

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 10 (172). С. 40-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 10 (172). P. 40-48.

Научная статья

УДК 621.891.22

doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-40-48

Оценка несущей способности масел с присадками дитиофосфатов цинка и молибдена при испытаниях на четырёхшариковой машине

Илья Александрович Буяновский¹, д.т.н.

Владимир Дмитриевич Самусенко², к.т.н.

Андрей Николаевич Большаков³, м.н.с.

Юрий Иванович Щербаков⁴, м.н.с.

^{1, 2, 3, 4} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

¹ buyan37@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-5095>

² samusenkovd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8093-5372>

³ bolshakov.and@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2523-6565>

⁴ shcherbakov_1949@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9786-3491>

Аннотация. В статье представлена оценка несущей способности масел, содержащих присадки на основе дитиофосфатов цинка (ДФ-11, ДФ-11к) и молибдена (ПАФ-4) при трении в условиях граничной смазки. Эти присадки являются ключевыми компонентами современных смазочных материалов, которые обеспечивают необходимые трибологические свойства при тяжелых режимах работы. Исследовалось влияние металла в составе диалкилдитиофосфатов на их трибологические характеристики, в частности на несущую способность. Исследования проводились на стандартной четырёхшариковой машине с использованием нефтяного масла МС-20 в качестве базовой среды. Для оценки трибологических характеристик применялся метод РД50-531-85, который позволяет определить параметры линейной аппроксимации зависимости интенсивности изнашивания от контактного давления: коэффициент износа (k) и несущую способность p_0 . Данный подход обеспечивает более глубокий анализ трибологических свойств смазочных материалов, учитывающий контактные давления в процессе изнашивания. Полученные результаты показали, что цинкостержащие присадки обеспечивают значительно более высокую несущую способность смазочного слоя (1235 МПа для ДФ-11) по сравнению с молибденостержащей присадкой (1038 МПа для ПАФ-4). Это указывает на формирование ими более прочной и износостойкой граничной пленки. В то же время, присадка на основе молибдена продемонстрировала лучшие антифрикционные свойства, показав самый низкий коэффициент трения. Таким образом, исследование показывает различие в функциональном действии присадок: дитиофосфаты цинка выступают как высокоэффективные противоизносные компоненты, повышающие предельную нагрузку, тогда как дитиофосфат молибдена проявляет себя преимущественно как модификатор трения. Полученные результаты важны для целенаправленной разработки рецептур масел для конкретных условий эксплуатации.

Ключевые слова: смазочные композиции, трибологически активные присадки, диалкилдитиофосфат цинка, диалкилдитиофосфат молибдена, несущая способность, четырёхшариковая машина

Для цитирования: Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Большаков А.Н., Щербаков Ю.И. Оценка несущей способности масел с присадками дитиофосфатов цинка и молибдена при испытаниях на четырёхшариковой машине // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 10 (172). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-40-48

Assessment of sustaining counter pressure of improver-inhabited oils containing additives of zinc and molybdenum dithiophosphates under friction in boundary lubrication mode

Ilya A. Buyanovsky¹, D. Eng.
Vladimir D. Samusenko², PhD Eng.
Andrey N. Bolshakov³, JRF
Yuri I. Shcherbakov⁴, JRF

^{1, 2, 3, 4} Federal Budget-Funded Research Institute for Machine Science named after A.A. Blagonravov, Moscow, Russia

¹ buyan37@mail.ru

² samusenkovd@gmail.com

³ bolshakov.and@gmail.com

⁴ shcherbakov_1949@mail.ru

Abstract. The article presents an assessment of the bearing capacity of oils containing additives based on zinc dithiophosphates (DF-11, DF-11k) and molybdenum dithiophosphates (PAF-4) during friction under boundary lubrication conditions. These additives are key components of modern lubricants, which provide the necessary tribological properties under severe operating conditions. The effect of the metal in the composition of dialkyl dithiophosphates on their tribological characteristics, in particular, on the bearing capacity, was studied. The studies were carried out on a standard four-ball machine using MS-20 petroleum oil as a base medium. To assess the tribological characteristics, the RD50-531-85 method was used, which allows determining the parameters of the linear approximation of the dependence of wear intensity on contact pressure: wear coefficient (k) and bearing capacity p_0 . This approach provides a more in-depth analysis of the tribological properties of lubricants, taking into account contact pressures during wear. The obtained results showed that zinc-containing additives provide a significantly higher load-bearing capacity of the lubricating layer (1235 MPa for DF-11) compared to the molybdenum-containing additive (1038 MPa for PAF-4). This indicates that they form a stronger and more wear-resistant boundary film. At the same time, the molybdenum-based additive demonstrated better antifriction properties, showing the lowest friction coefficient. Thus, the study shows the difference in the functional action of the additives: zinc dithiophosphates act as highly effective antiwear components that increase the ultimate load, while molybdenum dithiophosphate manifests itself primarily as a friction modifier. The obtained results are important for the targeted development of oil formulations for specific operating conditions.

