

На правах рукописи

**Хуссейн Хайдар А.**

**ТВЕРДЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ  
ПРИСАДКИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ГРАФИТА  
ДЛЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.04 — Трение и износ в машинах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

**Научные руководители**

доктор технических наук, профессор

Мельников Вячеслав Георгиевич
----------------------------------

доктор технических наук, профессор

Годлевский  
Владимир Александрович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор

Гинзбург  
Борис Моисеевич

доктор технических наук, доцент

Берёзина  
Елена Владимировна

Ведущая организация

ОАО «ТОЧПРИБОР»,  
г. Иваново

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_ час. на заседании диссертационного совета Д 002.075.01 при Институте проблем машиноведения РАН по адресу: 199178 Санкт-Петербург, Васильевский остров, Большой проспект, 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМАШ РАН

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор —

В.В. Дубаренко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Одним из путей повышения долговечности и надежности машин является улучшение противоизносных и антифрикционных свойств смазочных материалов (СМ). Это может быть достигнуто введением присадок и активных наполнителей. Хороший результат демонстрируют в пластичных смазочных материалах (ПСМ) порошковые присадки твердых смазочных материалов (ТСМ). Большинство из них хорошо совмещаются с базовой основой, другими присадками и наполнителями, что дает возможность широко варьировать их состав и свойства. Чаще всего используют вещества слоистого («анизодесмического») строения — графит, дисульфид молибдена (молибденит), а также сульфид серебра, пористый свинец. Часто в качестве порошковых добавок используют «металлоплакирующие» наполнители («креметаллизанты»).

В настоящей работе предложено расширить диапазон применения твердосмазочных трибоактивных компонентов ПСМ путем использования композитных порошков (частицы ТСМ с покрытиями). Этот путь имеет практическое и теоретическое значение для разработки и использования новых эффективных ПСМ. Механизм действия композитных ТСМ мало изучен. В литературе нет данных, обосновывающих применение порошков с покрытиями. Работа выполнена в рамках исследований Кафедры механики ИГХТУ в области разработки новых компонентов ПСМ, в соответствии с тематическим планом НИР ИГХТУ на 2006-2010 г.

**Цель и задачи исследования.** *Целью работы* является повышение триботехнических характеристик пластичных смазочных материалов за счет введения порошковых ТСМ композитного состава. В рамках названной цели предполагалось решить следующие задачи.

1. Разработать теоретическую концепцию и математическую модель, описывающую механизм действия композитных порошков в качестве трибоактивных присадок.
2. Выявить зависимость между химическим составом, концентрацией и триботехническими параметрами композиционных присадок различной природы.
3. Создать новые, эффективные присадки порошков с покрытиями.

### Автор защищает

1. Теоретическую концепцию, объясняющую эффективность композиционных (покрытых) порошковых ТСМ избытком поверхностной энергии полидисперсной системы.

2. Математическую модель и методику расчета поверхностной энергии композитной присадки по сравнению с раздельным введением компонентов.
3. Новые составы композитных порошковых присадок.
4. Количественные зависимости, связывающие состав и концентрацию композиционных присадок в ПСМ с их триботехническими характеристиками.

#### **Научная новизна работы заключается в:**

1. разработке теоретических положений, обосновывающих применение в смазочных материалах композиционных (покрытых) порошковых твердосмазочных присадок;
2. получении количественных закономерностей триботехнической эффективности композиционных присадок ТСМ;

#### **Практическая полезность**

Разработана лабораторная технология получения композитных присадок ТСМ, получены модельные составы ПСМ повышенной триботехнической эффективности, в том числе композитных присадок с двухслойным покрытием. На способ получения графитового порошка с двухслойным металлическим покрытием авторским коллективом при участии автора диссертации была подана заявка на патент (Заявка № 2008121021/04(024901), приоритет от 26.05.2008), по которой получено положительное решение. Техническая информация о результатах диссертационной работы передана организации-производителю для разработки на этой основе серийных СМ и организации малотоннажного производства. Результаты диссертации используются в учебном процессе кафедры «Механика» ИГХТУ при чтении курса «Триботехника», выполнении студентами лабораторных, курсовых и дипломных работ.

#### **Методы исследования**

Задачи, поставленные в работе, решались теоретическими и экспериментальными методами. В теоретических исследованиях применены основные положения физикохимии поверхностей. Экспериментальные исследования выполнены в соответствии с известными методиками выполнения триботехнических испытаний по измерению трения и износа. Новые типы покрытий порошков создавали с использованием химической технологии нанесения покрытий на неметаллические поверхности.

