УДК 544.72:538.9

И.В.ПЛЕСКУНОВ, *аспирант, pleskunov@mail.ru*
Д.С.БЫСТРОВ, *аспирант, dimafast@mail.ru*
А.Г.СЫРКОВ, *д-р техн. наук, профессор, syrkovandrey@mail.ru*
И.В.ПАНТЮШИН, *аспирант, +7(812)-921-565-62-92*
Т.Г.ВАХРЕНЕВА, *студентка, tahioxa87@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

I.V.PLESKUNOV, *post-graduate student, pleskunov@mail.ru*
D.S.BYSTROV, *post-graduate student, dimafast@mail.ru*
A.G.SYRKOV, *Dr. in eng. sc., professor syrkovandrey@mail.ru*
I.V.PANTUSHIN, *post-graduate student, +7(812)-921-565-62-92*
T.G.VAKHRENEVA, *student, tahioxa87@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИНДУСТРИАЛЬНОГО МАСЛА С ПРИСАДКАМИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОВ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

По данным акустического метода, зависимость интегрального показателя трения D от нагрузочного давления P при использовании лучшей смазки с присадкой наноструктурированного порошка алюминия, обработанного смесью паров алкамона и триамона, не содержит характерного пика при малых давлениях на стадии притирки контактирующих поверхностей. Данная зависимость является плавной, гладкой и в диапазоне рабочих давлений (15-55 МПа) удовлетворительно описывается уравнением $D = 8{,}5e^{0{,}082P}$. Изменение D по закону экспоненты происходит также при использовании аналогичной присадки на основе порошка меди и порошка меди, обработанного парами алкамона. Эти факты свидетельствуют в пользу жидкостного режима трения.

Ключевые слова: нанотрибология, нелинейные эффекты, Al-, Cu-присадки, модифицирование поверхности присадки, ПАВ, эффект безызносности.

RESEARCH OF ANTIFRICTIONAL PROPERTIES OF INDUSTRIAL OIL WITH ADDITIVES OF THE NANOSTRUCTURED METALS THE ACOUSTIC METHOD

On data of acoustic method, it's discovered that dependence of integral index of friction (D) from loading pressure (P) under using of best lubricant with addition of nanostructured aluminium powder after treatment by mixture of alcamon and triamon vapour, doesn't consist a characteristic peak under small pressures. This dependence is smooth, plain curve and in pressure range (15-55 MPa) is correctly described by equation $D=8{,}5e^{0{,}082P}$. Alteration of D on exponent low takes place under using of analogous addition on copper powder base and powder copper, which is processed by alcamon, too. Those facts testify about liquid mode of friction.

Key words: nanotribology, nonlinear effects, Al-, Cu-additives, modifying of a surface of an additive, tensides, Garkunov's effect.

Применение наноприсадок (например, в виде высокодисперсных металлов) в современных топливно-смазочных материалах – один из перспективных путей улучшения свойств последних [2, 5-7]. Но сами по себе высокодисперсные металлы без защитных, стабилизирующих и согласующих (со смазкой, например) сверхтонких покрытий на

частицах обладают различными недостатками: неустойчивостью во влажных и окисляющих средах, слеживаемостью и комкованием при хранении и эксплуатации, слабым сродством к веществу смазки и смазываемым поверхностям [4].

В настоящей работе исходные порошки металлов, используемые для приготовления присадок в смазке, обрабатывали по различной программе парами алкамона (А), триамона (Т) и гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости (ГКЖ). Для каждого металла (М) была получена серия образцов: М/ГКЖ, М/А, М/Т, М/Т/А, М/(А+Т), где М = Al, Fe, Ni, Cu.

Измерение интегральных показателей трения (пропорциональных силе трения) и их зависимостей от нагрузки проводили с помощью сертифицированного прибора АРП-11 акустическим методом в ультразвуковом диапазоне частот 20-300 кГц на горно-электромеханическом факультете СПГГИ (ТУ). Действие прибора основано на анализе параметров акустической эмиссии по ГОСТ 27655-88. С использованием этой установки были получены зависимости интегрального показателя трения D от давления в пятне контакта P для различных смазок типа индустриальное масло – присадка и для исходного масла И-20. В качестве реперных исходных твердых присадок к маслу использовали промышленно выпускаемые активированный уголь С, предварительно растертый в ступке до пылеобразного состояния, и алюминиевую пудру (ПАП-2). Кроме того, исследовали присадку ПАП-2/(А+Т), полученную газофазным модифицированием пудры ПАП-2 парами, выделяющимися под смесью алкамонотриамоновых жидких препаратов на основе катионных ПАВ – алкамона и триамона. По способности смазок снижать интегральный показатель трения в паре трения металл – металл их можно расположить в следующем ряду [2]:

$$\text{И-20/Al/(А + Т)} > \text{И-20/Al} > \text{И-20/С} > \text{И-20/Al}^{*} > \text{И-20},$$

где Al^{*} – присадка с массовой концентрацией 0,005 в масле; все другие присадки (Al-пудра ПАП-2) имели концентрацию 0,01.

