

отфильтрованных данных получены реалистические распределения плотности потока по координате перемещения датчика.

Литература

1. Spears R.A. "Gold film electrodes for high frequency quartz plates". Journal of the British Institution of Radio Engineers, 1946, Vol. 6, No. 2, pp. 50-59.
2. "Operation Manual. IQM-233 Thin Film Deposition Controller". Inficon, 2013.
3. Майшев Ю.П., Шевчук С.Л. "Установка для обработки материалов пучком быстрых нейтральных частиц". Труды ФТИАН, 2017, т. 26 (в печати).

Влияние легирования углеродного покрытия-ориентанта кремнием, молибденом и вольфрамом на антифрикционные свойства полиальфаолефинового масла ПАО-4

*Е.А. Митрофанов, С.Б. Симакин, *А.Н.Большаков, *И.А.Буяновский,
**В.Н.Матвеевко, **В.А. Левченко
Москва, ОАО «НИИВТ им. С.А. Векшинского»
*Москва, ИМАШ РАН, Малый Харитоньевский, 4
**Москва, Химфак МГУ имени Ломоносова
E-mail:vladalev@yahoo.com*

Экспериментально установлена возможность значительного повышения смазочной способности инактивного полиальфаолефинового масла ПАО-4 при нанесении на рабочие поверхности деталей узлов трения покрытий монокристаллическим углеродом. Показана также возможность управлять антифрикционными свойствами исследуемого масла путём легирования монокристаллического покрытия-ориентанта такими элементами, как вольфрам, молибден и кремний, а также введения в масло ПАО-4 поверхностно-активной и химически активной присадок.

Influence of alloying of a carbon coating-orientation silicon, molybdenum and tungsten on antifriction properties of the polyalphaolefin PAO-4 oil. E.A. Mitrofanov, S.B. Simakin, A. N. Bolshakov, I. A. Buyanovskii, V. N. Matveenko, V. A. Levchenko. The possibility of the substantial increase of lubricant ability of inactive polyalphaolefin PAO-4 oil was established experimentally when plotting on working surfaces of details of frictional units by monocrystalline carbon coatings. An opportunity to control antifriction properties of the researched oil is shown by alloying of a monocrystalline coating orientation with tungsten, molybdenum and silicon and by introductions of surface-active and chemically active additives to PAO-4 oil.

Современные смазочные масла для обеспечения снижения энергетических потерь при эксплуатации узлов трения тяжелонагруженных объектов новой техники включают значительное число присадок, содержащих соединения серы, фосфора, хлора и т.д., которые дороги и во многих случаях неблагоприятно воздействуют на экологию. Борьба с этим явлением ведётся, главным образом, путём сокращения содержания в этих маслах химически активных присадок, включающих подобные вещества, или замена их на компоненты, представляющие меньшую опасность для экологии. Этот путь достаточно корректен, но не всегда эффективен. Авторы предлагают альтернативный путь обеспечения требуемого уровня антифрикционных свойств масел – нанести на рабочие поверхности контактирующих деталей узлов трения разработанные ранее углеродные покрытия-ориентанты, обеспечивающие требуемые смазочные свойства. Это позволит отказаться от дорогих и не всегда экологически

безопасных присадок (или, по крайней мере, уменьшить их содержание в смазочных маслах) путём использования известного явления: граничный слой повторяет ориентацию поверхности, на которой он образуется. Нанесение на поверхности трения тонкого (порядка 0,5 – 2,0 мкм) слоя монокристаллического углерода обеспечивает образование граничного слоя, обладающего высоким уровнем ориентации составляющих его молекул масла, который позволяет существенно расширить пределы работоспособности узлов трения по нагрузкам и температурам, а также при прочих равных условиях обеспечивает снижение трения и износа трущихся тел, как показано нами ранее [1, 2].

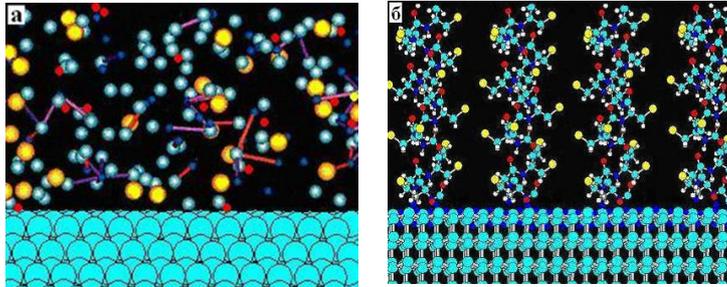


Рис. 1. Конфигурация молекул инактивной смазочной среды у поверхности твёрдого тела: а – не обладающего свойствами ориентанта (аморфное покрытие); б – обладающего свойствами ориентанта (монокристаллическое углеродное покрытие).