Частицы присадок исследовали методами оптической и электронной микроскопии, электронографии. Для оценки гранулометрического состава порошков применяли соответствующие методы математической статистики. Исследование поверхностей трения производили методами оптической микроскопии, профилометрии и путем измерения микротвердости. Эксперимен-

тальные зависимости обрабатывали с использованием регрессионного анализа.

**Обоснованность и достоверность результатов.** Основные результаты и выводы настоящей работы являются обоснованными и достоверными, поскольку: применена статистическая обработка результатов эксперимента, использованы стохастические модели при построении экспериментальных зависимостей. Имеется удовлетворительное согласование теоретических результатов с экспериментальными данными настоящей работы, а также литературными данными о других исследованиях; корректным применением известных методик физико-химических исследований к выбранным классам смазочных материалов.

**Личный вклад автора.** Лично автору принадлежат: направление работы, постановка задач, программа и методология исследований; непосредственное выполнение всех экспериментов, построение математических моделей, установление основных закономерностей, формулирование выводов, разработка на базе выполненных исследований составов ПСМ.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях, симпозиумах, семинарах Междунар. научно-методич. конф. Иваново, ИГСХА, 2007 г.; Научно-практической научной конференции по трибологии. Иваново, ИвГУ, 2008 г.; Научно-практической научной конференции ИГСХА, Иваново, 2008 г.; VIII Междунар. научн. конф. «Трибология и надежность» С-Петербург, 23–25 окт. 2008 г.; заседании научно-технического совета ИГХТУ, май 2008 г.; научном семинаре Ивановского института государственной противопожарной службы МЧС РФ, январь 2009 г.; научном семинаре Института наноматериалов Ивановского государственного университета, январь 2008 г.; Городском семинаре по механике Института проблем машиноведения РАН, С.-Петербург, март 2009 г., Региональной научно-техн. конф. «Материаловедение и надежность триботехнических систем», Иваново, апрель 2009 г.; ежегодных научных конференциях преподавателей и сотрудников кафедры «Механика» ИГХТУ, 2006–09 гг.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

Результаты работы нашли применение в учебном процессе кафедры механики Ивановского государственного химико-технологического университета в виде лабораторных практикумов, курсовых и дипломных работ студентов; вошли в ряд дисциплин, читаемых на факультете.

**Публикации.** Основное содержание работы изложено в 12 печатных работах, в том числе 1 работа — в журнале, входящем в список ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 155 страницах, содержит список условных обозначений, введение, 6 основных глав, заключе-

ние, список литературы из 154 наименований. Работа включает 46 рисунков и 8 таблиц.

### **Основное содержание работы**

Во **Введении** дается общая характеристика исследуемой проблемы, приводятся данные об актуальности, новизне, апробации и практическом использовании результатов работы.

**Глава 1** содержит аналитический обзор проблемы действия трибоактивных присадок в составе смазочного материала, механизма возникновения противоизносных и противозадирных свойств. Показано, что общепринятых теоретических критериев подбора присадок, улучшающих смазочные свойства материалов в широком диапазоне режимов трения, пока нет. Первая глава завершается выводами, формулированием цели и задач исследования.

**Глава 2** посвящена выбору материалов для исследования: материалов поверхностей трения, базовых жидких и пластичных СМ (ПСМ), поверхностно-активных веществ (ПАВ), присадок ТСМ.

**В 3 главе** предложено теоретическое описание, объясняющее особенности смазочного действия присадок мелкодисперсного графита с металлическим покрытием. Ранние эксперименты В.Г. Мельникова и А.А. Калинина и наши опытные данные показали, что в составе ПСМ присадка графита с металлизированной поверхностью демонстрирует лучшие смазочные характеристики по сравнению с двухкомпонентной присадкой с отдельно введенными компонентами графит + металл, где компоненты взяты в тех же количественных соотношениях.

Было выдвинуто предположение, что различие в действии присадки-композита и отдельно введенных компонентов состоит в том, что трибоактивные материалы (в данном случае графит и металл) находятся в различном коллоидном состоянии с различными наборами внутренних межфазных поверхностей. Объяснению особенностей смазочного процесса с участием композита, но нашему мнению, может служить оценка различия величины свободной поверхностной энергии дисперсной фазы для двух сравниваемых случаев.

Исходящее из этих посылок количественное модельное описание должно было ответить на следующие вопросы: 1) Как различается величина свободной поверхностной энергии, когда твердосмазочные компоненты а) сочетаются путем покрытия частиц одного компонента пленкой другого и б) существуют в среде в том же массовом соотношении в виде свободнодисперсных фаз? 2) Как это различие изменяется в условиях разрушения, измельчения частиц различного типа (с покрытием и без него) в условиях трения?