Keywords: lubricants, tribologically active additives, zinc dialkyldithiophosphate, molybdenum dialkyldithiophosphate, bearing capacity, four-ball machine

For citation: Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Bolshakov A.N., Shcherbakov Yu.I. Assessment of sustaining counter pressure of improver-inhabited oils containing additives of zinc and molybdenum dithiophosphates under friction in boundary lubrication mode / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 9 (171). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-9-40-48

Введение

Одним из наиболее эффективных путей обеспечения требуемого уровня долговечности и надёжности функционирования смазываемых узлов трения машин и механизмов современной техники является корректный выбор трибологически активных присадок для используемых смазочных материалов [1, 2]. В настоящее время наиболее распространёнными присадками к моторным маслам являются дитиофосфаты металлов (MeDDP), которые в зависимости от типа металла и строения органического радикала способны обеспечивать этим маслам антиокислительный, противоизносный или антифрикционный эффект или их сочетание [3]. Так, диалкилдитиофосфаты цинка (ZnDDP) широко используются в качестве антиокислительных и противоизносных присадок, а дитиофосфаты молибдена

(MoDDP) – в качестве противоизносных и антифрикционных присадок. Диалкилдитиофосфаты цинка были синтезированы в конце 1930-х гг. [4], запатентованы в качестве эффективных антиокислительных присадок к моторным маслам в 1941 г. [5], показали себя как прекрасные противоизносные присадки в 1955 г. [4]. С тех пор по выражению Х. Спайкса [5], дитиофосфаты цинка последние 75 лет являются ключевыми компонентами смазочных масел для картерных двигателей, обеспечивая им сочетание превосходного противоизносного, противозадирного и антиокислительного действия». Позднее был синтезирован дитиофосфат молибдена, который проявил себя как прекрасная высокотемпературная антифрикционная присадка («модификатор трения»), обладающая также определёнными противоизносными свойствами. Присадки MoDDP также до сих пор успешно применяется в моторных

маслах [3, 6, 7]. Высокая эффективность этих бифункциональных присадок обусловила многолетние исследования их противоизносных свойств. Однако такая важная характеристика смазочных слоёв, как их несущая способность, которая позволяет отдельно оценить переход от «установившегося» изнашивания к условно «безызносному режиму трения», пока не исследовалась. Целью статьи является оценка влияния металла на несущую способность диалкилдитиофосфатов цинка и молибдена как трибологически активных присадок к смазочным маслам

К настоящему времени накоплен значительный массив результатов исследований механизмов смазочного действия дитиофосфатов (в частности – дитиофосфатов ряда металлов) и большой опыт их практического использования в различных приложениях [8 – 11]. Тем не менее, исследования трибологических характеристик дитиофосфатов продолжается до сих пор. Об этом свидетельствует обзор [12], значительная часть которого посвящена анализу исследований трибологического поведения и механизмов смазочного действия новейших антифрикционных, противоизносных и противозадирных присадок, разрабатываемых на базе дитиофосфатов. Это свидетельствует о том, что потенциальные возможности этих присадок этого типа не до конца раскрыты. С другой стороны, как показано в обзоре [6], лабораторная оценка трибологических характеристик дитиофосфатов (во всяком случае – дитиофосфатов различных металлов), начиная с 60-ых годов XX века до настоящего времени, проводится на четырёхшариковых машинах, причём противоизносные свойства этих смазочных композиций как правило оцениваются по значению показателя износа D_H – средней величины диаметров пятен износа на нижних шариках за определённое время испытаний (по ГОСТ 9490-75 за 60 мин) при постоянной

нагрузке. Эти испытания не дают возможности идентифицировать основные стадии изнашивания шариков – приработку, установившееся изнашивание и «безызносное» изнашивание, при котором практически отсутствует изнашивание. В представленной статье приводятся результаты исследования процесса изнашивания шариков на стандартной четырёхшариковой машине при постоянной нагрузке, но при изменении длительности испытаний, что позволяет установить давление в трибологическом контакте, при котором происходит переход от интенсивного изнашивания в режиме граничной смазки к переходу к смешанной и возможно даже жидкостной смазке. Это позволило вместо применяемой в настоящее время оценки противоизносных свойств масла по величине диаметра пятна износа, полученной неизвестно при каком режиме, оценить интенсивность изнашивания этих шариков по идее М.М. Хрущева как функции контактного давления и смазочной способности масел [13 – 15], что позволяет отдельно оценить несущую способность граничного смазочного слоя и влияние давления на противоизносные свойства этих масел.

