

З. П. МЕЛЬНИК, Ю. Л. ИЩУК, О. И. НОСОВСКИЙ

МЕХАНИЗМ СМАЗОЧНОГО ДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩИХ СМАЗОК И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Металлоплакирующие смазки применяют в различных узлах трения давно и исследованиям их трибологических и, в меньшей степени, реологических свойств посвящено множество публикаций, однако единого мнения о механизме их смазочного действия нет. Наоборот, одни авторы связывают металлоплакирование с избирательным переносом, другие считают, что это явление (металлоплакирование) не имеет с ним ничего общего. Все это, наряду с отсутствием четких представлений о химических и физико-химических процессах металлоплакирования, препятствует созданию металлоплакирующих смазочных материалов на строго научной основе и определению рациональных областей их применения, что, отчасти, и явилось целью настоящих исследований.

Объектами служили модельные композиции, полученные загущением нефтяного масла И-50А (ГОСТ 20799-75), литиевым (Li-), комплексным литиевым (kLi-), комплексным алюминиевым (kAl-), мылами и производными мочевины (П-). В качестве добавок изучали: порошок меди, ее оксиды, соли органических и неорганических кислот, комплексные соединения меди.

Трибологические характеристики смазок исследовали на машинах трения с реализацией различных форм контактирования пар трения: точечный контакт – ЧШМ (четырёхшариковая машина трения), вибротрибометр "SRV-Optimol"; линейный контакт – стенд 2070 СМТ-1; по плоскости – машина торцевого трения на базе модернизированной ЧШМ "Ранзи".

Состояние поверхностей трения металлов исследовали методами ОЖЭ-спектроскопии (Джамп-10с), РД-рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-3), РЭМ-растровой электронной микроскопии (Т-20), РФЭС-рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (ЭС-2402) и МСКЭ-электронной мессбауэровской микроскопии.

На первом этапе с целью выявления наиболее эффективных добавок и изучения влияния природы загустителя на эффективность такого действия провели серию опытов на машинах трения с реализацией различных режимов контактного взаимодействия (окислительного изнашивания и повреждаемости). Установлено, что наибольшая активность таких добавок характерна для смазок, обладающих более низкими трибологическими характеристиками (Li- и kAl- смазки). На рис. 1 и в табл. 1 проиллюстрированы результаты оценки противоизносных и противозадирных свойств исследованных композиций в зависимости от содержания в них добавки. Они свидетельствуют, что наибольшая эффективность медьсодержащих добавок (с точки зрения улучшения противоизносных свойств смазки) проявляется при повышенных нагрузках ($P \geq 600$ Н, ЧШМ), т. е. в режиме повреждаемости. При низких нагрузках ($P \leq 200$ Н, ЧШМ) такие добавки, как правило, ухудшают противоизносные свойства смазки. По способности улучшать противозадирные характеристики Li-смазок, как было установлено ранее [1], исследованные добавки можно расположить в

ряд: соли органических кислот и комплексные соединения меди <порошки меди и ее оксидов> соли неорганических кислот.

