

4. Polsky E.A. Technological quality assurance of assembly units based on functional changes of dimensional relations with the use of CALS technologies / E.A. Polsky, S.V. Sorokin // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 973 MSF. – P. 189–194.

УДК 621.893, 620.178.16

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

М.И. Прудников,
ООО «Моденжи»,
г. Брянск, Россия;

И.Г. Леванов,
Южно-Уральский государственный университет,
г. Челябинск, Россия;

А.В. Морозов,
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
г. Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена технология твердой смазки и ее реализация в виде твердосмазочных покрытий. Приведены примеры использования этих покрытий в машиностроении и результаты испытаний. Оценены перспективы и намечены пути дальнейшего развития технологии.

Ключевые слова: твердая смазка, твердосмазочное покрытие, узел трения, триботехнические свойства, коэффициент трения

Abstract. The solid lubrication technology and its implementation in the form of antifriction solid-film coatings are considered. These coatings application examples in the mechanical engineering and test results are given. The technology prospects are assessed and ways of further development are outlined.

Key words: solid lubrication, antifriction solid-film coatings, friction unit, tribological properties, coefficient of friction

В настоящее время четко обозначился ряд тенденций в разработке узлов трения машин. В частности, это:

- уменьшение габаритов с соответствующим повышением контактного давления;
- увеличение скорости относительного перемещения деталей;
- расширение температурного диапазона эксплуатации;
- возможность работы в химически агрессивных средах;
- создание необслуживаемых узлов трения;
- ужесточение требований к энергоэффективности;
- безопасность для окружающей среды и человека.

Действительно, узлы трения современной техники зачастую должны работать при криогенных температурах или температурах до +500 °С и более, в условиях вакуума, воздействия радиации или агрессивных химикатов. Развитие робототехники и электромобилей привносит свои требования к снижению потерь на трение, что напрямую связано с автономностью этих машин. При всем этом применяемые для снижения трения материалы и технологии должны минимизировать обслуживание узла и быть экологически безопасны при эксплуатации. Очевидно, что хорошо известные пластичные смазочные материалы и масла уже не способны удовлетворять возросшим требованиям. По этой причине в последние несколько лет отмечено интенсивное развитие технологий твердой смазки.

Твердые смазочные материалы и покрытия на их основе. Некоторые твердые материалы в виде порошков начали использоваться в качестве смазочных еще в прошлом веке. К ним относятся вещества слоистой кристаллической структуры (дисульфид молибдена, графит), некоторые полимеры (политерафторэтилен), мягкие металлы (серебро, золото, свинец). В последнее время отмечено также использование дисульфида вольфрама и алмазоподобного углерода. В частности, дисульфид вольфрама способен обеспечить коэффициент трения менее 0,05 и работать в диапазоне температур от –200 °С до +500 °С, выдерживая контактные давления до 3000 МПа. Однако, для эффективной и ресурсной смазки применения материалов в виде порошков уже недостаточно. Поэтому следующим этапом развития технологии стали различные способы интеграции их в поверхность трения. Одним из таких способов является применение твердосмазочных покрытий. В исходном виде это суспензии порошков твердых смазочных материалов, связующего вещества и растворителя. После нанесения методом окрашивания и отверждения на поверхности формируется

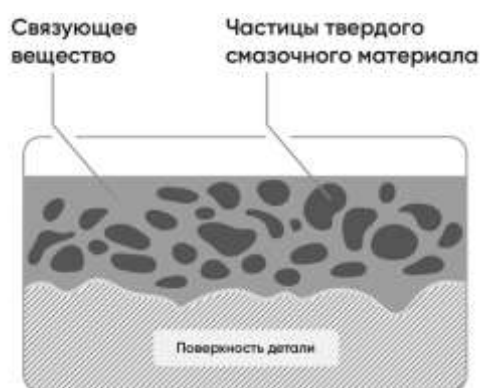


Рис. 1. Схема структуры покрытия

композиционный слой толщиной 25 ± 5 мкм. Он представляет собой матрицу связующего вещества, в ячейках которой распределены высокодисперсные частицы твердых смазочных материалов (рис. 1). Как правило, применяемые связующие вещества и само покрытие имеют существенно меньшую твердость, чем поверхность, на которую они наносятся (сталь, чугун, бронза, латунь и др.). Тем не менее покрытие, прочно сцепляясь с основой, демонстрирует высокое со-

противление сжатию и малое сопротивление сдвигу. Все дело в том, что при указанных толщинах основную нормальную нагрузку воспринимает поверх-

ность основы, а покрытие работает на сдвиг. Это позволяет данной технологии при всей ее простоте реализации обеспечивать высокую эффективность в части снижения трения и износа в широком диапазоне условий работы узла. Компания Моденжи (г. Брянск) разработала серию таких покрытий для различных условий трения и выпускает их под торговой маркой MODENGY. В составах покрытий применяются упомянутые выше твердые смазочные материалы, а также связующие вещества органической и неорганической природы – эпоксидные и фенолформальдегидные смолы, полиамид-имиды, полиуретаны, силикаты, а также алюмофосфатные и алюмохромфосфатные связующие. Далее рассмотрим ряд примеров применения этих покрытий.