Исследуемые материалы и методы исследования

В качестве образцов присадок для трибологических испытаний диалкилдитиофосфатов цинка и молибдена в настоящей работе использовались соответственно присадки ДФ-11 и ПАФ-4, синтезированные группой компаний «Квалитет», которые были любезно предоставлены нам для испытаний. Для сравнения была также испытана синтезированная той же фирмой присадка ДФ-11к (вариант присадки ДФ-11 с повышенным содержанием активных ингредиентов). Активные компоненты перечисленных присадок приведены в табл. 1.

1. Содержание активных компонентов дитиофосфорных присадок

1. The content of active components of dithiophosphoric additives

Марка присадки	Элементы, %				
	Zn	P	S	N	Mo
ДФ-11	5,4	4,6	9,5	-	-
ДФ-11к	9,2	8,7	15,0	-	-
ПАФ-4	-	2,6	6,7	-	4,0

Поскольку ранее было показано [13], что базовые масла оказывают определённое влияние на характеристики несущей способности исследуемых присадок, но основное влияние на эти показатели оказывает присадка, для данного исследования было использовано одно базовое масло – минеральное масло МС-20 по ГОСТ 21743-76. Это масло селективной очистки, изготовленное из беспарафиновой нефти или парафиновой нефти с низким содержанием серы, применяемое в поршневых двигателях. Его кинематическая вязкость при 100 °С – 20,5 мм²/с, индекс вязкости (ИВ) – 80. Масло МС-20 обладает высокой термической и термоокислительной стабильностью, хорошей смазочной способностью, не агрессивно к металлам и сплавам. Исследуемые присадки вводили в базовое масло в концентрации 1 % (масс).

Метод оценки несущей способности смазочных сред РД50-531-85 применительно к оценке смазочной способности масел на стандартной четырёхшариковой машине был разработан в ИМАШ РАН на основе исследований М.М. Хрущева и Л.Ю. Пружанского [13]. Согласно [14], деформированный в процессе испытания объём материала шариков представляет собой два сферических сегмента, сложенных в виде двояковыпуклой линзы, а линейный износ h_i характеризуется средней глубиной изношенного слоя на нижних шариках. При постоянной нагрузке на узел трения геометрия контакта по мере изнашивания контактирующих шариков обеспечивает снижение контактного давления до такого уровня, при котором несущая способность трущихся поверхностей практически полностью компенсирует остаточное давление в трибологическом контакте за счёт образования химически модифицированных слоёв, которые обеспечивают выравнивание поверхностей трения, которое может привести к гидродинамическим эффектам, стимулирующим расклинивающее действие слоя смазочной жидкости и или за счёт высокоэффективной граничной смазки (например, избирательного переноса). Именно поэтому, использование метода оценки противоизносных свойств смазочных материалов при испытании на стандартной четырёхшариковой машине при постоянной нагрузке позволяет описать процесс изнашивания в виде параметров

линейной аппроксимации зависимости интенсивности изнашивания нижних шариков от давления в трибологическом контакте, которая в общем случае может быть описана уравнением

$$I_h = k(p - p_0), \quad (1)$$

где I_h – интенсивность линейного изнашивания нижних шаров; k – тангенс угла наклона графика зависимости интенсивности изнашивания I_h к оси абсцисс; p – текущее значение среднего давления в трибологическом контакте; p_0 – несущая способность контакта, т.е. предельное давление в трибологическом контакте, при котором интенсивность изнашивания в исследуемом смазочном материале снижается вследствие достижения приработки поверхностей контакта, достаточной для обеспечения реализации безыносной стадии процесса (т.е. интенсивность изнашивания условно равна нулю, как будет показано ниже). В соответствии с РД50-531-85 испытания проводились на четырёхшариковой машине со стандартными шариками диаметром 12,7 мм из стали ШХ-15 при общей длительности испытаний 120 мин, что при частоте вращения шпинделя машины 1460 мин⁻¹ соответствовало $4 \cdot 10^6$ мм пути трения S по нижним шарикам. Производилось графическое дифференцирование пути трения, в результате чего общий путь трения S был разбит на 8 равных участков ΔS , в конце каждого из которых на микроскопе с окулярным микрометром определялся средний диаметр пятен износа на нижних шариках.

