

М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев, В. В. Авилов, П. Г. Иваночкин

ЭФФЕКТИВНАЯ ПОЛИМЕРНАЯ ФОСФОМОЛИБДАТНАЯ ПРИСАДКА ДЛЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Методами физико-химического анализа – термогравиметрическим, рентгенометрическим, ИК-спектроскопическим исследована диаграмма состояния системы метафосфат меди – триоксид молибдена, в которой образуется соединение $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. Изучалось использование присадки фосфоромолибдата меди для улучшения физико-химических свойств пластичных смазок, применяемых в узлах трения железнодорожной техники. Проводились триботехнические испытания созданных смазочных материалов с многофункциональной присадкой $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. Рассмотрен механизм смазочного действия противоизносной, противозадирной, антикоррозионной присадки фосфоро-молибдата меди в модельных основах, в качестве которых использовали пластичные смазки: ЛЗ-ЦНИИ, применяемая в узлах трения железнодорожной техники, и ЦИАТИМ-201, предназначенная для узлов трения автомобильной и авиационной техники.

Ключевые слова: трение, износ, смазочные материалы, диаграмма состояния системы, фосфоромолибдат меди, многофункциональная присадка, триботехнические испытания, смазочное действие.

Для цитирования: Эффективная полимерная фосфоромолибдатная присадка для смазочных материалов / М. А. Савенкова, С. А. Воляник, А. П. Сычев [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2. – С. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

Введение

Конструкционным элементом трибосистем, снижающим силу трения и, следовательно, интенсивность изнашивания, являются смазочные материалы.

Увеличение ресурса надёжности и безремонтной эксплуатации трибосистем, их энергосберегающего и экологически безопасного функционирования обеспечивают смазочные материалы с запрограммированным комплексом свойств. Во многие узлы трения транспортных средств, работающих в условиях высоких скоростей и больших нагрузок, вводятся пластичные смазки. Оптимизация свойств пластичных смазок (ПС) достигается использованием присадок определённой химической природы и с заданными физико-химическими свойствами [1].

Для узлов трения транспортных средств, в том числе и железнодорожного транспорта, применяются пластичные смазки с антифрикционными, противоизносными и противозадирными свойствами, работающие в условиях граничного трения. При разделении металлических поверхностей трибосопряжения тонким слоем смазочного материала в условиях граничного трения возможно соприкосновение поверхностей и появление сухого трения, поэтому широко используются различные виды присадок.

Как отмечено в обзоре о влиянии смазочных материалов (СМ), а также различных присадок на триботехнические свойства твёрдых тел, актуальными противозадирными, противоизносными присадками являются неорганические полимерные фосфаты метафосфатного состава [2]. Метафосфатному составу отвечает соотношение оксид металла (II) / пентаоксид фосфора, равное единице, т.е. $\text{MeO}/\text{P}_2\text{O}_5 = 1$. Отмечено, что полимерные метафосфаты одно- и двухвалентных металлов отличаются высокой склонностью к комплексообразованию [3]. Уникальной способностью полимерных метафосфатов является взаимодействие с оксидами *d*-элементов (оксидами молибдена (VI) и вольфрама (VI), ванадия (V)), приводящее к образованию гетерополифосфатов.

По результатам проведённых триботехнических испытаний установлено, что присадки неорганической природы, а именно, фосфоромолибдаты некоторых *s*-элементов – лития и натрия, и *d*-элементов – цинка и никеля являются эффективными, обладают многофункциональностью, олеофильностью и значительно улучшают физико-химические и трибологические свойства смазочных композиций [4]. Поэтому целесообразно продолжить обоснованный системный поиск эффективных многофункциональных присадок внутри класса гетерополифосфатов.

Получение новых материалов с заданными свойствами – одно из важных направлений современного материаловедения, развивается на основе исследований фазовых диаграмм состояния систем

методами: термогравиметрическим, рентгенофазовым, ИК-спектроскопическим. Установлено, что основным типом взаимодействия в системах из метафосфатов одно- и двухвалентных металлов с оксидом молибдена (VI) является комплексообразование, приводящее при кристаллизации из расплавов к образованию соединений со стехиометрическим соотношением компонентов 1:1 [3, 4].