Применение твердосмазочных покрытий. Один из примеров успешного применения покрытий – узлы трения скольжения запорно-регулирующей трубопроводной арматуры в теплоэнергетике. Особенности условий работы этих узлов:

- высокие контактные давления и малая скорость скольжения;
- рабочие температуры более +300 °С;
- длительное время простоя между циклами работы.

Потери на трение при работе арматуры всегда в фокусе внимания разработчиков, поскольку они напрямую влияют на усилия открытия-закрытия затворов и требуемую мощность исполнительных механизмов. Применяемые пластичные смазки в описанных условиях малоэффективны. На заводе-изготовителе запорных клапанов С.КЗ были проведены испытания на определение моментов открытия-закрытия на штатной смазке и с покрытиями MODENGY 1001 и MODENGY 1004 на основе дисульфида молибдена и графита при сухом трении [1]. На рис. 2 приведены фотографии обработанных деталей клапана. Диаграмма на рис. 3 отражает результаты испытаний. Моменты открытия и закрытия клапана не только уменьшились до 5 раз, но и стабилизировались.



Рис. 2. Детали запорного клапана с нанесенным покрытием

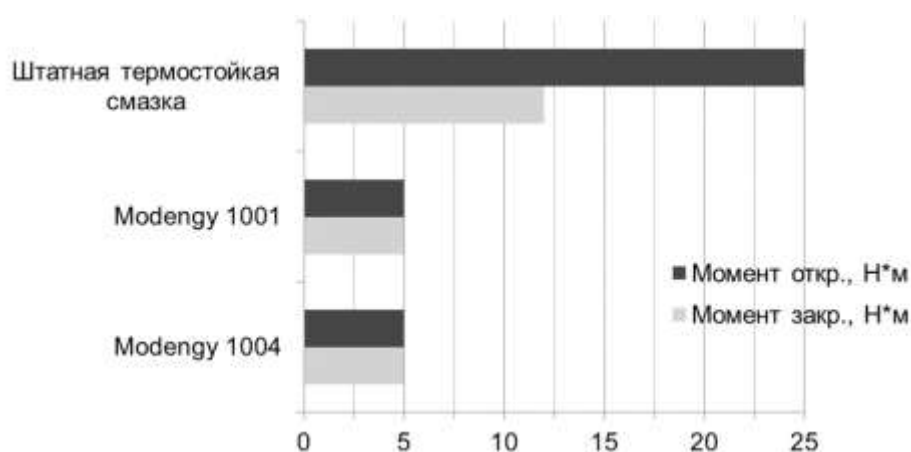


Рис. 3. Результаты измерения моментов открытия и закрытия клапана

Другой пример использования покрытий – юбки поршней двигателей внутреннего сгорания. Здесь покрытие выполняет функцию дополнительной защиты от износа и задиrow в моменты масляного голодания при пуске двигателя, перегреве, облегчает приработку. Применение таких покрытий уже становится своего рода стандартом в двигателестроении с учетом возросших требований к экономичности и мощности двигателей. Для решения этих задач существует серия покрытий MODENGY. В институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН проведены их обширные исследования с моделированием условий работы цилиндра-поршневой группы [2]. В таблице приведена выдержка из результатов исследований в виде значений коэффициентов трения на образцах, имитирующих пару цилиндр-поршень. Видно, что в отсутствие покрытия существенно возрастает коэффициент трения и снижается нагрузка, при которой сила трения превышает предельную для измерительной системы. На рис. 4 представлена фотография поршней с покрытиями.

Результаты испытаний

Наименование покрытия	Коэффициент трения при нормальной нагрузке, Н				
	50	120	250	350	450
Без покрытия	0,69±0,08	0,58±0,06	-*	-*	-*
MODENGY 1007	0,22±0,07	0,17±0,05	0,17±0,03	0,13	0,12±0,03
MODENGY 1003	0,16±0,03	0,11±0,01	0,11±0,01	0,10±0,02	0,11±0,02
MODENGY 1066	0,13±0,05	0,12±0,01	0,11±0,03	0,12±0,02	0,11±0,01
MODENGY 1006	0,12±0,04	0,10±0,02	0,10±0,01	0,10±0,01	0,11±0,02

* – сила трения превысила предельные значения для измерительной системы.

