

ВЛИЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПРИСАДОК НА ГЕНЕРАЦИЮ ТЕПЛА В КОНТАКТАХ КАЧЕНИЯ С ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЕМ

И.В. Мухортов, И.Г. Леванов, К.А. Якунина

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Целью работы является изучение перспективных методов повышения надежности гипоидных зубчатых зацеплений при высоких нагрузках. К техническим устройствам, содержащим такие зацепления относятся, в частности, ведущие мосты автотракторной техники. Фактором риска является повышение температуры вследствие упругих деформаций металла и трения скольжения при значительном смещении осей зацепления. В данной работе рассмотрено влияние триарилфосфоротионатов, а также диалкилдитиофосфатов цинка и молибдена (III) на силу трения и генерирование тепла в контактах трения качения с проскальзыванием. Контакты качения с проскальзыванием моделируют трение в гипоидных зубчатых передачах. В данной работе построены зависимости коэффициента трения от температуры при смазке трансмиссионным маслом с дополнительно введенными изучаемыми присадками. Сравнивались влияние присадок на температуру узлов трения и эффективность присадок при различных температурах.

Из полученных результатов следует, что оба типа испытанных присадок существенно снижают силу трения при температурах от 100 °С и выше. Введение в состав трансмиссионного масла как фосфоротионатов, так и диалкилдитиофосфатов существенно снижает силу трения и интенсивность изнашивания в контакте качения с проскальзыванием. Отличие между исследованными присадками заключается, в основном, в диапазонах температур, в которых проявляется влияние присадок на трибологические свойства трансмиссионного масла. Для триарилфосфоротионатов это влияние проявляется при температурах выше 100...110 °С. Для триалкилфосфоротионатов – при температурах выше 80 °С. Диалкилдитиофосфаты молибдена (III) с достаточно длинными углеводородными радикалами снижают силу трения практически при всех положительных температурах и превосходят по эффективности фосфоротионаты. Таким образом, введение в трансмиссионное масло дополнительного количества рассмотренных присадок способно существенно снизить как температуры, достигаемые зубчатыми передачами в ходе эксплуатации, так и скорость изнашивания при данных температурах.

Ключевые слова: трансмиссионное масло, противоизносные присадки, полимолекулярная адсорбция, триарилфосфоротионаты диалкилдитиофосфаты.

Введение

Повышение надежности и долговечности трансмиссий и ведущих мостов наземной мобильной техники возможно только при использовании комплекса технических решений на стадиях проектирования, производства и эксплуатации этих узлов. Основными факторами, позволяющими повысить долговечность зубчатых передач, в частности, гипоидных передач ведущих мостов, при увеличении нагрузок и коэффициента проскальзывания, являются [1]: оптимизация геометрических параметров передачи, усовершенствование физико-механических свойств материалов зубчатых колёс и поверхностной обработки зубьев; повышение противоизносных и противозадирных свойств трансмиссионного масла. Задача дальнейшего повышения надежности и долговечности гипоидных зубчатых передач актуальна для мобильной техники, эксплуатирующейся в условиях бездорожья или при эксплуатации в жарком климате, например, для некоторых видов техники на шасси КАМАЗ. В этой связи целесообразно рассмотреть возможность повышения допустимых контактных давлений и температур за счет применения эффективных присадок к трансмиссионным маслам.

1. Механизмы трения в гипоидных зубчатых передачах

Особенности механизма передачи энергии в гипоидных передачах: 1) приложение контактной нагрузки к боковой поверхности зуба, что приводит к несимметричности распределения кон-

тактных давлений; 2) наличие существенных тангенциальных составляющих контактного давления в двух плоскостях. Этими особенностями обусловлены три основных типа износа зубчатых передач [1, 2]. К первому типу относится разрушение зуба у основания. Данный вид износа слабо зависит от смазочного материала. Ко второму виду относятся адгезионный износ, усталостное выкрашивание и задиры. К третьему типу относят абразивное изнашивание, обусловленное условиями эксплуатации узла. Данный вид изнашивания здесь не рассматривается в связи с низкой актуальностью для закрытых узлов.

