

СВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИАЛКИЛДИТИОФОСФАТОВ ЦИНКА

И.В. Мухортов, К.А. Почкайло, А.А. Дойкин, И.Г. Леванов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Рассмотрена зависимость противоизносного и антифрикционного действия диалкилдитиофосфатов цинка (ZDDP) от величины углеводородных радикалов. Экспериментально изучены параметры трения в контакте скольжения, имитирующем радиальной подшипник. Значение контактных давлений, в котором реализуется гидродинамический режим зависит от шероховатости поверхностей. Выделен режим граничной смазки, отличающийся от гидродинамического и граничного режимов трения. Данный режим характеризуется относительно постоянным коэффициентом трения и малой величиной износа. В качестве критерия оценки противоизносных свойств использовано значение контактного давления, при котором происходит переход от режима граничной смазки к режиму граничного трения. Получено, что переход к граничному режиму трения происходит при различных контактных давлениях для одностипных ZDDP с различной длиной углеводородных радикалов. При использовании дигексадецилдитиофосфата цинка переход к граничному трению происходит при значительно больших значениях контактного давления, чем при использовании диоктилдитиофосфата цинка. Результаты обсуждены с учетом механизма адсорбции компонентов смазочных масел на металлической поверхности. Зависимость противоизносного действия ZDDP от длины углеводородных радикалов соответствует их влиянию на параметры полимолекулярного адсорбционного слоя. Приведены данные о влиянии вспомогательных компонентов на структуру и механические свойства адсорбционных слоев, а также на реологические параметры смазки в узлах трения. Показано, что введение в базовое углеводородное масло вместе с ZDDP других компонентов, состоящих из линейных молекул с достаточно длинными углеводородными радикалами, влияет на диапазон контактных давлений, в котором реализуется гидродинамический режим трения. В качестве примера использован диэфир гексадеканола и малеиновой кислоты. Включение таких компонентов в смазочное масло способствует реализации гидродинамического режима, но не влияет на переход от граничной смазки к граничному трению.

Ключевые слова: противоизносные присадки, полимолекулярная адсорбция, смазочные материалы.

Введение. В последние 30 лет в научной литературе приводится крайне мало данных об исследованиях в области наиболее распространенного класса противоизносных присадок к смазочным маслам – диалкилдитиофосфатов цинка. Эти вещества, наряду с противоизносными и антифрикционными свойствами, придают углеводородным смазочным материалам антикоррозионные свойства и повышают их устойчивость к окислению. Принято считать, что интенсивные работы в этой области, проводившиеся в 1950–1970-е годы, дали исчерпывающую информацию об оптимальном составе, структуре и методах синтеза. Однако появившийся в последнее время интерес к импортозамещающим и импортонезависимым технологиям, вместе со значительным отставанием отечественных технологий производства смазочных материалов от зарубежных, заставляет вернуться к этой теме. Так, в отечественной литературе и ряде зарубежных публикаций [1–17] при рассмотрении влияния размеров и структуры углеводородных радикалов, входящих в состав присадки, на ее трибологические свойства, приводятся противоречивые данные. Отмечается, что увеличение длины углеводородных радикалов несколько усиливает антифрикционные свойства присадки [3, 5, 14–17]. При этом несколько ухудшается солубилизирующая способность по отношению к диспергирующим сукцинимидным присадкам. Решающим фактором

Контроль и испытания

в пользу выбора в качестве товарных присадок соединений с радикалами, содержащими 6–8 атомов углерода послужили результаты испытаний на четырехшариковых машинах трения (ЧМТ), например, по ГОСТ 9490-75. При определении индекса задира и нагрузки сваривания наилучшие результаты дают присадки с максимальным массовым содержанием серы и фосфора, т. е. с минимальной массой углеводородных радикалов. Несмотря на очевидность различия механизмов трения и изнашивания в области нагрузок, соответствующих реальным узлам трения и достигаемым в испытаниях на ЧМТ [18], для промышленного производства в качестве присадок к моторным и трансмиссионным маслам, а также, к пластичным смазкам, были выбраны диалкилдитиофосфаты с радикалами минимальной длины, обеспечивающими растворимость присадки в минеральных маслах. Наибольшее распространение получила присадка ДФ-11, содержащая изобутиловый и 2-этилгексильный радикалы.