В Южно-Уральском государственном университете научным коллективом под руководством канд. техн. наук И.Г. Леванова проводятся исследования подшипников скольжения двигателей. По их результатам уже установлено, что применение твердосмазочных покрытий на стандартных вкладышах шатунного

подшипника позволяет повысить его «живучесть» до 5 раз. При этом под «живучестью» понимается время сохранения работоспособности подшипника после аварийного прекращения подачи масла. Эти исследования связаны в том числе с внедрением систем «старт-стоп», которые позволяют экономить топливо, но в то же время ужесточают условия работы узлов трения. При пуске-останове они периодически работают в режиме граничной или полужидкостной смазки.



Рис. 4. Поршни с твердосмазочными покрытиями MODENGY

Кроме описанных примеров твердосмазочные покрытия MODENGY нашли применение в нефтегазовом оборудовании (в частности, на резьбовых соединениях бурильных и насосно-компрессорных труб) [3], подшипниках скольжения грузоподъемной и землеройной техники, направляющих скольжения штампов и пресс-форм, крепежных изделиях специального назначения, робототехнике, пневмоприводах [4], винтовых компрессорах [5] и др.

Перспективы развития технологии твердосмазочных покрытий. Из вышесказанного очевидно, что технология твердой смазки и ее реализация в виде твердосмазочных покрытий позволяют создавать более эффективные и совершенные узлы трения и в целом соответствуют требованиям современной техники. Однако, на сегодняшний день есть уже и новые вызовы. Рассмотрим на примере. В последнее время в нашей стране активно развивается направление компактных высокоскоростных энергетических машин. В них в качестве опор ротора используются лепестковые газодинамические подшипники (ЛГП). При пуске и останове они нуждаются в дополнительной смазке. При этом условия работы таковы, что полностью исключают возможность применения какой-либо иной смазки, кроме твердой. Это высокие контактные давления, скорость скольжения более 15 м/с, рабочие температуры от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+500\dots 600\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этих условиях, особенно это касается диапазона температур, не может эффективно работать ни один из известных на сегодня твердых смазочных материалов. Коэффициент трения дисульфида молибдена существенно увеличивается

после температур $+300..+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за его окисления с образованием триоксида молибдена. Графит для реализации механизма смазки требует наличия в нем влаги, которая испаряется при температурах выше $+200..+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оксиды некоторых металлов и фторид кальция, наоборот, проявляют смазочные свойства только в высокотемпературной области – более $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому решение обозначенной задачи лежит в области комбинирования твердых смазочных материалов с различными добавками и создания обратимо адаптирующихся покрытий. Недостаточно просто смешать дисульфид молибдена и оксиды металлов, поскольку тогда получим необратимо адаптирующееся покрытие, которое потеряет свою работоспособность после возврата из высокотемпературной зоны. Необходимо, чтобы при переходе через определенные температурные пределы покрытие формировало новые структуры. Определенные успехи в этой области достигнуты в «Научно-производственном центре Моденжи». На рис. 5 отражена выдержка из результатов проведенных в Московском авиационном институте испытаний покрытий MODENGY применительно к условиям трения ЛПП. По графикам для обратимо адаптирующихся покрытий 2 и 3 можно наглядно проследить процесс адаптации к изменяющейся температуре. В то же время для базового варианта 1 на основе графита отчетливо виден оптимальный температурный режим работы в пределах $+100..+300\text{ }^{\circ}\text{C}$, за рамками которого эффективность покрытия существенно снижается. На рис. 6 представлена фотография элементов ЛПП с покрытием MODENGY.

