На правах рукописи

Юдин Алексей Сергеевич

РАЗРАБОТКА ИЗНОСОСТОЙКИХ, АНТИФРИКЦИОННЫХ ОРГАНОТЕКСТОЛИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИОКСАДИАЗОЛЬНЫХ ТКАНЕЙ И ПОЛИМЕР-МИНЕРАЛЬНЫХ МОДИФИКАТОРОВ

05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в лаборатории наполненных полимерных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук

Научный руководитель: Доктор химических наук, профессор
Краснов Александр Петрович
главный научный сотрудник,
руководитель группы наполненных полимерных систем
ИНЭОС РАН

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Куперман Александр Михайлович
заведующий лабораторией армированных пластиков,
Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

Доктор технических наук, профессор
Шевердяев Олег Николаевич
заведующий кафедрой химической технологии переработки полимерных материалов и органических веществ,
Московского государственного открытого университета имени В.С. Черномырдина

Ведущая организация:
ОАО «Межотраслевой институт переработки пластмасс – НПО «Пластик»

Защита диссертации состоится 18 декабря 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.01 в РХТУ им. Д.И. Менделеева по адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., д.9, в конференц-зале (ауд. 443)

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-информационном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Автореферат разослан _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.204.01 Ю.В. Биличенко

Актуальность работы. В последнее десятилетие резко возросла потребность в антифрикционных высокоизносостойких полимерных материалах, способных работать в сверхтяжелых условиях эксплуатации, как правило, без жидкой смазки, в паре со стальными контртелами как на воздухе, так и в различных, в том числе агрессивных средах. Резко возросли требования к узлам трения в железнодорожном транспорте, подъёмном оборудовании, тяжело нагруженном автотранспорте, металлопрокате, добывающей промышленности и др.

Сложность проблемы создания высокоизносостойких и антифрикционных волокноармированных материалов заключается в том, что при повышении комплекса прочностных свойств и износостойкости волокон возрастает их коэффициент трения, так что ряд подобных волокон с успехом используется в тормозных колодках в качестве фрикционного наполнителя. Новый подход к созданию полимерных, высокоизносостойких, волокнонаполненных материалов был заложен в 1985 г. исследованием полиоксадиазольных волокон (ПОД-волокно) совместно с фенолоформальдегидным связующим (ФФ-полимер), удачно решавшим комплекс требований, предъявляемых к подобным материалам. В связи с общими проблемами развития отечественной промышленности, научные работы в этом направлении велись в крайне ограниченном объеме, что не может удовлетворить современные требования народного хозяйства.

Цели и задачи. Целью диссертационного исследования является разработка модифицированных износостойких органотекстолитов на основе ПОД-тканей и ФФ-полимера с улучшенными антифрикционными и термофрикционными свойствами. Для выполнения намеченной цели требовалось решить ряд задач:

- исследовать процесс трения органотекстолитов и углепластов, изучить физико-химические процессы, происходящие в поверхностных слоях подобных материалов со связующем – ФФ-полимером;

- провести разработку полимер-минеральных модификаторов, для чего исследовать возможности использования наноламеллярных соединений;

- разработать технологию и исследовать свойства модифицированных органотекстолитов.

Научная новизна. Созданы научные основы разработки антифрикционных, износостойких органотекстолитов на основе ПОД-тканей, ФФ-полимера и полимер-минеральных модификаторов, включающие исследование влияния химического состава

модифицированного органотекстолита на трение и износ, изучение трибохимических процессов при трении компонентов материала: связующего ФФ-полимера, модификаторов – нано-MoS_2 и нано-графита и исследование процесса трения органотекстолита. Это позволило обосновать состав полимер-минерального модификатора и других компонентов модифицированного органотекстолита.

Обнаружено два основных этапа трения органотекстолитов: период низкого (0,22-0,24) коэффициента трения (f), связанного с наличием на поверхности только ФФ-полимера и продолжительный период «колебательного» трения с f до 0,5-0,7. Этот этап обусловлен избирательным износом ФФ-полимера с переходом к трению по износостойким, но не антифрикционным ПОД-нитям, что определило необходимость разработки модифицированных органотекстолитов с полимер-минеральными модификаторами для создания антифрикционной опорной поверхности.

Установлено, что первичные акты взаимодействия основного связующего органотекстолитов – ФФ-полимера при трении по стали характеризуются интенсивно протекающими окислительными процессами и сопровождаются переносом на полированную поверхность контртела соединений с СО–группами, что позволило обосновать причины избирательного износа ФФ-полимера и химическое строение полимерных носителей – модификаторов.

При исследовании трения компонента органотекстолитов – наноразмерного MoS_2 с привлечением методов РФЭС и ТГА, установлена модификация краевых атомов серы с образованием SO_4-групп, что препятствует созданию самосмазывающейся поверхности на контртеле и ухудшает трибологические характеристики.

Исследован, в качестве антифрикционного компонента полимер-минерального модификатора, графит трех уровней размерности: исходный ~ 1 мкм, нанографит с уровнем 25–300 индивидуальных слоев, активированный графит с максимальной чистотой поверхности. Выявлено преимущество последнего в качестве антифрикционного компонента, заключающееся в лучших трибологических характеристиках.

Практическая значимость. Разработаны антифрикционные износостойкие органотекстолиты с повышенной на 40°С термофрикционной стабильностью и значительным (до 100%) повышением износостойкости, армированные полиоксадиазольными тканями саржевого переплетения и модифицированные полимер-минеральными антифрикционными модификаторами на основе СВМПЭ, ПФС, ПЭЭК и

нано-ламеллярных соединений графита и дисульфида молибдена. Достоинством разработанного материала является сохранение простой двухстадийной технологии получения х/б текстолитов, включающей пропитку и сушку ткани.

Проведена, с положительным результатом, апробация опытных партий разработанного материала в качестве используемого в настоящее время вкладыша башмака скольжения грузопассажирского лифта установленного при реконструкции Государственного академического Большого театра России.

Разработана лабораторная технология получения активированного графита, заключающаяся в обработке порошка графита в высокоэнергетической вибромельнице. Активированный графит обладает лучшим комплексом свойств, по сравнению с природным и нанографитом по показателю смазывающих свойств, износостойкости, технологичности и экономическим показателям. Это позволило использовать его в практических целях в качестве антифрикционного компонента полимер-минеральных модификаторов.

