند و در این حالت، روان‌کاری مرزی مطرح می‌گردد [۶]. در یک سامانه دارای روان‌کاری مرزی، با اضافه‌کردن افزودنی‌های EP[2] به سطوح مختلف و تشکیل لایه مرزی مولکولی توسط روان‌کننده، می‌توان سایش را به‌طور چشم‌گیری کاهش داد [۷].

هدف اصلی استفاده از روان‌کننده‌های فیلم‌جامد ایجاد فیلمی نرم یا سخت در سطوح درگیر حرکت می‌باشد. روان‌کننده‌های فیلم‌جامد می‌توانند به روش‌های مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی روی سطح اعمال گردند. روان‌کننده‌های فیلم جامد ویژگی خاصی در کاهش سایش از خود نشان می‌دهند که کاربرد آن‌ها را در خلا، تجهیزات هوافضا یا خودرو گسترده می‌کند.

در شرایط حساس که لازم است سطوح درگیر حرکت به‌صورت جدا از هم باقی بمانند و روان‌کننده هم روی سطح پایدار بماند، استفاده از روان‌کننده‌های فیلم‌جامد توصیه می‌شود. همچنین روان‌کننده‌های فیلم جامد برای کاربرد در اعمال بارهای خاص روی سطوح درگیر حرکت در حضور رژیم‌های اصطکاکی مرزی و ترکیبی در سرعت بسیار پایین هیدرودینامیکی یا هنگامی‌که روان‌کننده باید در شرایط دمایی خاص و گستره دمایی وسیع پایدار بماند، مانند هواپیما، مناسب هستند. به‌طورکلی در کاربردهایی که باید از روغن‌های روان‌کننده اجتناب گردد، مانند یاتاقان‌های مورد استفاده در خلا و در درجه حرارت بسیار بالا و یا تحت تابش بسیار شدید، روان‌کننده‌های فیلم جامد نقش مهمی را ایفا می‌کنند.

بسیاری از مواد به‌عنوان روان‌کننده‌های فیلم جامد کاربرد دارند. این روان‌کننده‌ها معمولاً روان‌کارهای ساختاری[3]، روان‌کارهای مکانیکی[4]، صابون‌های واکنش‌پذیر[5] و روان‌کننده‌های شیمیایی فعال[6] هستند [۸، ۹]. به‌طورکلی روان‌کننده‌های جامد به‌صورت یک فیلم بین سطوح دارای حرکت نسبی پوشش داده می‌شوند. به بیان ساده روان‌کننده‌های فیلم جامد برای نیازهای روان‌کاری تحت شرایط عملیاتی شدید مانند درجه حرارت بالا و یا بسیار کم مناسب می‌باشند. به‌طور مثال، زمانی که به طیف گسترده‌ای از دما از ۷۳ تا ۱۰۷۳ کلوین نیاز است و نیز در شرایطی که خوردگی سطح بالاست، روان‌کننده‌های فیلم جامد به سبب ساختار بلوری لایه‌ای موجب کاهش مقاومت برشی، سایش و اصطکاک می‌گردند، چراکه ساختارهای بلوری لایه‌ای با سازوکار حرکت نسبی لایه‌ها بر روی هم می‌توانند نیروی اصطکاک بین دو سطح را کاهش دهند. نمونه‌هایی از مواد جامد با ساختار لایه‌ای عبارت‌اند از: دی‌سولفیدمولیبدن، گرافیت، نیترید بور، یدید کادمیم و بوراکس [۱۰].

روان‌کننده‌های مکانیکی شامل ترکیبی از مواد آلی مانند پلیمرهای گرماسخت و گرمانرم و فیلم‌های اکسید فلزی که معمولاً حدود ۱۰ نانومتر ضخامت دارند، می‌باشند. روان‌کننده‌های معمولی فلزی تشکیل‌دهنده صابون‌های واکنش‌پذیر مانند نمک اورئیک اسید، نمک استئاریک اسید و نمک پالمیک اسید بر روی سطوح زینک فسفاته اعمال می‌گردند. عملکرد اصلی صابون نمک‌های اسید چرب در فناوری روان‌کاری در آماده‌سازی گریس‌ها می‌باشد. صابون در سطح فلز با واکنش شیمیایی اسید چرب روی فلز ایجاد می‌شود. روان‌کننده‌های فعال شیمیایی شامل مواد افزودنی EP و سایر مواد شیمیایی هستند که با سطح فلز برای تولید یک لایه روان‌کننده یا محافظ در ارتباط‌اند. روان‌کننده‌های فیلم جامد در صنعت کاربرد گسترده‌ای از جمله روان‌کنندگی کمپرسورها، انواع موتور، محورهای مختلف، یاتاقان و پیچ‌های سر چاهی چاه نفت، بلبرینگ‌های غلتکی، و سطوح پلاستیک و الاستومر را دارا می‌باشند.

به‌کارگیری فیلم نازک روان‌کننده در اتصالات مختلف در صنایع لوازم خانگی می‌تواند نیروی جابه‌جایی را تا ۸۰ درصد کاهش دهد. همچنین از

[1] Elasto-Hydrodynamic Lubrication
[2] Extreme pressure additive
[3] Structural lubricants
[4] Mechanical lubricants
[5] Soaps
[6] Active chemical lubricants

مقاله

روان‌کننده‌های فیلم جامد برای کنترل‌های الکترونیکی لوازم خانگی که در آن‌ها حرکت آرام و کنترل‌شده را فراهم می‌کند و تنظیمات بسیار دقیق را ممکن می‌سازد. در چنین کاربردهایی استفاده روان‌کننده‌های غیرجامد باعث آلودگی لوازم خانگی و محیط خانه می‌شود [۱۱].

مهم‌ترین خواص روان‌کننده‌های فیلم جامد شامل ساختار بلوری، پایداری حرارتی، پایداری اکسایش، واکنش‌پذیری شیمیایی، نقطه ذوب مناسب و سختی بالا می‌باشد. ساختار روان‌کننده فیلم جامد متشکل از پنج جزء اصلی می‌باشد [۱۲].

الف- جزء اتصال‌دهنده[1] که می‌تواند شامل رزین‌های آلی مانند آکریلیک، اپوکسی، فنولیک و یورتان و مواد معدنی مانند سیلیکون و یا سیلیکات‌ها و فسفات‌های غیرآلی، فلزات، سرامیک‌ها و نمک‌های فلزی اکسیدهای فلزی، سولفیدهای فلزی، سلنیدهای فلزی، تلوریدهای فلزی باشد.

ب- افزودنی[2] که بر اساس به کاربرد موردنظر اضافه می‌شود که عبارتند از: آنتی‌اکسیدان، عوامل ضدسایش، غیرفعال‌کننده سطح فلزات، پراکنه و بازدارنده‌های خوردگی.

ج- حلال[3] که شامل حلال‌های هیدروکربنی و آب می‌باشد [۱۳].

د- جامد روان‌کننده که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به گرافیت، دی‌سولفیدمولیبدن، نیترید بور، پلی تترافلوئورواتیلن (PTFE) و کامپوزیت‌های خودروان‌کار اشاره نمود [۱۴].

ه- پرکننده[4] به‌عنوان جزئی که موجب کاهش قیمت می‌شود و با توجه به ویژگی‌های کاربردی به ماده اضافه می‌گردد.

روش‌های اصلی کاربرد ذرات روان‌کننده عبارت‌اند از:

الف- به‌صورت پراکنه در چربی‌ها و روغن‌ها

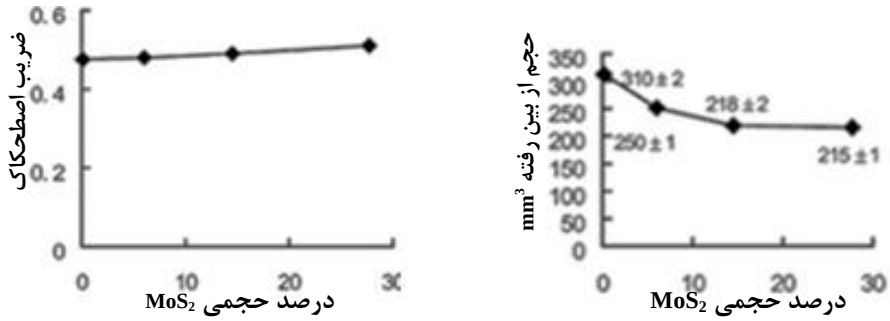
ب- به‌صورت پراکنه در پوشش‌های تشکیل‌دهنده فیلم جامد

در جدول ۱ دسته‌بندی روان‌کننده‌های فیلم جامد و انواع آن آورده شده است. تجزیه و تحلیل پوشش در یک دوره اعمال بر روی سطح، اطلاعات مربوط به روند لازم را برای مقایسه با مقادیر عوامل روان‌کننده مورد استفاده قرار می‌دهد که به تعیین زمان جایگزینی آن کمک می‌کند. روان‌کننده‌ها در یک سامانه می‌توانند کارایی خود را تا ۳۰۰۰۰ ساعت حفظ کنند [۱۶]. برای تعیین طول عمر روان‌کننده‌های فیلم جامد از تحلیل هم‌زمان نتایج به‌دست‌آمده از نمودار تغییر وزن یا حجم پوشش برحسب ضریب اصطکاک و نمودار تعداد دور سایش برحسب ضریب اصطکاک استفاده می‌گردد. در شکل ۱ و ۲ نمونه‌ای از این نمودارها برای روان‌کننده فیلم جامد MoS_2 آورده شده است [۱۷].