К адгезионному изнашиванию обычно относят процессы, обусловленные непосредственным контактом шероховатостей поверхностей зубьев при толщине слоя смазочного материала, меньшей, чем суммарная высота шероховатостей поверхностей зубьев. Толщина слоя смазочного материала в зоне контакта зависит как от объемной вязкости смазочного масла, так и от его микро-реологических свойств, обусловленных такими компонентами, как противоизносные присадки и другие поверхностно-активные вещества (ПАВ). Общеизвестно, что эти компоненты образуют адсорбционные слои с высокой вязкостью [2, 3]. Усталостное выкрашивание обусловлено величиной и периодичностью деформации материала зуба в пятне контакта. Этот вид изнашивания в значительной степени зависит от распределения контактных давлений по пятну контакта и, следовательно, от демпфирующих свойств разделяющего слоя смазочного материала. Демпфирующие свойства частично обусловлены созданием масляного клина в контакте качения, частично – микро-реологическими свойствами масла, т. е. зависят от тех же параметров масла, которые влияют на адгезионное изнашивание. В работах [4, 5] приводится описание процесса образования на поверхности металла адсорбированного слоя смазочного материала, способного воспринимать высокие контактные давления. Слои, образованные на поверхностях трения в результате физической адсорбции, хемосорбции и химической реакции называются граничными. Их свойства значительно отличаются от объемных свойств смазочного масла [6–10]. Задиры возникают вследствие резкого увеличения силы трения в пятне контакта и связанного с этим резкого локального повышения температуры, снижения вязкости масла и плавления адсорбционных слоев. Для предотвращения задира используют химически активные присадки, содержащие органические масло-растворимые соединения серы, хлора, фосфора. Из факторов, повышающих вероятность задира, основными являются тангенциальные составляющие контактных давлений, обусловленные типом и геометрическими параметрами зубчатой передачи. Особенности противозадирных присадок являются высокие температуры активации химического взаимодействия с материалами поверхностей зубьев (180...250 °С) и связанное с этим резкое повышение коррозионно-химического изнашивания при высоких температурах.

Таким образом, минимизация адгезионного, коррозионно-химического изнашивания и усталостного выкрашивания возможна лишь при введении в состав трансмиссионного масла эффективных противоизносных присадок, вызывающих образование полимолекулярных адсорбционных слоев, устойчивых к высоким напряжениям сдвига и высоким температурам. В настоящее время в маслах классов ТМ-4 и ТМ-5 используются диалкилдитиофосфаты цинка часто в сочетании со вспомогательными компонентами, например, сернистыми соединениями: моно- и полисульфидами, тиокислотами и т. п. Методы повышения эффективности диалкилдитиофосфатов цинка (ZDDP) при высоких температурах рассмотрены в многочисленных исследованиях. Например, в [11, 12] изучено совместное действие ZDDP и дисульфида молибдена, в [13] рассмотрено поведение ZDDP при высоких температурах, в [14] рассмотрена возможность их противозадирного действия. В работе [15] рассмотрено влияние углеводородного радикала на противоизносные свойства ZDDP. Эффективность сочетания ZDDP с такими компонентами, как сульфонаты кальция, органические комплексы молибдена и метафосфат цинка, рассмотрена в [16–18]. Результаты данных исследований показывают, что возможности повышения устойчивости зубчатых передач к высоким температурам при использовании ZDDP ограничены.

2. Противоизносные компоненты высокотемпературных смазок

В связи с задачей повышения противоизносных свойств трансмиссионного масла при температурах 150 °С и выше, следует рассмотреть противоизносные компоненты других смазочных материалов, предназначенных для длительной эксплуатации при таких температурах. Часть таких материалов изготавливается на неуглеводородных основах: полигликоли (например, Shell Tivela), силиконы (напр., ВНИИ НП-246), перфторполиэфиры (Fomblin Y-45) и др. Вследствие

резкого отличия свойств данных материалов от трансмиссионных масел, входящие в их состав противоизносные компоненты в данной работе не рассматриваются. Из материалов на углеводородной основе, предназначенных для эксплуатации при 150...180 °С и, кратковременно, до 200 °С, преобладают пластичные смазки для индустриального (преимущественно металлургического) оборудования. Некоторые из этих смазок имеют чрезвычайно высокие противоизносные свойства и заслуживают внимания в качестве прототипов. Среди этих материалов смазки SKF: LGHP 2/50, LGHP 2/180, Mobil Centaur XHP 221, Mobilith SHC PM 460, Shell Gadus S3 T460 1.5, Shell Gadus S5 T460 1.5. Согласно данным о химическом составе, приведенным в паспортах безопасности этих смазок, в качестве противоизносных присадок используются диалкилдитиофосфаты цинка, кальциевые соли C₁₆–C₂₄ алкилпроизводных, бензолсульфокислоты и триарилфосфотионаты. Триарилфосфотионаты содержатся в смазках, обладающих наиболее высокими противоизносными свойствами при температурах 150...180 °С. Таким образом, для исследования возможности повышения противоизносных свойств трансмиссионного масла при предельных температурах наиболее перспективным типом присадки следует считать триарилфосфотионаты и аналогичные соединения.