При построении модели необходимо учесть тот факт, что в процессе трения частицы, попадающие в контактную зону, деформируются и разрушаются, образуя новую коллоидную систему повышенной дисперсности. В поряд-

ке постановки задачи для предполагаемого теоретического расчета примем следующие допущения.

1) Пусть сравниваемые системы для простоты рассмотрения будут монодисперсными, с размером частиц  $d$  (рис. 1), а композит имеет покрытие толщиной  $\delta$ . Форму частиц в этом приближении удобно представить сферой.

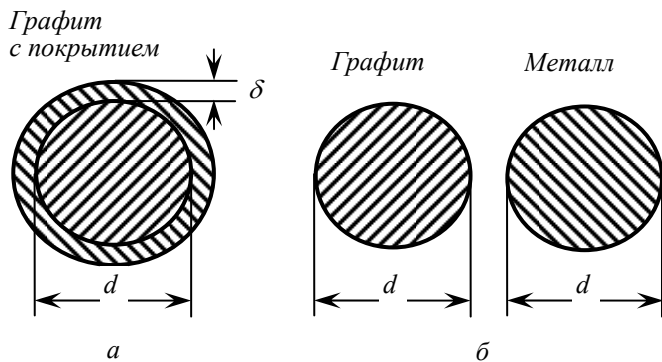


Рис. 1. Сравнимые модельные дисперсные системы: *a* — графит с покрытием и *б* — механическая смесь монодисперсных частиц графита и того же металла, который используется для нанесения покрытия.

2) При введении каждого из трех типов частиц в смазочную дисперсионную среду их поверхности можно охарактеризовать специфической удельной свободной поверхностной энергией:  $\sigma_1$  — энергия поверхности графит — СМ;  $\sigma_2$  — энергия поверхности металл — СМ;  $\sigma_3$  — энергия поверхности металл — графит.

3) Положим, что частицы не взаимодействуют между собой, и что также отсутствует химическое взаимодействие твердых поверхностей со смазочным материалом.

4) Предположим, что в процессе трения происходит измельчение частиц (как композиционных, так и простых) до некоторого характерного постоянного размера, по порядку величины сопоставимого с толщиной покрытия  $\delta$ . Положим при этом, что  $\delta \ll d$ .

5) Пусть суспензия присадки в СМ имеет массовую концентрацию  $c$ .

6) Влиянием внутренних поверхностей базового ПСМ пренебрегаем.

На основании приведенных выше допущений рассчитывали различие избыточной внутренней поверхностной энергии суспензий, содержащих два компонента: графит и медь при композитном (в виде покрытия) и раздельном введении присадок. При расчете учитывали степень измельчения дисперсной

фазы в процессе трения. В результате можно оценить различие в поверхностных энергетических состояниях смазочных составов, подаваемых в зону трения, в которых компоненты вводятся раздельно или в композиционной форме. С учетом вышеперечисленных допущений получены следующие формулы для расчета поверхностной энергии (табл. 1).

Таблица 1. Формулы расчета поверхностной энергии  $\varepsilon$  порошковых присадок

Способ введения присадки	До трения	После трения
Раздельное введение графита и меди	$\varepsilon = \frac{0,06}{d} \left( \sigma_1 \frac{K_1}{\rho_1} + \sigma_2 \frac{K_2}{\rho_2} \right)$	$\varepsilon' = \frac{0,06}{d} \left( \sigma_1 \frac{K_1}{\rho_1} \frac{d}{\delta} + \sigma_2 \frac{K_2}{\rho_2} \right)$
Композитная присадка	$\varepsilon_K = \frac{0,06}{d} \frac{K_1}{\rho_1} (\sigma_2 + \sigma_3)$	$\varepsilon'_K = \frac{0,06}{\delta} \left( \sigma_1 \frac{K_1}{\rho_1} + \sigma_2 \frac{K_2}{\rho_2} \right)$

где:  $d$  — диаметр частиц субстрата и металлической дисперсии;  $K_1$  и  $K_2$  — массовые содержания графита и меди;  $\sigma_1$  — энергия поверхности графит — СМ;  $\sigma_2$  — энергия поверхности металл — СМ;  $\sigma_3$  — энергия поверхности металл — графит;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности графита и меди

Расчетные формулы, представленные в табл. 1, использовали для расчета соотношений поверхностных энергий в случае, когда массовые концентрации графита и меди одинаковы, т.е.  $K_1 = K_2 = 1,5\%$  мас.