Аморфное покрытие не организует ориентированного граничного слоя (рис. 1,а) и молекулы масла легко выдавливаются из фрикционного контакта; монокристаллический углерод организует высокоупорядоченный слой молекул, имеющий гомеотропную ориентацию (рис.1,б), который надёжно разделяет трущиеся поверхности в достаточно широком интервале нагрузок и температур[3].

Целью настоящей работы является обеспечение оптимальной ориентации молекул смазочного масла в граничном слое, обеспечивая тем самым высокие противоизносные и антифрикционные характеристики смазываемому узлу трения, то есть, повышая его долговечность и снижая энергоёмкость, без введения в масло химически активных присадок, содержащих агрессивные элементы, либо ограничивая их содержание в масле. Оптимизацию ориентации граничного слоя достигалась путём изменения технологии получения монокристаллического покрытия и его состава и оценивали по изменению трибологических характеристик покрытий.

Метод трибологических испытаний

Исследование влияния покрытий на антифрикционные свойства смазочных сред проводили на разработанной в ИМАШ РАН модернизированной четырёхшариковой машине трения КТ-2 при схеме контакта шарик-три ролика, в которой зажатый в вертикальном шпинделе машины шар диаметром 12,7 мм при вращении под нагрузкой вытирает лунки на цилиндрических поверхностях трёх роликов диаметром 8 мм каждый, которые установлены в оправке треугольником симметрично вертикальной оси шпинделя (рис. 2).

На цилиндрические поверхности роликов наносят исследуемые покрытия. Поскольку исследование проводят в режиме граничной смазки, частота вращения шпинделя выбрана 1 мин⁻¹. Для машины КТ-2 в качестве образцов применяют стандартные подшипниковые шары и ролики, поверхности которых имеют высокую однородность по твёрдости, по микроструктуре, и по чистоте обработки. Испытания проводят при нагрузке на шпиндель 110 Н (то есть реализация начального точечного контакта, которая выбрана исходя из соображений хорошей воспроизводимости и возможности сравнения с большим массивом литературных данных, выполненных по такой же или близким схемам трения [4-6]). Продолжительность испытаний при заданной нагрузке – 60 мин. (при испытаниях в смазочных средах) или 30 мин. (при испытаниях «всухую») Регистрируется величина момента трения, оцениваемая по деформации торсионного динамометра. Машины трения с начальным точечным контактом широко применяются при трибологических испытаниях.



Рис. 2. Узел трения машины КТ-2[6]:
1 – шпindelь с установленным в нём шаром; 2 – масляная чаша; 3 – оправка с тремя роликами, установленными симметрично относительно оси шпинделя.

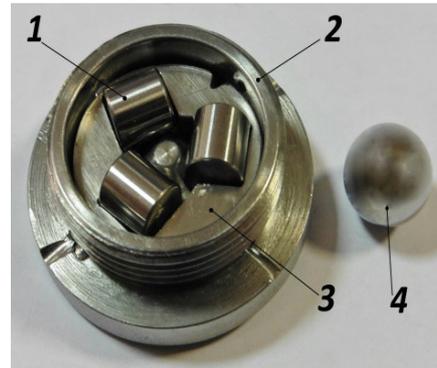


Рис. 3. Детали оправки (прижимная гайка снята):
1- испытательный ролик;
2 – корпус оправки;
3 – сепаратор; 4 – шарик.

Исследуемые материалы

Исследовали трибологические характеристики монокристаллического покрытия (МКУ), а также этого покрытия, легированного вольфрамом (МКУ-W), молибденом (МКУ-Mo) и кремнием (МКУ-Si), которые наносили на цилиндрические покрытия роликов диаметром 8 мм, при трении по ним шарика диаметром 12,7 мм из стали и керамики Si_3N_4 . Для получения легированных наноструктурированных углеродных покрытий с монокристаллической структурой, использовался ранее усовершенствованный нами PVD метод осаждения, который претерпел ряд технологических изменений [7]. В качестве смазочных сред использовали полиальфаолефиновое масло ПАО-4 и это же масло с поверхностно-активной (олеиновая кислота ОК) и химически активной (диалкилдитиофосфат цинка ДФ-11) присадками. Экспериментально[6] установлено, что МКУ-покрытие даже в отсутствии смазочного материала резко снижает коэффициент трения по стали по сравнению с трением, стали по стали (рис. 4).