Таким образом, для расчёта интенсивности изнашивания трущихся тел необходимо определить параметры k и p_0 линейной аппроксимации экспериментальной зависимости интенсивности линейного изнашивания от контактного давления. Эти параметры могут быть оценены путём графической обработки в соответствующих координатах или рассчитаны по формулам (7) и (8), приведённым в работе [13].

Эксперимент: проведение и обсуждение результатов

Как уже было отмечено, экспериментальные исследования противоизносных свойств исследованных смазочных композиций

проводили на четырёхшариковой машине ИМАШ конструкции Р.М. Матвеевского.

В соответствии с выбранным шагом дифференцирования – 15 мин – испытание составляет 8 этапов, после окончания каждого из которых производится измерение пятен износа на микроскопе с оптическим микрометром. Каждое испытание проводится два раза. Зависимости диаметров пятен износа шаров от продолжительности испытаний приведены на рис. 1. Каждое значение диаметра пятна износа на этом графике представляет собой осреднение по трём пятнам износа на нижних шариках и по значениям двух повторных испытаний.

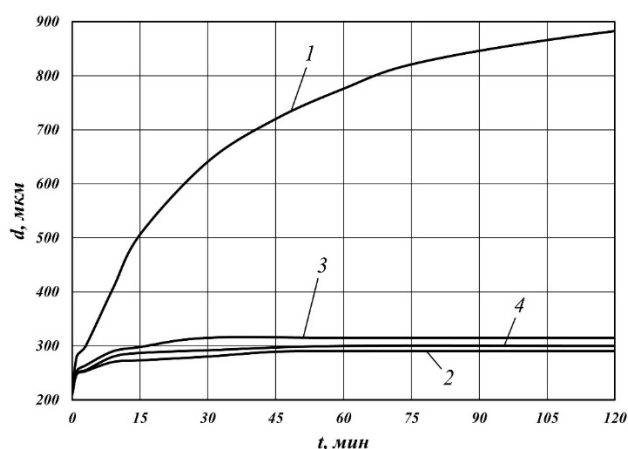


Рис. 1. Зависимости диаметров пятен износа d от продолжительности t испытаний на четырёхшариковой машине ИМАШ масла МС-20 (1) и растворов в этом масле присадок: ДФ-11 (2); ПАФ-4 (3); ДФ-11к (4)

Fig. 1. Dependences of the diameters of wear spots d on the duration t of tests on a four-ball test machine for MS-20 oil (1) and impure solutions with additives in this oil: DF-11 (2); PAF-4 (3); DF-11k (4)

Анализ рис. 1 показывает, что размер пятен износа в значительной степени зависит от наличия (или отсутствия) и природы присадок к базовому маслу, а также от продолжительности испытаний. Наиболее заметно это отражается на результатах испытаний масла без присадок (кривая 1). В случае с растворами исследуемых присадок процесс приработки заканчивался уже за 15...25 мин и происходил переход в режим практической «безыноса», причём минимальные диаметры пятен износа за всю продолжительность испытаний обеспечивала композиция масло МС-20 + ДФ-11.

Для оценки интенсивности линейного изнашивания от пути трения на каждом участке этого пути рассмотрим рис. 2.

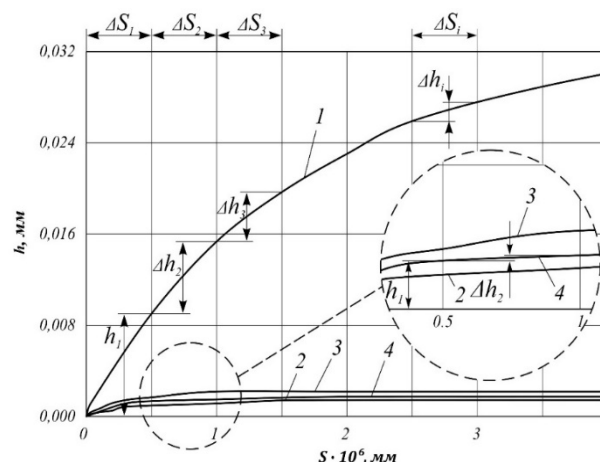


Рис. 2. Зависимость линейного износа h_i шариков от пути трения S при испытании на четырёхшариковой машине масла МС-20 (1) и растворов в этом масле присадок: ДФ-11 (2); ПАФ-4 (3); ДФ-11к (4)