Личный вклад соискателя. Диссертантом лично выполнены все экспериментальные исследования, в том числе с привлечением сложных физических методов (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), рентгенодифракционный анализ). При обсуждении результатов исследования основные выводы сделал самостоятельно и предложил решения, обеспечивающие положительное завершение диссертационного исследования.

Объекты и методы исследования.

Объектами исследования служили: фенолоформальдегидная смола (ФФ-полимер), углеродные и полиоксадиазольные волокна, полифениленсульфид (ПФС), сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), полиамид-6 (ПА-6), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК). В качестве твердых смазок использовали графит и дисульфид молибдена.

Для измельчения и смешения компонентов применяли вибромельницу М-10 и ультразвуковой диспергатор УЗД-0,063/22. Образцы прессовали на гидравлическом прессе с применением съемной пресс-формы.

Определение коэффициента трения проводили на торцевых машинах трения И-47К54 и UMT-2. Рентгеновские фотоэлектронные спектры регистрировали на спектрометре XSAM800 фирмы Kratos при давлении ~ 5×10^{-10} торр. В качестве источника возбуждения применяли магниевый анод с энергией характеристического излучения

MgK_{α}= 1253.6 эВ. Дифрактограммы получены на дифрактометре Bruker D8 Advance с зеркалом Гёбеля и обработаны в программном комплексе TOPAS. Краевой угол смачивания (КУС) измеряли на инструментальном микроскопе типа МИИ-2, а оптические исследования поверхности трения проводились на микроскопе Neophot 21 с использованием цифровой камеры DCM300.

Публикации и апробация работы. По результатам работы опубликовано 4 статьи, 4 из них в журналах рекомендованных ВАК, и тезисы 6 докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 150 страницах, содержит 57 рисунков и 24 таблицы. Список использованной литературы включает 99 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Влияние природы армирующих тканей на трибологические свойства текстолитов.

Проведено изучение трибологических свойств текстолитов, армированных волокнами различной природы: термостойкими углеродными (углеродопласты) и ПОД тканями (органотекстолиты). Для определения коэффициента трения была использована машина трения UMT-2, на которой фиксировалось изменение коэффициента трения с частотой 100Гц. Испытания проводились на прессованных образцах ПКМ обоего типа со связующим - фенолоформальдегидным полимером (ФФ-полимер).

Весь период трения может быть условно разделен на 4 характерных этапа.

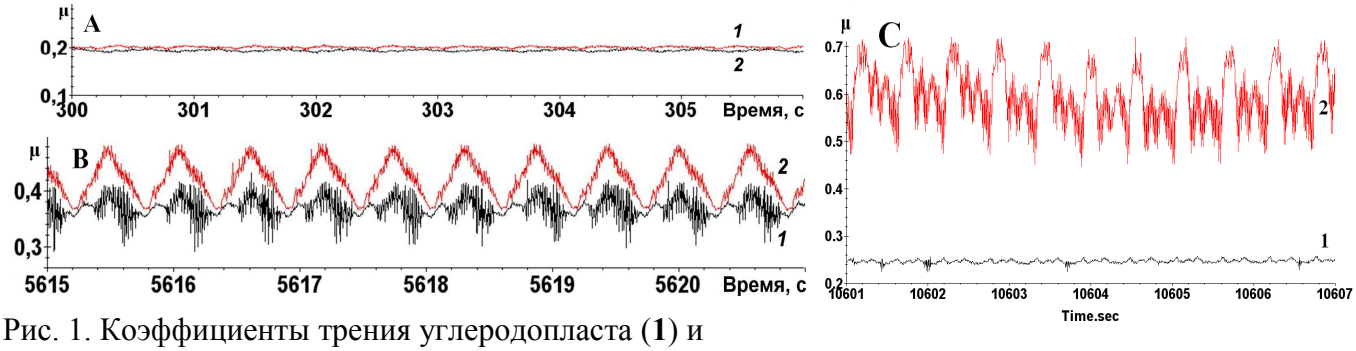

Рис. 1. Коэффициенты трения углеродопласта (**1**) и органотекстолита (**2**) в начальный (**A**), во второй – третий (**B**) и четвертый (**C**) этапы.

Начальный этап трения (рис. 1А) составляет примерно 5 минут и характеризуется низким коэффициентом трения тканевых образцов как органотекстолита, так и углеродопласта (0,2), независимо от природы ткани.

Природа подобного явления заключается в структуре пропитанных ФФ-полимером поверхностных слоев тканевых образцов. Независимо от типа ткани, наружная

поверхность покрыта слоем полимерного связующего – ФФ-полимером, которое осуществляет трение по стальному контртелу. На следующих этапах (рис. 1 В) трение характеризуется более высоким коэффициентом трения и более высокой амплитудой колебаний коэффициента трения, в связи с избирательным износом связующего (ФФ-полимера), что приводит к обнажению дискретной поверхности из волокон армирующих тканей (УВ и ПОД).

При переходе к 4-му этапу (рис. 1 С) можно видеть, что, поскольку химическое строение армирующих волокон различно, резко отличается изменение величины и характера коэффициента трения.

В случае углеродного волокна усилие передеформирования приводит к образованию поверхности трения за счет хрупкого разрушения углеродных волокон, выступающих на поверхность. В отличие от углеродных, органические износостойкие волокна способны в процессе передеформирования не разрушаться, а выдерживать высокие сдвиговые усилия, что приводит к резкому повышению коэффициента трения.

При увеличении (рис. 2) хорошо видны непосредственно на поверхности трения две ПОД нити тканевой основы материала и продукты износа полимерного связующего, во впадине, образованной плетением армирующей ткани.

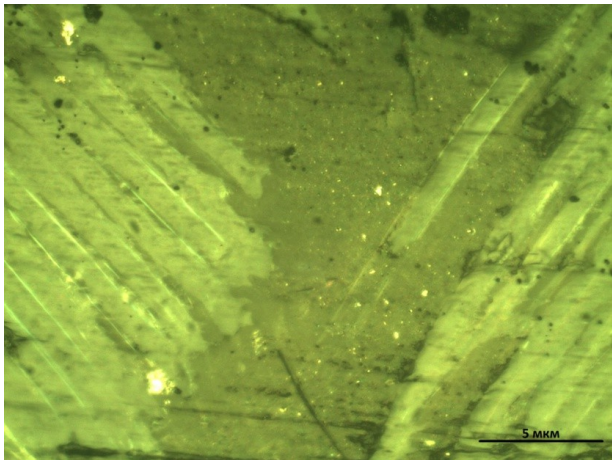

Рис. 2. Фото поверхности органотекстолита через 58 минут трения (3-ий этап трения).