Необходимость экспериментальных работ по подтверждению целесообразности использования таких присадок или необходимости оптимизации их структуры обусловлена следующими обстоятельствами:

1. ДФ-11 и аналогичные присадки разрабатывались для применения в составе нефтяных масел, очищенных селективными растворителями. Такие масла содержат нефтяные поверхностно-активные вещества (ПАВ), действующие как противоизносные и антифрикционные компоненты. Таким образом, изначально оценивался совместный эффект от двух разных ПАВ. Для производства современных смазочных масел используются только гидроочищенные и синтетические базовые масла, не содержащие ПАВ.

2. Современные моторные и трансмиссионные масла содержат диалкилдитиофосфаты с гораздо более длинными, чем в присадке ДФ-11, углеводородными радикалами. Как правило, $C_{16}-C_{20}$ и более.

3. Разработка присадок, подобных ДФ-11, основывалась только на эмпирических данных. Как неоднократно отмечалось [18], механизм действия противоизносных присадок был неизвестен. Распространенное мнение о роли сульфидов при разложении присадок, имеет отношение только к наиболее жестким режимам трения, возникающих при задирах [18]. В настоящее время механизм действия присадок в режимах трения, характерных для подшипников скольжения, известен [19, 20].

4. Тестирование противоизносных и антифрикционных присадок по методикам ГОСТ 9490-75 противоречит принципам моделирования. Давления в точечных контактах между шариками ЧМТ на порядок превышают даже контактные давления в зубчатых передачах, и на 4-5 порядков выше, чем в подшипниках скольжения. Для объективной оценки эффективности различных вариантов диалкилдитиофосфатов необходимо корректное моделирование предполагаемых эксплуатационных условий.

Экспериментальное определение зависимости противоизносных и антифрикционных свойств от величины алкильных радикалов, входящих в состав диалкилдитиофосфатов цинка. Для экспериментальных работ из пентасульфида фосфора, октанола-1 и гексадеканола-1 синтезированы диоктилдитиофосфат цинка, содержащий радикалы C_8 и дигексадецилдитиофосфат цинка, содержащий радикалы C_{16} . Синтезированные присадки растворяли в индустриальном масле И-20А (класс вязкости SAE 30) в концентрации 2 % массовых. Испытания проводили в контакте трения скольжения (ролик-колодка), имитирующем шатунный подшипник мощного дизельного двигателя. Ролик диаметром 90 мм изготовлен из стали ШХ-15 с поверхностной закалкой. Колодка изготовлена из фрагмента вкладыша подшипника с бронзовым антифрикционным слоем. Для достижения контактных давлений 30–50 МПа, характерных для подшипников ДВС, площадь контакта колодки с роликом составляла 30 мм². Испытания проводили на машине трения ИИ 5018 при скорости вращения ролика 500 мин⁻¹, что соответствует линейной скорости скольжения 1,5 м/с. Перед началом каждого испытания поверхность ролика шлифовали до достижения шероховатости $R_a = 0,18-0,19$. Испытания проводили при постоянной скорости и переменной нагрузке. Цель испытаний состояла в построении зависимостей коэффициента трения f_{mp} от контактного давления P для базового масла и каждого варианта присадки. Зависимость коэффициента трения от контактного давления и, в особенности, от величины, обратной контактному давлению $1/P$, значительно различается для различных режимов трения. В частности, позволяет

определить диапазоны контактных давлений, в которых реализуется жидкостный режим трения, граничный режим и промежуточный режим граничной смазки.

Как следует из результатов предыдущих аналогичных испытаний, между жидкостным (гидродинамическим) режимом трения, характеризующимся монотонным снижением коэффициента трения при возрастании контактного давления, и граничным режимом, характеризующимся возрастанием f_{mp} при возрастании контактного давления, в некотором диапазоне контактных давлений коэффициент трения имеет почти постоянное значение или имеет локальный минимум. В этом промежуточном режиме интенсивность изнашивания крайне низка и практически не возрастает при возрастании нагрузки. Трение при этом происходит по адсорбированному слою смазочного материала без непосредственного контакта поверхностей. Параметром, характеризующим эффективность противоизносной присадки, в первую очередь, служит значение контактного давления, при котором этот режим переходит в режим граничного трения.