В тяжело нагруженных узлах трения железнодорожного транспорта в жёстких режимах эксплуатации происходит ухудшение эксплуатационных характеристик всех составляющих компонентов трибосистем – деструкция смазочного материала, разложение молекул присадок органической и элементоорганической природы, появление граничного и, далее, возможно, сухого трения, что увеличивает износ узлов трения. Исследования в этой области трибологии проводились и ранее [5].

По результатам триботехнических испытаний, проведённых нами ранее, установлено, что фосфоромолибдаты лития и натрия, а также цинка, никеля в качестве присадок к пластичным смазочным материалам существенно улучшают их физико-химические и реологические свойства [6]. Поэтому целесообразно продолжить поиск эффективных многофункциональных присадок внутри класса гетерополифосфатов.

Получение новых материалов с заданными свойствами – одно из важных направлений современного материаловедения, развивается на основе исследования фазовых диаграмм состояния. При исследовании диаграмм состояния установлено, что в системах из метафосфатов одно- и двухвалентных металлов с оксидом молибдена (VI) преобладающими являются реакции комплексообразования, приводящие при кристаллизации расплавов к образованию соединений со стехиометрическим соотношением компонентов 1:1 [7].

Проведены триботехнические испытания пластичных смазочных материалов, основу которых составили пластичные смазки (ПС) ЛЗ-ЦНИИ и ЦИАТИМ-201, используемые в узлах транспортных средств. В указанные ПС вводили соединение $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$, эффективность которого в качестве многофункциональной присадки проявилась в модельных смазочных средах – вазелиновом масле и глицерине [8].

Выполнялись лабораторные и стендовые исследования смазочных материалов с присадкой фосфоромолибдата меди с целью установления антифрикционных, противозадирных, противоизносных и антикоррозионных свойств этого соединения. Установлено увеличение работоспособности и уменьшение износостойкости узла трения.

Материалы и методы исследования

Один из компонентов системы метафосфат меди – триоксид молибдена $\text{Cu}(\text{PO}_3)_2$ синтезировали из гексагидрата нитрата меди и однозамещённого ортофосфата аммония марок «хч», взятых в стехиометрическом соотношении. Полученное соединение плавится при 935°C . Методами ИК-спектроскопии и восходящей хроматографии на бумаге установлена индивидуальность соединения и определена структура аниона $\text{P}_4\text{O}_{12}^{4-}$. Анион соединения является тетраметафосфатом. Циклический анион содержит четыре атома фосфора, соединённые друг с другом через атомы кислорода.

В системе $\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 - \text{MoO}_3$ выявлено образование новой фазы при соотношении исходных компонентов 1:1. Дериватограмма образца такого состава имеет чёткий глубокий эндоэффект при 935°C . Следовательно, соединение плавится конгруэнтно, без разложения, химически и термически стабильно не имеет фазовых переходов. Даже при перегреве соединения на 150°C выше температуры плавления в течение 3 ч потери массы образца не происходит.

ИК-спектр $\text{Cu}(\text{PO}_3)_2$ фиксирует в области антисимметричных колебаний связей $V_{\text{as}}\text{POP}$ только одну сильную полосу поглощения при 1037см^{-1} и в интервале симметричных колебаний $V_s\text{POP}$ узкий дуплет при $720-750\text{см}^{-1}$. Такие отличительные особенности характерны для ИК-спектров тетраметафосфатов. Хроматографический анализ метафосфата меди показал присутствие аниона циклотетрафосфата $[\text{P}_4\text{O}_{12}]^{4-}$.

При образовании фосфоромолибдата меди происходит усложнение анионной структуры, в которой сохраняются фрагменты связей P-O-P и O-P-O, но возникают новые P-O-Mo. Такие анионы в виде терминальных тетраэдров с атомами молибдена характеризуют способность пятивалентного фосфора и молибдена с валентностью шесть образовывать разнообразные циклические структуры.