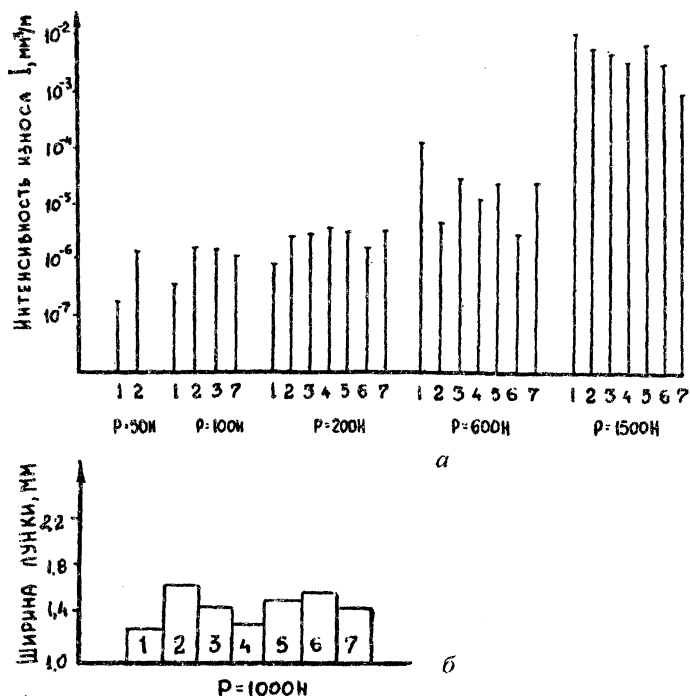


Рис. 1. Противозадирные свойства Li-смазки, содержащей добавки:
 а - ЧШМ; б - 2070 СМТ-1;
 1 - без добавки; 2 - 10 % ПМС-2; 3 - 10 % Cu_2O ; 4 - 10 % CuO ;
 5 - 10 % $\text{Cu}(\text{OH})_2$; 6 - 5 % CuCl_2 ; 7 - 5 % CuS

Полученные результаты свидетельствуют, что медьсодержащие добавки в основном улучшают противозадирные характеристики смазки, что важно для узлов трения, работающих в экстремальных условиях. В то же время в режиме окислительного изнашивания такие добавки нередко вызывают повышенный износ.

**Влияние добавок порошка меди марки ПМС-2
на трибологические свойства смазок, приготовленных
на различных загустителях**

Смаз- ка	Содер- жание добавки, %	ЧШМ, ГОСТ 9490-75					
		$P_k, Н$	$P_c, Н$	$I_3, Н$	$D_{из}, мм$		
					$P=1000 Н$	$P=600 Н$	$P=1000 Н$
Li-	-	680	1780	310	0,60	1,80	схв.
	5	840	1880	390	0,65	0,85	схв.
	10	1190	1880	510	0,68	0,80	схв.
	15	1120	1880	520	0,70	0,90	схв.
kLi-	-	890	2000	380	0,30	0,80	1,60
	5	1190	2110	440	0,48	0,75	1,35
	10	1190	2200	450	0,55	0,75	1,15
	15	1060	2500	490	0,55	0,80	1,10
kAl-	-	750	1780	320	0,55	2,00	2,60
	5	1060	2000	390	0,53	0,72	1,40
	10	1190	2110	430	0,53	0,75	1,20
	15	1260	2240	480	0,50	0,75	1,10
П-	-	890	1120	360	0,60	1,30	2,80
	5	1000	1600	410	0,55	1,15	1,50
	10	1120	1600	440	0,50	1,07	1,38
	15	1000	1600	450	0,48	1,15	1,55

Для выявления особенностей механизма смазочного действия таких добавок при различных режимах поверхностного разрушения при трении на втором этапе проведены трибологические исследования, включающие анализ состояния поверхностей трения. Основные процессы изнашивания (схватывание 1-го и 2-го рода, окислительное) моделировали на машине торцевого трения, позволяющей обеспечивать непрерывную подачу смазочного материала непосредственно в зону трения (пара трения: диск и пальчики из стали У10А). Оказалось, что введение порошка меди в Li-смазку незначительно снижает интенсивность изнашивания

в режимах схватывания, увеличивая его при окислительном изнашивании (табл. 2). Исследованиями состояния поверхностей трения методами РД, РЭМ, МСКЭ, ОЖЭ и РФЭС после различных режимов трения установлено следующее.

1. Схватывание 1-го рода ($P_{уд}=130$ МПа, $V_{ск}=15$ м·с⁻¹, $\tau=5$ с). Введение порошка меди в смазку приводит к формированию более однородного рельефа со значительно меньшими разрушениями по сравнению с поверхностью, сформированной в среде смазки без этой добавки. Микроструктура поверхностных слоев при работе в среде металлоплакирующей смазки претерпевает меньшие изменения, чем после работы в среде смазки без добавки (см. табл. 2). При этом независимо от смазки на поверхности трения образуется незначительное количество парамагнитной фазы (рис. 2).

