

УДК 621.001.4

А.О. Горленко, И.Л. Шупиков, М.И. Прудников

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА В КАЧЕСТВЕ АНТИФРИКЦИОННОГО КОМПОНЕНТА СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ**

Описаны возможности дисульфида молибдена по улучшению трибологических показателей смазочных масел, комплексный эффект от применения дисперсии Molykote M-55 в качестве присадки к смазочному маслу. Приведены результаты триботехнических испытаний цилиндрических образцов нормализованным методом с применением автоматизированной системы научных исследований.

Ключевые слова: поверхностный слой, износостойкость, дисульфид молибдена, антифрикционный компонент, смазочный материал, пара трения, триботехнические испытания.

Дисульфид молибдена – вещество слоистой структуры, известное своими уникальными антифрикционными свойствами. Его широко используют в качестве антифрикционного наполнителя при промышленном изготовлении пластичных смазочных материалов и масел. Кроме того, выпускаются концентрированные дисперсии дисульфида молибдена, рекомендуемые в качестве присадки к товарным маслам с целью повышения их эксплуатационных свойств. Дисперсия дисульфида молибдена может добавляться как в редукторные, так и в моторные и другие масла, поскольку ее высокодисперсные частицы не задерживаются масляными фильтрами. Настоящая статья посвящена изучению изменения трибологических показателей товарных масел при введении в них дисульфида молибдена и масляных дисперсий на его основе.

Экспериментальные исследования влияния дисульфида молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) на трибологические свойства масел и пластичных смазочных материалов проводились в нашей стране и за рубежом в различных лабораториях. Испытания, как правило, велись по стандартной методике на четырехшариковой машине трения. По ГОСТ 9490 оценивались несущая способность смазочного слоя (нагрузка сваривания  $P_c$ ) и противоизносные свойства (диаметр пятна износа  $D_u$ ). Это делает возможным сравнение и анализ данных, полученных разными учеными.

Исследования последних лет в разное время проводились в Московском государственном университете тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, Уфимском авиационном институте, Новгородском государственном университете, лаборатории «Dow Corning» в Германии и др. [1; 2]. «Dow Corning» – компания-производитель специальных смазочных материалов, в том числе пластичных смазочных материалов, паст и дисперсий с дисульфидом молибдена под торговой маркой Molykote®. В табл. 1 представлены результаты испытаний пластичного смазочного материала ЦИАТИМ-201, промышленного масла И-20А при добавлении в них дисульфида молибдена в различных пропорциях, а также дисперсии Molykote M-55 дисульфида молибдена (10% по массе) в минеральном масле. Дисперсия Molykote M-55 рекомендуется производителем в качестве присадки к маслам для тяжело нагруженных узлов трения с целью увеличения несущей способности и энергоэффективности, облегчения приработки, снижения износа и шума при работе. Дисперсия добавляется в масла в пропорции 5 – 10% от объема.

Анализ данных табл. 1 показывает, что добавление дисульфида молибдена в товарный смазочный материал в зависимости от концентрации позволяет увеличить несущую способность смазочного слоя в 1,1 – 2,2 раза и снизить износ в 1,1 – 1,5 раза.

Добавление от 20 до 70% дисульфида молибдена в промышленное масло И-20А значительно улучшает все его трибологические показатели. Почти в два раза сокращается диаметр пятна износа, заедания не происходит даже при очень высоких удельных нагруз-

ках (до 4520 Н/мм<sup>2</sup>), в то время как у чистого индустриального масла заедание наступает при 2490 Н/мм<sup>2</sup>.

Таблица 1

Результаты исследований влияния дисульфида молибдена на трибологические свойства масел и пластичных смазок

Базовый смазочный материал	Относительное количество MoS <sub>2</sub> , % по массе	Нагрузка сваривания $P_c$ , Н	Диаметр пятна износа $D_u$ (мм) при нагрузке		
			196 Н	392 Н	800 Н
Пластичная смазка ЦИАТИМ-201	0	1235	0,73	-	-
	10	2766	0,51	-	-
Масло индустриальное И-20А	0	1099	-	0,99	-
	0,1	1167	-	0,66	-
	1	1844	-	0,7	-
	5	2325	-	0,88	-
Дисперсия Molykote M-55	10*	3000	-	-	1,35

\* Содержание в товарном продукте.

Анализ данных исследований показывает в целом положительное влияние дисульфида молибдена на несущую способность и противоизносные свойства масел. Однако эти испытания проводились по стандартному ускоренному методу на четырехшариковой машине трения в режимах, далеких от реальных условий эксплуатации узлов трения. Это позволяет проводить лишь качественную сравнительную оценку. Остается невыясненным влияние дисульфида молибдена на такие важные трибологические показатели, как прирабатываемость и антифрикционность (коэффициент трения).

Для комплексной оценки трибологических показателей в научно-исследовательской лаборатории «Триботехника» Брянского государственного технического университета были проведены испытания чистого индустриального масла И-20А и масла И-20А с добавлением дисперсии дисульфида молибдена Molykote M-55 в рекомендуемом производителем количестве 5% от объема.