Индивидуальность выделенного фосфоромолибдата меди подтверждена рентгенофазовым, ИК-спектроскопическим анализом, тонкослойной хроматографией на бумаге, электронно-оптическим и кристаллографическими исследованиями [9]. Применение указанных методов исследования показало, что фосфоромолибдат меди имеет анионную молибденофосфатную структуру из молибдатных и фосфатных фрагментов, соединённых мостиковыми связями P-O-Mo. На рис. 1 приведена структура циклического аниона соединения $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$.

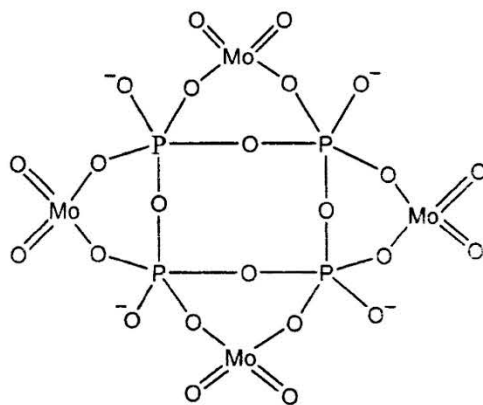


Рис. 1. Структура циклического аниона $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$

Колебательный ИК-спектр поглощения $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ имеет особенности, характерные для спектров метафосфатов с циклическими тетраметафосфатными анионами.

На контуре полосы в области $820\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ отражаются четыре максимума при $835, 910, 970$ и 988 см^{-1} , отвечающие валентным антисимметричным колебаниям связей O-Mo-O и P-O-P, которые происходят вдоль оси связей без изменения угла между ними. Валентные симметричные колебания V_s фрагментов O-Mo-O фиксируются при $840, 905, 980$ и 985 см^{-1} .

Полосы сильной интенсивности при $575, 598$ и 670 см^{-1} отнести к симметричными V_s и антисимметричным колебанием связей Mo-O-Mo.

Деформационные колебания, связанные с изменением значений валентных углов, δPO_2 и γPO_2 выявлены в интервале значений волновых чисел $450\text{--}580\text{ см}^{-1}$, а деформационные колебания фрагментов P-O-Mo проявляются при $565\text{--}725\text{ см}^{-1}$.

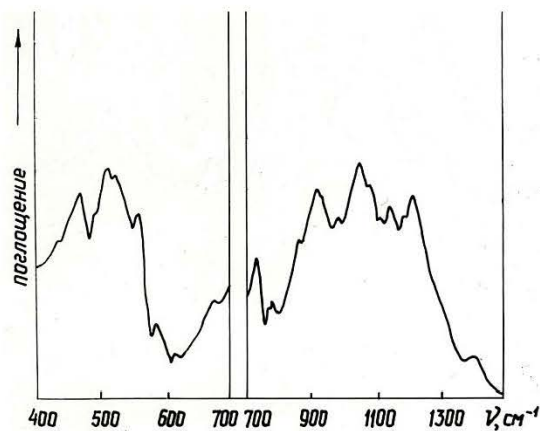


Рис. 2. ИК-спектр фосформолибдата меди

Интерпретация результатов восходящей тонкослойной хроматографии на бумаге, как и данные ИК-спектроскопии, позволяет однозначно определить гетероанион соединения как кольцевую структуру, подобную тетраметафосфатному аниону $(\text{P}_4\text{O}_{12})^{4-}$ [9]. На каждой из хроматограмм, полученных при использовании кислого и щелочного растворителя, имеется только одно пятно, характерное для тетраметафосфатного кольца.

Данные электронно-микроскопического исследования показывают, что соединение $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ можно отнести к моноклинной сингонии, что является характерным признаком для большинства фосформолибдатов такого стехиометрического соотношения [10] и благоприятным факторам формирования вторичных структур на поверхностях трения.