Полученные зависимости коэффициентов трения от контактного давления приведены на рис. 1.

Испытания автоматически прекращались при достижении момента трения 12 Н·м, что соответствует силе трения 180 Н. Такое значение силы трения в условиях эксперимента достигалось в граничном режиме при возрастании коэффициента трения.

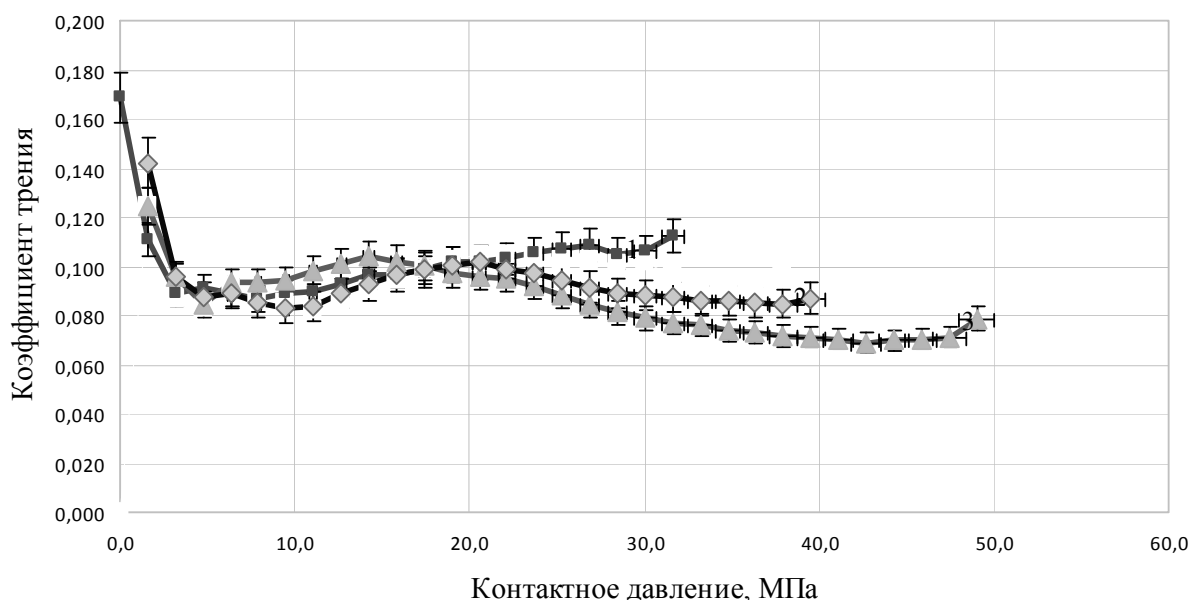


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от контактного давления при смазке маслом И-20А (1), И-20А с 2 % мас. диоктилдитиофосфата цинка (2), И-20А с 2 % мас. дигексадецилдитиофосфата цинка (3)

Как следует из данных, приведенных на рис. 1, при введении в масло И-20А 2 % мас. диоктилдитиофосфата цинка, контактное давление, при котором происходит переход в граничный режим, возрастает с 28 до 38 МПа, а при введении в масло И-20А 2 % мас. дигексадецилдитиофосфата цинка – до 48 МПа. Антифрикционные свойства присадки, содержащей более длинные углеводородные радикалы, также существенно выше. Следует отметить, что приведенные результаты получены для равного массового содержания присадки в масле. Если использовать количества присадок, соответствующие равному содержанию «активных элементов», как это принято, например, в ГОСТ Р 51634-2000, различие в эффективности этих присадок выражено еще более отчетливо. В таблице приведено массовое содержание данных элементов в использованных присадках.

Содержание «активных» элементов в диоктил- и дигексадецилдитиофосфатах цинка

Элемент	Содержание в присадке, % мас.	
	Радикал – октил, C ₈	Радикал – гексадецил, C ₁₆
Сера	0,37	0,21
Фосфор	0,18	0,1
Цинк	0,32	0,2

Контроль и испытания

Как следует из данных, приведенных в таблице равному содержанию серы, фосфора и цинка, соответствует в 1,7–1,8 большее содержание дигексадецилдитиофосфата цинка, чем октильного производного.