Комплексные сравнительные испытания образцов проводились на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М и предназначенной для триботехнических испытаний цилиндрических образцов из металлических материалов и сплавов, позволяющих определить триботехнические показатели поверхностей в условиях трения скольжения при граничной смазке нормализованным методом с применением автоматизированной системы научных исследований [3; 4].

При испытаниях с установленными нагрузкой и скоростью скольжения к вращающейся цилиндрической поверхности образца, частично погруженного в смазочный материал, прижимался неподвижный цилиндрический индентор. Для установки образцов и индентора использовалась схема со сменными держателями, обеспечивающая самоустановку индентора относительно испытываемой поверхности образца на промежуточной сферической опоре для реализации линейного контакта.

В процессе испытаний с помощью системы датчиков непрерывно и синхронно регистрировались время испытания, нагрузка, коэффициент трения и линейный износ. Их численные значения выводились на монитор персонального компьютера. Для измерения момента трения и нагрузки использовались тензодатчики. Для непрерывного измерения износа в процессе проведения испытаний была разработана специальная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние на результаты измерений радиального биения и тепловых деформаций испытуемого образца.

Испытания образцов проводились при скорости скольжения  $v = 1$  м/с и нормальном усилии нагружения  $N = 30 \pm 0,5$  %, Н (соответствует давлениям, рассчитанным по Герцу, порядка 70 МПа). Такие режимы максимально приближены к реальным условиям эксплуатации большинства узлов трения. Смазывание осуществлялось постоянно в процессе проведения экспериментов окунанием в емкость с маслом. Материал образца – сталь 45 без термической обработки (точение); материал индентора – твердый сплав ВК8; вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло промышленное И – 20А (ГОСТ 20799 – 88); общее время испытаний каждого образца – 6 ч.

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие трибологические показатели:

- время приработки  $t_0$  (ч) – время от начала испытания до момента выхода кривой изнашивания на линейный участок;
- приработочный износ  $h_0$  (мкм) – величина сближения, определяемая в момент окончания времени приработки  $t_0$ ;
- значение коэффициента трения в конце испытаний  $f$ ;
- $f_0/f$  – отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки  $f_0$  к его значению в конце испытаний  $f$ ;
- среднее значение скорости изнашивания в период нормального изнашивания  $\gamma = (h - h_0)/(t - t_0)$ , где  $h$  – величина износа образца за все время испытаний, мкм;  $t$  – общее время испытаний, ч;
- значение скорости изнашивания за общее время испытаний  $\gamma_{\Sigma} = h/t$ .

В табл. 2 приведены значения трибологических показателей, определенные по результатам испытаний.

На рис. 1, 2 показаны графики износа и изменения коэффициента трения в процессе испытаний при смазывании маслом И-20А и маслом И-20А с добавлением дисперсии Molykote M-55.

Проведенные испытания и выполненные расчеты показывают, что при добавлении в промышленное масло И-20А 5% дисперсии дисульфида молибдена Molykote M-55 длительность приработки несколько возросла, однако износ в ее процессе уменьшился на 15%. Это свидетельствует о том, что процесс приработки происходил более плавно и с меньшими потерями. Скорость изнашивания в период нормального изнашивания уменьшилась на 41%. Потери на трение в период нормального изнашивания уменьшились в среднем на 18%.

Поскольку около 90% генерируемой при трении энергии рассеивается в виде тепла, то вполне предсказуемо пропорциональное коэффициенту трения снижение температуры фрикционного разогрева. Это благоприятно отразится на сроке службы масла благодаря снижению интенсивности его окисления. Известно, что для минеральных масел снижение их температуры при эксплуатации на 10 – 15 °С позволяет продлить срок до замены вдвое.

Комплексный эффект от применения дисперсии Molykote M-55 в качестве присадки к маслу наглядно демонстрирует диаграмма, представленная на рис. 3.

Таблица 2

Значения трибологических показателей по результатам испытаний

Трибологическое свойство	Показатель	Значение показателя	
		Мас-ло	Масло + дисперсия Molykote M-55
Прирабатываемость	Время приработки $t_0$ , ч	1,33	1,58
	Приработочный износ $h_0$ , мкм	7,50	6,50
	Отношение коэффициентов трения $f_0/f$	1,24	1,55
Антифрикционность	Установившийся коэффициент трения $f$	0,145	0,123
Износостойкость	Суммарный износ $h$ , мкм	15,40	11,80
	Скорость изнашивания в период нормального изнашивания $\gamma$ , мкм/ч	1,69	1,20
	Скорость изнашивания за общее время испытаний $\gamma_{\Sigma}$ , мкм/ч	2,57	1,97