Опыты показали, что для присадок на основе карбонильных металлов (Ni, Fe) в зависимости от вида поверхностной обработки понижение D в смазке происходит по мере ее гидрофобизации в последовательности М/(А+Т), М/ГКЖ, М/А, М/Т, М, М/Т/А, где присадка М/(Т+А) получена смесевой обработкой порошка металла, а М/Т/А – последовательным молекулярным наслаиванием препаратов А и Т на металл. Наиболее сильно из изученных наполнителей понижают показатель D порошки, модифицированные в поверхностном слое наноструктурами алкамона и триамона (катионоактивными препаратами) при массовой концентрации наполнителя в смазке 0,5-1,0 % [1].

У присадки на основе меди (ПМ) показатель D снижается в последовательности Cu, Cu/A, Cu/T, Cu/(A+T), Cu/T/A, Cu/ГКЖ. Интерес к изучению порошка меди как добавки к смазке обусловлен применением порошка меди марки ПМ в триботехнике [5, 7] и использованием медьсодержащих поверхностей для достижения «эффекта Гаркунова» [6].

Анализ вида кривых из работы [2] показывает, что все они, кроме кривой для присадки Al/(A+T), имеют сложную форму и характерный «зуб» зависимости при 25-30 МПА, отвечающий стадии притирки и распределения смазки по контактирующим поверхностям. Кривые для смазок с присадками Cu/(A+T) и Cu/A, как и в случае смазки с Al/(A+T), являются плавными и гладкими во всем диапазоне изменения давления и могут быть, вероятно описаны функцией $D = f(P)$ одного вида.

Математическая обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов (с использованием программного пакета MathCad) приводит к следующим уравнениям в виде показательной функции: для смазки с добавкой Cu/(A+T)

$$D = 5{,}477\mathrm{e}^{0{,}131P}; \qquad (1)$$

для смазки с добавкой Cu/A (рис.1)

$$D = 22{,}382\mathrm{e}^{0{,}083P}, \qquad (2)$$

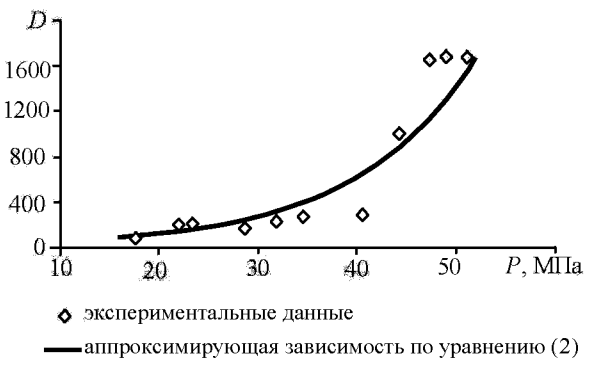


Рис.1. Зависимость интегрального показателя D от давления P в пятне контакта для смазки с присадкой Cu/A

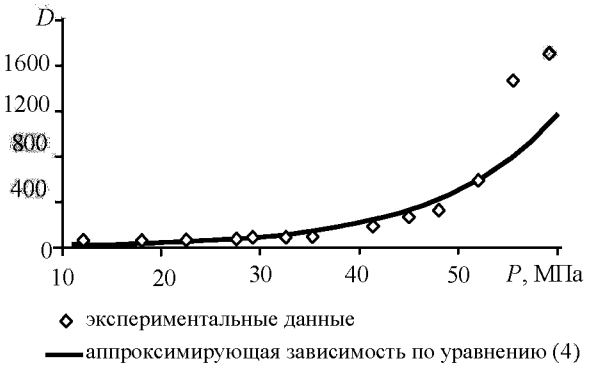


Рис.2. Зависимость интегрального показателя D от давления P в пятне контакта для смазки с присадкой Al/(A+T)

где e – основание натурального логарифма; массовая концентрация твердой добавки в обоих случаях одинакова и составляет 0,5 %.