3. Методы исследования температурной стойкости трансмиссионных масел и критерии оценки

Под температурной стойкостью смазочных материалов и антифрикционных покрытий подразумевается способность этих материалов сохранять определенные значения противоизносных и антифрикционных свойств в некотором температурном интервале [3]. Данный параметр, как правило, определяется путем построения зависимостей интенсивности изнашивания от температуры или коэффициента трения от температуры при выбранных фиксированных нагрузках на узел трения. В случае смазочных масел и пластичных смазок без твердых смазочных компонентов, верхний предел сохранения трибологических характеристик определяется такими факторами, как вязкостно-температурные свойства и устойчивость граничных слоев, обусловленная противоизносными присадками. Вследствие этого, определяемая температурная стойкость существенно зависит от типа и геометрии узла трения, нагрузки, скорости и других параметров трения. Таким образом, определение температурной стойкости, за редкими исключениями, имеет смысл при достаточно точном моделировании условий эксплуатации смазочного материала. В этом случае определяется критическое значение температуры, при котором происходит либо резкое возрастание скорости изнашивания и силы трения, либо достигаются критические значения этих параметров. В ряде случаев под температурной стойкостью подразумевают устойчивость смазочного материала к термической деструкции [4]. Однако данное свойство определяется по стандартным параметрам: термоокислительной стабильности и индукционному периоду осадкообразования. Эти параметры зависят от свойств базового масла и мало зависят от присадок.

Наиболее распространенным методом определения температурной стойкости моторных, трансмиссионных, гидравлических и индустриальных масел является методика ГОСТ 23.221-84. Согласно данной методике измеряют зависимость индекса задира, нагрузки сваривания и диаметра пятна износа от температуры. Температурным пределом считают максимальное значение температуры, при котором достигаются допустимые значения всех трех параметров, установленные стандартом на данный смазочный материал. Для трансмиссионных масел это допустимые значения по ГОСТ 17479.2-85 или API GL.

Недостатком методики ГОСТ 23.221-84, так же, как и методики по ГОСТ 9490-75, является использование схемы трения подвижного образца о неподвижные. Это приводит к существенному изменению контактного давления в трибосопряжении по мере изнашивания. Кроме того, объем изношенных сферических или цилиндрических сегментов не пропорционален площади пятна износа. Вследствие этих причин, методика мало чувствительна к различию противоизносных свойств масел, проявляющихся в условиях эксплуатации.

Более точная оценка зависимости трибологических характеристик смазочных масел от температуры проводится при испытаниях в узлах трения качения с проскальзыванием. В контактах подвижных цилиндрических образцов (тип «ролик – ролик»), устанавливаемых на машинах трения типа СМЦ, СМТ, ИИ, УМТ и т. д., возможно точное определение зависимости коэффициента трения от температуры при постоянной площади контакта. В ходе таких испытаний четко определяется температура, при которой происходит возрастание коэффициента трения, соответст-

вующее разрушению разделяющего слоя смазки и непосредственному контакту поверхностей образцов. Недостатком данной методики является невозможность достоверного измерения интенсивности изнашивания.

Таким образом, для оценки влияния тех или иных компонентов на температурную стойкость трансмиссионного масла целесообразно сочетание методов, предусмотренных ГОСТ 23.221-84 и исследовательских испытаний в узлах трения качения с проскальзыванием.

Критерии оценки перспективных противоизносных присадок должны быть связаны как с оценкой их влияние на температуру зубчатой передачи в процессе работы, так и с оценкой их эффективности при максимально допустимых температурах. В связи с этим целесообразно оценивать перспективные присадки по двум параметрам: степень снижения силы трения во всем температурном диапазоне работы зубчатых передач и степень снижения силы трения при предельно высоких температурах.

4. Методы испытаний

Для сравнительных испытаний функциональных свойств использовали трифенилфосфоро- тионат, трибензилфосфоро- тионат, триоктилфосфоро- тионат, а также дигексадецилдитиофосфаты цинка (ZDDP) и молибдена (III) (MoDDP). Компоненты вводили в стандартное трансмиссионное масло Лукойл ТМ-5 класса вязкости SAE 75W-90 в количестве 2 % массовых.