2. Окислительное изнашивание ($P_{уд}=1,5$ МПа, $V_{ск}=1$ м·с⁻¹, $\tau=18000$ с). Введение порошка меди в смазку способствует уменьшению площади "выглаженных" участков и увеличению площади, покрытой специфической "мозаичной" структурой, т. е. такие добавки способствуют "развитию" поверхности трения, вызывая тем самым увеличение износа (метод РЭМ). Фазовый качественный анализ поверхностей трения (метод РД), а также результаты исследований методами ОЖЭ и РФЭС свидетельствуют об отсутствии

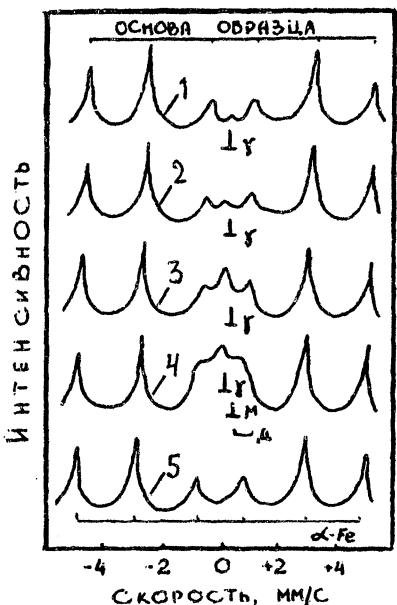


Рис. 2. Электронные мессбауэровские спектры поверхностей трения после работы в среде Li-смазки: 1 – без добавки (схватывание 1-го рода); 2 – 10 % ПМС-2 (схватывание 1-го рода); 3 – без добавки (схватывание 2-го рода); 4 – 10 % ПМС-2 (схватывание 2-го рода); 5 – эталон

Результаты дифрактометрических (ДРОН-3) и трибологических (МТТ) исследований

Показатель	Li-смазка			Li-смазка + 10 % ПМС-2		
	схватывание 1-го рода	окислительное изнашивание	схватывание 2-го рода	схватывание 1-го рода	окислительное изнашивание	схватывание 2-го рода
Остаточная макродеформация (x10)	- 0,80	- 0,20	- 0,14	- 0,10	- 0,20	- 0,19
Полная ширина на половине максимальной интенсивности 2W:						
Fe (110) ^x	0,62	0,40	0,46	0,55	0,40	0,45
Fe (200) ^{xx}	1,24	0,87	1,05	1,05	0,88	1,09
Fe (211) ^{xxx}	1,24	0,89	0,90	1,03	0,91	0,94
Fe (220) ^{xxxx}	3,00	1,07	1,50	1,80	1,05	1,60
Размер области когерентного рассеяния	10	-	46	39	-	42
Микродеформация	-0,146	-0,068	-0,117	-0,136	-0,071	-0,117
Наличие меди	-	-	-	+	-	+
Интенсивность изнашивания, (x10)	1,0	0,0010	0,012	0,4	0,0012	0,008

Примечание. Для эталона ^x0,39; ^{xx}0,91; ^{xxx}0,91; ^{xxxx}1,04

меди на поверхности трения. Исследования микроструктурных изменений поверхностных слоев методами Долле-Хока и Фойгта не выявили заметного влияния содержания порошка меди в смазке на остаточную макро- и микродеформацию кристаллической решетки подповерхностных слоев исследуемого материала (см. табл. 2).

3. *Схватывание 2-го рода* ($P_{уд}=15$ МПа, $V=4,3$ м·с⁻¹, $\tau=300$ с). На поверхностях трения, работавших в среде смазки без добавок, имеются области, сходные с областями мощного термического воздействия. Для образцов, испытанных в среде металлоплакирующей смазки, такие области отсутствуют. Благотворно влияя на снижение температурных полей на трущихся поверхностях, порошок меди при его введении практически не влияет на изменение структурного состояния поверхностных слоев (см. табл. 2). Однако при этом на поверхности трения обнаруживается медьсодержащая пленка, которая расположена в виде отдельных сегрегаций в местах, где процесс схватывания проявляется наиболее отчетливо. Наличие сателлита "встряски" основной фотоэлектронной линии меди [3] свидетельствует о том, что она находится в двухвалентном состоянии (предположительно в виде CuO). При испытании образцов в среде обычной смазки интенсивность одиночной линии аустенита в сравнении со схватыванием 1-го рода увеличивается почти в два раза (метод МСКЭ, см. рис.2). Других особенностей изменения резонансных спектров не наблюдалось. Однако при использовании металлоплакирующей смазки в парамагнитной области спектра возникает сложная картина из суперпозиции ряда одиночных линий и дублетов, из анализа которых можно предположить, что "появление" такой картины связано с формированием микрообластей меди (кластеров), в которых растворяется некоторое количество железа.