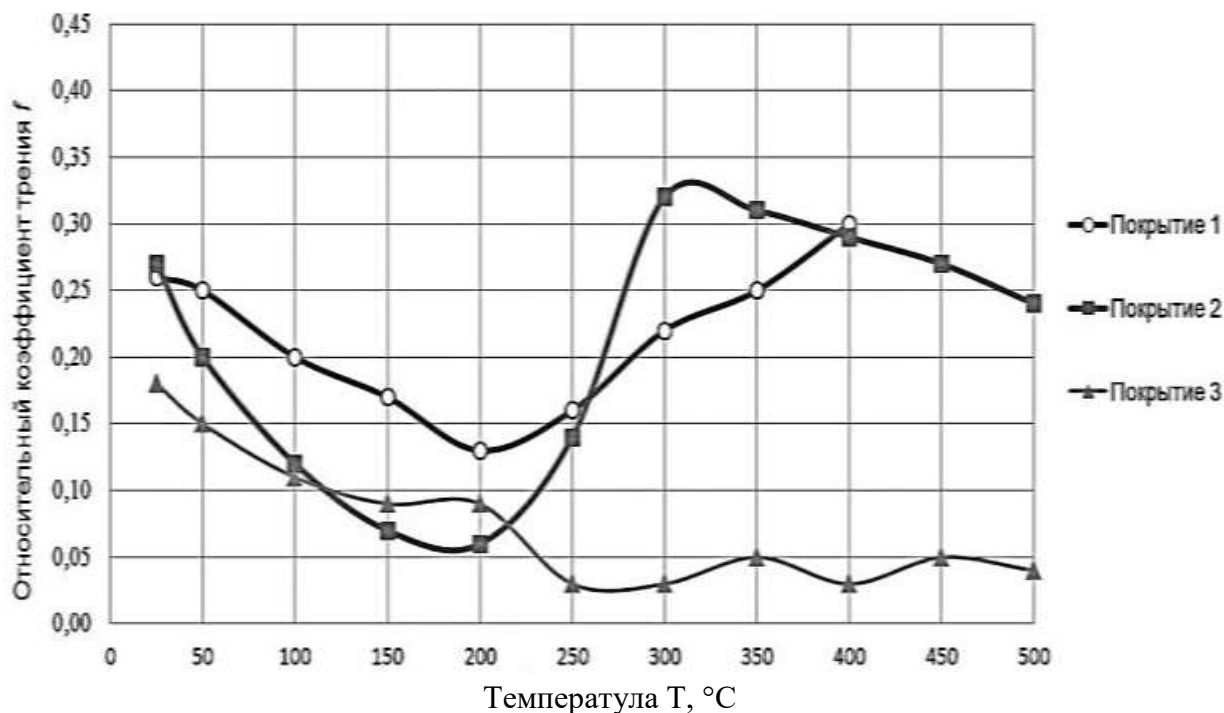


Рис. 5. Результаты испытаний покрытий в виде зависимости потерь на трение от температуры (покрытие 1 – базовое покрытие на основе графита; покрытие 2 – первая версия обратимо адаптирующегося покрытия; покрытие 3 – доработанная версия обратимо адаптирующегося покрытия)

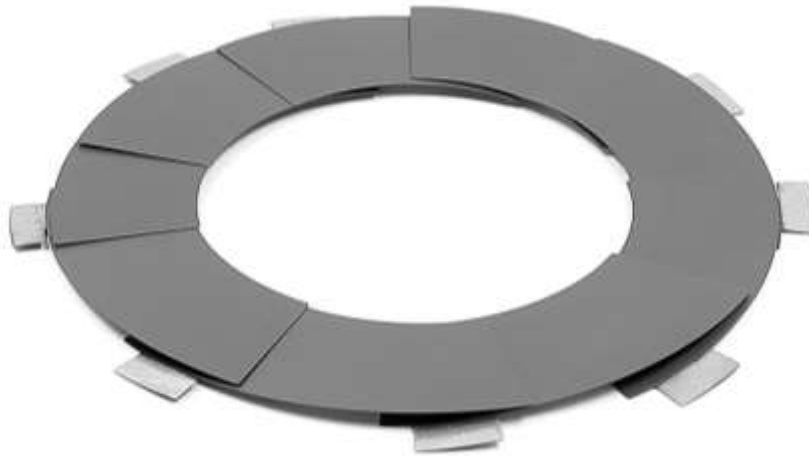


Рис. 6. Элементы ЛПП с покрытием MODENGY

Сегодня технология твердой смазки и ее реализация в виде твердосмазочных покрытий помогают удовлетворять все возрастающие потребности современной техники. А дальнейшее их развитие происходит в виде создания обратимо адаптирующихся покрытий, которые меняют свою структуру в зависимости от условий работы – влажности, температуры и прочих факторов внешней среды. Такие покрытия могут работать в гораздо более широком диапазоне условий, открывая новые резервы по уровню триботехнических свойств.

Библиографический список

1. Прудников М.И. Эффект применения антифрикционных твердосмазочных покрытий для деталей клапанов ТЭС / М.И. Прудников, А.В. Чекмодеев // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2017. – №6(93). – С. 78–79.
2. Гаврилов К.В. Оценка антифрикционных свойств твердосмазочных покрытий для юбки поршня высокофорсированного дизеля / К.В. Гаврилов, А.В. Морозов, М.В. Селезнев и др. // Трение и износ. – 2020. – Том 41. – №5. – С.647–654.
3. Янкилевич А.М. Антифрикционные твердосмазочные покрытия MODENGY для узлов трения и крепежа оборудования морских буровых платформ / А.М. Янкилевич // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2020. – №6(111). – С. 54–55.
4. Прудников М.И. MODENGY PTFE-A20 – новое отечественное покрытие на основе политетрафторэтилена / М.И. Прудников, Е.В. Фролов // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2020. – №3(108). – С. 47.
5. Прудников М.И. Покрытия MODENGY для роторов безмасляных винтовых компрессоров / М.И. Прудников // Главный механик. – 2019. – №11. – С. 30–33.