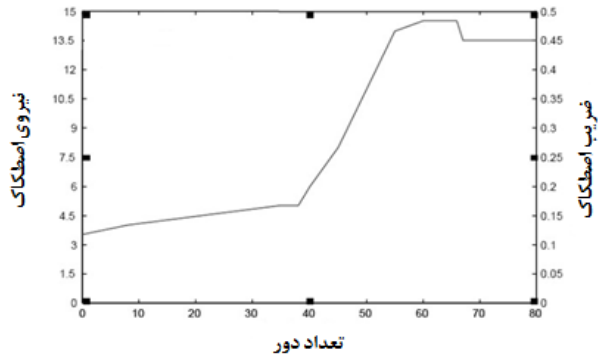
جدول ۱- دسته‌بندی روان‌کننده‌های فیلم جامد [۱۵].

نوع روان‌کننده	مثال
فلزات و مواد معدنی	دی‌سولفیدمولیبدن- گرافیت- نیترید بور
ترکیبات دارای ساختار لایه‌ای	
ترکیبات دارای ساختار غیرلایه‌ای	CaF_2 ،PbO
فلزات نرم	Cu ،Ag،Au،Sn،Pb
ترکیبات آلی	موم زنبورعسل
صابون، چربی‌ها و واکس‌ها	لیتیم استئارات
پلیمرها	پلی تترافلوئورواتیلن، پلی‌آمید

[1] Binder
[2] Additive
[3] Solvent
[4] Filler



شکل ۱- تغییرات ضریب اصطکاک و حجم اتلافی برای پوشش روان کننده با درصدهای متفاوت وزنی جامد روان‌کننده [۱۸].

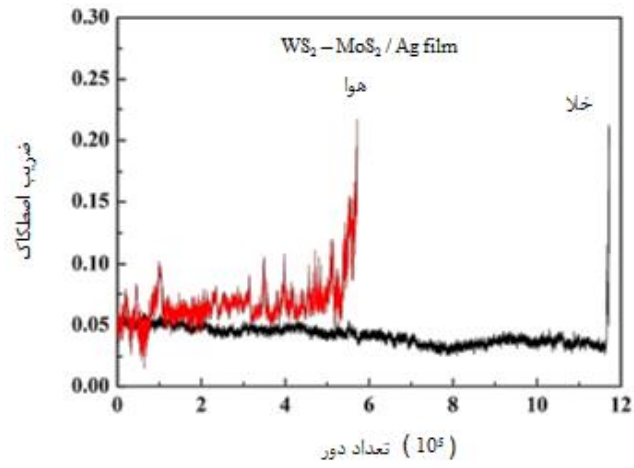


شکل ۲- تغییرات ضریب اصطکاک برحسب تعداد دور سایش [۱۹].

لازم به ذکر است که نحوه آماده‌سازی سطح قبل از پوشش‌دهی روان‌کننده در تعداد دور سایش و درنتیجه میزان از بین رفتن سطح پوشش روان‌کننده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. همچنین محیط آزمون برای تعیین طول عمر پوشش تأثیر بسزایی دارد که شکل ۳ نشان می‌دهد طول عمر پوشش روان‌کننده در محیط خلا بیشتر از محیط هوا است که به دلیل اکسایش سطح در حضور هوا بخشی از پوشش از بین می‌رود و موجب کاهش طول عمر آن می‌گردد [۲۰].

محدوده پذیرش ضریب اصطکاک روان‌کاری در صنایع و کاربردهای مختلف بین ۰/۶-۰/۳ می‌باشد که این میزان با توجه به ویژگی مهم قابل‌انتظار از پوشش روان‌کننده و کاربرد آن متغیر است. ازجمله این ویژگی‌ها می‌توان به بهترین میزان چسبندگی، مقاومت شیمیایی، حفاظت در برابر خوردگی، پایداری در برابر اکسایش، سازگاری با سطح از جنس لاستیک و پلاستیک، پایداری حرارتی، ظرفیت بالای تحمل بارگذاری، عملکرد مناسب در درجه حرارت بالا، مقاومت در برابر سایش بسیار شدید، ممانعت نفوذ رطوبت، شفافیت و محدوده دمای سرویس گسترده اشاره نمود، لازم به ذکر است که در موارد خاص این میزان به کمتر از ۰/۱ نیز می‌رسد. در حالت کلی نکته قابل‌توجه این است که ضریب اصطکاک نباید به ۱ برسد [۲۱].

دسته‌ای از روان‌کننده‌های فیلم جامد، پوشرنگ‌هایی متشکل از ذرات روان‌کننده است که با پیونده و افزودنی‌های دیگر ترکیب‌شده است. روان‌کننده به روش‌های مختلف به یک بستر اعمال می‌شود و پس از اعمال، یک فیلم جامد ایجاد می‌کند که آب را دفع می‌کند، اصطکاک را کاهش می‌دهد و مقاومت به سایش بستر را افزایش می‌دهد [۲۲]. از رزین‌های مختلف ازجمله رزین اپوکسی، فنولیک، پلی‌استر و یا ترکیب آن‌ها به‌عنوان پیونده استفاده می‌شوند. وجود ذرات معدنی در بستر می‌تواند با سازوکارهای چقرمگی از قبیل انحراف مسیر ترک و پل ذره‌ای[1]، میزان مقاومت در برابر ترک و تغییر شکل را افزایش دهد.



شکل ۳- مقایسه طول عمر پوشش در محیط هوا و خلأ [۲۰].

[1] Particle bridging

افزودن ذرات معدنی درون رزین‌های اپوکسی می‌تواند مدول، سختی و مقاومت در برابر شکست را افزایش دهد بنابراین رزین‌های اپوکسی به دلیل خواص ممتازشان از قبیل فرآیندپذیری آسان، ایمنی بالا، مقاومت عالی در برابر مواد شیمیایی و حلال‌ها، چقرمگی، جمع‌شدگی[2] بسیار کم در حین پخت، مقاومت در برابر خوردگی و چسبندگی عالی به سطوح متنوع به‌طور گسترده به‌عنوان پوشش‌های مقاوم ضدخوردگی استفاده می‌شوند [۲۳].

۲- تاریخچه روان‌کننده‌های فیلم جامد

اگرچه استفاده از گرافیت به‌عنوان روان‌کننده احتمالاً به قرون وسطی بازمی‌گردد، اما استفاده از روان‌کننده‌های فیلم جامد نسبتاً جدید است. اولین بار در ایالات‌متحده این مواد در اواسط دهه ۱۹۴۰ روان‌کننده فیلم جامد مورد استفاده قرار گرفت. روان‌کننده‌های فیلم جامد، جامد روان‌کننده و عوامل اتصال‌دهنده را شامل می‌شود که عوامل اتصال‌دهنده جامد روان کار را به سطح موردنظر اتصال می‌دهند. امروزه تقریباً دویست نوع روان‌کننده فیلم جامد وجود دارد. اولین روان‌کننده فیلم جامد گرافیت با عامل اتصال‌دهنده اسید فسفریک می‌باشد. استفاده از دی‌سولفیدمولیبدن به‌عنوان روان‌کننده فیلم جامد نیز در دهه ۱۹۴۰ آغاز گردید که در حال حاضر رایج‌ترین روان‌کننده فیلم جامد است و مواد متعدد دیگری به‌عنوان روان‌کننده‌های فیلم جامد توسط تعداد زیادی از گروه‌های تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است [۲۴].

۳- دسته‌بندی پوشش‌های روان‌کننده فیلم جامد از جهت کاربرد

پوشش‌های روان‌کننده فیلم جامد را از دو جهت کارایی تریبولوژیکی و طیف دمایی کاربرد می‌توان تقسیم‌بندی نمود. ازنظر کارایی تریبولوژیکی، این پوشش‌ها به پوشش‌های تریبولوژیکی هیبریدی (که هر دو رفتار دینامیکی گسسته و پیوسته در آن مشاهده می‌شود) و پوشش‌های تریبولوژیکی انطباقی (که پوشش‌هایی شامل مواد جامد با سرعت انتشار محدود می‌باشند) تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین ازنظر طیف دمایی کارکرد در روان‌کنندگی، این پوشش‌ها به دما پایین، دما متوسط و دما بالا تقسیم‌بندی می‌شوند. یک سامانه‌ی تریبولوژیکی شامل چهار عامل مهم می‌باشد که عبارتند از: ماهیت دو سطحی که در تماس با یکدیگر هستند[3]، سطح مشترک این دو سطح[4]، ماده واسط بین دو سطح[5] و محیط[6]. متغیرهای اصلی در سامانه‌ی تریبولوژیکی روان‌کننده‌ها می‌تواند شامل انواع حرکت‌های دو سطح روی هم، دما، سرعت و مدت‌زمان وارد شدن تنش به سطوح باشد، که این تنش خود نتیجه عوامل مربوط به

[2] Shrinkage
[3] Two contacting partners
[4] Interface between the two
[5] Medium in the interface
[6] Environment

مقاله

سطح و هندسه سطوح درگیر، میزان بارگذاری روی سطوح و ضخامت روان‌کننده اعمال‌شده است [۲۵]. کشش سطحی روان‌کننده مایع حدود dynes/cm ۴۶ تا ۸/۲ می‌باشد [۲۶]، این درحالی است که در روان‌کننده‌های جامد مقدار انرژی سطح به حدود dynes/cm ۵۲ می‌رسد [۲۷]. انرژی سطحی درواقع نتیجه نیروهای واندروالسی میان مولکولی است و هر چه این نیروها قوی‌تر باشند، کشش سطحی نیز بیشتر می‌شود.