Fig. 2. Dependence of linear wear of h_i balls on the friction path S when testing MS-20 oil (1) and solutions of additives in this oil on a four-ball machine: DF-11 (2); PAF-4 (3); DF-11k (4)

Поскольку значения диаметров пятен износа представляют собой сугубо качественную оценку противоизносных свойств смазочных композиций представим на рис. 2 полученные результаты исследования в виде зависимости линейного износа шарика в исследуемых средах от пути трения S . Линейный износ h_i на каждом участке с учётом упругого восстановления стали рассчитывался по формуле [15]:

$$h_i = \left(39,4d^2 - 2,732 \cdot 10^{-3} \frac{N}{d} \right) \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где d – диаметр пятна износа; N – осевая нагрузка.

Интенсивность изнашивания I_h это отношение приращения износа Δh к пути трения ΔS , за который он образовался:

$$I_h = \frac{dh}{ds} \approx \frac{\Delta h}{\Delta S} = \frac{h_i - h_{(i-1)}}{S_i - S_{(i-1)}}, \quad (3)$$

где h_i и $h_{(i-1)}$ – линейные износы при путях трения S_i и $S_{(i-1)}$.

Среднее контактное давление на пути ΔS рассчитывается по формуле

$$p = \frac{1,0389N}{d_i^2 + d_{(i-1)}^2}, \quad (4)$$

где d_i и $d_{(i-1)}$ – диаметры пятен износа, измеренные соответственно по прохождению пути трения на каждом исследуемом участке для каждого исследуемого смазочного материала.

Параметры k и p_0 линейной аппроксимации экспериментальной зависимости интенсивности линейного изнашивания от контактного давления могут быть оценены путём графической обработки в соответствующих координатах, как показано выше, или рассчитаны по формулам (7) и (8), приведённым в работе [13].

Результаты проведённых исследований, позволившие установить разницу между трибологическим поведением сравниваемых исследуемых дитиофосфатов, и прежде всего – между поведением дитиофосфатов цинка и молибдена, приведены на рис. 3 в виде зависимостей интенсивности линейного изнашивания стальных шариков I_h от давления p в трибологическом контакте. Зависимости аппроксимируются прямыми, имеющими разные углы наклона к абсциссе, что свидетельствует о различных значениях параметра k , который является тангенсом этого угла, а экстраполяция указанных прямых на эту же ось координат,

которые определяют значения параметров p_0 для исследуемых смазочных композиций, также различны.

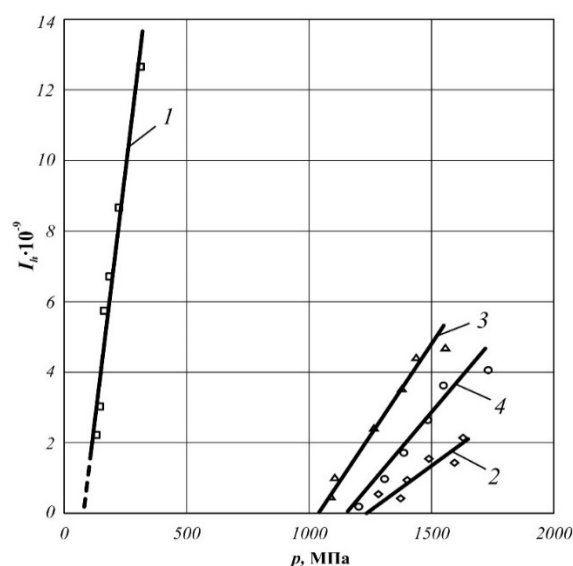


Рис. 3. Зависимости интенсивности изнашивания I_h от давления p в контакте при испытании на ЧШМ смазочных композиций: 1 – MC-20; 2 – MC-20 + ДФ-11; 3 – MC-20 + ПАФ-4; 4 – MC-20 + ДФ-11к

Fig. 3. Dependence of the wear intensity I_h on the pressure p in contact during the 4-BM test of lubricating compositions: 1 – MS-20; 2 – MS-20 + DF-11; 3 – MS-20 + PAF-4; 4 – MS-20 + DF-11k

Полученные таким образом значения параметров k и p_0 приведены в табл. 2. Там же приведены значения коэффициентов трения, замеренные в конце испытаний.