Влияние вспомогательных компонентов на антифрикционные свойства масел, содержащих диалкилдитиофосфаты цинка. Согласно представлениям о механизме действия противоизносных присадок, диалкилдитиофосфаты цинка инициируют полимолекулярную адсорбцию углеводородных молекул смазочного масла [19, 20]. Условная толщина и механические свойства адсорбционного слоя зависят как от свойств и концентрации присадки – ПАВ, модифицирующей поверхность металла, так и от параметров углеводородных молекул. Этот эффект принято называть «приемистостью» масла к присадкам. При введении присадок в базовые масла, содержащие углеводородные компоненты с большей молекулярной массой, противоизносные свойства присадок проявляются сильнее, чем в маслах, состоящих из углеводородов с меньшей молекулярной массой. Масла, состоящие из углеводородов линейного строения, имеют более высокую приемистость к присадкам, чем масла на основе изопарафинов. Проблема повышения эффективности противоизносных присадок актуальна при разработке всесезонных синтетических моторных и трансмиссионных масел. Такие масла изготавливают на основе синтетических сильноветвленных изопарафинов с низкой вязкостью, т. е., с относительно низкой средней молекулярной массой. На основании имеющихся представлений о механизме формирования граничного смазочного слоя, следует предполагать, что эффективность противоизносных присадок может быть повышена при одновременном введении в масло компонентов, содержащих достаточно длинные углеводородные радикалы, и образующих более сильные межмолекулярные связи, чем углеводороды. К таким компонентам можно отнести, например, диалкильные эфиры терефталевой кислоты, входящие в состав масел ZIC концерна SK Lubricants и некоторые другие масла.

Для проверки гипотезы о возможности повышения эффективности противоизносных присадок при введении вспомогательных компонентов, авторами были синтезированы диоктиловый- и дигексадециловый эфиры малеиновой кислоты, по структуре аналогичные диэфирам терефталевой кислоты. Эти компоненты добавляли в количестве 2 % массовых к маслу И-20А, содержащему 2 % дигексадецилдитиофосфата цинка. Испытания проводили по методике, описанной в п. 2. Результаты приведены на рис. 2.

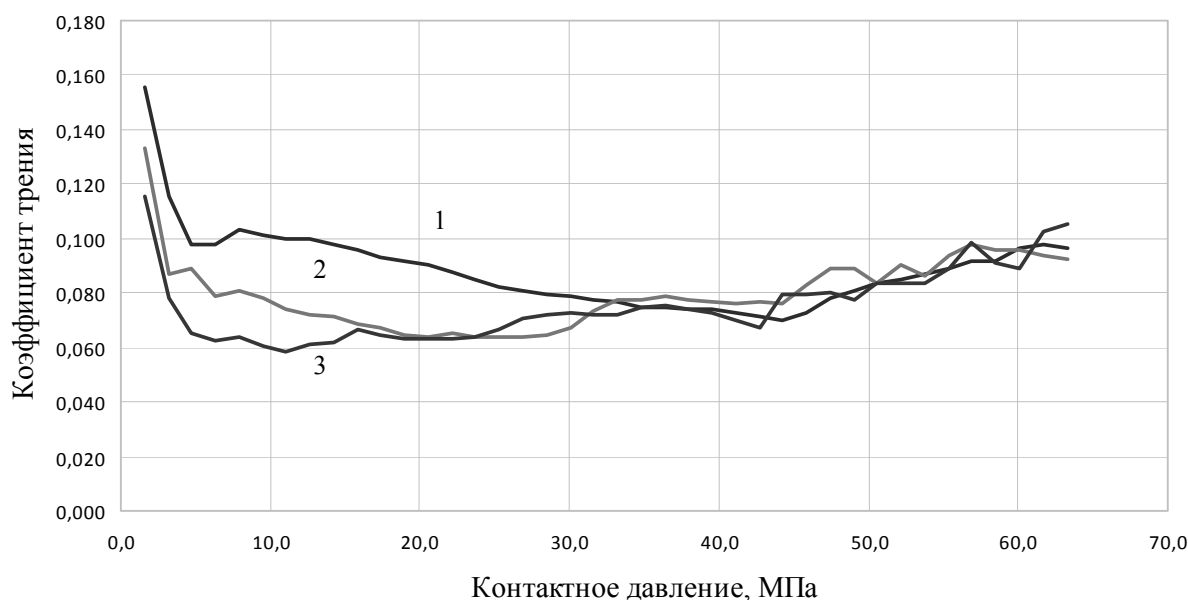


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от контактного давления при смазке маслом И-20А, содержащим 2 % мас. дигексадецилдитиофосфата цинка (1), тем же маслом, дополнительно содержащим 2 % мас. диоктилового эфира малеиновой кислоты (2), и 2 % мас. дигексадецилового эфира малеиновой кислоты (3)