۴- روان‌کنندگی فیلم جامد

تحت شرایط عملیاتی روان‌کنندگی فیلم جامد دو سطح جامد به‌طور مستقیم با یکدیگر در تماس هستند و هیچ روغن یا عامل روان‌ساز هیدرودینامیکی بین دو سطح درگیر وجود ندارد، و نیروی اصطکاک متناسب است با بار عمودی اعمال‌شده به سطح تماس، سرعت لغزش و اصطکاک استاتیکی، که مقدار آن بیشتر از اصطکاک جنبشی است، بنابراین انتخاب نوع روان‌کننده فیلم جامد در کارایی آن بسیار مهم است [۲۸].

۵- ترکیبات روان‌ساز

۵-۱- روان‌کننده‌های معدنی

۵-۱-۱- دی‌سولفیدمولیبدن و ویژگی‌های روان‌کنندگی آن

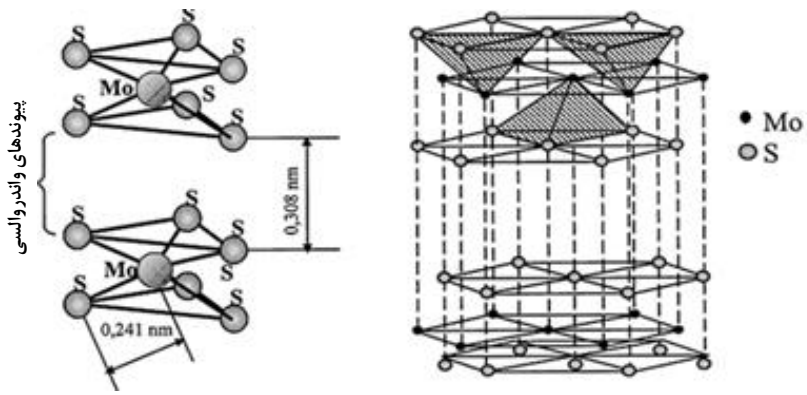
محققان اخیرا در مطالعات خود به اهمیت دی‌سولفید مولیبدن و بهبود آن با استفاده از کاهش ضخامت لایه‌ها و یا افزایش فاصله بین لایه‌ای پی برده‌اند. این ماده دارای ساختار لایه‌ای متشکل از دو سطح اتم‌های سولفور و اتم‌های مولیبدن جدا از هم و به‌صورت چندلایه‌ای می‌باشد. نانو صفحه‌های دوبعدی دی‌سولفیدمولیبدن می‌توانند با استفاده از روش‌های لایه‌برداری مکانیکی و شیمیایی از نمونه‌های توده‌ای و یا مستقیماً به روش رسوب شیمیایی بخار، تولید شوند. ساختار این ماده هگزاگونال است. بلور دی‌سولفید مولیبدن شامل لایه‌های تشکیل‌شده از پیوند مولیبدن و دو گوگرد می‌باشد که در شکل ۴ آورده شده است. در داخل سلول واحد، هر اتم مولیبدن با توزیع به شکل منشور مثلثی با اتم‌های گوگرد احاطه شده است. ضخامت هر لایه ۰/۶۲۵ نانومتر بوده و حدود ۴۰۰۰۰ سلول واحد در هر لایه وجود دارد. فاصله بین اتم گوگرد و مولیبدن ۰/۲۴۱ نانومتر و فاصله بین لایه‌ای برابر ۰/۳۰۸ نانومتر است. نیروی بین اتم‌های گوگرد و مولیبدن از نوع کوالانسی و بسیار قوی می‌باشد. همچنین لایه‌ها با نیروی مولکولی ضعیف واندروالسی کنار یکدیگر قرارگرفته و به‌راحتی می‌توانند روی‌هم بلغزند، بنابراین، دی‌سولفیدمولیبدن دارای خواص روان‌کاری می‌باشد. دی‌سولفیدمولیبدن با توجه به ویژگی‌هایی نظیر میزان پوشش‌دهی در حدود ۰/۵ میکرومتر و کاملاً یکنواخت، وجود پیوندهای مولکولی قوی، قابلیت اعمال در دمای اتاق، کارایی در طیف گسترده دمایی، عدم پوسته‌پوسته شدن پس از اعمال روی سطح، چسبندگی قابل‌توجه روی سطح و نیز کاهش قابل‌توجه ضریب اصطکاک به‌عنوان ذره جامد روان‌کننده و همچنین غیرسمی و مقرون‌به‌صرفه بودن، بسیار حائز اهمیت است [۲۹، ۳۰].

لازم به ذکر است نانو ذرات دی‌سولفیدمولیبدن نسبت به دی‌سولفیدمولیبدن با اندازه میکرو، از ویژگی روان‌کاری بهتری برخوردار است و عملکرد مناسب آن به میزان پخش شدن آن در فاز سیال بستگی دارد [۳۱]. این ماده دارای ضریب اصطکاک پایین در خلا و هوا می‌باشد و دارای پایداری حرارتی در محیط‌های غیراکسیدکننده خلا تا دمای ۱۳۷۸ K می‌باشد. اما در محیط‌های اکسیدکننده، این محدوده پایداری به محدوده ۶۷۳-۶۲۳ K کاهش می‌یابد. درواقع حباب‌های آب جذب‌شده و وجود محیط اکسیدکننده منجر به افزایش اصطکاک می‌شوند اما این مقدار افزایش، ناچیز است. دی‌سولفیدمولیبدن ظرفیت بارگذاری بیشتری نسبت به سایر روان‌کننده‌های فیلم جامد مانند گرافیت و پلی تترافلوئورواتیلن دارد، و کارایی آن نسبت به گرافیت در خلا بیشتر است [۳۲].

رفتار دی‌سولفیدمولیبدن به‌عنوان یک روان‌کننده تحت تأثیر عوامل مختلفی ازجمله وجود بخارآب و سایر گازهای متراکم شونده، میزان بارگذاری روی سطح، سرعت سایش دو سطح روی یکدیگر، دما و اندازه ذرات جامد می‌باشد که در ادامه به‌طور اجمالی بررسی می‌گردد [۳۳].

الف- تأثیر بخار آب و سایر گازهای چگالنده

کاهش اصطکاک با توجه به عملکرد روان‌کنندگی دی‌سولفیدمولیبدن به ساختار بلوری آن وابسته است و برخلاف گرافیت، به وجود گازهای چگالنده وابسته نیست. در حقیقت، نشان داده‌شده است که اصطکاک MoS_2 هنگامی‌که بخارات فشرده‌شده از جو حذف می‌شود، کاهش می‌یابد. بنابراین بخارات چگالنده و به‌ویژه بخارآب تأثیر اندکی بر عملکرد MoS_2 به‌عنوان یک روان‌کننده فیلم جامد دارد و با افزایش میزان رطوبت نسبی اصطکاک در سطح فلز پوشش داده‌شده با MoS_2 تا میزان ۶۵ درصد کاهش می‌یابد [۳۳].



شکل ۴- ساختار بلوری و شش‌وجهی دی‌سولفیدمولیبدن [۲۹].

ب- تأثیر بارگذاری و سرعت لغزش

در میزان بارگذاری‌های بسیار کم و سرعت لغزش بالا دوام پوشش در برابر سایش بیشتر است. در میزان بارگذاری‌های زیاد و سرعت کم به دلیل واکنش پوشش با هوای محیط، دوام و طول عمر پوشش در برابر سایش کمتر شده و سایش شدیدتری رخ می‌دهد [۳۳].

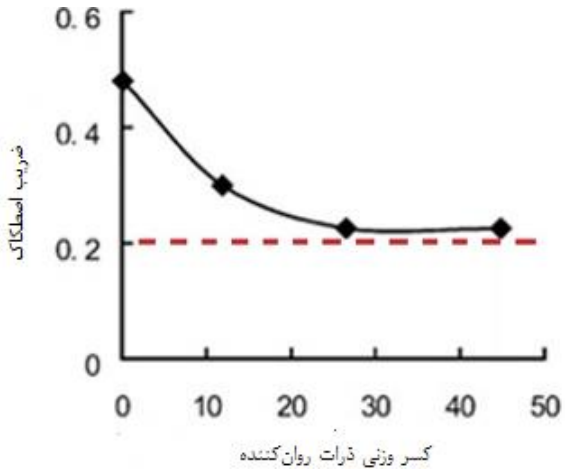
ج- اثر دما

دما در حالت‌های روان‌کاری، عملکرد و شرایط آن مؤثر است. با افزایش دما میزان ضریب اصطکاک پوشش عمدتاً کاهش می‌یابد زیرا افزایش دما با کاهش میزان رطوبت همراه است [۳۳].