В отсутствие точных формул для поверхностной энергии твердых тел приближенно оценить ее позволяет *правило Стефана*:

$$\sigma \cong \frac{A}{V_m^{2/3}} \frac{Z_s}{N_A^{1/3}} \frac{Z}{Z} \quad (1)$$

где  $A$  — теплота сублимации или испарения;  $V_m$  — молярный объем вещества;  $N_A$  — число Авогадро;  $Z_s$  — координационное число молекул, находящихся в поверхностном монослое;  $Z$  — координационное число (число соседей молекулы) в объеме конденсированной фазы.

Для твердых тел величину  $\sigma$  экспериментально оценить очень трудно. Поэтому для проведения оценочных расчетов будем считать, согласно правилу Стефана (1), что удельная поверхностная энергия пропорциональна мольной теплоте сублимации и обратно пропорционально молярному объему вещества в степени  $2/3$ .



Так как теплота сублимации меди примерно в 2 раза выше, чем у графита, а мольные объемы меди и графита приблизительно одинаковы, соответственно, следовательно, удельная поверхностная энергия меди приблизительно в 2 раза превышает аналогичную величину у графита. Отношение плотностей меди и графита равно приблизительно 4.

Для определения межфазной поверхностной энергии графит-медь  $\sigma_3$  используем также *правило Антонова*, согласно которому, межфазная удельная поверхностная энергия конденсированных сред определяется разностью удельных поверхностных энергий тел:  $\sigma_3 = |\sigma_1 - \sigma_2|$ . Во всех последующих расчетах принимали соотношение размера частицы субстрата и покрытия  $d/\delta = 10$ , которое мы оценили выше из условия равенства масс субстрата и покрытия (что обеспечивалось технологическим процессом нанесения покрытия). Результаты вычислений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Соотношение значений поверхностной энергии порошковых присадок графита и меди при раздельном и композиционном введении в СМ

	Суммарная поверхностная энергия		Соотношение поверхностных энергий при раздельном и композиционном введении присадок
	Раздельно введенные компоненты графит и медь	Смазка-композит: графит с медным покрытием	
До процесса трения	$\varepsilon$	$\varepsilon_K$	$\frac{\varepsilon_K}{\varepsilon} \cong 2$
После процесса трения	$\varepsilon'$	$\varepsilon'_K$	$\frac{\varepsilon'_K}{\varepsilon'} \cong 1,4$
Соотношение энергий после и до процесса трения	$\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon_1} \cong 7$	$\frac{\varepsilon'_2}{\varepsilon_2} \cong 5$	

Таким образом, в результате моделирования было показано, что «композитное» введение двухкомпонентных присадок, когда одна из них является покрытием, позволяет дисперсной системе запастись избыточную поверхностную энергию за счет образования новых поверхностей раздела «субстрат — покрытие». Тогда новая «высокоэнергетичная» дисперсная система оказывается способной более эффективно взаимодействовать с поверхностью трения, и способствовать антифрикционному эффекту.

Если предложенная гипотеза, оказывается верной, то тогда открывается перспектива дальнейшего использования наблюдаемого эффекта — за счет образования двух- и многослойного металлического покрытия на базовой порошковой основе твердой присадки: добавление новых межфазных границ будет способствовать усилению смазочного действия. Данные выводы способствовали постановке задачи эксперимента по созданию одно-и двухслойных покрытых частиц и их триботехнических испытаний при различных режимах трения.

**Глава 4** посвящена получению порошков графита с однослойным и двухслойным покрытиями. В электролите осуществляли процесс химического меднения и бронзирования порошка присадки. Под «бронзированием» в нашей работе подразумевался процесс одновременного осаждения меди и олова на поверхность субстрата. В работе дано общее описание технологии процесса нанесения покрытий. Двухслойное покрытие получали путем дополнительного осаждения олова на медное покрытие. Время осаждения меди и олова при выбранной технологии не превышало 7-10 минут. Требуемая толщина слоя покрытия определялась расчетом. На способ получения графитового порошка с двухслойным (бронза + олово) покрытием авторским коллективом при участии автора диссертации была подана патентная заявка (Заявка № 2008121021/04(024901), приоритет от 26.05.2008). Порошок меди для сравнительных испытаний получали катодным осаждением из электролита (рис. 2).