Из данных, приведенных на рис. 2 видно, что добавка диэфиров приводит к существенному повышению значений контактного давления, соответствующих переходу от гидродинамического режима к режиму граничной смазки. Более эффективен диэфир с большей длиной углеводородных радикалов. В области высоких контактных давлений эффект от введения диэфиров отсутствует.

Обсуждение результатов. Полученные данные соответствуют упоминавшемуся выше представлению о механизме действия противоизносных присадок, заключающемуся в мономолекулярной адсорбции диалкилдитиофосфатов или других ПАВ на поверхности металла, и вторичной полимолекулярной адсорбции углеводородов масла на поверхности, модифицированной слоем ПАВ. С этой точки зрения, более выраженными свойствами должны обладать ПАВ, содержащие более длинные углеводородные радикалы. Результаты, полученные для полностью аналогичных присадок, различающихся только длиной радикалов одинакового линейного строения, полностью подтверждают предположение. Следует отметить, что испытания проводили при средней высоте шероховатостей поверхностей около 0,2 мкм. Это на порядок больше, чем средняя высота шероховатостей шеек коленчатого вала двигателей. Значение шероховатости $R_a = 0,2$ мкм выбрано исходя из измерявшихся ранее [20] значений толщины граничного смазочного слоя моторных масел, составлявших 0,4–0,7 мкм. Также следует отметить значения контактных давлений, при которых в условиях эксперимента начинался непосредственный контакт поверхностей. Эти значения соответствуют контактным давлениям в типичных подшипниках коленчатого вала ДВС. Таким образом, моделирование эксплуатационных условий можно считать корректным, по крайней мере, для моторных масел. В отношении трансмиссионных масел, работающих в условиях контактных давлений до 3000 МПа и выше, значение результатов менее очевидно. Как видно из приведенных данных (график 3 на рис. 1), при давлениях до 50 МПа между поверхностями трибосопряжения сохраняется смазочный слой толщиной не менее 0,4 мкм. Следует предполагать, что адсорбционный слой меньшей толщины должен быть устойчив к действию значительно более высоких контактных давлений. Такой адсорбционный слой способен к демпфированию нагрузок, прикладываемых к зубьям зубчатых передач путем распределения контактных давлений по большей площади и снижению их максимальных значений. Это должно приводить к снижению генерирования тепла при деформации зубьев в зоне контакта и, помимо снижения износа в результате усталостного выкрашивания, приводить к снижению коррозионно-механического изнашивания из-за активации противозадирных присадок. Диэфиры малеиновой кислоты усиливают антифрикционные свойства рассмотренных присадок. Однако в связи с тем, что они формируют периферийную часть граничного слоя (полимолекулярного адсорбционного слоя), они эффективны лишь при невысоких напряжениях сдвига. Эти компоненты целесообразно применять только в составе моторных масел.

Заключение. При корректном моделировании условий, существующих в наиболее распространенных в технике узлах трения, получены результаты, заставляющие изменить существовавшие ранее представления об эффективности противоизносных компонентов смазочных масел. Полученные данные о связи структуры диалкилдитиофосфатов цинка с их антифрикционными и противоизносными свойствами позволяют целенаправленно синтезировать противоизносные присадки к синтетическим маслам, более эффективные, чем существующие. Результаты работы могут быть использованы в случае необходимости разработки импортонезависимых технологий производства смазочных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства нового поколения энергоэффективных трансмиссий для грузовых автомобилей и автобусов» по договору № 02.G25.31.0142 от 01 декабря 2015 года между Министерством образования и науки Российской Федерации и Публичным акционерным обществом «КАМАЗ» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Литература

1. Оболенцев, Р.Д. Химия сераорганических соединений, содержащихся в нефтях и нефтепродуктах / Р.Д. Оболенцев. – Уфа, 1963. – Т. 5. – 264 с.
2. Присадки к маслам: труды второго всесоюзного научно-технического совещания / под ред. С.Э. Крейна. – М.: Химия, 1968. – 348 с.
3. Братков, А.А. Теоретические основы химмотологии / А.А. Братков. – М.: Химия, 1985. – 321 с.