د- اثر اندازه ذرات MoS_2 بر خاصیت روان‌کاری

اندازه ذرات با مساحت سطح روان‌کننده فیلم جامدی که روی سطح فلز پوشش داده می‌شود ارتباط دارد. با کاهش اندازه ذرات MoS_2، سطح مؤثر آن افزایش‌یافته و می‌تواند با توجه به ساختار بلوری خود میزان اصطکاک را کاهش دهد که این میزان کاهش در ابعاد نانو به حدود ۳۰ درصد نیز می‌رسد [۳۴].

دی‌سولفیدمولیبدن به‌عنوان روان‌کننده به روش‌های مختلفی نظیر افزودنی‌های پودری، محلول‌های روغنی، محلول‌های پایه آب، مواد کامپوزیتی و روان‌کننده‌های فیلم جامد استفاده می‌شود. ازجمله مهم‌ترین پلیمرها که به‌عنوان فاز بستر در روان‌کننده‌های فیلم جامد استفاده می‌شوند اپوکسی، پلی‌آمید، فنولیک و ترکیب آن‌ها می‌باشد. رزین‌های اپوکسی به دلیل خواص ممتازی چون فرایندپذیری آسان، ایمنی بالا، مقاومت عالی در برابر مواد شیمیایی و حلال‌ها، جمع‌شدگی بسیار کم در حین پخت، مقاومت در برابر خوردگی و چسبندگی عالی به سطوح متنوع به‌طور گسترده برای انواع پوشش‌ها استفاده می‌شوند. کاربرد اپوکسی در پوشش‌های روان‌کننده فیلم جامد با افزودن MoS_2 در بسیاری از کاربردها مرسوم است و علاوه بر خاصیت روان‌کنندگی، می‌تواند با سازوکارهایی از قبیل انحراف مسیر ترک و پل ذره‌ای[1]، مدول، سختی و میزان مقاومت در برابر ترک و تغییر شکل را افزایش دهد [۳۵]. رزین فنولیک نیز به‌عنوان بستر در پوشش‌های روان‌کننده فیلم جامد حاوی MoS_2 استفاده می‌شود. در صورت فراهم نمودن شرایط مساعد واکنش پخت و به حداقل رساندن احتمال واکنش MoS_2 با اتم‌های اکسیژن فعال در ساختار رزین فنولیک، پوشش دارای خواص تریبولوژیکی مناسبی مانند ضریب اصطکاک کمتر نسبت به رزین فنولیک خالص و نرخ سایش کمتر خواهد بود (شکل ۵). لازم به ذکر است رزین‌های اپوکسی و فنولیک به‌تنهایی و به‌صورت آلیاژ به‌عنوان بستر برای ذرات MoS_2 استفاده شده است و این ترکیبات به‌عنوان پوشش‌های روان‌کننده فیلم جامد شناخته شده‌اند [۳۶].



شکل ۵- روند تغییر ضریب اصطکاک پوشش اپوکسی با افزودن MoS_2 [۳۵].

۵-۱-۲-دی سولفید تنگستن

این ماده دارای یکی از کمترین ضریب‌های اصطکاک (دینامیکی ۰/۰۳ و استاتیکی ۰/۰۷) می‌باشد. ازنظر کاربرد به‌عنوان روان‌کننده فیلم جامد نامحدود است و می‌تواند برای انواع کاربردها در شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد. از دی‌سولفیدتنگستن به دو روش می‌توان به‌عنوان روان کار بهره برد: یکی به‌صورت پراکنه در روان‌کننده‌های مایع مانند روغن، گریس و دیگر روغن‌های مصنوعی و دیگری از طریق پوشش‌دهی پودر در سطح موردنظر به‌صورت خشک [۳۷].

الف- مخلوط کردن دی سولفید تنگستن با روان‌کننده‌های مایع

در این روش با توجه به میزان روان‌کاری موردنظر، ۱ تا ۱۵ درصد از پودر دی سولفید تنگستن را با روغن گریس مخلوط می‌نمایند. افزودن پودر موجب افزایش روان‌کاری در عمل اختلاط شده و بدین ترتیب دما و فشار به‌شدت افزایش می‌یابند. در این روش دی سولفید تنگستن روی سطوح درگیر حرکت پوشش داده‌شده و ضمن کاهش اصطکاک موجب افزایش قابلیت بارگذاری برای سامانه‌های دارای چرخه عملیات طولانی می‌گردد [۳۷].

ب- پوشش‌دهی پودر در سطح موردنظر به‌صورت خشک

در این سازوکار پودر به صورت پاششی (در فشار ۱۲۰ psi به‌صورت هوا خشک) روی سطح موردنظر پوشش داده می‌شود. این سازوکار نیازمند هیچ ماده اتصال‌دهنده‌ای نیست و پاشش می‌تواند در دمای معمولی اتاق انجام شود. در صورت اعمال با ضخامت ۰/۵ میکرون عمل روان‌کاری به‌خوبی انجام می‌شود. همچنین در یک روش جایگزین، پودر را نیز می‌توان با ایزوپروپیل الکل مخلوط کرده و روی سطح پاشش نمود [۳۷].

بر اساس نتایج مطالعات XPS[2]، سرعت اکسایش MoS_2 کمتر از WS_2 است، بنابراین کامپوزیت‌های پرشده با ذرات دی‌سولفیدمولیبدن دارای نرخ سایش کمتری نسبت به کامپوزیت‌های پرشده با ذرات WS_2 و ضریب اصطکاک کمتری می‌باشند [۳۸].

[1] Particle bridging

[2] X-ray photoelectron spectroscopy

مقاله

۵-۱-۳- گرافیت

گرافیت ضریب اصطکاک کم و پایداری حرارتی بالا تا دمای ۲۲۷۳ K دارد و دارای ساختار شش‌ضلعی می‌باشد. گرافیت بسته به میزان رطوبت و بخارآب جذب‌شده می‌تواند دارای ضریب اصطکاک کمتری باشد. بنابراین کاربرد آن در محیط‌های خشک و خلا محدود است. در دماهای کم حدود ۳۷۳ K که بخارآب جذب‌شده کمتری وجود دارد اصطکاک ممکن است به میزان مورد انتظار کاهش نیابد. کاربرد گرافیت به‌عنوان روان‌کننده فیلم جامد در محدوده دمایی ۸۷۳-۷۷۳ K به دلیل اکسایش محدود می‌گردد. در صورت لزوم می‌توان از ترکیبات معدنی برای بهبود ویژگی‌های موردنظر در این دما بهره برد [۳۹].

۵-۱-۴- گرافن

گرافن تا به امروز کم‌ضخامت‌ترین ماده شناخته‌شده است که شامل اتم‌های کربن با ضخامت لایه ۰/۳۳۵ نانومتر می‌باشد. این اتم‌های کربن دارای ساختار شش‌وجهی لانه‌زنبوری می‌باشد. گرافن ویژگی‌های حرارتی، الکتریکی و مکانیکی منحصربه‌فردی مانند سختی بسیار بالا، قابلیت برش آسان و استحکام بالا دارد. علاوه بر این، مساحت سطح زیاد و ساختار لایه‌ای آن، این امکان را می‌دهد که روی سطح پوشش داده‌شده و موجب کاهش اصطکاک و سایش گردد. همچنین مقادیر کم گرافن پوشش داده‌شده روی سطح کارایی لازم را داشته و موجب افزایش دوام سطح می‌گردد. علاوه بر ویژگی‌های فوق، گرافن می‌تواند به‌عنوان یک جامد روان کار با خاصیت شیمیایی خنثی و با رفتار تریبولوژیکی مطلوب مورداستفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه از ساختار لایه‌ای مناسبی برخوردار است می‌توان در سامانه‌های نانومقیاس یا مقیاس‌های کوچک مانند سامانه‌های میکروالکترومکانیکی MEMS[1] و سامانه‌های نانو الکترومکانیکی NEMS[2] برای کاهش قابل‌توجه ضریب اصطکاک و میزان سایش از آن بهره گرفت درواقع این ماده با توجه به حرکت لایه‌ها روی یکدیگر موجب کاهش اصطکاک بین سطوح می‌گردد. انرژی سطح گرافن در حدود mJ/m^2 ۴±۶۱ و نزدیک به مقدار mJ/m^2 ۶۳ برای گرافیت می‌باشد [۴۰، ۴۱].