Анализ полученных результатов позволил выявить основное общее свойство структуры трущейся поверхности органотекстолитов, заключающееся в жесткой фиксации износостойких синтетических волокон в структуре трущейся ткани и не способных к деформации по направлению трения, что определяет, либо серьезно влияет на весь комплекс трибологических свойств ПКМ при трении. Этот же общий структурный фактор строения трущейся поверхности подобных материалов обусловливает причину возникновения «колебательного» характера трения.

Основной практический вывод из проведенного исследования заключается в направлении возможной модификации, которая должна включать создание сплошной износостойкой и антифрикционной поверхности, для чего необходимо заполнить

«впадины» между нитями износостойким антифрикционным модификатором и, одновременно, повысить антифрикционность вершин переплетения нитей.

2. Физико-химические процессы взаимодействия органотекстолита со сталью.

Низкие коэффициенты трения (~ 0,2) органотекстолитов в начальный период трения характерны только для самосмазывающихся полимеров, что потребовало проведения исследования стальной контрповерхности трения. Методом определения краевого угла смачивания (КУС) водой (табл. 1) был определен минимальный (2 минуты) период трения, необходимый для модификации поверхности металла.

Таблица 1

Изменение КУС стального контртела при трении органотекстолита.

№ Опыта	Время трения, мин.	КУС, °
1	Исх.	69
2	2	65
3	5	61

Анализ трибохимических изменений проводился методом РФЭС при использовании данных обзорных спектров с подробным анализом характера изменений O1s и Fe2p. Поскольку ранее было проведено подобное исследование трения СВМПЭ, в таблице 2 приведены результаты изменения наиболее характерных элементов на поверхности стальных контртел.

Таблица 2

Концентрация элементов на поверхности стали по данным РФЭС-анализа.

Соедин.	Сталь – ФФ-полимер		Сталь – СВМПЭ	
% ат. Элемент	Исходная поверхн.	После трения (2 мин.)	Исходная поверхн.	После трения (5 мин)
Fe 2p	9.8	6.7	3.9	5.7
O 1s	29.3	49.2	30.4	32.8
C 1s	58.7	41.5	65.7	61.5
N 1s	2.2	2.8		

При трении образцов с ФФ-полимером на стали увеличивается концентрация кислорода (O1s) с 29% до 49% с преимущественным окислением углерода (C1s). При этом, концентрация углерода на поверхности уменьшается с 58% до 41%, а концентрация железа, находящегося в окисленном состоянии, уменьшается с 9,8% до 6,7%. Это свидетельствует, что наиболее характерными являются окислительные процессы, приводящие в результате трения к окислению свободного железа в приповерхностном слое и появлению в поверхностном слое продуктов окислительной трибодеструкции связующего, содержащих окисленный углерод.

Таким образом, основной процесс трибохимического взаимодействия при модификации поверхности стали заключается в переносе продуктов трибохимической деструкции содержащих CO–группы, что может активировать процесс износа. Эти результаты резко отличаются от трибохимических процессов в паре СВМПЭ – сталь. По своей трибоокислительной стабильности, в выбранных условиях трения СВМПЭ резко превосходит ФФ-полимер и может служить стабилизатором его трения.

3. Нанокристаллический MoS_2 и его трение.

Предварительные данные по нано-ламеллярным самосмазывающимся наполнителям позволяли надеяться на снижение веса, улучшение адгезионных и возможно, антифрикционных свойств при введении этих соединений в органотекстолит.

Размерные характеристики образцов нано-MoS_2 приведены в таблице 3.

Таблица 3

Образцы нано-MoS_2, использованные в трении.

Образец	Дисперсионная среда	Межслоевое расстояние, Å	Толщина кристаллита $L_{per.}$, нм	Диаметр кристаллита $L_{par.}$, нм
A	Ацетонитрил (ac)	6.250	9.4	16.0
B	Вода (H_2O)	6.246	11.5	17.0

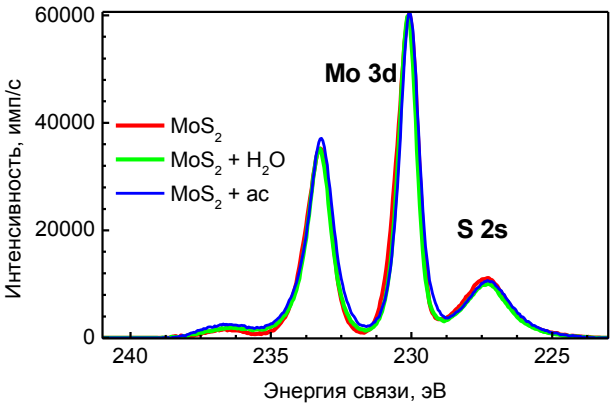

Рис. 3. Фотоэлектронные спектры S2p образцов нано-MoS_2.

Методом РФЭС показано (рис. 3), что на поверхности MoS_2, в зависимости от химического строения диспергатора (H_2O; CH_3CN), образуется наноразмерное «покрытие», включающее сульфогруппу, модифицирующую, в первую очередь, краевые молекулы. Поверхность очищается от низкомолекулярных углеродных «загрязнений». При обработке CH_3CN, помимо сульфогруппы, подобное «нанопокрытие» содержит окисленный азот, а также связь C≡N. Толщина «нанопокрытия», определенная по ослаблению сигнала «Mo» ~ 5 Å в случае H_2O, в случае CH_3CN этот «нанослой» возрастает ~ до 7-8 Å.

Трение нано-MoS_2.

В связи с резким отличием по размерности исходного MoS_2 и полученных наночастиц, было проведено трение по контртелам 2-х типов: шлифованному и полированному. В случае шлифованного контртела не учитывались размеры испытываемого нано-MoS_2, а в случае полированного (R_a=0,03 мкм) осуществлялось трение наноразмерного MoS_2 по наноразмерной поверхности стали. При трении по шлифованной поверхности (рис. 4) видно резкое отличие трения полученных наночастиц от исходного MoS_2, особенно при приработке. Причины подобного различия обусловлены, вероятно, в основном, наноразмерностью испытуемых частиц, в связи с чем, в первоначальный период в трении наночастиц участвует непосредственный контакт металл – металл.