4. Бондарь, В.В. *Технология органических веществ*. 1966: сб. ст. / гл. ред. В.В. Бондарь. – М.: ВИНТИ, 1968. – 195 с.
5. Вуннер, А.Б. *Зарубежные масла и присадки* / А.Б. Вуннер. – М.: Химия, 1981. – 189 с.
6. Spikes, H. *The History and Mechanisms of ZDDP* / H. Spikes // *Tribology Letters*. – 2004. – Vol. 17 (3). – P. 469–489.
7. *The Influence of Ppoly-molecular Adsorption on the Rheological Behaviour of Lubricating Oil in a Thin Layer* / M. Fuller, Z. Yin, M. Kasrai et al. // *Tribology International*. – 1997. – Vol. 30 (4). – P. 305–315.
8. *Solution Decomposition of Zinc Dialkyl Dithiophosphate and Its Effect on Antiwear and Thermal Film Formation Studied by X-ray Absorption Spectroscopy* / M. Fuller, M. Kasrai, G.M. Bancroft et al. // *Tribology International*. – 1998. – Vol. 31 (10). – P. 627–644.
9. *The Chemistry of Antiwear Films Generated by the Combination of ZDDP and MoDTC Examined by X-ray Absorption Spectroscopy* / M. Kasrai, J.N. Cutler, K. Gore et al. // *Tribology Transactions*. – 1998. – Vol. 41 (1). – P. 67–77.
10. *Additive-Additive Interaction: an XPS Study of the Effect of ZDDP on the AW/EP Characteristics of Molybdenum Based Additives* / R. Unnikrishnan, M.C. Jain, A.K. Harinarayan, A.K. Mehta // *Wear*. – 2002. – Vol. 252 (3). – P. 240–249.
11. Taylor, L.J. *Friction-Enhancing Properties of ZDDP Antiwear Additive: Part I: Friction and Morphology of ZDDP Reaction Films* / L.J. Taylor, H.A. Spikes // *Tribology Transactions*. – 2003. – Vol. 46 (3). – P. 303–309.
12. So, H. *The Theory of Antiwear for ZDDP at Elevated Temperature in Boundary Lubrication Condition* / H. So, Y. Lin // *Wear*. – 1994. – Vol. 177 (2). – P. 105–115.
13. Spedding, H. *The Antiwear Mechanism of Zddp's. Part I* / H. Spedding, R. Watkins // *Tribology International*. – 1982. – Vol. 15 (1). – P. 9–12.
14. *Investigation of the Interactions Between a Novel, Organic Anti-Wear Additive, ZDDP and Overbased Calcium Sulphonate* / A. Greenall, A. Neville, A. Morina, M. Sutton // *Tribology International*. – 2012. – Vol. 46 (1). – P. 52–61.
15. *Calcium Sulphonate and its Interactions With ZDDP on Both Aluminium-Silicon and Model Silicon Surfaces* / M. Burkinshaw, A. Neville, A. Morina, M. Sutton // *Tribology International*. – 2012. – Vol. 46 (1). – P. 41–51.
16. Wu, H. *The Tribological Properties and Action Mechanism of Non-Active Organic Molybdate Ester and Its Combination with ZDDP* / H. Wu, Y-G. Wang, T.-H. Ren // *Tribology International*. – 2012. – Vol. 49. – P. 90–95.
17. *Model Formation of ZDDP Tribofilm From a Mixture of Zinc Metaphosphate and Goethite* / S. Berkani, F. Dassenoy, C. Minfray et al. // *Tribology International*. – 2014. – Vol. 79. – P. 197–203.
18. Заславский, Ю.С. *Механизм действия противоизносных присадок к маслам* / Ю.С. Заславский, Р.Н. Заславский. – М.: Химия, 1978. – 224 с.
19. Mukhortov, I. *Multimolecular adsorption lubricants and its integration in the theory fluid friction* / I. Mukhortov, E. Zadorojnaya, I. Levanov // *Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting and Exhibition 2013, Detroit Marriott at the Renaissance Center*. – Detroit, Michigan, USA. – P. 147–149.
20. *The influence of poly-molecular adsorption on the rheological behaviour of lubricating oil in a thin layer* / I.V. Mukhortov, E.A. Zadorozhnaya, I.G. Levanov, K.A. Pochkaylo // *FME Transactions*. – 2015. – Vol. 43 (3). – P. 218–222.