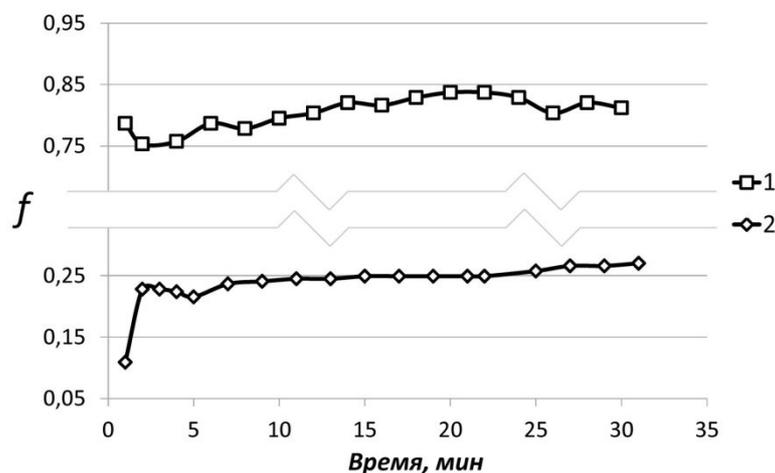


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения f от продолжительности испытаний без смазочной среды: 1- пара сталь по стали, 2 – пара трения: сталь по МКУ-покрытию [6].

Влияние смазочных сред и состава монокристаллического покрытия на антифрикционные свойства исследуемых смазочных сред.

Дальнейшие исследования показали, что монокристаллическое углеродное покрытие, как нелегированное, так и легированное вольфрамом, молибденом или кремнием, обеспечивает заметное снижение коэффициента трения в среде неактивного полиальфаолефинового масла

ПАО-4. Так, при трении стали по нелегированному покрытию коэффициент трения составил 0,16, по покрытию, легированному как вольфрамом, так и молибденом – 0,18, по покрытию, легированному молибденом – 0,18, в то время как коэффициент трения стали по стали в этой смазочной среде составляет 0,55. При трении по монокристаллическим покрытиям-ориентантам в присутствии смазочного материала, в который не включены серосодержащие продукты, хорошие антифрикционные свойства обеспечивают поверхностно-активные смазочные среды.

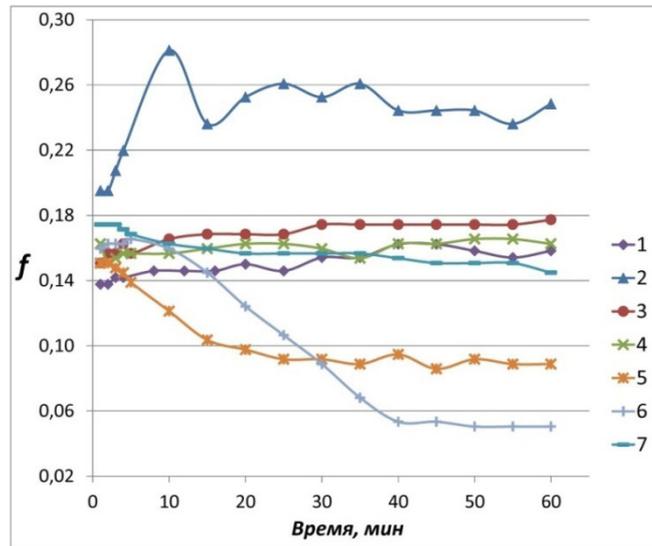


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний для пар трения 1 – сталь-сталь при смазке ПАО-4+1%ОК; 2 – сталь-сталь при смазке ПАО-4+2%ДФ-11; 3 – сталь – МКУ-*W* при смазке ПАО-4; 4- Сталь – МКУ-*W* при смазке ПАО-4+1%ОК; 5 – сталь - МКУ-*W* при смазке ПАО-4+2%ДФ-11; 6 – Сталь-МКУ-Мо при смазке ПАО-4+2%ДФ-11; 7 – сталь – МКУ-Мо при смазке ПАО-4+1%ОК.

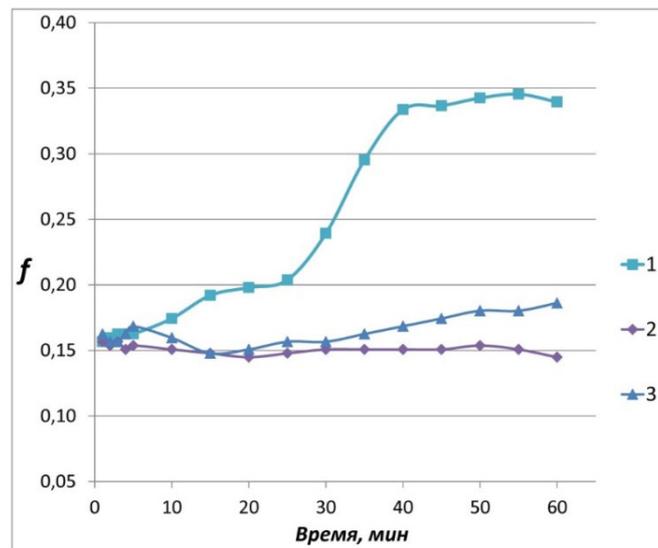


Рис. 6. Зависимости коэффициента трения от продолжительности испытаний пары трения стали по МКУ-покрытию, легированному кремнием, в среде масла ПАО-4 без присадок (1) и с присадками ОК (2) и ДФ-11 (3).