Цель работы и методы исследования

Триботехническим испытаниям подвергали смазочные материалы, основу которых составляли пластичные смазки (ПС) ЦИАТИМ-201 и ЛЗ-ЦНИИ, применяемые для трибосопряжений многих транспортных средств. В указанные ПС вводили присадку $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. Выполнялись лаборатор-

ные и стендовые исследования смазочных материалов с присадкой фосфоромолибдата меди с целью установления антифрикционных, противоизносных, противозадирных и антикоррозионных свойств этого соединения. Экспериментально установлено увеличение работоспособности и уменьшение износа узла трения при использовании созданных смазочных материалов.

С помощью прибора синхронного термического анализа NETZSCH STA 443F3 Jupiter выполняли термогравиметрические исследования в атмосфере воздуха в интервале 20–1200 °С, регистрируя фазовые превращения и температурные эффекты. ИК-спектры поглощения образцов записывали на спектрометре Specord 75ИК в диапазоне частот 400–3500 см⁻¹. Прибор ДРОН-3 с камерой, медным анодом и Ni-фильтром использовали для снятия рентгенограмм со скоростью 1 град/мин.

Восходящая тонкослойная хроматография на кислом и щелочном растворителях использовалась наряду с ИК-спектроскопией для идентификации типа аниона полимерных фосфатов.

На электронном микроскопе TESLA BS-500 выполняли электронно-микроскопическое исследование Cu(PO₃)₂ и 2Cu(PO₃)₂·4MoO₃. Присадка фосфоромолибдата меди, диспергированная на бисерной мельнице NETZSCH MICRO CER, вводилась в модельные ПС в виде наноразмерных частиц размерами от 45 до 55 нм. Размеры частиц диспергированной присадки определяли на дисковой центрифуге CPS Model BC 24000.

Противоизносные свойства созданных смазочных материалов исследовали, измеряя диаметр пятна износа. Лабораторные исследования выполняли на четырёхшариковой машине трения ЧМТ-1 в течение 1 часа, при нагрузке 196 Н и скорости вращения шпинделя верхнего шарика 1460 мин⁻¹. Измеряли диаметр пятна износа на стереоскопическом микроскопе с 100-кратным увеличением и программным обеспечением colormix. С помощью комплекса ZYGO New View-600S определяли шероховатость поверхностей пятен износа и микроструктуру поверхностей в трёх измерениях.

Результаты

Проведено ИК-спектроскопирование созданных смазочных композиций (СК) после триботехнических испытаний. В ИК-спектрах поглощения образцов выявлены признаки, проявляемые длинноципочечными анионами полимерных фосфатов. Таковыми являются совокупности частот в интервалах 860–940, 680–710 см⁻¹, характерных для валентных колебаний связей Р-О-Р и О-Мо-О. В табл. 1 указаны результаты триботехнических испытаний ПС ЦИАТИМ-201 и ЛЗ-ЦНИИ с присадкой фосфоромолибдата меди. Некоторые наиболее часто определяемые физико-химические свойства созданных смазочных композиций приведены в табл. 2.

Таблица 1

Диаметр и шероховатость поверхности пятен износа

Смазочная среда	Диаметр пятна износа, мм			Среднее значение	Шероховатость Ra, мкм
	измеренный				
	0,569	0,563	0,611		
ЦИАТИМ-201				0,581	2,586
ЦИАТИМ-201 + 3% ПРИСАДКИ	0,348	0,351	0,342	0,347	0,998
ЛЗ-ЦНИИ	0,548	0,562	0,540	0,550	2,520
ЛЗ-ЦНИИ + 3% ПРИСАДКИ	0,329	0,334	0,326	0,330	0,990

Сравнение средних значений по диаметру пятна износа для созданных СК показывает уменьшение этого показателя на 60 % для ЦИАТИМ-201 и для ЛЗ-ЦНИИ, что является хорошим результатом для узла трения в условиях значительных скоростей и больших нагрузок. Сопоставление значений средней шероховатости поверхностей пятен износа образцов также выявило уменьшение такой характеристики для СК в обоих случаях почти в 2,5 раза.