Мухортов Игорь Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, i.mukhortov@yandex.ru.

Почкайло Ксения Александровна, инженер, аспирант кафедры «Экология и химическая технология», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Ksyushenka666@ Rambler.ru.

Дойкин Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, r.a.s.h.86@mail.ru.

Леванов Игорь Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, levanovig@susu.ru.

Поступила в редакцию 21 октября 2016 г.

LINK STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF ZINC DIALKILDITHIOPHOSPHATES

I.V. Mukhortov, *i.mukhortov@yandex.ru*,
K.A. Pachkaylo, *Ksyushenka666@rambler.ru*,
A.A. Doykin, *r.a.s.h.86@mail.ru*,
I.G. Levanov, *levanovig@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article considers the dependence of the antiwear and antifriction action dialkyldithiophosphate zinc (ZDDP) from the value of hydrocarbon radicals. Experimentally studied the friction parameters in sliding contact, simulating a radial bearing. The value of the contact pressure, which implements a hydrodynamic modes depends on the roughness of the surfaces. Dedicated mode is boundary lubrication, which differs from the hydrodynamic and boundary friction regimes. This mode is characterized by a relatively constant coefficient of friction and a small amount of wear. As a criterion for evaluation of antiwear properties, used the value of contact pressure at which the transition from the boundary lubrication regime to the regime of boundary friction. It is found that the transition to the boundary friction regime occurs at different contact pressures for the same type of ZDDP with different length of hydrocarbon radicals. When using zinc dihexadecylphthalene the transition to boundary friction occurs at much larger values of contact pressure than when using dioctylphthalate zinc. The results are discussed taking into account the mechanism of adsorption of components of lubricating oils on metal surfaces. The dependence of the antiwear action of ZDDP from the length of the hydrocarbon radicals correspond to their influence on the parameters of a multi-molecular adsorption layer. The data on the influence of ancillary components on the structure and mechanical properties of adsorption layers, and on the rheological properties of lubricants in friction units. It is shown that the introduction of a hydrocarbon base oil ZDDP along with other components consisting of linear molecules with a sufficiently long hydrocarbon radicals, affects the range of contact pressures, which implements a hydrodynamic mode of friction. As an example, used hexadecanol diester and maleic acid. The inclusion of such components in the lubricating oil contributes to the implementation of the hydrodynamic regime, but does not affect the transition from boundary lubrication to boundary friction.

Keywords: antiwear additive, multimolecular adsorption, lubricants.

Reference

1. Obolentsev R.D. *Khimiya seraorganicheskikh soyedineniy, soderzhashchikhsya v neftnyakh i nefteproduktakh* [Chemistry of Organic Sulfur Compounds Contained in Petroleum and Petroleum Products]. Ufa, 1963, vol. 5, 264 p.
2. Kreyn S.E. (Ed.) *Prisadki k maslam. Trudy vtorogo vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo soveshchaniya* [Additive to Oils. The Works of the Second All-Union Scientific-technical Meeting]. Moscow, Khimiya, 1968. 348 p.
3. Bratkov A.A. *Teoreticheskiye osnovy khimnotologii* [Theoretical Bases of Chemmotology]. Moscow, Khimiya, 1985. 321 p.
4. Bondar' V.V. *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv. 1966* [Bondar' V.V. (Ed.) Technology of Organic Substances. 1966: Collection of Articles]. Moscow, VINITI, 1968. 195 p.
5. Vipper A.B. *Zarubezhnyye masla i prisadki* [Foreign Oil and Additives]. Moscow, Khimiya, 1981. 189 p.
6. Spikes H. The History and Mechanisms of ZDDP. *Tribology Letters*, 2004, vol. 17 (3), pp. 469–489.
7. Fuller M., Yin Z., Kasrai M., Bancroft G.M., Yamaguchi E.S., Ryason P.R., Willermet P.A., Tan K.H. The Influence of Ppoly-Molecular Adsorption on the Rheological Behaviour of Lubricating Oil in a Thin Layer. *Tribology International*, 1997, vol. 30 (4), pp. 305–315.
8. Fuller M., Yin Z., Kasrai M., Bancroft G.M., Fyfe K., Tan K.H. Solution Decomposition of Zinc

Dialkyl Dithiophosphate and Its Effect on Antiwear and Thermal Film Formation Studied by X-ray Absorption Spectroscopy. *Tribology International*, 1998, vol. 31 (10), pp. 627–644.