Качественно близкие результаты получены и при исследовании поверхностей трения, работавших с другими типами базовых смазок, а также медьсодержащими добавками различных

классов. Это позволяет сделать вывод, что механизм смазочного действия различных медьсодержащих добавок практически не зависит от класса используемого соединения. Вместе с тем, он имеет существенные различия для режимов окислительного изнашивания и повреждаемости. При относительно легких режимах трения (окислительное изнашивание) смазочное действие металлоплакирующих смазок определяется эффективностью адсорбционного граничного слоя. Порошок меди и другие ее соединения в связи с их каталитической активностью взаимодействуют с продуктами трибохимического окисления базовой смазки, уменьшая доступ кислорода к поверхностям трения. Это способствует формированию пленок вторичных структур первого типа, что провоцирует проявление сопутствующего процесса схватывания и увеличивает интенсивность изнашивания.

Увеличение нагрузки качественно меняет механизм смазочного действия:

а) при схватывании 1-го рода основную роль играют "механические" свойства граничного слоя. Поэтому, если смазка содержит в своем составе медьсодержащую добавку (порошок), то одновременно с разрушением граничного слоя адсорбированных молекул смазочного материала на участках схватывания происходит "вдавливание" добавки в поверхностные слои с последующим ее "размазыванием" за счет сдвиговых деформаций, что несколько "сглаживает" схватывание и отодвигает его в область более высоких нагрузок;

б) схватывание 2-го рода связано с интенсивным разогревом поверхностных слоев, способствующим деструкции смазочного материала и повреждаемости поверхностей трения.

Повышение температуры в сочетании с высокими нагрузками благоприятствует фрикционному "размазыванию" меди по ювенильной поверхности, что в соответствии с концепцией Боудена-Тейбора снижает коэффициент трения и температуру и повышает износостойкость. При этом происходит интенсивное окисление такой пленки.

Если медь содержащая добавка находится в виде химического соединения, то в режиме повреждаемости наряду с вышеописанными процессами происходит восстановление меди, плакирование и модификация поверхностных слоев (в местах схватывания) активными элементами добавки.

Полученные выводы согласуются с результатами лабораторно-стендовых испытаний опытно-промышленных металлоплакирующих смазок СМ 01"Л", СМ 02"Л", СМП-5 и других, а также смазок товарного ассортимента Литол-24, Лита, Шрус-4 [4]. По работоспособности в подшипниковых узлах трения, работающих в режиме окислительного изнашивания (стенды IP 168 и SETA-1860), металлоплакирующие смазки уступают смазкам товарного ассортимента. Однако в экстремальных условиях эксплуатации, где необходимо применять специальные смазки, например, высокотемпературные резьбовые, уплотнительные, технологические и другие, металлоплакирующие смазки имеют преимущества. Например, использование порошка меди в качестве добавки при разработке противозадирной антипригарной смазки, предназначенной для смазывания высокотемпературных крепежных соединений, подвижных и неподвижных частей пресс-форм машин литья под давлением, дало положительные результаты. При этом для таких условий эксплуатации традиционно применяемые до-

бавки типа MoS_2 , как показали промышленные испытания, малопригодны.

На основании полученных результатов и учитывая влияние медьсодержащих добавок на реологические и физико-химические свойства смазок [1, 2], можно констатировать, что применение смазок с медьсодержащими добавками в узлах трения, работающих в режиме окислительного изнашивания, недопустимо. Их применение оправдано в тяжело нагруженных узлах трения с ограниченным ресурсом работы, где ведущим процессом поверхностного разрушения является схватывание, или же в составах других узкоспециализированных смазок, где роль самой смазки сводится к функции "носителя" таких добавок.

Список литературы

1. Мельник З. П., Василенко И.В., Ищук Л.П. и др. Влияние медьсодержащих добавок на свойства пластичных смазок // Химия и технология топлив и масел, 1989. – № 10. – С. 16–18.
2. Мельник З.П. О стабильности металлоплакирующих смазок в условиях эксплуатации и хранения // Триботехника – машиностроению. Тез. IV Московской науч.-техн. конф. –М.: 1989. – С. 96.
3. Мельник З.П. Медьсодержащие пластичные смазки и поверхностное разрушение металлов при трении: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Киев, 1990. – 18 с.
4. Мельник З.П., Любинин И.А., Василенко И.В. Об эффективности металлоплакирующих смазок // Химия и технология топлив и масел, 1989. – № 2. – С. 24–26.