Зависимости коэффициента трения от температуры определяли на машине трения ИИ 5018 в контакте качения с проскальзыванием при диаметрах роликов 90 и 45 мм, скорости скольжения 300 мин⁻¹ и прижимающей нагрузке 2000 Н. Температуру роликов измеряли контактным способом (скользящий контакт). Интенсивность генерации тепла оценивали по времени повышения температуры контакта от 30 до 150 °С.

Дополнительно определяли противоизносные свойства на машине трения ЧМТ-1 по ГОСТ 9490-75 п. 3.9.

5. Результаты испытаний

Результаты испытаний антифрикционных свойств фосфоро- тионатов в контакте трения каче- ния со скольжением представлены на рис. 1.

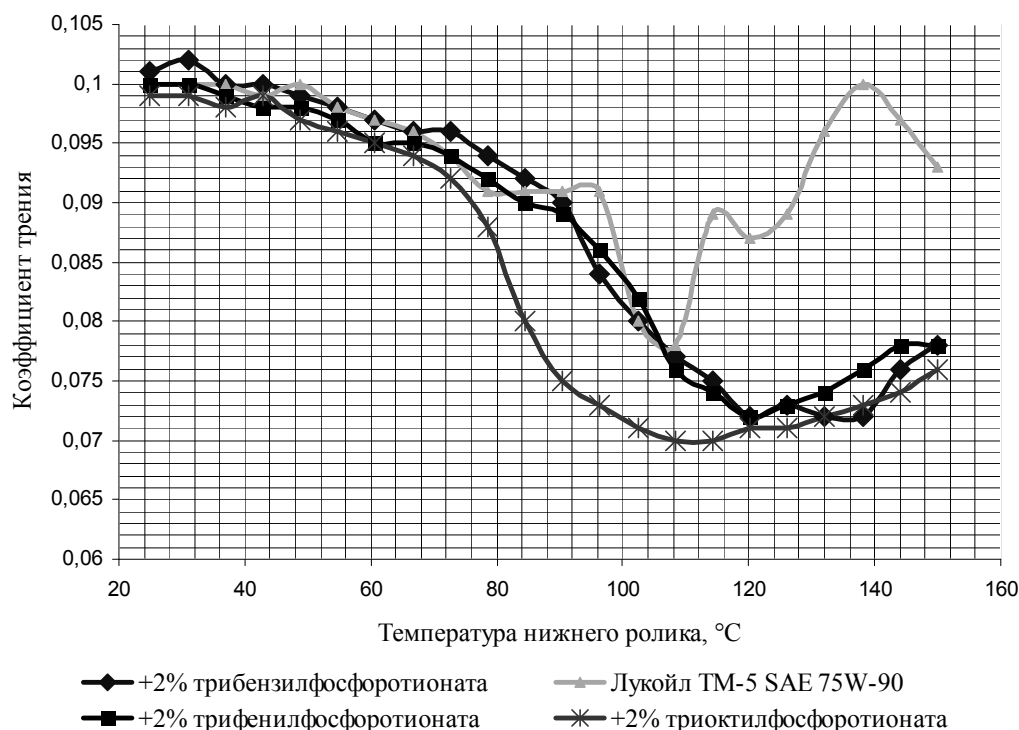


Рис. 1. Влияние тиарил- и триалкилфосфоро- тионатов на антифрикционные свойства трансмиссионного масла

Результаты испытаний антифрикционных свойств дигексадецилдитиофосфатов в контакте трения качения со скольжением представлены на рис. 2.