Таблица 2

Физико-химические свойства СК

Показатель	ЦИАТИМ-201	ЦИАТИМ-201 +3 % присадок	ЛЗ-ЦНИИ	ЛЗ-ЦНИИ + 3 % присадки
Пенетрация при 25 °С	270	289	228	241
Температура каплепадения	175	208	130	188
Коллоидная стабильность	25	17	22	12
Коррозионное воздействие	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает
Массовая доля воды, %	Отсутствие	Отсутствие	Следы	Отсутствие
Содержание механических примесей	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствие

Как следует из сравнения данных по физико-химическим свойствам используемых нормативных ПС ЦИАТИМ-201 и ЛЗ-ЦНИИ с созданными СК, последние показали трибостабильность и хорошие противоизносные свойства.

Обсуждение результатов

По результатам испытаний (табл. 1, 2) добавка $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ в качестве присадки в модельные смазочные среды (ПС) эффективна и значительно улучшает триботехнические свойства созданных СК. Корреляция по значениям диаметра пятна износа и шероховатости поверхностей образцов в СК свидетельствует об ориентированном расположении антифрикционных защитных слоёв вторичных структур, образующих плосковершинный рельеф, что снижает контактные локальные давления в узле трения.

Так как в ИК-спектрах, созданных СК, после испытаний зафиксированы колебания фрагментов связей, свойственные линейным структурам, то исходная циклическая структура, присоединяя кислород из окружающей среды, раскрывается без нарушения молекулярной стехиометрии и, сохраняя тетраэдрические группировки MoO_4 и PO_4 , преобразуется в длинноцепочечную (рис. 3).

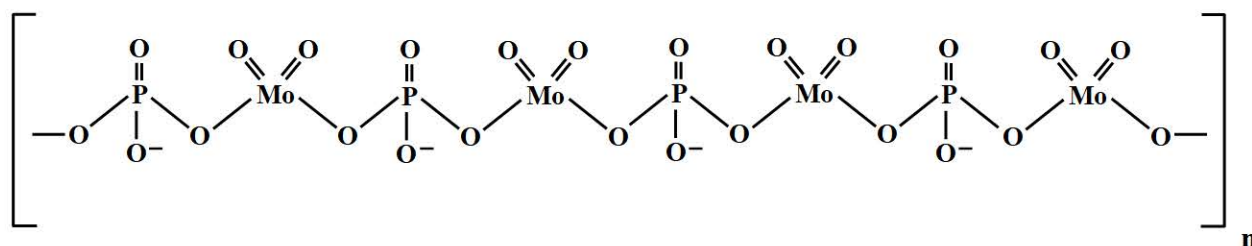


Рис. 3. Линейная форма аниона фосфоромолибдата меди

Анионы линейной формы фосфоромолибдата меди присоединяются к металлу поверхности трения и образуют на ней сглаженный рельеф, поскольку значительно уменьшаются расстояния между линиями выступов и впадин. Такая топография возможна только при образовании слоёв вторичных структур на поверхности трения.

Анализ ИК-спектров образцов после триботехнических испытаний показывает отсутствие окислительного разложения смазочной основы исходных ПС в созданных СК, так как очень снижена интенсивность колебания связей –ОН ($3100\text{--}2930\text{ см}^{-1}$), карбонильных групп альдегидов ($1650\text{--}1910\text{ см}^{-1}$), карбоксилат-анионов ($1550\text{--}1600\text{ см}^{-1}$) по сравнению с перечисленными чётко выраженными колебаниями тех же группировок в ИК-спектрах исходных ПС без присадки фосфоромолибдата меди.

Полученные результаты обоснованы данными, приведёнными в табл. 3. Коллоидная стабильность (отделение масляной фазы) понизилась почти в два раза, а стойкость к влагопоглощению и окислению возросла так же, как длительность и надёжность работы узла трения. Причём отсутствие следов

воды, механических примесей подтверждает и отсутствие коррозионного разрушения металла в созданных СК. Улучшились такие показатели, как пенетрация и температура каплепадения, что необходимо для обеспечения работоспособности независимо от сезонности использования созданных СК.