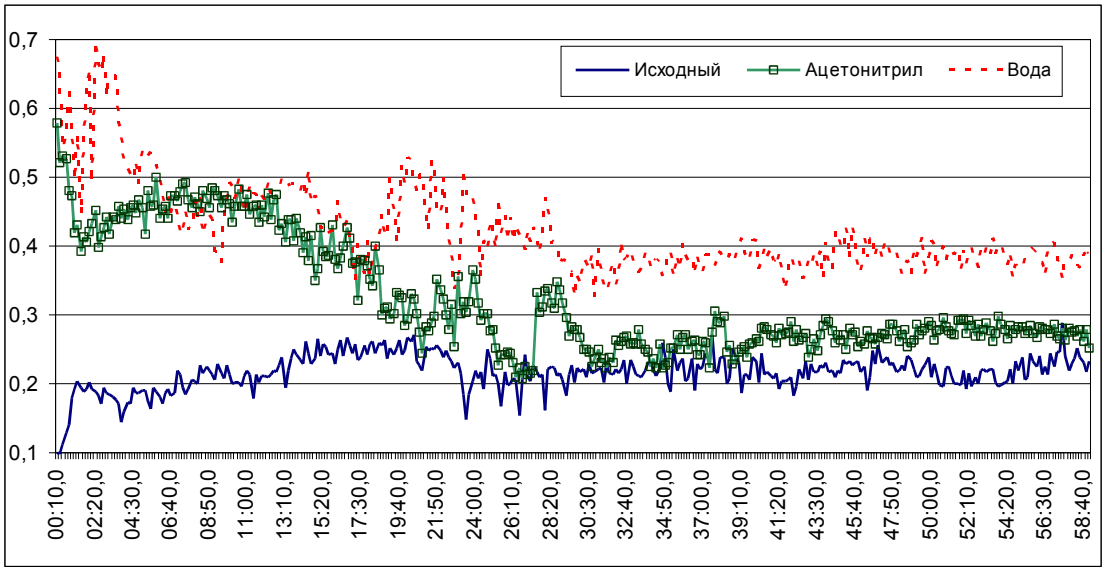

Рис. 4 Трение нано-MoS_2, полученного в ацетонитриле, либо H_2O, по шлифованной поверхности стали.

В трении по полированному контртелу (рис. 5) (наночастицы по наноповерхности) по первоначальным коэффициентам трения лучшие результаты имеет нано-MoS_2 (CH_3CN), у которого f ~ 0,2, в то время как у исходного ~ 0,3. В этом случае на трение основное влияние оказывает уровень шероховатости (R – 0,03 мкм) поверхности полированной стали.

Значительно более высокий коэффициент трения у нано-MoS_2 (H_2O) (f ~ 0,7 – 0,35), что, вероятно, обусловлено наличием большого количества прочно сорбированной на его поверхности воды (рис.6), которая не определяется методом РФЭС, т.к. удаляется в

глубоком вакууме. Это резко ухудшает адгезионные свойства и, соответственно, коэффициент трения.

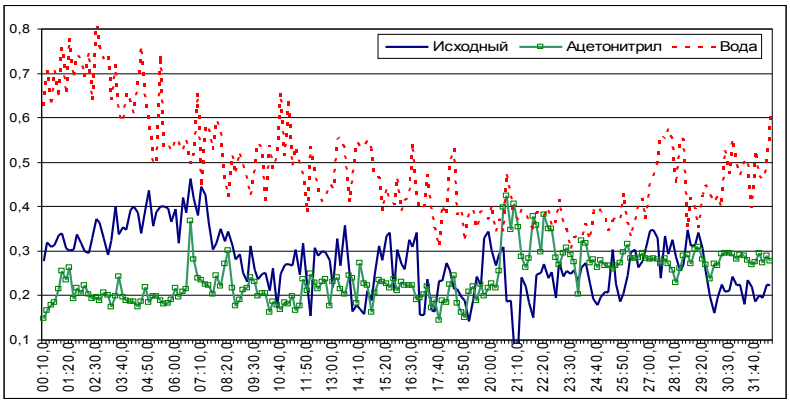

Рис. 5. Трение нано-MoS_2, полученного в ацетонитриле, либо H_2O, по полированной поверхности стали.

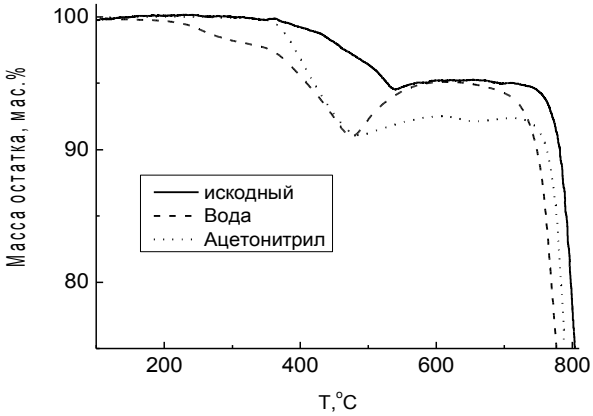

Рис. 6. Кривые ТГА нанокристаллического MoS_2.

Из полученных данных следует, что для трения наноламеллярных соединений необходима наноповерхность, и, второе, чем выше степень модификации поверхности нанонаполнителя, тем выше коэффициент трения, даже при трении по наноповерхности.

4. Исследование активированного и нано- графитов.

Нанокристаллические графиты получены в различных средах; воде – «н-графит (H_2O)», в глицерине – «н-графит (глиц.)» и исследованы методом рентгеновской дифракции (табл. 4).

Таблица 4

Структура нано-графита (метод рентгеновской дифракции).