اگرچه خواص مکانیکی بسیار ویژه مانند سختی قابل‌توجه گرافن بیان شد اما نقایص دیگر مانند پایداری محدود در برابر اکسایش، سختی آن را دستخوش تغییر قرار می‌دهد. فرآیندهایی که منجر به خوردگی سطح و اکسید شدن آن می‌گردد به دلیل ویژگی غیرقابل نفوذ بودن گرافن تأثیر کمتری روی عملکرد و دوام این ماده دارد. خواص منحصربه‌فرد مذکور، گرافن را به‌عنوان یک ماده بسیار کاربردی در روان‌کننده‌های فیلم جامد و بسیاری از کاربردهای تریبولوژیکی که در آن‌ها کنترل اصطکاک و سایش اهمیت دارد معرفی می‌کند، که این کاربرد گستره وسیع در مقیاس نانو تا مقیاس بزرگ‌تر را در برمی‌گیرد [۴۲]. از مهم‌ترین روش‌های سنتز گرافن می‌توان به روش رسوب شیمیایی[3] نظیر تجزیه اتیلن روی سطح نیکل، روش ازهم‌گسیختگی میکرو مکانیکی گرافیت (روش پوست‌کنی[4])، رشد هم بافته[5] روی سطوح عایق الکتریکی مانند SiC و احیای شیمیایی اکسید گرافن اشاره کرد.

یکی از روش‌های ساخت روان‌کننده‌های فیلم جامد ترکیب آن‌ها با دیگر مواد می‌باشد. به‌طور مثال یک پوشش کامپوزیتی گرافن- اکسیدروی ازنظر کاهش اصطکاک و سایش تحت شرایط عملیاتی شدید بسیار مناسب است [۴۰]. کامپوزیت گرافن/اکسیدروی/ پلی وینیلیدین تلورید پوشش داده شده به روش چرخشی بر روی یک بستر فولاد ضدزنگ تهیه شده است. روان‌کننده فیلم جامد غنی از گرافن، اصطکاک و سایش را در حدود ۹۰٪ در مقایسه با شرایط بدون روان‌کننده فیلم جامد کاهش می‌دهد. همچنین فیلم روان‌کننده کامپوزیت قادر به حفظ اثرات روان‌کاری خود در شرایط عملیاتی شدید است. عملکرد تریبولوژیکی عالی این کامپوزیت غنی از گرافن به اثر چسبندگی اکسید روی بستگی دارد. اکسیدروی، گرافن را به سطح مشترک متصل کرده و عملکرد تریبولوژیکی بهبودیافته را تحت‌فشار بالا حفظ می‌نماید. دوام و انعطاف‌پذیری این پوشش، آن را به‌عنوان یک روان‌کننده فیلم جامد برای کاربردهای تحت شرایط بارگذاری بالا مطرح می‌کند [۴۰، ۴۰]. شکل ۶ کامپوزیت گرافن-اکسید روی را نشان می‌دهد که دارای کاربرد روان‌کنندگی می‌باشد. استفاده از گرافن به‌عنوان یک پرکننده در UHMWPE[6] به دلیل سختی ذاتی و مقاومت مکانیکی و خاصیت روان‌کنندگی آن است که موجب افزایش مقاومت مکانیکی کامپوزیت و بهبود خواص تریبولوژیکی آن می‌گردد.

[1] Microelectromechanical Systems
[2] Nanoelectromechanical Systems

[3] Chemical Vapor Deposition (CVD)
[4] Peel-off
[5] Epitaxial growth
[6] Ultra high molecular weight polyethylene

شکل ۶- مراحل آماده‌سازی کامپوزیت گرافن-اکسید روی [۴۰].

با توجه به ثبات شیمیایی، حضور شبکه‌ای از پیوندهای کووالانسی بین‌مولکولی و یک ظرفیت پذیرنده الکترون، که توانایی واکنش رادیکال‌های آزاد را دارد و کارکرد دوبعدی گرافن، پتانسیل آن را به‌عنوان یک روان‌کننده و افزودنی با عملکرد بالا در روان‌کاری نشان می‌دهد. خایواص تریبولوژیکی UHMWPE با توجه به نوع گرافن افزوده‌شده بهبود می‌یابد و گرافن ضریب اصطکاک پوشش روان‌کننده فیلم جامد را تا ۱۰٪ کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است گرافن چندلایه عملکرد بهتری نسبت به گرافن دولایه دارد. مقاومت الکتریکی سطحی از پوشش گرافن/پلی‌اتیلن از طریق افزایش درجه حرارت از ۴۴۸ تا ۵۱۸ کلوین بدون تغییر خواص مکانیکی و شیمیایی سطحی، کاهش می‌یابد [۴۲، ۴۳].

۵-۱-۵- اکسید روی

استفاده از ZnO به‌عنوان یک پرکننده معدنی، به علت خواص فیزیکی و شیمیایی آن، کاربرد گسترده‌ای دارد. ذرات ZnO می‌توانند خواص مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمر را بهبود بخشند و در پوشش‌های روان‌کننده فیلم جامد مورداستفاده قرار گیرند. افزودن ZnO به پلیمر ABS[1] به‌عنوان پرکننده خصوصیات تریبولوژی را بهبود بخشیده و ضریب اصطکاک و نرخ سایش ویژه آن را کاهش می‌دهد [۴۳].

۵-۱-۶- زیرکونیا[2]

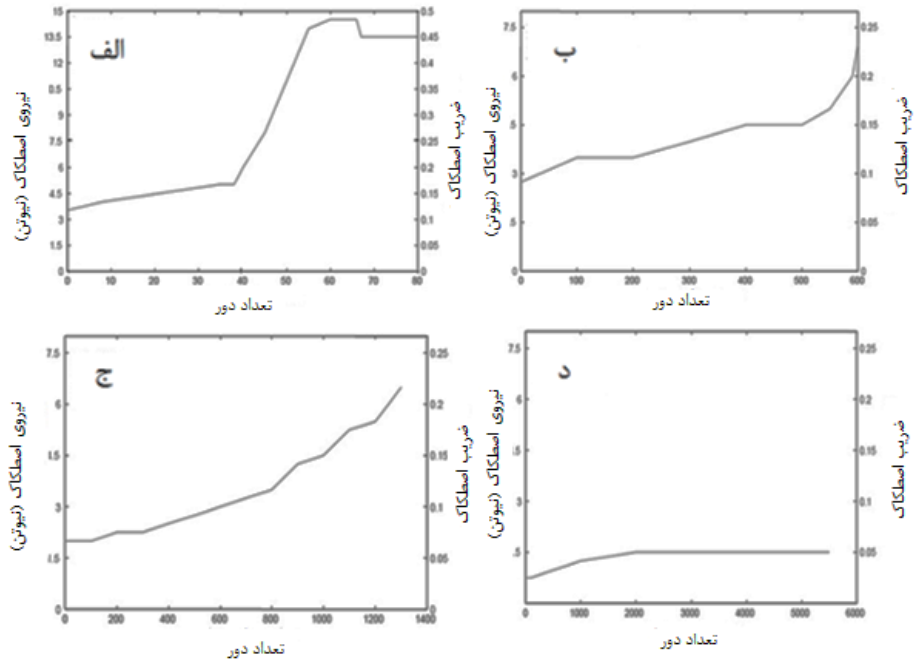
استفاده از زیرکونیا به‌عنوان روان‌کننده به‌ویژه در سرامیک‌های ترمومکانیکی که در محیط‌های با درجه حرارت بالا و محیط‌های خورنده کاربرد دارد. نتایج بررسی ویژگی‌های تریبولوژیکی زیرکونیا حاکی از آن است که افزودن این ماده در ترکیب با سایر روان‌کننده‌ها از شکستگی و ترک سطح پوشش جلوگیری کرده و خواص تریبولوژیکی سطح را به طرز قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد [۴۴].

۵-۱-۷- ترکیب روان‌کننده‌های معدنی و بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کننده‌های فیلم جامد

۵-۱-۷-۱- ترکیب دی‌سولفیدمولیبدن/گرافیت/زیرکونیا

افزودن زیرکونیا و گرافیت به MoS_2 خواص آن را از نظر اصطکاک و سایش بهبود می‌بخشد. علاوه بر این حضور رطوبت بر دوام فیلم روان‌کننده تأثیر می‌گذارد. نشان داده شده است که در دمای بالا، تبخیر رطوبت باعث بهبود عملکرد سایش فیلم می‌شود. در شکل ۷ تغییرات ضریب اصطکاک با تعداد چرخه‌های آزمون اصطکاک در حضور MoS_2 به‌تنهایی، زیرکونیا به‌تنهایی، MoS_2 به همراه ۸٪ درصد زیرکونیا و ۲۵٪ در دمای محیط و در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است [۴۵]. با توجه به شکل ۷ پایین‌ترین ضریب اصطکاک مربوط به ترکیب سه نوع روان‌کننده می‌باشد که این ویژگی در روان‌کننده‌ها مطلوب است. اندازه‌گیری ضریب اصطکاک در دمای ۴۷۳ کلوین بیان‌گر کاهش قابل‌توجه ضریب اصطکاک پوشش روان‌کننده فیلم جامد نسبت به ضریب اصطکاک اندازه‌گیری شده در دمای محیط است. همان‌طور که قبلا بیان شد با افزایش رطوبت نسبی، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد، ازآنجاکه با افزایش دما رطوبت سطح کاهش می‌یابد این موضوع باعث کاهش قابل‌توجه ضریب اصطکاک شده است [۴۵].