Выводы

Установлено, что присадка фосфомолибдата меди, благодаря лабильности структуры и способности к изменению строения аниона, способствует проявлению смазочного действия. Проведённые триботехнические испытания созданных СК с присадкой $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ выявили значительное улучшение физико-химических, триботехнических показателей новых СК, поэтому синтезированная полимерная присадка действует как многофункциональная. Созданные СК могут найти применение в узлах трения железнодорожного транспорта в условиях высоких скоростей и нагрузок.

Список литературы

- 1 Трибологические исследования для разработки модификаторов трения в системе «колесо – рельс» / С. М. Захаров, И. Г. Горячева, А. П. Краснов [и др.] // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. – № 6. – С. 468–475. – DOI 10.3103/S10683661.
- 2 Свойства смазочных материалов пума и буксол, модифицированных неорганическими присадками двойных полифосфатов / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, В. В. Авилов [и др.] // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. – № 3. – С. 273–281. – DOI 10.3103/S1068366615030071.
- 3 Улучшение трибологических параметров смазочных материалов введением неорганической полимерной присадки / И. В. Колесников, М. А. Савенкова, А. П. Сычев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2021. – № 1. – С. 329–332. – DOI 10.3103/S1068798X21040134.
- 4 Синтез и исследование триботехнических характеристик новой наноразмерной керамической присадки фосфомолибдата никеля к пластичным смазкам / В. И. Колесников, С. Ф. Ермаков, Ф. Даниэль [и др.] // Трение и износ. – 2010. – Т. 31. – № 6. – С. 426–432. – DOI 10.3103/S1068366610060048.
- 5 Сидашов, А. В. Образование поверхностных пленок на стали при трении полимерных композитов, содержащих микрокапсулы со смазкой / А. В. Сидашов, М. В. Бойко // Конспект лекций по машиностроению. – 2020. – С. 1259–1268. – DOI 10.1007/978-3-030-22041-9_131.
- 6 Влияние коэффициента трения в узле «пятник-подпятник» грузовых вагонов на работу сил трения при движении в кривой / В. И. Колесников, А. А. Зарифьян, А. П. Сычев [и др.] // Трение и износ. – 2016. – Т. 31. – № 6. – С. 476–481. – DOI 10.3103/S1068366616050081.
- 7 Трибоиндуцированный эффект экранирующего действия этаноламинов и соединений холестерина при динамическом контакте металлов в пластичных смазках / В. И. Колесников, С. Ф. Ермаков, А. П. Сычев [и др.] // Научная

References

- 1 Tribological studies for developing friction modifiers in the «wheel – rail» system / S. M. Zakharov, D. P. Markov, A. V. Ovechkin [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36. – No. 6. – P. 468–475. – DOI 10.3103/S10683661.
- 2 Properties of Puma and Buksol lubricants modified by inorganic additives of binary polyphosphates / V. I. Kolesnikov, M. A. Savenkova, V. V. Avilov [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36. – No. 3. – P. 273–281. – DOI 10.3103/S1068366615030071.
- 3 Improving Lubricants by Adding Inorganic Polymers / I. V. Kolesnikov, M. A. Savenkova, A. P. Sychev [et al.] // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2021. – No. 1. – P. 329–332. – DOI 10.3103/S1068798X21040134.
- 4 Synthesis and study of triboengineering characteristics of a new nanosize ceramic nickel phosphomolybdate additive to greases / V. I. Kolesnikov, S. F. Ermakov, F. Daniel [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2010. – Vol. 31. – No. 6. – P. 426–432. – DOI 10.3103/S1068366610060048.
- 5 Sidashov, A. V. Surface Films Formation on Steel During Friction of Polymer Composites Containing Microcapsules with Lubricant / A. V. Sidashov, M. V. Boiko // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2020. – P. 1259–1268. – DOI 10.1007/978-3-030-22041-9_131.
- 6 The effect of the coefficient of journal friction in «ball-and-socket» bogie body pivots on the work done by friction forces in curvilinear motion / V. I. Kolesnikov, A. A. Zarifiyan, A. P. Sychev [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2016. – Vol. 31. – No. 6. – P. 476–481. – DOI 10.3103/S1068366616050081.
- 7 The Tribo-Induced Effect of Shielding Action of Ethanolamines and Compounds of Cholesterol under the Dynamic Contact of Metals in Plastic Lubricants / V. I. Kolesnikov, S. F. Ermakov, A. P. Sychev [et al.] // Scientific article. – 2020. –