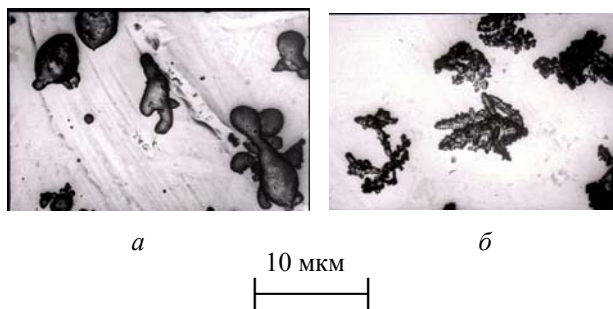


Рис. 2. Частицы коллоидного графита С-2 (*а*) и электролитической порошковой меди (*б*)

**В главе 5** описано изучение размерных и структурных характеристик порошков. Снимки дисперсий порошков присадок, полученные после УЗ-распыления на просвечивающем электронном микроскопе ЭВЛ-100, обрабатывались с целью получения распределения частиц по размерам. Гистограммы этих распределений представлены на рис. 3. Гистограмма показывает, что нанесение покрытий на частицы графита не приводит к существенному из-

менению статистического разброса размеров дисперсии — мода распределения находится в диапазоне 8...10 мкм. Это говорит о том, что малая толщина покрытий не приводит к существенному увеличению среднего размера частиц и согласуется с нашей гипотезой о том, что наличие покрытия является причиной накопления избытка поверхностной энергии, способствующей смазочной и антиизносной эффективности порошков присадок с покрытиями. Кроме электронной микроскопии, производили электронографию частиц с покрытиями и без покрытий для подтверждения наличия в порошке металлической составляющей.

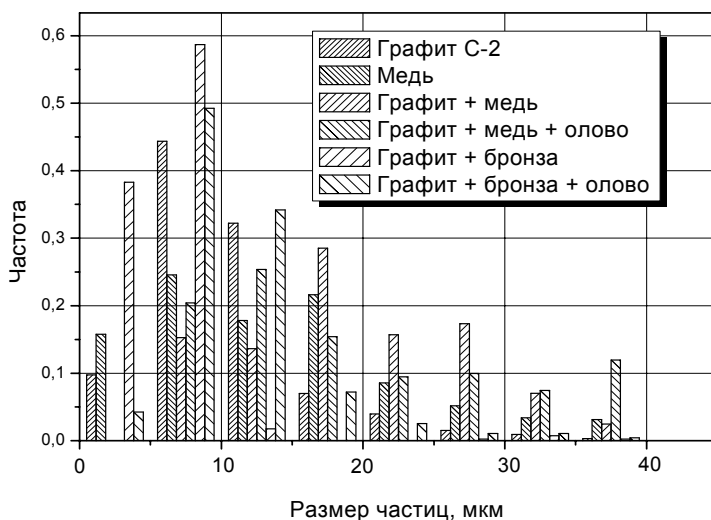


Рис. 3. Частотная гистограмма распределения частиц присадок без покрытия и с покрытиями по размерам

**Шестая глава** посвящена триботехническим испытаниям смазочных материалов с присадками порошков с покрытиями и без них. Измеряли коэффициент трения, интенсивность изнашивания, микротвердость поверхностей трения. Опыты производили на машине трения СМТ-1. Варьировали скорость трения, нормальную нагрузку. Некоторые результаты испытаний приведены на рис. 4 и 5.

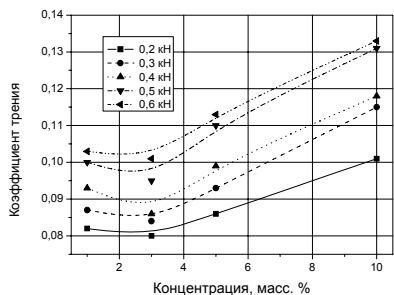


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от концентрации порошка коллоидного графита С-2 в медицинском вазелине при  $\nu = 1$  м/с при различной нормальной нагрузке

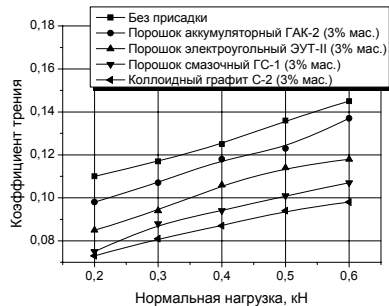


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки для пары трения «сталь 45 — сталь 45» при использовании 3% мас. присадки углеродсодержащих порошков различной природы в медицинском вазелине ( $\nu = 1$  м/с)

Рис. 6 демонстрирует факт, что введение омедненного графита приводит к значимому (примерно 30%-ному) повышению антифрикционного эффекта композитной присадки по сравнению с тем случаем, когда те же самые компоненты введены в том же количестве, но раздельно. Далее было необходимо установить, имеет ли место обнаруженный эффект в другой базовой среде: не в поверхностно инактивном медицинском вазелине, а в стандартной пластичной смазке Литол-24. Результаты такого эксперимента, выполненного с применением ПСМ, представлены на рис. 7. Здесь мы наблюдаем ту же картину, что и в случае вазелина (см. рис. 6): композитная присадка (омедненный графит) дает лучший эффект, чем присадки меди и графита введенные индивидуально, либо раздельно в равной пропорции.