[1] Acrylonitrile – butadiene – styrene
[2] Zirconia



شکل ۷- تغییرات ضریب اصطکاک با تعداد چرخه‌های آزمون اصطکاک در دمای محیط در حضور MoS_2 به‌تنهایی (الف)، زیرکونیا به‌تنهایی (ب)، MoS_2 به همراه ۸٪ درصد زیرکونیا و ۲۵٪ گرافیت (ج)، MoS_2 به همراه ۸٪ درصد زیرکونیا و ۲۵٪ گرافیت در دمای ۴۷۳ درجه کلوین [۴۵].

مقاله

۵-۱-۷-۲- ترکیب دی‌سولفیدمولیبدن/دی‌سولفیدتنگستن

بررسی خواص تریبولوژیکی ترکیب روان‌کننده‌های فیلم جامد MoS_2 / WS_2 در شرایط خلا و هوا نشان می‌دهد که نرخ سایش و ضریب اصطکاک این ترکیبات در مقایسه با هرکدام به‌صورت خالص کمتر است که به دلیل سازوکارهای مختلف روان‌کاری هرکدام از آن‌ها می‌باشد. شکل ۸ تصویر SEM[1] گرفته شده از سطح شکست فیلم می‌باشد که ساختار لایه‌ای روان‌کننده فیلم جامد ترکیبی در جهت‌های مختلف را نشان می‌دهد. فواصل بین ذرات MoS_2 و WS_2 که حرکت بین لایه‌ها را تسهیل کرده و درنتیجه ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد، قابل‌مشاهده است [۴۶].

۵-۱-۷-۳- ترکیب گرافن/ دی‌سولفیدتنگستن

ترکیب روان‌کننده‌های جامد تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش اصطکاک و نرخ سایش پوشش‌های روان‌کننده فیلم جامد دارد. همان‌طور که شکل ۹ نشان می‌دهد افزودن ۴-۲ درصد وزنی نانو کامپوزیت گرافن/دی‌سولفیدتنگستن داخل پوشش، ضریب اصطکاک حدود ۷۰/۲ درصد و نرخ سایش ۶۵/۸ درصد کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزودن گرافن و دی‌سولفیدتنگستن هرکدام به‌تنهایی مقدار ضریب اصطکاک پوشش را به ترتیب ۱۱ درصد و ۲۷ درصد کاهش می‌دهند. بنابراین جذب بالا از لایه‌های گرافن و رسوب بهتر دی‌سولفیدتنگستن در پوشش موجب ایجاد هم‌افزایی دو نوع روان‌کننده جامد شده و کارایی تریبولوژیکی روان‌کننده فیلم‌جامد حاصل را بهبود چشم‌گیری می‌بخشد [۴۷، ۴۸].

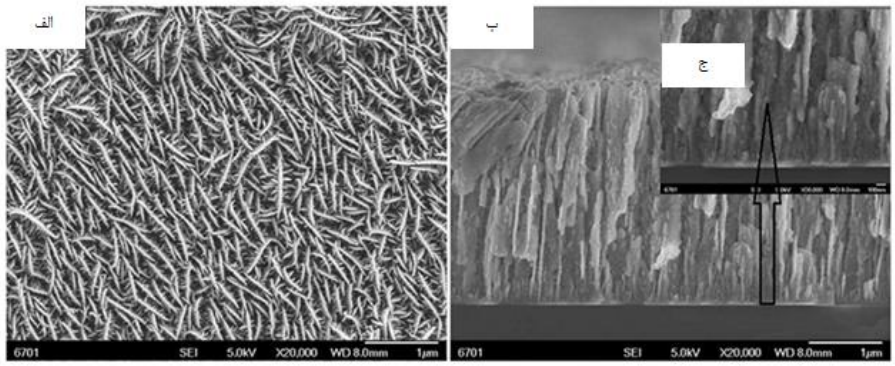
۵-۲- روان‌کننده‌های آلی

۵-۲-۱-پلی تترافلوئورواتیلن (PTFE)[2]

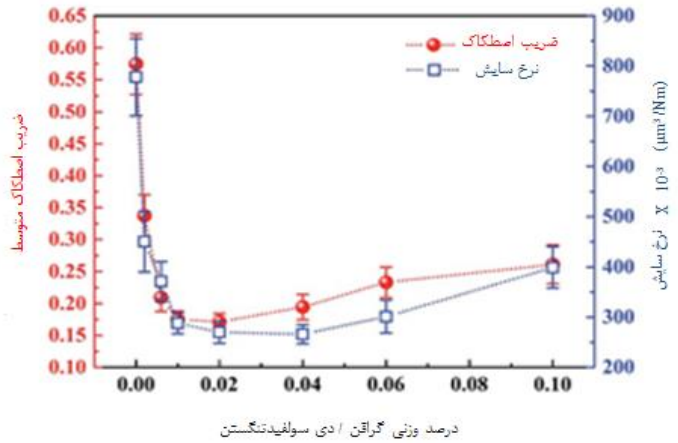
پلی تترافلوئورواتیلن یک پلیمر مهندسی مهم است. این ماده به رنگ سفید یا خاکستری بوده و برای هر دو حالت بارگذاری سبک و سنگین با سرعت کم و متوسط مناسب می‌باشد.

[1] Scanning electron microscope

[2] Polytetrafluoroethylene



شکل ۸- تصویر SEM از روان‌کننده فیلم جامد MoS_2/ WS_2، الف) میکرو ساختار لایه‌ای پوشش ب) شکل سطح، ج) بلورهای دندریتیک[3] ذرات جامد [۴۶].



شکل ۹- مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک و نرخ سایش با افزودن گرافن و دی‌سولفیدتنگستن به‌عنوان روان‌کننده در پوشش [۴۷، ۴۸].

[3] Dendritic

PTFE دارای ویژگی‌هایی نظیر اصطکاک کم حدود ۰/۰۴، میزان جذب رطوبت کمتر از یک درصد وزنی در ۲۴ ساعت (بر اساس استاندارد ASTM D570)، ظرفیت بارگذاری مناسب، مقاومت در برابر خستگی، مقاومت در برابر خوردگی و سختی می‌باشد

PTFE یک روان‌کننده فیلم جامد پلیمری است که به دلیل مقاومت شیمیایی بالا در برابر طیف گسترده‌ای از حلال‌ها، نقطه ذوب بالا، ضریب اصطکاک کم و سازگاری زیست‌محیطی موردتوجه قرارگرفته است. این ماده به دلیل نرم بودن دارای مقاومت در برابر سایش کم می‌باشد که این ویژگی به‌وسیله پرکننده‌های مناسب بهبود می‌یابند. ازجمله این پرکننده‌ها، گرافیت، دی‌سولفیدمولیبدن، کربن، برنز، سیلیکات، سیلیکون، دی‌اکسید تیتانیم، نقره، مس و تنگستن می‌باشد [۴۹].

اخیرا کارایی تریبولوژیکی نانو کامپوزیت‌های ساخته‌شده با اپوکسی بسیار مورد توجه قرارگرفته است. نانو ذرات سیلیس، آلومینا و نیترید سیلیکون کامپوزیت شده با اپوکسی ازجمله روان‌کننده‌های جامد با کارایی تریبولوژیکی مطلوب می‌باشد که از مقاومت در برابر سایش بالا و ضریب اصطکاک پایین برخوردار هستند. نشان داده‌شده است که استفاده از PTFE (به‌عنوان پرکننده) در پوشش اپوکسی موجب کاهش ۲۰ درصدی ضریب اصطکاک می‌شود [۴۹]. پلی تترافلوئورواتیلن به‌عنوان یک پلیمر مهندسی با کارایی بالا، در مقیاس نانو دارای خاصیت روان‌کنندگی قابل‌توجهی می‌باشد که توسط روش‌هایی مانند پاشش[1] روی سطح اعمال می‌گردد. ویژگی منحصربه‌فرد PTFE کاربرد مطلوب آن به‌عنوان جامد روان‌ساز در هر دو محیط هوا و خلا می‌باشد، که طول عمر آن در محیط خلا نسبت به هوا بیشتر است. ضریب اصطکاک بالاتر پوشش پلی تترافلوئورواتیلن در هوا نسبت به خلأ مربوط به جذب آب و قرارگیری آن در مکان‌های پلی آمیدی اپوکسی و ایجاد پیوند هیدروژنی بین آن‌ها می‌باشد. بنابراین با دفع آب در شرایط خلا مقاومت برشی پلیمر کاهش‌یافته و ضریب اصطکاک کاهش چشم‌گیری را به دنبال دارد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه ظرفیت تحمل بار آن محدود است نباید در تنش‌های تماسی بیش از ۱۲۰۰ مگا پاسکال از آن به‌عنوان روان‌کننده فیلم جامد استفاده کرد زیرا دچار ترک‌خوردگی می‌گردد همچنین خاصیت روان‌کنندگی با افزودن مقدار ۱۲ درصد از این ماده به روغن‌های روان‌کننده و نیز کاهش اندازه ذرات به‌ویژه در ابعاد نانو به بهبود عملکرد روان‌کنندگی کمک می‌کند. این ماده فاقد ساختار لایه‌ای می‌باشد و ماکرو مولکول‌های PTFE در کنار یکدیگر قرارگرفته و ساختاری شبه لایه‌ای به وجود می‌آورند. این ماده دارای یکی از کم‌ترین ضرایب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی (حدود ۰/۰۴) در محدوده دمای عملیاتی ۳۲۳ K است [۴۹].