	Область когерентного рассеяния (001), нм	Число слоев	Степень графитизации
Графит С-1	78	234	91.1%
Обр. водой	75	225	91.1%
Обр. глицерином	66	198	91.1%

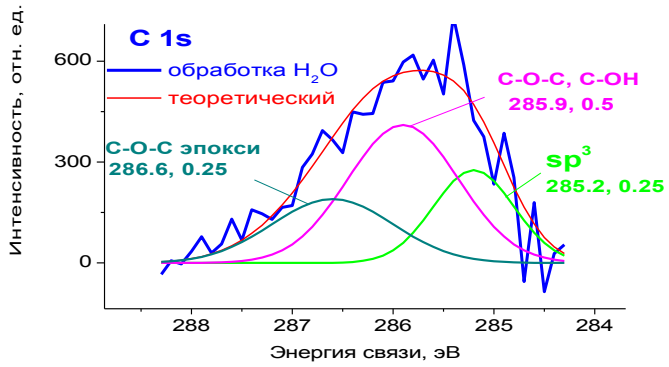

Рис. 7. Разложение спектра нанографита (H_2O) на компоненты

Результаты исследования поверхности методом РФЭС приведены на рис.7. Из сравнительного анализа фотоэлектронных и оже-спектров графита (H_2O) следует, что во всех образцах присутствует кислород в виде соединений С-ОН, эпокси-группы С-О-С и H_2O.

Основные изменения состава в модифицированных образцах происходят на глубине превышающей информационную глубину оже-электронов C KVV, равную пяти слоям графита или ~40 Å. Это может быть связано с тем, что первые 5 слоев относятся к структуре графена, а по систематизации только после 10 слоев, т.е. 5 с двух сторон, начинается структура графита (до 5 слоя межслоевые расстояния разные).

Трение нанографитов (шлифованное контртело)

Фрикционные зависимости коэффициента трения от продолжительности эксперимента свидетельствуют (рис. 8) о близких результатах у всех исследованных образцов нано-графитов с коэффициентом трения около 0,2.

Характерные отличия отдельных образцов заключаются в этапе приработки и продолжительности трения. Приработку с высоким коэффициентом трения имеет только исходный графит. Нано-графиты практически не имеют приработки и коэффициент трения с начала процесса имеет низкий показатель (~0,2). Причина этого обусловлена, вероятно, тем, что первичный этап трения исходного графита связан с активными деформационными процессами, которые проходят, преимущественно, по базальным плоскостям, т.е. в процессе трения графита происходят процессы деления по базальным плоскостям, близкие к операциям получения наноструктурированного графита. Возможно, что этой же причиной объясняется более короткая продолжительность трения нанографитов (рис.8).

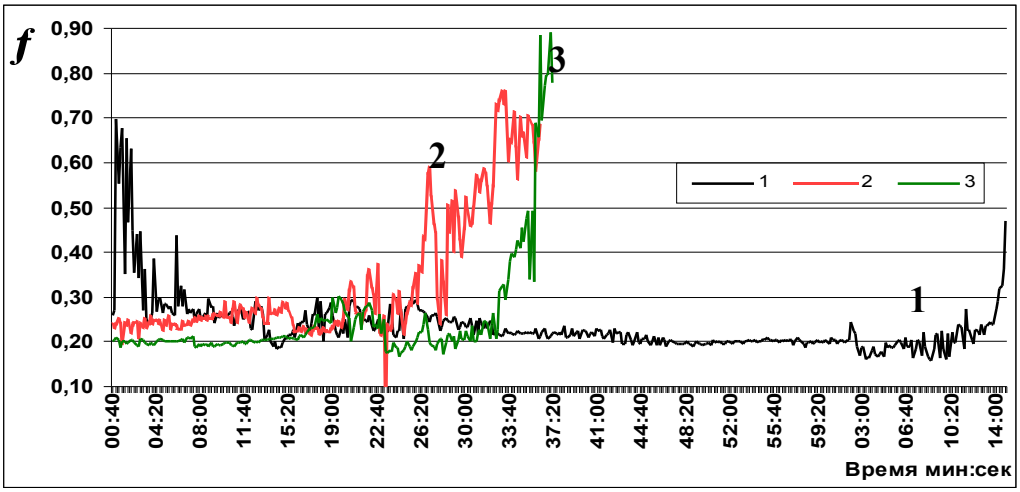

Рис. 8. Коэффициенты трения нанографитов:
1 – исходный графит;
2 – нанографит (H2O);
3 – нанографит (глиц.)

Механическая активация графита

В результате сильного механического воздействия происходит разрушение частиц графита, в основном, по базальным плоскостям, что приводит к увеличению площади занимаемой частицами (рис.9, табл.5). В отличие от графита, механическая активация

MoS_2 также уменьшает размер частиц, но занимаемая площадь при этом практически не изменяется.

Таблица 5

Влияние активации на размерные характеристики графита и дисульфида молибдена.

Тип наполнителя / доля в суспензии	Площадь частиц в покрытии	
	Исходные	Активированные
Графит 0,25%	14%	38%
Дисульфид молибдена 0,25%	21%	23%

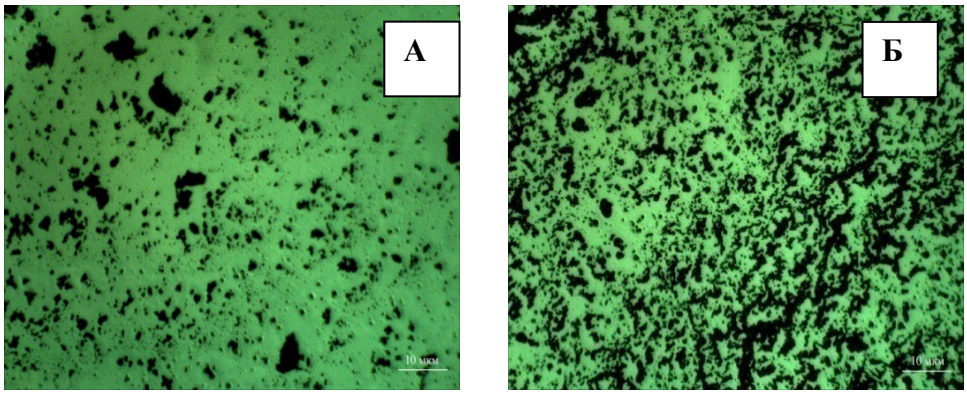

Рис. 9. Поверхность покрытия до (**А**) и после (**В**) активации графита.

Химическое состояние поверхности порошков графита оценивали методом РФЭС, до и после измельчения (рис.10).