2. Параметры k и p_0 линейной аппроксимации зависимости интенсивности линейного изнашивания стальных шаров от контактного давления в среде 1 % растворов четырёх дитиофосфатов в масле MC-20

2. Parameters k and p_0 of a linear approximation of linear wear intensity dependence for steel balls on the contact pressure in a medium of 1 % solutions of four dithiophosphates in MS-20 oil

Параметры	Дитиофосфатные присадки, марки			
	-	ДФ-11	ПАФ-4	ДФ-11к
$k \cdot 10^{-9}$	0,0566	0,0051	0,0104	0,0082
p_0 , МПа	79	1235	1038	1151

Общая продолжительность испытания каждой из исследуемых смазочных композиций составляла 120 минут при нагрузке на узел

трения 196 Н. Дополнительно на четырёхшариковой машине ИМАШ конструкции Р.М. Матвеевского для каждой исследуемой

смазочной композиции приведены диаметры пятен износа и коэффициенты трения в конце испытаний (табл. 3). Для наглядности

приводим также фотографии пятен износа исследуемых шариков после окончания испытаний (рис. 4).

3. Оценка противоизносных и антифрикционных свойств дитиофосфатов на четырёхшариковой машине ИМАШ при нагрузке 196 Н и продолжительности 120 мин

3. Evaluation of anti-wear and antifriction properties of dithiophosphates on a four-ball test machine with a load of 196 N and a duration of 120 min

Показатель	МС-20	МС-20 + 1 % ДФ-11	МС-20 + 1 % ПАФ-4	МС-20 + 1 % ДФ-11к
Диаметр пятна износа, мм	0,879	0,290	0,315	0,300
Коэффициент трения	0,054	0,048	0,045	0,050

Для наглядности на рис. 4 приведены пятна износа на шариках после завершения эксперимента.

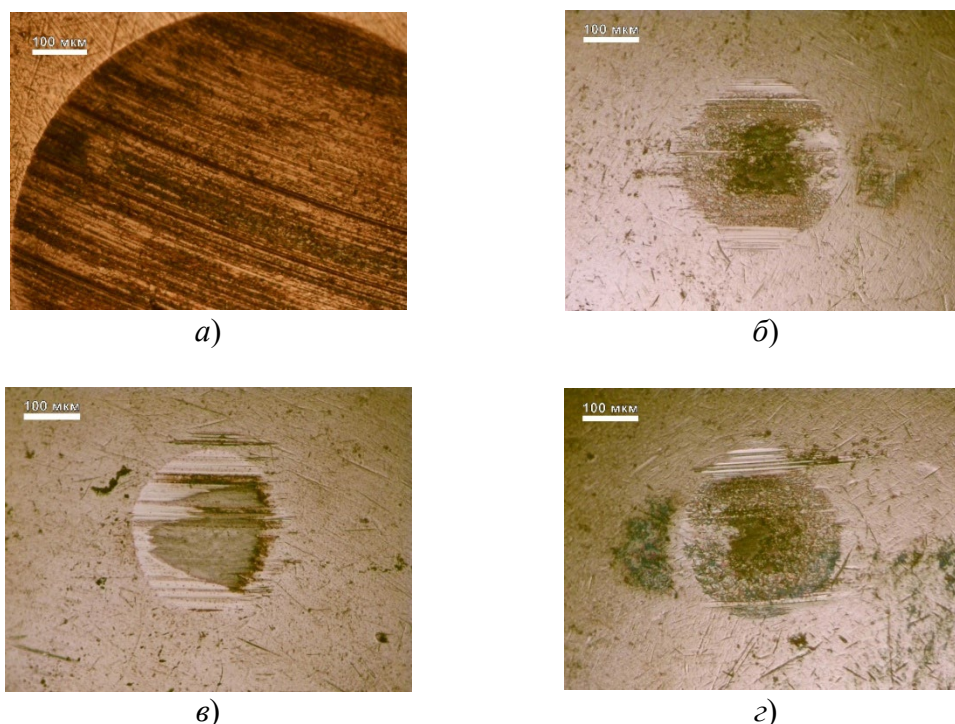


Рис. 4. Фотографии пятен износа нижних шариков после испытаний смазочных композиций на ЧШМ:
а – МС-20; б – МС-20 + 1 % ДФ-11; в – МС-20 + 1 % ПАФ-4; г – МС-20 + 1 % ДФ-11к

Fig. 4. Photos of the wear spots of the lower balls after testing the lubricating compositions on the 4-BM:
a – MS-20; b – MS-20 + 1 % DF-11; c – MS-20 + 1 % PAF-4; d – MS-20 + 1 % DF-11k