PTFE یک فلوئورکربن خطی است که ضریب اصطکاک کمی از خود نشان می‌دهد اما نسبت به ترموپلاستیک‌های دیگر دارای نرخ سایشی بالایی است زیرا در ساختار بلوری مولکول‌هایش دارای لغزش می‌باشد. به علت خصوصیت ضریب اصطکاک پایین، PTFE به‌عنوان یک روان‌کار جامد برای استفاده در کامپوزیت‌های پلیمری بسیار مناسب می‌باشد [۵۰].

۵-۲-۲- پلی اتر اتر کتون (PEEK)[2]

PEEK یک پلیمر با خواص تریبولوژیکی و مکانیکی نسبتاً مطلوب است. با این وجود، ضریب اصطکاک آن در سطوح تماسی خشک مطلوب نبوده و ممکن است دچار سایش و درنتیجه شکست گردد. بنابراین ذرات افزودنی مختلفی برای بهبود خواص تریبولوژیکی و مکانیکی آن به پوشش اضافه می‌گردد. به‌طور مثال روان‌کننده فیلم جامد PEEK با افزودنی‌هایی از قبیل دی‌سولفیدمولیبدن و دی‌سولفیدتنگستن برای کاهش اصطکاک و مقاومت در برابر سایش در این نوع پوشش بسیار مناسب است. PEEK یک پلیمر با مقاومت دمایی بالا است که نرخ سایش کمی را از خود به نمایش می‌گذارد. مطالعات حاکی از آن است که ضریب اصطکاک مواد کامپوزیتی، در مقایسه با PEEK خالص، بدون در نظر گرفتن نوع یا اندازه ذرات تا حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین تمام کامپوزیت‌ها در غلظت‌های پایین ذرات، به‌جز مواردی که با WS_2 با اندازه میکرو پر شوند، دارای نرخ سایش کمتر نسبت به PEEK خالص بوده و سایش به‌شدت وابسته به‌سختی کامپوزیت است به طوریکه سختی بالاتر منجر به عملکرد بهتر در مقایسه با کامپوزیت‌ها با سختی کمتر، می‌باشد [۵۱].

۵-۲-۳- پلی‌استر گرماسخت آروماتیک[3] (ASTP)

سنتز پودر ASTP، تولید انبوه، کاربرد در پوشش‌های روان‌کننده فیلم‌جامد و عملکرد تریبولوژیکی آن اواسط دهه ۱۹۹۰ مورد توجه قرار گرفت. این ماده دارای ساختار مایع بلوری می‌باشد. ساختار بلوری ASTP موجب عملکرد مناسب آن در کاربردهای تریبولوژیک شده است. همچنین ASTP دارای پایداری حرارتی (تا ۶۲۳ کلوین در هوا و ۶۹۸ کلوین در نیتروژن) می‌باشد. ویژگی‌هایی نظیر مقاومت بالا در برابر شعله، مقاومت شیمیایی، قابلیت چسبندگی مناسب در پوشش و خواص تریبولوژیکی مطلوب، کاربرد آن را در صنعت گسترده نموده است. علاوه بر این، ATSP با ساختار حاصل از واکنش‌های ترانس استریفیکاسیون بین زنجیره‌ای[4] (ITR) که روند سنتز را تسهیل می‌کند، موجب بازیابی میکرو ترک‌ها و حفره‌ها در ساختار پوشش شده و خواص مکانیکی و تریبولوژیکی پوشش را بهبود می‌بخشد [۵۲].

۵-۳- فلزات نرم

سرب، طلا، نقره، مس و روی دارای ضریب اصطکاک نسبتاً کم در خلا و

[1] Spray

[2] Polyether-ether-ketone
[3] Aromatic thermosetting polyester
[4] Interchain Transesterification Reaction

مقاله

هوا می‌باشند. این فلزات برای کاربردهای با درجه حرارت بالا حدود ۱۲۷۳K و کاربرد در غلتک‌های کوچک بسیار موردتوجه قرار می‌گیرند. بیشتر پوشش‌های فلزی نرم مانند نقره، قلع و سرب، نقطه ذوب پایین دارند اما نسبت به اکسایش مقاوم نیستند به‌استثنا طلای خالص که دارای مقاومت در برابر نفوذ شیمیایی و نقطه ذوب بالا می‌باشد. بنابراین مناسب برای کاربرد روان‌کاری در درجه حرارت بالا و خلا می‌باشد. خواص تریبولوژیکی به‌ویژه ضریب اصطکاک پوشش‌های فلزی نرم به ضخامت پوشش بستگی دارد. ضخامت مطلوب حدود ۱۰۰ نانومتر است و با توجه به این میزان رسوب باید با فرآیند پوشش‌دهی آن‌ها به‌خوبی کنترل شود. روش آبکاری به‌جای پاشش، به‌طور گسترده‌ای برای پوشش‌دهی این فیلم‌ها استفاده شده است. مزایای اصلی این روش نسبت به روش‌های دیگر، چسبندگی خوبی و ساختاری متراکم حاصل از آن، است [۴۴، ۵۳].

۶- مزایای روان‌کننده‌های فیلم جامد

ازجمله مزایای مهم روان‌کننده‌های فیلم جامد می‌توان به پایداری زیاد در درجه حرارت بالا، خلا و محیط‌های با فشار بالا، انتقال گرمای مناسب و پایدار در دماهای بالا، استحکام مطلوب در محیط‌های تابشی شدید، مقاومت به سایش بالا در محیط‌های دارای گردوغبار، استحکام قابل‌توجه در محیط‌های دارای واکنش شیمیایی، کارایی بیشتر نسبت به روان‌کننده‌های مایع در بارگذاری‌های متناوب و شدید با سرعت زیاد، سبک‌تر شدن تجهیزات با اجتناب از روان‌کننده‌های مایع و کاربرد گسترده در شرایطی که دسترسی برای سرویس‌دهی تجهیزات دشوار است [۵۴].

۷- معایب روان‌کننده‌های فیلم‌جامد

ازجمله معایب روان‌کننده‌های فیلم‌جامد می‌توان به ضریب اصطکاک بیشتر و مقاومت به سایش کمتر نسبت به روان‌کننده‌های هیدرودینامیکی، انتقال گرمای ضعیف در مورد روان‌کننده‌های فیلم جامد پلیمری نسبت به سایر روان‌کننده‌های رسانای حرارتی و همچنین فام نامطلوب در برخی موارد، مانند روان‌کننده‌های پایه گرافیتی، اشاره نمود. [۵۴].

۸- نتیجه‌گیری

کاربرد روان‌کننده‌های فیلم جامد با ضخامت یک میکرومتر یا کمتر در صنایع مختلف به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودرو در حال گسترش است. در شرایط خاصی که ضخامت روان‌کننده محدود است از قبیل خلا، درجه حرارت بالا، دمای فرسایش، وجود تابش شدید، وجود گردوغبار در محیط و محیط‌های دارای خوردگی بالا و زمانی که روان‌کننده‌های مایع پاسخگوی نیاز صنعت نیستند، می‌توان از این نوع روان‌کننده‌ها بهره برد. همچنین روان‌کننده‌های فیلم جامد با ضخامت کم تأثیر چشم‌گیری در کاهش اصطکاک و سایش دارند و درعین‌حال از استحکام و دوام بیشتری برخوردار می‌باشند. بنابراین برای بهره‌مندی مطلوب از کارایی روان‌کننده‌های فیلم جامد باید درک کافی در مورد خواص و رفتار تریبولوژیکی آن‌ها داشته و با سنتز و یا ساخت ترکیب این روان‌کننده‌ها گامی مهم در جهت بهبود مسئله روان‌کاری در صنایع مختلف برداشت.

۹- مراجع

۱. س. آ. حدادی، م. مهدویان احدی، ف. عباسی، "مروری بر رزین‌های فنولیک و روش‌های اصلاح آن"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۳، ۱۹-۳۴، **۱۳۹۳**.

۲. س. م. کسائیان، م. ر. محمدزاده عطار، م. مهدویان احدی، "بهینه‌سازی آماده‌سازی شیمیایی سطوح فولادی زنگ‌زده توسط محلول‌های آماده‌سازی بر پایه مخلوط تانین و اسید فسفریک"، نشریه علوم و فناوری رنگ، ۸، ۱۴۷-۱۳۷، **۱۳۹۳**.