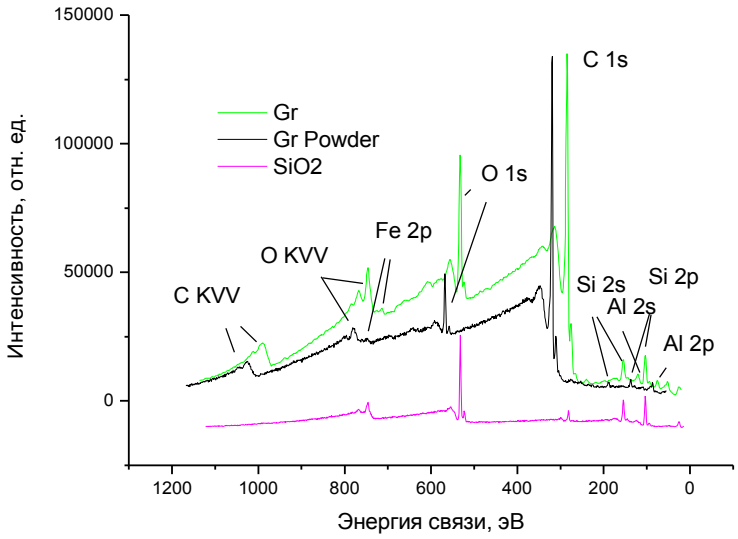

Рис. 10. Обзорные фотоэлектронные спектры исходного и измельченного графитов

Из обзорного спектра РФЭС видно, что измельчение приводит к резкому уменьшению концентрации кислорода (с 20% до 10%) и снижению интенсивности пиков, относящихся к Al, Si и Fe. При измельчении также уменьшается концентрация примесей в приповерхностной области, что связано с увеличением доли свежеобразованной поверхности.

Структура активированного графита установлена методом рентгеновской дифрактометрии (табл. 6).

Таблица 6

Эффективные размеры частиц в различных кристаллографических направлениях.

Образец	D002, нм толщина – Lper.	Dhk0, нм диаметр –Lpar.	Dhkl, нм Упорядоченность
Исходный графит	>200	>200	68
Активированный графит	29	70	4.5

Таким образом, активация графита приводит к увеличению свежеобразованных частиц, т.е. преимущественному продольному измельчению. Резко понижается упорядоченность слоев в полученной структуре. При трении активированного графита, по сравнению с исходным, показано, что значение коэффициента трения несколько понижено.

5. Полимер-минеральные модификаторы и разработка органотекстолитов на их основе.

Исходя из влияния химического строения на трибологические свойства, выбранные для полимер-минеральных модификаторов полимеры являются представителями двух основных групп: трибохимически стабильных и трибохимически активных полимеров (табл.7).

Таблица 7

Строение и основные свойства полимерных носителей полимер-минеральных модификаторов.

Полимер	Трибохимическая активность	Физическое состояние	Размер порошка, мкм	Температура стеклования, T_g °C	Мин.коэффициент трения (1м/с, 1 кг/см^2)
ПФС	стабильный	кристаллич.	~20	86	0,7
ПЭЭК	стабильный	кристаллич.	~20	143	0,7
ПА6	активный	кристаллич.	~20	210	0,35
СВМПЭ	стабильный	кристаллич.	~20	-120	0,2

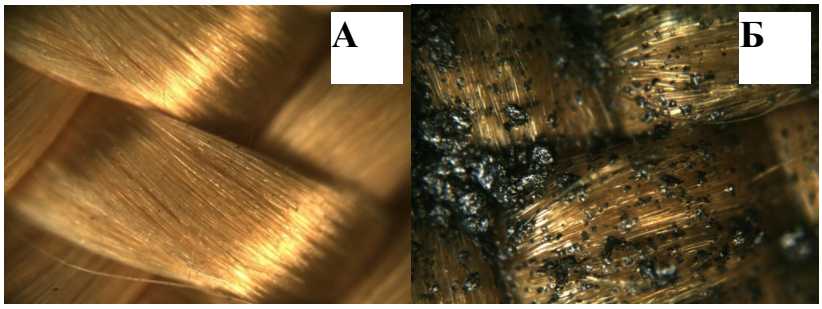

Рис. 11. Препрег модифицированного органотекстолита (**А** – исходная ткань; **Б** – препрег).

При пропитке (рис. 11) модификатор (порошок полимера + активированный графит) располагается, в основном, не на «вершине» нитей, а во впадинах, образованных плетением ткани.

В ряде случаев модификатор дает положительный эффект уже при введении 1% по отношению к сухой смоле(Рис. 12).

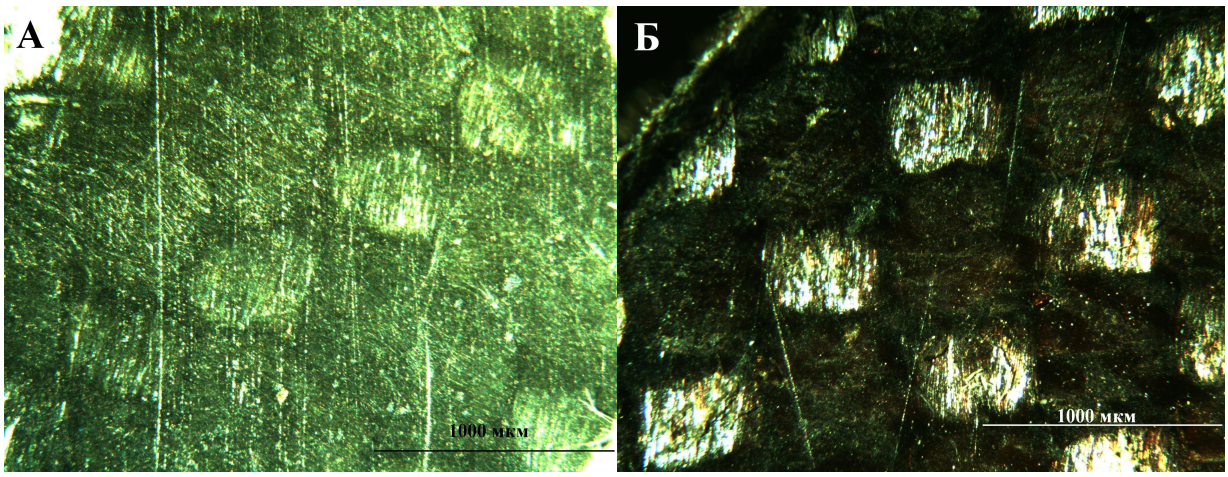

Рис 12. Поверхности трения после термофрикционных испытаний: А - органотекстолит с 3% модификатора; Б - исходный органотекстолит (ОТ).

Термофрикционные испытания модифицированных органотекстолитов.