Как видно из фотографий на рис. 4 и из данных в табл. 3, введение в масло МС-20 любой из сравниваемых присадок существенно снижает диаметр пятен износа, а также снижает коэффициент трения. Кроме того, судя по этим фотографиям, сравниваемые пятна износа в сравниваемых средах заметно различаются

по рельефу, что особенно заметно при сравнении рельефа поверхности пятен износа, полученных в среде масла МС-20 без присадки (рис. 4, а), и рельефов поверхностей пятен износа, полученных при испытаниях масел с присадками (рис. 4, б, в и г). В то же время заметно, что микрорельефы пятен износа, полученные

при испытаниях композиций, содержащих дитиофосфаты цинка (рис. 5, б и 5, з), близки между собой, в то время как микрорельефы поверхностей пятен износа, полученные при испытаниях в растворе дитиофосфата молибдена ПАФ-4 явно отличаются от них (рис. 5, в).

Различие механизмов смазочного действия дитиофосфатов цинка и молибдена достаточно подробно рассмотрено в работах [3 – 5].

Совокупность представленных экспериментальных данных и результатов их обработки методом, зафиксированном РД50-531-85, позволяет сделать следующие заключения о трибологических характеристиках исследуемых смазочных материалов.

Использованная методика позволила экспериментально определить как значение параметра p_0 , которое характеризует несущую способность смазанного трибологического контакта, а также значение параметра k .

Масло МС-20 без присадок при испытаниях по РД50-535-85 ожидаемо показало самое низкое значение параметра p_0 , то есть самую низкую несущую способность вследствие незначительной величины участка реализации, и самое высокое значение параметра k , то есть самую низкую износостойкость. Добавление в масло исследуемых дитиофосфатов резко повышает как несущую способность смазочных слоёв исследуемых композиций, так и противоизносные свойства этих композиций. Анализ рис. 3 показывает, что наиболее высокие значения параметра p_0 для исследуемых смазочных композиций наблюдались для диалкилдитиофосфатов цинка ДФ-11 и ДФ-11к (соответственно 1235 и 1151 МПа) и достаточно низкие значения k ($0,0051$ и $0,0082 \cdot 10^{-9}$). Диалкилдитиофосфат молибдена ПАФ-4 оказывает несколько меньшую активность противоизносного действия ($p_0 = 1038$ МПа; $k = 0,0104 \cdot 10^{-9}$) и более интенсивное выплачивание поверхностей контакта.

Выводы

1. Для 1 % растворов дитиофосфатов цинка и молибдена (соответственно присадок ДФ-11 и ПАФ-4) в минеральном масле МС-20 при испытаниях на стандартной четырёхшариковой машине методом графического дифференцирования, разработанного ранее в ИМАШ РАН, экспериментально установлены значения характеризующих трибологическое поведение параметров k и p_0 линейной аппроксимации

взаимодействий между интенсивностями изнашивания трущихся.

2. Показано, что цинксоодержащие дитиофосфаты ДФ-11 и ДФ-11к обеспечивают маслу МС-20 более высокую несущую способность, чем молибденсодержащая присадка ПАФ-4.

3. Результаты проведённых экспериментов показали, что сопоставление результатов значений параметров k и p_0 , оцененных путём графического дифференцирования процесса изнашивания на стандартных четырёхшариковых машинах позволяет оценить несущую способность и противоизносные свойства смазочных сред.