Так, в масле ПАО-4+1% олеиновой кислоты при трении стального шара по монокристаллическому углероду, как нелегированному, так и легированному соответственно вольфрамом, кремнием и молибденом, коэффициент трения составляет 0,15 – 0,16 (такой же,

как при трении стали по стали, то есть для антифрикционные эффекты от монокристаллического углерода и поверхностно-активной среды не суммируется) (рис. 5 и 6). В среде масла ПАО-4 с серосодержащей присадкой ДФ-11 при трении стального шара по монокристаллическому углероду, легированному вольфрамом или молибденом, коэффициенты трения составляли соответственно 0,09 и 0,05, что, по-видимому, объясняется образованием в процессе трения дисульфидов вольфрама и молибдена, смазочное действие которых хорошо известно (см. рис. 5).

Таблица. Результаты экспериментальной оценки трибологических характеристик трёх смазочных сред при трении стали по стали и по стали с покрытиями

Состав покрытий	Коэффициент трения/средний диаметр пятна износа, мм			
	безсмазки за 30 мин.	ПАОМ-4	ПАОМ-4 +1%ОК	ПАОМ-4+ 2% ДФ-11
нет	0,84/0,404	0,55/0,442	0,16/0,255	0,25/0,461
МКУ	0,25/0,275	0,24/0,298	0,15/0,271	0,16/0,275
МКУ-W	0,40/0,316	0,18/0,257	0,15/0,296	0,09/0,278
МКУ-Мо	0,72 /0,679	0,18 /0,330	0,15/0,307	0,05/0,304
МКУ- Si	0,77 /0,607	0,35 /0,342	0,15/0,297	0,18/0,303

Обозначения: ПАОМ-4 – полиальфаолефиновое масло ПАО-4; покрытие МКУ – покрытие монокристаллическим углеродом; ОК – олеиновая кислота; ДФ-11 – 50%-ный раствор диалкилдифитофосфата цинка в маловязком масле.
Примечание: Продолжительность испытания в смазочной среде – 60 мин.

Результаты экспериментальной оценки трибологических характеристик трёх смазочных сред при трении стали по стали и по стали с покрытиями монокристаллическим углеродом приведены в сводной таблице. Как видно из таблицы, легирование исследуемого покрытия молибденом и кремнием приводит к повышению износа во всех трёх сравниваемых средах.

Литература

1. Буяновский И.А., Игнатъева З.В., Левченко В.А. и др. Ориентационная упорядоченность граничных слоёв и смазочная способность масел // Трение и износ, 2008, т. 29, № 4. С. 375-381.
2. Буяновский И.А., Левченко В.А., Большаков А.Н. и др. Влияние структуры и состава твёрдых углеродных покрытий стальных деталей на смазочную способность синтетического масла //Трение и износ, 2013, т. 34, № 5, с. 470-474.
3. Левченко В.А., Матвеев В.Н., Буяновский И.А. и др. К вопросу об эффективности углеродных покрытий-ориентантов для повышения смазочной способности масел. – В кн.: Методы упрочнения поверхностей деталей машин. - М.: КРАСАНД, 2008. – С. 219-235.
4. Большаков А.Н., Буяновский И.А., Игнатъева З.В. и др. Лабораторные трибологические испытания тонких углеродных покрытий в смазочных средах //Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2011 (77), № 11. С. 27-29.
5. Tribology of diamond-like films. Fundamentals and applications./Ed by C.Donet, A.Erdemir, - NY: Springer Sciences+Business Media, LLG, 2008, 662 p.
6. Буяновский И.А., Большаков А.Н., Самусенко В.Д., Левченко В.А. Методика трибологических исследований тонких твёрдых покрытий стальных деталей. - В кн.: Труды НИ РХТУ им. Д.И.Менделеева. Серия: Инженерная механика, материаловедение и надёжность оборудования Вып. № 11 (32) / ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт (филиал). Новомосковск, 2016. – с. 3-6.
7. Левченко В.А., Буяновский И.А., Большаков А.Н., Митрофанов Е.А., Симакин С.Б., Матвеев В.Н. Синтез нанокomпозиционных покрытий, повышающих ресурс трибологических узлов машин и механизмов. "Вакуумная наука и техника" Материалы XXIII научно-технической конференции /под ред. С.Б. Нестерова – М.: НОБЕЛЛА 2016 - с. 192-194.