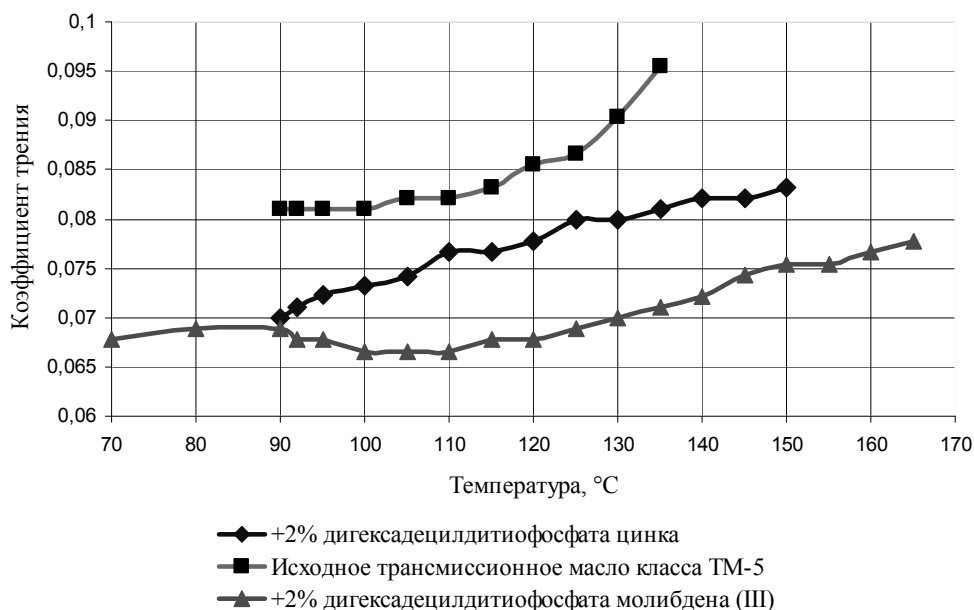


Рис. 2. Влияние дигексадецилдитиофосфатов на антифрикционные свойства трансмиссионного масла

Время повышения температуры от 30 до 150 °C в данных испытаниях при смазке исходным маслом Лукойл ТМ-5 SAE 75W-90 составило 12 ± 2 мин, при смазке тем же маслом с дополнительно введенными присадками 23...25 мин.

Результаты измерения диаметров пятен износа при начальной температуре испытаний 100 °C приведены в таблице.

Результаты измерений диаметра пятна износа по ГОСТ 9490-75 при осевой нагрузке 392 Н для масла Лукойл ТМ-5 SAE 75W90 и того же масла с дополнительно введенными присадками

№	Смазочный материал	Средний диаметр пятна контакта, мм	Средняя площадь пятна контакта, мм ²	Минимальное контактное давление, достигнутое в ходе испытаний, МПа
1	Лукойл ТМ-5 SAE 75W-90	0,446	0,199	657
2	Лукойл ТМ-5 + 2 % трибензилфосфорогониата	0,342	0,091	1430
3	Лукойл ТМ-5 + 2 % триоктилфосфорогониата	0,339	0,090	1450
4	Лукойл ТМ-5 + 2 % ZDDP	0,37	0,107	1220
5	Лукойл ТМ-5 + 2 % MoDDP	0,35	0,096	1360

6. Обсуждение результатов. Из результатов, приведенных на рис. 1 и 2, следует, что оба типа испытанных присадок существенно снижают силу трения при температурах от 100 °C и выше. Для исходного масла Лукойл ТМ-5 в диапазоне температур 90...120 °C наблюдается неустойчивость коэффициента трения. При температурах 120...130 °C наблюдается резкий рост коэффициента трения с некоторым снижением при температуре 150 °C. Это свидетельствует об изменении механизма трения при температурах выше 120 °C и вероятной активации противозадирных присадок. Такое предположение подтверждается изменением диаметров пятен износа при введении присадок. Введение в состав данного масла как фосфорогониатов, так и диалкилдитиофосфатов существенно снижает силу трения и интенсивность изнашивания в контакте качения с проскальзыванием. Отличие между исследованными присадками заключается, в основном, в диапазонах температур, в которых проявляется влияние присадок на трибологические свойства трансмиссионного масла. Для триарилфосфорогониатов это влияние проявляется при температурах выше 100...110 °C. Для триалкилфосфорогониатов – при температурах выше 80 °C. Диалкилдитиофос-

фаты с достаточно длинными углеводородными радикалами, как это было показано в предыдущих работах авторов, снижают силу трения практически при всех положительных температурах [7]. Наиболее эффективным из испытанных антифрикционных компонентов является дигексадецилдитиофосфат молибдена (III).

Выводы. Из результатов, полученных в ходе проведенных работ, следует, что введение в трансмиссионное масло диалкилдитиофосфатов и триалкилфосфоротионатов способно существенно снизить как температуры, достигаемые зубчатыми передачами в ходе эксплуатации, так и скорость изнашивания при данных температурах. Это позволяет сделать вывод о способности данных противоизносных компонентов существенно повысить работоспособность, ресурс и нагрузочную способность зубчатых передач, в частности, трансмиссий и ведущих мостов наземной мобильной техники в наиболее тяжелых условиях эксплуатации.