4. Установлено, что молибденсодержащая присадка ПАФ-4 обеспечивает более высокие антифрикционные свойства маслу МС-20, содержащие цинк присадки ДФ-11.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Митин И.В., Татур И.Р. Моторные масла. М.: Изд-во «Проспект». 2025. 432 с.
2. Lubricants and Lubrication / Ed by J. Mang, W. Dressel. NY: John Wiley and Son, Ltd: 2018. 944 с.
3. Лашхи В.Л., Чудиновских А.Л. Физико-химические основы химмотологии моторных масел. М.: Издательский дом Недр. 2015. 355 с.
4. Spikes H. The history and mechanisms of ZDDP // Tribology Letters. 2004. Т. 17. № 3. С. 469–489.
5. Spikes H. Mechanisms of ZDDP // Tribology Letters. 2025. Т. 73. № 1. 38 p.
6. Буяновский И.А., Самусенко В.Д. Дитиофосфаты металлов как трибологически активные присадки к смазочным маслам // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2024. Т. 25. № 11. С. 501–507.
7. Spikes H. Friction modifier additives // Tribology Letters. 2015. Т. 60. № 1. 5 p.
8. Roache D.C., Devlin M., Li H. Mechanical properties of tribofilms formed by metal dithiophosphates // Tribology International. 2024. Т. 197. 109794 p.
9. Zhang J. Boundary lubrication of ZDDP // Tribology Letters. 2021. Т. 69. 8 p.
10. Sato K., Watanabe S., Sasaki S. High friction mechanism of ZDDP tribofilm based on in situ AFM observation of nanofriction and adhesion properties // Tribology Letters. 2022. Т. 70. № 3. 94 p.
11. Ueda M., Keidrich A., Spikes H. ZDDP tribofilm formation on nonferrous surfaces // Tribology Online. 2020. Т. 15. № 5. 318 p.
12. Chen Y., Renner P., Liang H. A review of current understanding in tribochemical reactions involving lubricant additives // Friction. 2023. Т. 11. № 4. Р. 489–512.
13. Буяновский И.А. Развитие идей М.М. Хрущева о триботехнических испытаниях материалов применительно к изучению противоизносных свойств масел // Трение и износ. Т. 11. № 6. С. 1124–1132.
14. Хрущов М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. М.: Изд-во АН СССР. 1946. 160 с.

15. Feng I. A new approach in interpreting the four-ball wear results // Wear. 1962. Т. 5. №. 4. С. 275–288.

16. Большаков А.Н., Щербakov Ю.И. Трибологическое исследование дитиофосфатных присадок по РД 50-531-85 // Трибология: Труды XV Международной научно-технической конференции. М.: ИМАШ РАН, 2024. С. 24–25.

REFERENCES

1. Mitin I.V., Tatur I.R. Motor oils. Moscow: Prospekt, 2025, 432 p.

2. Lubricants and Lubrication / Ed by J. Mang, W. Dressel. NY: John Wiley and Son, Ltd: 2018. 944 p.

3. Lashkhi V.L., Chudinovskikh A.L. Physico-chemical fundamentals of chemmatology of motor oils. Moscow: Nedr Publishing House, 2015, 355 p.

4. Spikes H. The history and mechanisms of ZDDP // Tribology Letters. 2004. Т. 17. № 3. P. 469–489.

5. Spikes H. Mechanisms of ZDDP // Tribology Letters. 2025. Т. 73. № 1. 38 p.

6. Buyanovskiy I.A., Samusenko V.D. Metal dithiophosphates as tribologically active additives to lubricating oils // Assembly in mechanical engineering, instrument engineering. 2024. vol. 25. no. 11. pp. 501–507.

7. Spikes H. Friction modifier additives // Tribology Letters. 2015. Т. 60. № 1. 5 p.

8. Roache D.C., Devlin M., Li H. Mechanical properties of tribofilms formed by metal dithiophosphates // Tribology International. 2024. Т. 197. 109794 p.

9. Zhang J. Boundary lubrication of ZDDP // Tribology Letters. 2021. Т. 69. 8 p.

10. Sato K., Watanabe S., Sasaki S. High friction mechanism of ZDDP tribofilm based on in situ AFM observation of nanofriction and adhesion properties // Tribology Letters. 2022. Т. 70. № 3. 94 p.

11. Ueda M., Keidrich A., Spikes H. ZDDP tribofilm formation on nonferrous surfaces // Tribology Online. 2020. Т. 15. № 5. 318 p.

12. Chen Y., Renner P., Liang H. A review of current understanding in tribochemical reactions involving lubricant additives // Friction. 2023. Т. 11. № 4. P. 489–512.

13. Buyanovskiy I.A. The development of M.M. Khrushchev's ideas on tribotechnical testing of materials in relation to the study of anti-wear properties of oils // Friction and wear, vol. 11. no. 6. P. 1124–1132.

14. Khrushchev M.M. Investigation of the running-in of bearing alloys and center pins. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 1946. 160 p.

15. Feng I. A new approach in interpreting the four-ball wear results // Wear. 1962. Т. 5. №. 4. P. 275–288.

16. Bolshakov A.N., Shcherbakov Yu.I. Tribological study of dithiophosphate additives according to RD 50-531-85 // Tribology: Proceedings of the XV-th International Scientific and Technical Conference. Moscow: IMASH RAS, 2024. P. 24–25.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.05.2025; одобрена после рецензирования 08.07.2025; принята к публикации 30.08.2025

The article was submitted 04.05.2025; approved after reviewing 08.07.2025; assepted for publication 30.08.2025