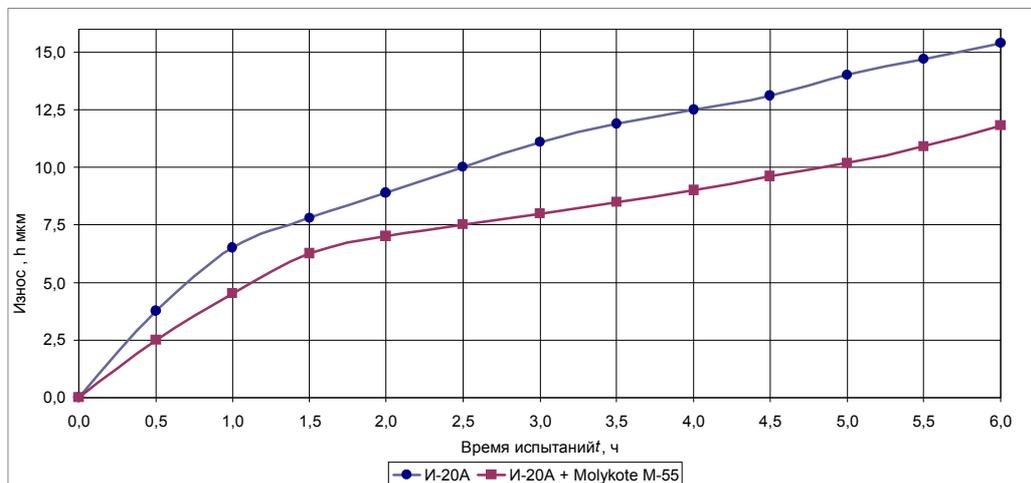


Рис. 1. Кривые изнашивания для образцов, смазываемых маслом И-20А и маслом И-20А с добавлением 5% дисперсии дисульфида молибдена Molykote M-55

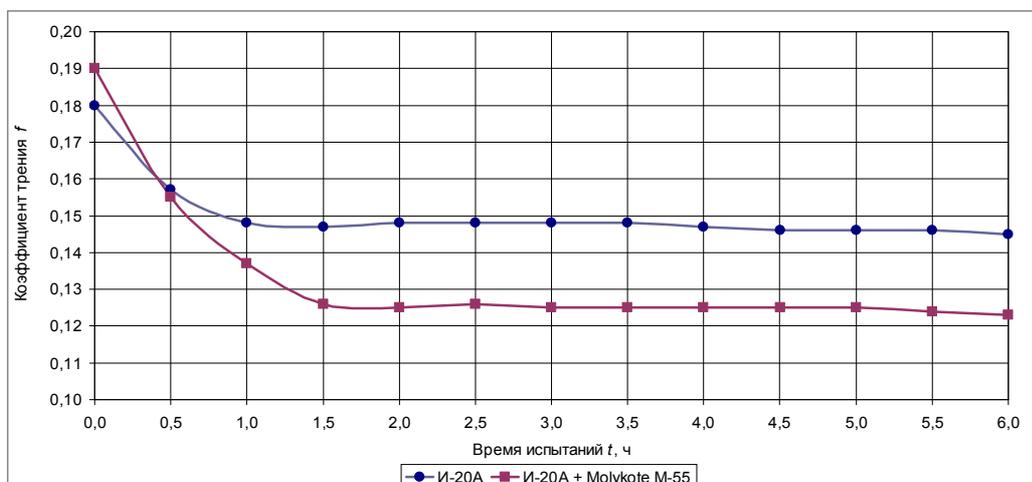


Рис. 2. Графики изменения коэффициента трения для образцов, смазываемых маслом И-20А и маслом И-20А с добавлением 5% дисперсии дисульфида молибдена Molykote M-55



Рис. 3. Эффект от применения дисперсии Molykote M-55 в качестве присадки к маслу

Из рис. 3 видно, что применение дисперсии Molykote M-55 в качестве присадки к маслу позволяет снизить потери на трение, уменьшить приработочный износ, значительно уменьшить скорость изнашивания, хотя длительность приработки при этом незначительно увеличивается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, А.Н. Сравнительная оценка триботехнических свойств РВС «Форсан» и дисульфида молибдена в качестве добавок к смазочным материалам / А.Н. Абрамов, Д.Г. Тюленев, И.С. Мухамадиев [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. - №12. – С.31-34.
2. Дисперсия дисульфида молибдена в минеральном масле Molykote M-55: техническое описание / АТФ. – М., 2013. – 2 с. – URL: <http://support.atf.ru/uploads/15284c4a65f044M-55.pdf>.
3. Горленко, А.О. Формирование износостойких поверхностных слоев пар трения на основе применения наноалмазных материалов / А.О. Горленко, С.В. Давыдов, В.М. Сканцев, М.Ю. Куракин // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – №4 (193). – С. 23 – 29.
4. Горленко, А.О. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом / А.О. Горленко, М.И. Прудников // Справочник. Инженерный журнал. – Прил. 10. – 2009. – С. 22-24.

Материал поступил в редколлегию 19.02.14.