Испытания проводились на машине трения И-47 с внешним нагревом.

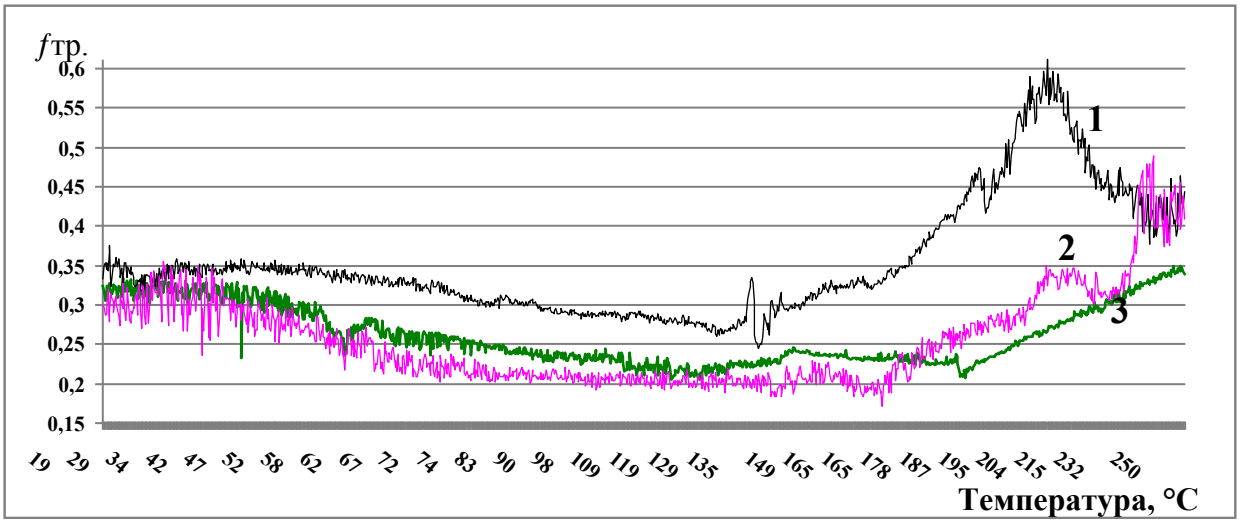

Рис. 13. Термофрикционные зависимости органотекстолитов с модификатором (ПФС + графит): **1** – исходный; **2** – 1%; **3** – 5% модификатора

Введение модификатора позволило повысить предельные рабочие температуры с 140° до 200° градусов, стабилизировало и понизило коэффициент трения(Рис.13).

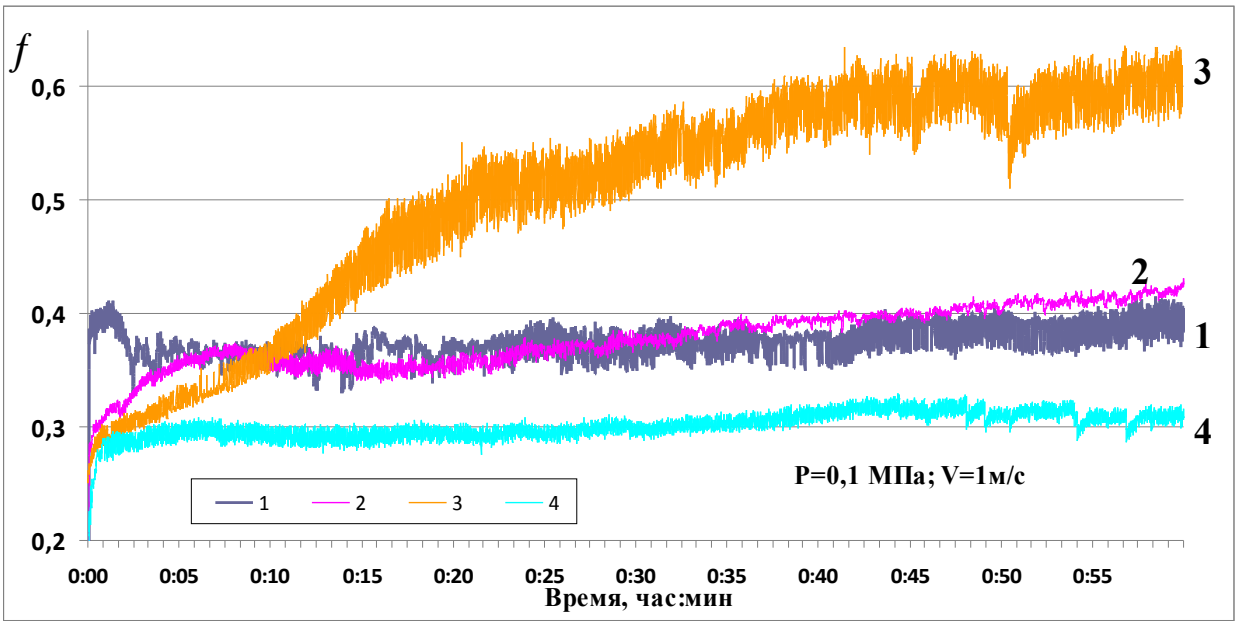

Рис. 14. Коэффициент трения органотекстолитов с полимер-минеральными модификаторами на основе: **1** – исходный; **2** – СВМПЭ; **3** – ПА-6, **4** – ПФС, полимеры с активированным графитом.

На рис. 14 видно влияние антифрикционности самого полимер-минерального модификатора и его стабильности в сшитой матрице ФФ-полимера. При введении модификатора с СВМПЭ несколько повышается коэффициент трения, хотя сохраняется самая низкая амплитуда колебания. Это обусловлено тем, что самосмазывающими свойствами обладает не только смазывающий компонент – графит, но и полимерный носитель – СВМПЭ. Более высокое, чем можно было предположить, значение коэффициента трения этой композиции обусловлено тем, что СВМПЭ не может влиять на создание опорной поверхности и его введение повышает механическую составляющую силы трения. Образец с ПА-6 имеет худшие показатели, вероятно, благодаря трибохимической активности этого полимера. Лучшие антифрикционные свойства имеет органотекстолит с модификатором (ПФС + графит), что связано с комплексным влиянием порошка кристаллического ПФС, модифицированного активированным самосмазывающимся графитом. Наряду с минимальным коэффициентом трения, этот материал имеет лучшую износостойкость (табл. 8). Продолжительные испытания подтвердили полученные результаты, что позволило рекомендовать подобный материал для использования в подъёмных механизмах. Положительные результаты применения этого материала в специальных лифтовых механизмах приводятся в диссертации.