9. Kasrai M., Cutler J.N., Gore K., Canning G., Bancroft G.M., Tan K.H. The Chemistry of Antiwear Films Generated by the Combination of ZDDP and MoDTC Examined by X-ray Absorption Spectroscopy. *Tribology Transactions*, 1998, vol. 41 (1), pp. 67–77.

10. Unnikrishnan R., Jain M.C., Harinarayan A.K., Mehta A.K. Additive–Additive Interaction: an XPS Study of the Effect of ZDDP on the AW/EP Characteristics of Molybdenum Based Additives. *Wear*, 2002, vol. 252 (3), pp. 240–249.

11. Taylor L.J., Spikes H.A. Friction-Enhancing Properties of ZDDP Antiwear Additive: Part I: Friction and Morphology of ZDDP Reaction Films. *Tribology Transactions*, 2003, vol. 46 (3), pp. 303–309.

12. So H., Lin Y. The Theory of Antiwear for ZDDP at Elevated Temperature in Boundary Lubrication Condition. *Wear*, 1994, vol. 177 (2), pp. 105–115.

13. Spedding H., Watkins R. The Antiwear Mechanism of ZDDP's. Part I. *Tribology International*, 1982, vol. 15 (1), pp. 9–12.

14. Greenall A., Neville A., Morina A., Sutton M. Investigation of the Interactions Between a Novel, Organic Anti-Wear Additive, ZDDP and Overbased Calcium Sulphonate. *Tribology International*, 2012, vol. 46 (1), pp. 52–61.

15. Burkinshaw M., Neville A., Morina A., Sutton M. Calcium Sulphonate and its Interactions With ZDDP on Both Aluminium–Silicon and Model Silicon Surfaces. *Tribology International*, 2012, vol. 46 (1), pp. 41–51.

16. Wu H., Wang Y.-G., Ren T.-H. The Tribological Properties and Action Mechanism of Non-Active Organic Molybdate Ester and Its Combination with ZDDP. *Tribology International*, 2012, vol. 49, pp. 90–95.

17. Berkani S., Dassenoy F., Minfray C., Belin M., Vacher B., Martin J.M., Cardon H., Montagnac G., Reynard B. Model Formation of ZDDP Tribofilm From a Mixture of Zinc Metaphosphate and Goethite. *Tribology International*, 2014, vol. 79, pp. 197–203.

18. Zaslavskiy YU.S., Zaslavskiy R.N. *Mekhanizm deystviya protivoznosnykh prisadok k maslam* [The Mechanism of Action of Antiwear Additives to Oils]. Moscow, Khimiya, 1978. 224 p.

19. Mukhortov I., Zadorojnaya E., Levanov I. Multimolecular adsorption lubricants and its integration in the theory fluid friction. *Society of Tribologists and Lubrication Engineers Annual Meeting and Exhibition 2013*, Detroit Marriott at the Renaissance Center, Detroit, Michigan, USA, pp. 147–149.

20. Mukhortov I.V., Zadorozhnaya E.A., Levanov I.G., Pochkaylo K.A. The influence of poly-molecular adsorption on the rheological behaviour of lubricating oil in a thin layer. *FME Transactions*, 2015, vol. 43 (3), pp. 218–222.

Received 21 October 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Связь структуры и трибологических характеристик диалкилдитиофосфатов цинка / И.В. Мухортов, К.А. Почкайло, А.А. Дойкин, И.Г. Леванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 67–74. DOI: 10.14529/engin160408

FOR CITATION

Mukhortov I.V., Pochkaylo K.A., Doykin A.A., Levanov I.G. Link Structure and Tribological Properties of Zinc Dialkildithiophosphates. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 67–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin160408