3. M. Mahdavian, M. M. Attar. "Electrochemical assessment of imidazole derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 3.5% NaCl solution", Prog. Color Colorants Coat. 8, 177-196, **2015**.
4. H. Liang, Y. Bu, J. Zhang, Z. Cao, A. Liang, "Graphene oxide film as solid lubricant", ACS Appl. Mater. Interfaces, 5, 6369-6375, 2013.
5. C. H. Riewe, M. Freling, R. P. Salva, "Aluminum fan blades with root wear mitigation", U.S. Patent Application No. 20,160,003,067, **2016.**
6. T. Sunil, M. Sandeep, R. Kumaraswami, A. Shravan, "A critical review on solid lubricants", Technol. 7, 193-199, 2016.
7. G. Guangteng, H. A. Spike. "Elastohydrodynamics-'96: fundamentals and applications in lubrication and traction", **1997**.
8. T. Bartels, W. Bock, J. Braun, C. Busch, W. Buss, W. Dresel, F. Kubicki, "Lubricants and Lubrication", Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, **2005**.
9. I. Efeoglu, "Deposition and Charactrization of a Multylayared-Composition Solid Lubricant Coating", Master. Sci. 87-94, **2007.**
10. M. E. Campbell, J. B. Loser, E. Sneegas, "Solid Lubricants", Nasa SP-5059. Nasa special publication", 5059, **1966.**
11. I. Efeoglu, A. Keleş, Y. Totik, H. Çiçek, E. E. Süküroglu, "Tribological Behaviour of Ti: Ta-DLC Films Under Different Tribo-Test Conditions", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 295, **2018**.
12. V. Durga N. Rao, Daniel M. Kabat, Brian W. Lizotte. "Anti-Friction Coating Composition Containing Solid Lubricants", U.S. Patent Application No.US005482637A, **1996.**
13. S. Orkin, N. Nazaryan, G. Greenberg. "Self-lubricating coating composition of epoxy resins, polytetrafluoroethylene, MoS_2 and mica", US Patent No. US006090869A, ***2000.***
14. J. Anthony, H. Mcdonald, D. Oldiges, "Resin bonded particulate anti-Seize agent lubricating system made therefrom and methods of making and using same", US Patent No.US6960555B2, ***2005.***
15. N. S. Ahmed, A. M. Nassar, "Lubricating oil additives. In Tribology-Lubricants and Lubrication", InTech, **2011.**
16. R. K. Sivamani, J. Goodman, N. V. Gitis, H. I. Maibach, H. I, "Coefficient of friction: tribological studies in man–an overview", Skin. Res. Technol. 9, 227-234, **2013**.

17. J. Ye, H. S. Khare, D. L. Burris, "Quantitative characterization of solid lubricant transfer film quality", Wear, 316, 133-143, **2014**.
18. X. Li, Y. Gao, J. Xing, Y. Wang, L. Fang, "Wear reduction mechanism of graphite and MoS_2 in epoxy composites", Wear, 257, 279-283, **2004**.
19. A. Shankara, P. L. Menezes, K. R. Y. Simha, S. V. Kailas, "Study of solid lubrication with MoS_2 coating in the presence of additives using reciprocating ball-on-flat scratch tester", Sadhana, 33, 207-220, **2008**.
20. X. Quan, M. Hu, X. Gao, Y. Fu, L. Weng, D. Wang, J. Sun, "Friction and wear performance of dual lubrication systems combining WS_2–MoS_2 composite film and low volatility oils under vacuum condition", Tribol. Int. 99, 57-66, **2016**.
21. K. Friedrich, "*Friction and wear of polymer composites*" ,Vol. 1, Elsevier, **2012**.
22. M. J. King, P. Jearanaisilawong, S. Socrate, "A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics" Int. J. Solids Struct. 42, 3867-3896, **2005**.
23. T**.** Takeichi, N. Furukawa, "Epoxy resins and phenol-formaldehyde resins", 723-751, **2012.**
24. S. J. Patil, D. P. Patil, A. P. Shrotri, V. P. Patil, "A review on effect of addition of nano particles on tribological properties of lubricants" Int. J. Mech. Eng. Technol. 5, 120-129, **2014.**
25. I. Ilie Filip, M. Tita, "High tempreture dry film lubricant", Proceedings of the Romanian Academy, 413-417, **2007.**
26. B. Podgornik, B. Zajec, S. Stmad, K. Stana-Kleinschek, "Influence of surface energy on the interactions between hard coatings and lubricants" Wear, 262, 1199-1204, **2007.**
27. G. Winchester, R. K. Reber, "Variation of surface tensions of lubricating oils with temperature", Ind. Eng. Chem. 21, 1093-1096, 1929.
28. G. Biresaw, D. Compton, K. Evans, G. B. Bantchev, "Lipoate ester multifunctional lubricant additives", Ind. Eng. Chem. Res. 55, 373-383, **2015.**
29. E. Arslan, F. Bülbül, I. Efeoglu, "The structural and tribological properties of MoS_2-Ti composite solid lubricants", Tribol. Trans. 47, 218-226, **2004.**
30. C. Donnet, "Advanced solid lubricant coatings for high vacuum environments", Surf. Coat. Technol. 80, 151-156, **1996.**
31. N. Akihiro, O. Kenji, O. Kohji, F. Takeshi, T. Yoshinobu, "Lubrication mechanism of concentrated polymer brushes in solvents", Macromol. 44, 5013–5019, **2011.**
32. D. Bagale, S. Shekhawat, J. Chaudhari, "Wear Analysis of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions using design-expert, IJAR, 3, 1-5, **2013.**
33. K. C. Ludema, "Lubricating Properties of Molybdenium disulphide", Ind. Lubr. Tribol. 7, 34-36, **1955**.
34. X. Li, Y. Gao, J. Xing, Y. Wang, L. Fang, "Wear reduction mechanism of graphite and MoS_2 in epoxy composites" Wear, 257, 279-283, **2004**.
35. H. J. Song, Z. Z. Zhang, Z. Z. Luo, "Effects of solid lubricants on friction and wear behaviors of the phenolic coating under different friction conditions", Surf. Coat. Technol. 201, 2760-2767, **2006.**
36. S. J. Patil, D. Patil, A. Shrotri, V. P. Patil, "A review on effect of addition of nano particles on tribological properties of lubricants", Int. J. Mech. Eng. Technol. 5, 120-129, **2014**.
37. M. Zalaznik, M. Kalin, S. Novak, S. G. Jakša, "Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK", Wear, 364, 31-39, **2016**.
38. N. L. McCook, D. L. Burris, G. R. Bourne, J. Steffens, J. R. Hanrahan, W. G. Sawyer, "Wear resistant solid lubricant coating made from PTFE and epoxy", Tribol. Lett. 18, 119-124, **2005**.
39. D. Berman, A. Erdemir, A. V. Sumant, "Graphene: a new emerging lubricant", Mater. Today. 17, 31-42, **2014**.
40. P**.** Lazar, E. Otyepkova, P. Banáš, A. Fargašova, K. Šafářová, L. Lapčík, M. Otyepka, "The nature of high surface energy sites in graphene and graphite", Carbon, 73, 448-453, **2014**.
41. A. Chih, A. Ansón-Casaos, J. A. Puértolas, "Frictional and mechanical behaviour of graphene/UHMWPE composite coatings", Tribol. Int. 116, 295-302, **2017**.
42. J. Sudeepan, K. Kumar, T. K. Barman, P. Sahoo, "Study of friction and wear of ABS/Zno polymer composite using Taguchi technique", Procedia Materials Science, 6, 391-400, **2014**.
43. P. Maurin-Perrier, P. Kapsa, "Wear reduction of partially stabilised zirconia by lubrication", Lubr. Sci. 8, 255-264, **1992**.
44. A. Shankara, P. L. Menezes, K. R. Simha, S. V. Kailas, "Study of solid lubrication with MoS_2 coating in the presence of additives using reciprocating ball-on-flat scratch tester", Sadhana, 33, 207-220, **2008**.
45. X. Quan, S. Zhang, M. Hu, X. Gao, D. Jiang, J. Sun, "Tribological properties of WS_2/MoS_2-Ag composite films lubricated with ionic liquids under vacuum conditions" Tribol. Int. 115, 389-396, **2017**.
46. D. Zheng, Y. P. Wu, Z. Y. Li, Z. B. Cai, "Tribological properties of WS_2/graphene nanocomposites as lubricating oil additives", RSC Adv. 7, 14060-14068, **2017**.
47. S. Rengifo, "A Comparison between graphene and WS_2 as solid lubricant additives to aluminum for automobile applications**"**, MS thesis, **2015**.
48. M. K. Dubey, J. Bijwe, S. S. V. Ramakumar, "PTFE based nano-lubricants" Wear, 306, 80-88, **2013**.
49. F. G. Reick, U.S. Patent No. 4,349,444. Washington, DC, **1982**.
50. M. W. Akram, J. L. Meyer, A. A. Polycarpou, "Tribological interactions of advanced polymeric coatings with polyalkylene glycol lubricant and r1234yf refrigerant", Tribol. Int. 97, 200-211, **2016**.
51. M. R. Hilton, P. D. Fleischauer, "Applications of solid lubricant films in spacecraft", Surf. Coat. Technol. 54, 435-441, **1992**.
52. J. F. Yang, Y. Jiang, J. Hardell, B. Prakash, Q. F. Fang, "influence of service temperature on tribological characteristics of self-lubricant coatings, a review", Front. Mater. Sci. 7, 28-39, **2013**.
53. T. R. Prabhu, "Effects of solid lubricants, load, and sliding speed on the tribological behavior of silica reinforced composites using design of experiments", Mater. Design, 77, 149-160, **2015**.