Таблица 8

Износ и контактная температура трения текстолитов с 10% полимер-минерального модификатора.

№	Тип модификатора	Износ, г*10^{-4}/час	T_{max}, °С
1	Исходный органотекстолит	9	47
2	СВМПЭ + графит	8	43
3	ПА6 + графит	12	51
4	ПФС + графит	4	41

Технологическая линия получения модифицированных органотекстолитов отличается от традиционной только узлом приготовления полимер-минерального модификатора.

ВЫВОДЫ.

1. Разработана новая группа органотекстолитов, наряду с износостойкостью, обладающих антифрикционностью с коэффициентом трения 0,20-0,3 вместо 0,22-0,5 и повышенной со 120°С до 170°С термофрикционной стабильностью, благодаря введению полимер-минеральных модификаторов, состоящих из полимеров носителей (ПФС, ПЭЭК, СВМПЭ) и ламеллярных наполнителей – нано-MoS_2 и нано-графита.
2. Отработана лабораторная технология получения новых органотекстолитов, заключающаяся в сохранении основных технологических этапов получения традиционного текстолита: пропитке и сушке полиоксадиазольной ткани саржевого переплетения спиртовым раствором ФФ-смолы совместно с полимер-минеральным модификатором, для чего вводится специальная операция получения полимер-минерального модификатора в вибромельнице.
3. Установлены зависимости в характере изменения трибологических свойств органотекстолитов, определяемые градиентом формирования компонентов органотекстолита: ФФ-полимера на поверхности и ПОД-ткани в подповерхностных слоях, что приводит к низкому начальному коэффициенту трения (~0,22) с переходом после избирательного износа ФФ-полимера, к колебательному характеру этого процесса с резко возросшим до 0,4-0,6 коэффициентом трения.
4. Впервые исследованы трибохимические изменения связующего – ФФ-полимера при взаимодействии со стальным контртелом, установлен трибоокислительный характер этого процесса, заключающийся в переносе на

стальную контрповерхность продуктов окисления ФФ-полимера, что способствует его избирательному износу как связующего органотекстолита.

5. Впервые исследованы трибологические изменения нано-MoS_2 и нано-графита, где основные выводы заключаются в необходимости применять нано-ламеллярные соединения только по наноразмерной поверхности стали и при их получении избегать химической модификации поверхности нано-соединений, либо сводить ее к минимуму.
6. Разработана лабораторная технология производства активированного графита, заключающаяся в обработке порошка графита в вибромельнице и позволяющая получать полидисперсный графит с улучшенными показателями чистоты поверхности и трибологических свойств.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Зюзина Г.Ф., Краснов А.П., Афоничева О.В., Баженова В.Б., Юдин А.С. // Трибологические свойства модифицированного литьевого полимера – полиарилата // «Трение и смазка в машинах и механизмах», № 4, 2010, с. 17-22.
2. Юдин А.С., Буяев Д.И., Краснов А.П., Сачек Б.Я., Афоничева О.В., Баженова В.Б. Дисперсные наполнители в трибологических полимерных волокноармированных материалах (поисковое исследование) // Журнал «Вопросы материаловедения», 4(72), 2012, с. 231-239.
3. А.П. Краснов, А.В. Наумкин, А.С. Юдин, В.А. Соловьева, О.В. Афоничева, Д.И. Буяев, Н.Н. Тихонов // Природа первичных актов фрикционного взаимодействия СВМПЭ с поверхностью стали. «Трение и износ», Т. 34, № 2, 2013, с. 154-163.
4. А. С. Юдин, Д. И. Буяев, О. В. Афоничева, И. Г. Горячева, А. П. Краснов // Трение полимерных самосмазывающихся композитов, армированных термостойкими тканями. «Трение и износ», Т. 34, № 4, 2013, с. 599-607.
5. Буяев Д.И., Юдин А.С., Тимофеев В.А., Афоничева О.В., Краснов А.П. // «Особенности формирования и функциональных свойств композитов нового поколения армированных смесями органических волокон» // Пятая Всероссийская Каргинская конференция «Полимеры – 2010», 21-25 июня 2010 г., г. Москва, МГУ им. Ломоносова, сборник тезисов, С4-18.

6. Мить В.А., Афоничева О.В., Юдин А.С., Краснов А.П., Буяев Д.И., Тимофеев В.В. //«Влияние термореактивного связующего на трибологические свойства высокоизносостойкого композита на основе ПОД-волокон» // XXII симпозиум «Современная химическая физика», 24 сентября – 5 октября 2010 г., г. Туапсе, сборник докладов, с. 100.
7. Пленарный доклад: Краснов А.П., Наумкин А.В., Мить В.А., Афоничева О.В., Кассис Мунир, А.С. Юдин // Эффективность нанонаполнителей (нн) в полимерных трибологических материалах // Научно - техническая конференция с участием иностранных специалистов «ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ», посвящённая 120 – летию со дня рождения проф. М.М. Хрущова, 7-9 декабря 2010 г., Москва, ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова
8. Секционный доклад: Буяев Д.И., Юдин А.С., Чукаловский П.А., Бычков Р.А., Афоничева О.В., Краснов А.П. // Свойства современных органопластов и пути их применения в тяжелых условиях эксплуатации // Научно - техническая конференция с участием иностранных специалистов «ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ», посвящённая 120 – летию со дня рождения проф. М.М. Хрущова, 7-9 декабря 2010 г., Москва, ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова
9. Секционный доклад: Юдин А.С., Краснов А.П., Буяев Д.И., Афоничева О.В., Сачек Б.Я., Баженова В.Б. // Роль дисперсного наполнителя в самосмазывающихся материалах армированных волокнами // Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб – 2011), 27-30 июня 2011 г., г. Гомель, Беларусь, стр. 232.
10. Юдин А.С., Краснов А.П., Сачек Б.Я., Буяев Д.И., Афоничева О.В., Баженова В.Б. // Влияние смесевых дисперсных наполнителей на трибологические характеристики полимерных композиционных материалов армированных полиоксадиазольными волокнами. Устный доклад на V международной конференции «Полимерные композиты в триботехнике», г. Санкт-Петербург, Россия, 30 мая - 1 июня 2012 г.