Идея об эффективности двухслойного покрытия была реализована с использованием двойного покрытия «бронза + олово». Эти данные приведены на рис. 8. Далее в главе 6 приводятся результаты исследования поверхностей трения. Реализация смазочного эффекта от применения твердосмазочных присадок типа порошка графита с покрытием предположительно должна отражаться на свойствах поверхностей трения. Следующая диаграмма показывает, каким образом влияет наличие в ПСМ Литол-24 присадки омедненного графита на микротвердость поверхности стали 45 после длительного трения ( $S = 20$  км,  $\nu = 1$  м/с;  $P = 0,4$  кН).

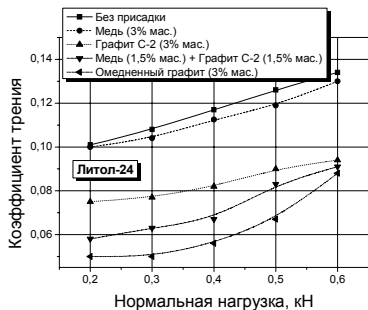


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения пары сталь 45 – сталь 45 от нормальной нагрузки при добавке в ПСМ Литол-24 различных твердосмазочных присадок: меди, графита, смеси меди с графитом и омедненного графита.

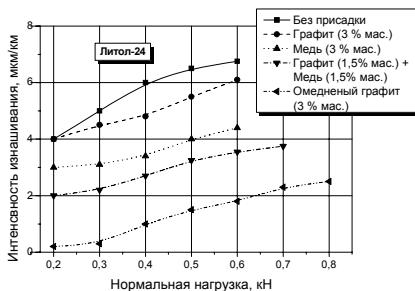


Рис. 7. Зависимость интенсивности изнашивания пары сталь 45 – сталь 45 от нормальной нагрузки в присутствии ПСМ Литол-24 с порошковыми присадками различного состава

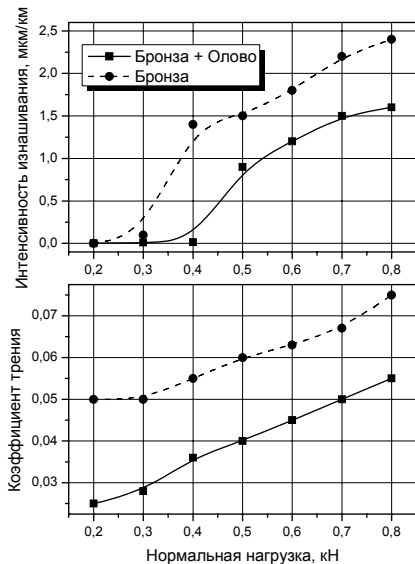


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения и интенсивности изнашивания пары трения сталь – сталь от величины нормальной нагрузки при трении в смазочной композиции на основе Литол-24, наполненного порошком графита с покрытиями: однослойным (бронзированным) и двухслойным (бронзирование + лужение). Концентрация каждого порошка в ПСМ — 3% мас.

На диаграмме можно наблюдать факт некоторого увеличения микротвердости поверхности трения, возникающего при использовании присадки меденного графита по сравнению ПСМ без присадки. Причиной этого небольшого, но уверенно регистрируемого упрочняющего эффекта может служить наличие на поверхности защитного слоя, содержащего графит и мягкие металлы (медь и олово), которые снижают дефектность поверхностного стального подслоя.

На рис. 10 приведены трибограммы процесса приработки образцов в среде вазелинового масла с присадкой графита с нанесенным металлическим покрытием, однослойным и двухслойным. Показано, что меньший момент трения и меньший период приработки (до стабилизации момента) соответствует присадке графита с двухслойным покрытием (бронзирование + лужение).

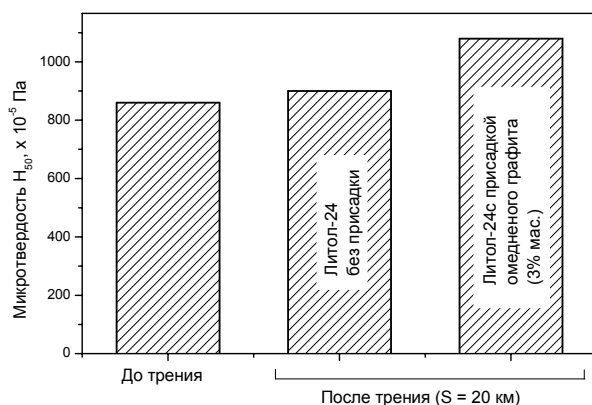


Рис. 9. Зависимость микротвердости поверхности трения стали 45 от пути трения ( $S = 20 \text{ км}$ ,  $v = 1 \text{ м/с}$ ;  $P = 0,4 \text{ кН}$ ) при трения в смазочной композиции на основе ПСМ Литол-24 без присадки и с присадкой омедненного графита

## Выводы

Выполненная работа в целом показала актуальность и благоприятные перспективы практического использования твердых порошковых присадок на основе графита, частицы которого покрыты одним или двумя слоями мягкого металла. В итоге работы автор сформулировал следующие общие выводы.