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. Bunner, A.B. Зарубежные масла и присадки / А.Б. Bunner. – 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. 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
8. The Influence of Poly-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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. Spedding, H. *The Antiwear Mechanism of Zddp's. Part I* / H. Spedding, R. Watkins // *Tribology International*. – 1982. – Vol. 15 (1). – P. 9–12.

15. *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.

16. *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.

17. 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.

18. *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.

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

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

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

Поступила в редакцию 16 сентября 2017 г.

DOI: 10.14529/engin170307

INFLUENCE ANTIFRICTIONAL ADDITIVES ON HEAT GENERATION IN ROLLING CONTACT WITH SLIPPAGE

I.V. Mukhortov, i.mukhortov@yandex.ru,

I.G. Levanov, levanovig@susu.ru,

K.A. Yakunina, Ksyushenka666@rambler.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The aim of the study is the investigation of advanced ways to increase the reliability of hypoid gear-tooth systems at high loads. The technological equipment containing such systems include, in particular, drive axles of automotive engines. The risk factor is the rise of temperature because of the metal elastic deformations and sliding friction at significant offset of the instant axes. The present paper studies the influence of triaryl phosphorothionates, as well as zinc and molybdenum (III) dialkyldithiophosphates upon friction force and heat generation at the surface contacts under combined rolling and sliding friction. Rolling and sliding contacts model the friction in hypoid gearing. The dependencies of friction coefficient from the temperature are graphed for lubricating by transmission gear oil with the studied additives introduced into the system. The influence of additives upon the temperature of friction units has been compared together with the efficiency of additives at various temperatures.

As follows from the obtained results, both types of the studied additives significantly decrease the friction force at temperatures from 100 °C and more. Addition of phosphorothionates and dialkyl dithiophosphates into the transmission oil composition significantly decreases the friction force and wear intensity at the rolling and sliding contact. Dissimilarity between the studied additives is observed mostly in the temperature ranges, in which the influence of the additives upon tribological properties of transmission oil is evident. For triaryl phosphorothionates

this influence is observed at temperatures greater than 100...110 °C. For trialkyl phosphorothionates it exists at temperatures greater than 80 °C. Molybdenum (III) dialkyl thiophosphates with long hydrocarbon radicals lower the friction force practically at all positive temperatures; they exceed phosphorothionates in efficiency. Thus, introduction of additional quantity of the studied additives into transmission oil can substantially decrease both the temperatures reached by the gearing in operation and the wear rate at given temperatures.

Keywords: gear oil, antiwear additives, polymolecular adsorption, triarylphosphorothionate, dialkyldithiophosphate.

The work has been performed with the financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation as a part of complex project to create a high-tech production “Development of high-tech production of new generation energy efficient transmissions for trucks and buses” by agreement No. 02.G25.31.0142 d.d. December, 01, 2015.

Reference

1. Obolentsev R.D. [Chemistry of Organic Sulfur Compounds Contained in Petroleum and Petroleum Products]. Ufa, 1963. Vol. 5. 264 p. (in Russ.)
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 Publ., 1968. 348 p.
3. Bratkov A.A. *Teoreticheskiye osnovy khimnotologii* [Theoretical Bases of Chemmotology]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 321 p.
4. Bondar' V.V. (Ed.) *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv. 1966* [Technology of Organic Substances. 1966]. Moscow, VINITI Publ., 1968. 195 p.
5. Vipper A.B. *Zarubezhnye masla i prisadki* [Foreign oils and additives]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 189 p.
6. Spikes H. The History and Mechanisms of ZDDP. *Tribology Letters*, 2004, vol. 17 (3), pp. 469–489.
7. 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
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Spedding H., Watkins R. The Antiwear Mechanism of Zddp's. Part I. *Tribology International*, 1982, vol. 15 (1), pp. 9–12.
15. 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.
16. Burkinshaw M., Neville A., Morina A., Sutton M. Calcium Sulphonate and its Interactions

Контроль и испытания

With ZDDP on Both Aluminium-Silicon and Model Silicon Surfaces. *Tribology International*, 2012, vol. 46 (1), pp. 41–51.

17. 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.

18. 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.

Received 16 September 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Мухортов, И.В. Влияние антифрикционных присадок на генерацию тепла в контактах качения с проскальзыванием / И.В. Мухортов, И.Г. Леванов, К.А. Якунина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 58–66. DOI: 10.14529/engin170307

FOR CITATION

Mukhortov I.V., Levanov I.G., Yakunina K.A. Influence Antifrictional Additives on Heat Generation in Rolling Contact with Slippage. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 58–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin170307