статья. – 2020. – Т. 493. – № 1. – С. 79–83. – DOI 10.1134/S1028335820080030.

8 Триботехнические характеристики химически неактивных поверхностей в смазочных материалах, легированных соединениями холестерина и жирных кислот / С. Ф. Ермаков, А. П. Сычев, И. В. Колесников [и др.] // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 1. – С. 7–10. – DOI 10.3103/S1068366621010025.

9 Смазочные материалы молекулярной инженерии: синтез, активация и трибологическая характеристика комплексов серебра в качестве присадок к смазочным материалам / Ch. P. Twist, A. M. Seyam, Ch. Chen [et al.] // Передовые инженерные материалы. – 2012. – V. 14. – P. 101–105. – DOI 10.1002/adem.201100193.

10 Механизм смазочного действия присадок полифосфатов и гетерополифосфатов в трибосистемах / В. И. Колесников, М. А. Савенкова, Ю. Ф. Мигаль [и др.] // Научная статья. – 2020. – Т. 90. – № 5. – С. 743–753 (2017). – URL: <https://doi.org/10.1134/S1070427217050135> (дата обращения 03.05.2023).

11 Влияние внешних воздействий на процессы структурирования в смазочных материалах / В. Г. Савкин, Т. Г. Чмыхова, И. О. Деликатная, Е. Н. Волнянко // Трение и износ. – 2007. – Т. 28. – № 6. – С. 634–639. – DOI 10.3103/51068366620020051.

12 Чжан, Дж. Смазывание границ адсорбционной пленкой. Статья 3 / Дж. Чжан, Ю. Мэн. – С. 115–147. (2015). – URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0084-4>. (дата обращения 03.05.2023).

13 Образование граничных смазывающих пленок в присутствии комплексообразующих присадок / М. В. Бойко, И. В. Колесников, С. Ф. Ермаков [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – Т. 41. – С. 927–930. – DOI 10.36652/0202-3350-2020-21-8-367-371.

14 Формирование поверхностных структур при трении в синтетических маслах / А. В. Сидашов, М. В. Бойко, А. Т. Козаков, В. В. Лесняк // Трение и износ. – 2020. – Т. 41. – № 5. – P. 417–420. – DOI 10.3103/S1068366620050165.

15 Исследование частиц износа, образующихся в некоторых сложнэфирных смазочных материалах / М. В. Бойко, И. В. Колесников, Т. Г. Бойко [и др.] // Материалы конференции. – 2019. – Т. 2188. – DOI 10.1063/1.5138375.

Vol. 493. – No. 1. – P. 79–83. – DOI 10.1134/S1028335820080030.

8 Tribological Characteristics of Chemically Inactive Surfaces in Lubricants Doped with Cholesterol and Fatty Acid Compounds / S. F. Ermakov, A. P. Sychev, I. V. Kolesnikov [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2021. – Vol. 42. – No. 1. – P. 7–10. – DOI 10.3103/S1068366621010025.

9 Molecularly-Engineered Lubricants: Synthesis, Activation, and Tribological Characterization of Silver Complexes as Lubricant Additives / Ch. P. Twist, A. M. Seyam, Ch. Chen [et al.] // Advanced engineering materials. – 2012. – V. 14. – P. 101–105. – DOI 10.1002/adem.201100193.