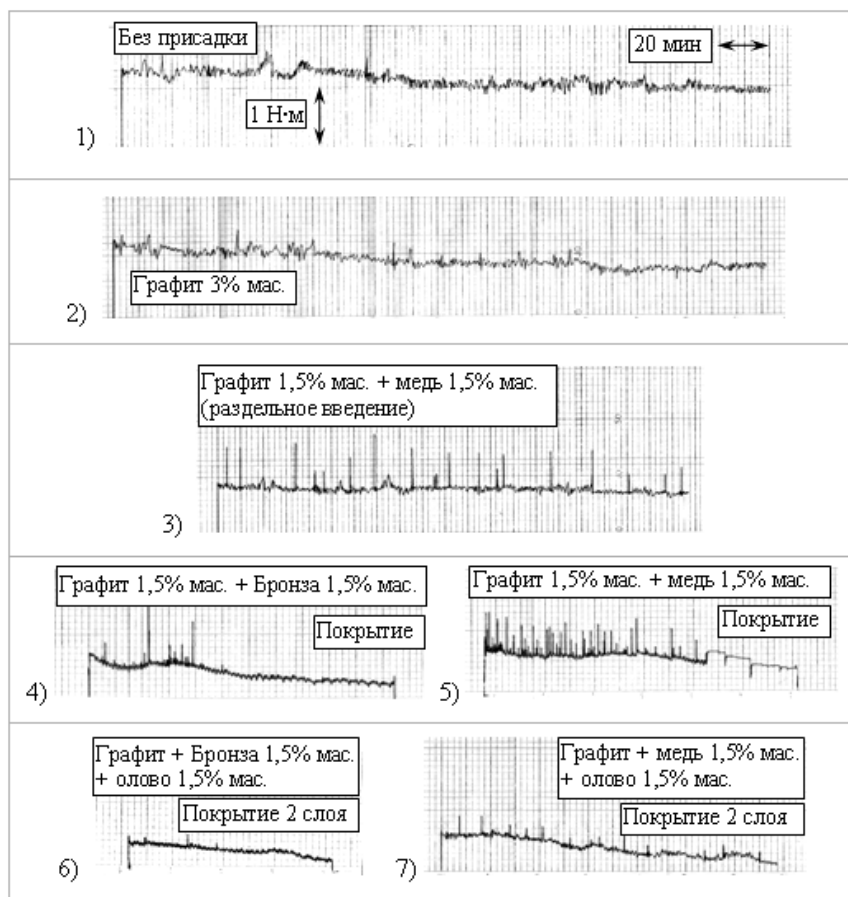


Рис. 10. Трибограммы процесса приработки образцов в среде вазелинового масла с присадкой графита с нанесенным металлическим покрытием, одно-слойным и двухслойным

1. Экспериментально обнаружено повышение эффективности смазочной среды при трении пары сталь–сталь при добавке в СМ композитных присадок графита, покрытого металлом по сравнению со случаем раздельного введения тех же количеств графита и металла, введенных раздельно. Данный эффект имел место как для инактивного медицинского вазелина, так и пластичной смазочной среды (литиевая смазка).

2. Выдвинута теоретическая концепция, согласно которой введение в базовую смазочную среду графита и металла в качестве тонкослойного покрытия графитовых частиц должно приводить к повышению антифрикционной и антиизносной эффективности присадки по сравнению со случаем, когда металлическая и неметаллическая присадки введены раздельно.
3. Предложено качественное описание механизма действия композитной присадки, основа которого заключается в том, что система с покрытием обладает дополнительной межфазной энергией, сосредоточенной на межфазных границах между порошковым субстратом и покрытием, (а также между двумя слоями покрытия, если покрытие двухслойное).
4. Разработана геометрическая математическая модель, позволяющая оценивать избытки поверхностной энергии покрытых частиц присадки по сравнению с разделенной двухкомпонентной дисперсией. Модель рассматривает состояние системы до трения и изменение поверхностной энергии при размерной трансформации частиц в процессе трения.
5. Получены триботехнические характеристики композитных графито-металлических присадок к ПСМ с однослойным и двухслойными покрытиями. Показано, что при монослойном медном покрытии коэффициент трения может снижаться до 30%, а интенсивность изнашивания — на порядок по сравнению со случаем раздельного введения присадок.
6. Установлено для пары трения сталь – сталь, что при введении порошковых присадок графита, меди и композитных наблюдается оптимум смазочного действия на уровне концентрации присадки в диапазоне 3...4 мас. %.
7. Переход от однослойного медного покрытия к двухслойному типа «медь + олово» дополнительно снижает коэффициент трения на 20–30%, а интенсивность изнашивания — в 2–3 раза.
8. Обнаружен эффект незначительного упрочнения стальной поверхности трения после трения в ПСМ с композитной присадкой