Сравнение полученных выражений (1) и (2) с уравнениями, используемыми в трибологии [1, 5] и в теории контактного взаимодействия твердых тел [3], показывает, что по своей структуре полученные выражения наиболее напоминают зависимость вязкости изотермической смазки от давления:

$$\eta = \eta_0 e^{\alpha P}, \qquad (3)$$

где η – вязкость; η_0 – вязкость, соответствующая внешнему давлению и температуре; α – постоянный коэффициент вязкости.

По мнению автора работы [3], уравнение (3) является разумным описанием, подтверждаемым на опыте, для наблюдаемого изменения вязкости большинства смазок в характерном диапазоне давлений.

Подобие зависимостей D от P и η от P с учетом линейной связи $F_{тр}$ и η в режиме внутреннего трения [5] свидетельствует в пользу жидкостного (внутреннего) трения в смазке. Этот результат представляет особый интерес, поскольку с формированием наноструктур меди в смазке связаны первые наблюдения «эффекта безызносности» (эффекта Гаркунова), подразумевающего переход трения в жидкостный режим [6].

Для смазок с присадкой Al/(A+T) зависимость $D = f(P)$ удовлетворительно описывается уравнением (рис.2):

$$D = 8{,}5e^{0{,}082}. \qquad (4)$$

Восходящая ветвь (при $P \geq 35$ МПа) зависимости изменяется нелинейным образом: по экспоненте (или по закону параболы [2]). Для смазки с исходной алюминиевой пудрой и самого масла И-20 соответствующие зависимости являются линейными.

Интересен тот факт, что в уравнениях, аппроксимирующих экспериментальные данные для образцов смазки с присадками Al/(A+T) и Cu/A, коэффициент при P практически совпадает (0,082 и 0,083).

Благодарим доц. В.В. Тарабана за помощь в нахождении уравнений для описания опытных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антифрикционные свойства индустриального масла с присадками наноструктурированных металлов / А.Г.Сырков, В.В.Тарабан, Д.С.Быстров и др. // Тез. докл. Второй всероссийской конференции с международным интернет – участием «От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к наноиндустрии». Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2009. С. 115.

2. Влияние наноструктурированных добавок металла на антифрикционные свойства индустриального масла / Д.С.Быстров, А.С.Фокин, И.В.Пантюшин и др. // Записки Горного института. 2008. Т. 182. С. 227-230.

3. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.

4. Кластеры, структуры и материалы наноразмера: инновационные и технические перспективы / М.И.Меретуков, М.И.Цепин, А.Г.Сырков и др. М.: Руда и Металлы, 2005. 128 с.

5. *Мышкин Н.К.* Трение, смазка, износ / Н.К.Мышкин, М.И.Петроковец. М.: Физматлит, 2008. 368 с.

6. Основы прикладной нанотехнологии / А.А.Абрамян, В.И.Балабанов, В.И.Беклемышев и др. М.: Магистр-Пресс, 2008. 208 с.

7. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости: Справочник / Под ред. В.М.Школьникова. М.: Химия, 1989. 360 с.

REFERENCES

1. *Syrkov A.G., Taraban V.V., Bystrov D.S. etc.* Antifrictional properties of industrial oil with additives of nanostructured metals // Abstr. Second All-Russian conference with the international internet-involving «From nanostructures, nanomaterials and nanotechnology to nanotechnology». Izhevsk: IzhGTU, 2009. P. 115.

2. *Bystrov D.S., Fokin A.S., Pantyushin I.V. etc.* Influence of additives of nanostructured metals on antifrictional properties of industrial oil // Proceeding of the Mining Institute, 2009. V. 182. P. 227-230.

3. *Johnson K.* Mechanics of contact interactions. Moscow: Mir, 1989. 510 p.

4. *Meretukov M.I., Tsepin M.I., Syrkov A.G. etc.* Nanosize clusters, structures and materials: innovation and technical perspectives. Moscow: Ore and Metals, 2005. 128 p.

5. *Myshkin N.K., Petrokovets M.I.* Friction, lubrication, wear. Friction, lubrication, wear. Moscow: Fizmatlit, 2008. 368 p.

6. *Abramyan A.A., Balabanov V.I., Beklemyshev V.I. and etc.* Foundations of Applied nanotechnology. Moscow: Master-Press, 2008. 208 p.

7. Fuels and lubricants, technical liquids. Handbook / Ed. V.M.Shkolnikova. Moscow: Khimiya, 1989. 360 p.

Научный руководитель д-р техн. наук, профессор *А.Г.Сырков*