10 Mechanism of lubricating action of polyphosphate and heteropolyphosphate additives in tribosystems / V. I. Kolesnikov, M. A. Savenkova, Y. F. Migal [et al.] // Scientific article. – 2020. – Vol. 90. – P. 743–753 (2017). – URL: <https://doi.org/10.1134/S1070427217050135> (date of access: 05/03/2023).

11 Influence of external effects on structuring of lubricants / T.G. Chmykhova, I.O. Delikatnaya, E. N. Volnyanko // Journal of Friction and Wear. – 2010. – Vol. 28. – No. 6. – P. 634–639. – DOI 10.3103/51068366620020051.

12 Zhang, J. Boundary lubrication by adsorption film. Friction 3 / J. Zhang, Y. Meng. – P. 115–147. (2015). – URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0084-4>. (date of access: 05/03/2023).

13 Formation of boundary lubricating films in the presence of complexing additives / M. V. Boiko, I. V. Kolesnikov, S. F. Ermakov [et al.] // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41. – P. 927–930. – DOI 10.36652/0202-3350-2020-21-8-367-371.

14 Formation of Surface Structures under Friction in Synthetic Oils / A. V. Sidashov, M. V. Boiko, A. T. Kozakov, V. V. Lesnyak // Journal of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 41. – No. 5. – P. 417–420. – DOI 10.3103/S1068366620050165.

15 Study of wear particles formed in some ester lubricants / M. V. Boiko, I. V. Kolesnikov, T. G. Boiko [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2188. – DOI 10.1063/1.5138375.

M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev, V. V. Avilov, P. G. Ivanochkin

THE EFFICIENT POLYMER PHOSPHOR-MOLYBDENUM ADDITIVE FOR LUBRICANTS

Abstract. The state diagram of the copper metaphosphate – molybdenum trioxide system, in which $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ compounds are formed, has been studied by the methods of physical and chemical analysis such as thermogravimetric, X-ray and IR-spectroscopic. The use of

copper phosphoromolybdate additive to improve the physicochemical properties of greases used in friction units of railway equipment was studied. Tribotechnical tests of the created lubricants with a multifunctional additive $2\text{Cu}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$ were carried out. The mechanism of the lubricating action of antiwear, extreme pressure, anticorrosion additives of copper phosphoromolybdate in model bases, which used LZ-TsNII greases, used in roller bearings of railway cars and TsIATIM-201, intended for friction units of automobile and aviation equipment, is considered.

Keywords: friction, wear, lubricants, system state diagram, copper phosphoromolybdate, multifunctional additive, tribotechnical tests, lubricating effect.

For citation: The efficient polymer phosphor-molybdenum additive for lubricants / M. A. Savenkova, S. A. Volyanik, A. P. Sychev [et al.] // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2. – P. 172–179. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_172.

Сведения об авторах

Савенкова Мария Андреевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Химия»,
кандидат химических наук, доцент,
e-mail: him@rgups.ru

Воляник Светлана Алексеевна

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Химия»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: him@rgups.ru

Сычев Александр Павлович

Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН),
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: Aleks_sap@mail.ru

Авилов Виктор Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
Лаборатория «Нанотехнологии и новые материалы», научный сотрудник,
e-mail: Avilov_Victor@mail.ru

Иваночкин Павел Григорьевич

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретическая механика»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru

Information about the authors

Savenkova Mariya Andreevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Chemistry»,
Candidate of Chemical Sciences,
Associate Professor,
e-mail: him@rgups.ru

Volyanik Svetlana Alekseevna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Chemistry»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: him@rgups.ru

Sychev Alexander Pavlovich

Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (UNC RAS),
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher,
e-mail: Aleks_sap@mail.ru

Avilov Viktor Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Laboratory «Nanotechnology and New Materials»,
Researcher,
e-mail: Avilov_Victor@mail.ru

Ivanochkin Pavel Grigorievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Mechanics»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: ivanochkin_p_g@mail.ru