### **Содержание диссертации опубликовано в следующих основных работах**

1. Хуссеин Х.А., Зарубин В.П. Триботехнические свойства пластичных смазок, наполненных твердыми смазочными материалами // Тез. докл. Междунар. научно-методич. конф. Иваново, ИГСХА, 2007 г. С. 157–158.
2. Хуссеин Х.А., Мельников В.Г. Исследование триботехнических свойств наполненных порошками твердых смазок // Современные наукоемкие технологии. Журнал регионального отд. РАЕН, Иваново, ИГХТУ, 2007 г. № 4. С. 62–67.



3. Хуссеин Х.А., Мельников В.Г. Исследование влияния порошков твердых смазочных материалов и модифицирования их поверхности на триботехнические свойства наполненных смазочных композиций // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. № 6. С. 18–22.
4. Хуссеин Х.А., Мельников В.Г. Исследование антифрикционных свойств пластичных смазочных материалов, наполненных порошками твердых смазок // Физика, химия и механика трибосистем. Иваново, ИвГУ, 2007. № 6. С. 48–50.
5. Хуссеин Х.А., Зарубин В.П. Исследование триботехнических свойств смазочных композиций, наполненных порошками твердых смазок // Тез. докл. Научно-практич. конф. Иваново, ИвГУ, 2008 г. С. 83–84.
6. Хуссеин Х.А., Зарубин В.П. Исследование влияния порошков твердых смазочных материалов на триботехнические свойства пластичных смазок // Мат-лы Научно-практич. конф. Иваново, 2008. С. 205–208.
7. Хуссеин Х.А., Годлевский В.А., Замятина Н.И., Зарубин В.П. Исследование триботехнических свойств смазочных композиций, наполненных порошком металлизированного графита // Трибология и надежность. Сб. научн. трудов VIII Междунар. конф. СПб: С-Петербург. гос. ун-т путей сообщения. 2008. С. 66–72.
8. Хуссеин Х.А., Годлевский В.А., Волков А.В. Механизм смазочного действия присадок мелкодисперсного графита с модифицированной поверхностью частиц // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2009. Т. 52, Вып. 1. С. 115–118.
9. Годлевский В.А., Богомолов М.В., Моисеев Ю.Н., Манерцев А.А., Хуссеин Х.А. Предпосылки разработки новых спеченных подшипниковых смазочных материалов для узлов трения пожарно-технического и аварийно-спасательного оборудования // Вестник Ивановского института ГПС МЧС России. 2008. № 2. С. 38–42.
10. Волков А.В., Годлевский В.А., Замятина Н.И., Хуссеин Х.А. Композитные присадки твердосмазочного действия // Физико-химическая механика процесса трения. Иваново, изд.-во ИвГУ, 2008. С. 118–121.
11. Хуссеин Х.А., Волков А.В., Годлевский В.А., Киселев Б.Р. Расчет свободной поверхностной энергии порошка металлизированного графита, применяемого в качестве трибоактивной присадки к пластичным смазочным материалам // Сб. докладов Региональной научно-техн. конф. «Материаловедение и надежность триботехнических систем», Иваново, апрель 2009 г. Изд. ИГХТУ. С. 22–25.
12. Решение патентной экспертизы о выдаче патента РФ по заявке № 2008121021/04(024901). Смазочная композиция. Авторы: Хуссеин Х.А., Замятина Н.И., Зарубин В.П. Приоритет от 28.07.2008.



Отпечатано с оригинала макета, предоставленного автором

Подписано в печать 06.04.09. Усл. п. л. 1,00 Уч.-изд. л. 1,03.  
Формат 60x84 1/16. Тираж 80 экз. Заказ 732.

Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Ивановский государственный химико-  
технологический университет». 153000 г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7.

Отпечатано на полиграфическом оборудовании Кафедры экономики и финансов ГОУ  
ВПО «ИГХТУ»