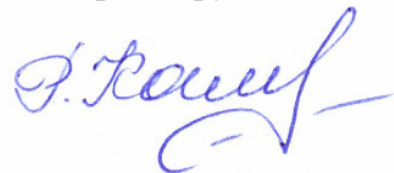


На правах рукописи



КАМАЛЕТДИНОВА РЕГИНА РАМИЛЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРМЕТОВ
НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА В ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЕ**

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2016

Работа выполнена на кафедре «Основы конструирования механизмов и машин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВО УГАТУ)

Научный
руководитель:

Шустер Лева Шмульевич – доктор
технических наук, профессор кафедры
«Основы конструирования механизмов и
машин» (ФГБОУ ВО УГАТУ)

Официальные оппоненты:

Куксенова Лидия Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией методов и
технологий упрочнения
ФГБУН «Институт машиноведения им.
А.А. Благонравова Российской академии наук»

Шульга Геннадий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автомобиля и транспортно-
технологические комплексы «Южно-
Российский государственный политехнический
университет (НПИ) им. М.И. Платова»

Ведущая организация:

ФГБУН Институт проблем механики им.
А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Защита диссертации состоится « 19 » декабря 2016 г. в 15.30 на заседании диссертационного совета Д 218.010.02 при ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д.2 и на сайте <http://www.rgups.ru>

Автореферат разослан «___» октября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 218.010.02
доктор технических наук, профессор



П.Н. Щербак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эксплуатационные характеристики и надежность трубопроводной запорной арматуры, в том числе шаровых кранов, имеющих трибосопряжение «шар-седло», оказывают значительное влияние на эффективность технологических процессов в различных производствах. Например, в горной металлургии в технологических линиях при переработке руды и транспортировке абразивосодержащей пульпы затворы подвергаются интенсивному износу и быстро теряют работоспособность. В нефтехимпереработке при каталитическом крекинге углеводородного сырья запорная арматура эксплуатируется в еще более жестких условиях, связанных с дополнительным воздействием высоких (до 700 °С) температур и вибронагрузок из-за больших скоростей жидких и газовых потоков, содержащих алюмосиликатные абразивные частицы, что предопределяет их низкий ресурс.

Одним из наиболее перспективных материалов для работы в указанных условиях, является керамико-металлический композиционный материал (кермет) на основе карбида титана с жаропрочной металлической связкой, в котором достигается уникальный комплекс служебных характеристик за счет твердости и износостойкости тугоплавкого и пластичности металлического компонентов.

Однако широкое использование в арматуростроении новых керамико-металлических материалов сдерживается как отсутствием научно обоснованных методов определения фрикционных характеристик керметов на основе карбида титана, так и рекомендаций по повышению эффективности их применения. В этой связи представляется актуальным разработать модели трибосистемы, позволяющие сочетать прочностные и трибологические характеристики керметов.

Данная диссертационная работа направлена на восполнение этого пробела, что определило ее актуальность и позволило сформулировать цель и задачи, способствующие достижению этой цели. О важности решения данной задачи свидетельствует тот факт, что исследования в этой области были включены в:

- федеральную целевую программу «Исследование и разработка по приоритетным направлениям и развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (№426 от 21.05.13 г.);
- программу сотрудничества с фондом развития инновационного центра «Сколково».

Степень разработанности темы.

Одним из важных параметров, как задвижек, так и более современных шаровых кранов, является сила трения в элементах затворного узла, которая влияет на их износ и характеристики привода. Поэтому материалы элементов

затвора выбираются исходя из минимизации коэффициента трения между шаром и седлом.

Однако, для разработки новых материалов и технологий, позволяющих улучшить триботехнические характеристики в затворном узле, отсутствуют исследования механизма влияния твердой основы керметов из карбида титана и износостойких покрытий на триботехнические характеристики и закономерности изнашивания.

Цель работы – установление закономерностей влияния твердой основы из карбида титана и износостойких покрытий на триботехнические характеристики и закономерности изнашивания тяжело нагруженных трибосопряжений из керамико-металлических материалов и на этой основе повышение эффективности работы запорной арматуры.

Для достижения указанной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Определить физико-механические свойства и структуру керамико-металлических материалов на основе карбида титана.
2. Исследовать влияние твердой основы из карбида титана, износостойких покрытий, температуры, давления и окружающей среды на триботехнические характеристики (предельную нагрузочную способность, прочность на срез адгезионных связей, адгезионную составляющую коэффициента трения) подвижного фрикционного контакта керамико-металлических материалов.
3. Изучить влияние твердой основы из карбида титана и износостойких покрытий на закономерности изнашивания трибосопряжений из керамико-металлических материалов.
4. На основании совместного анализа результатов исследования адгезионного взаимодействия и износа трибосопряжений установить обобщенные закономерности влияния твердой основы из карбида титана и износостойких покрытий на объемный износ тяжело нагруженных узлов трения из керамико-металлических материалов и получить соответствующие математические модели.
5. Изучить механизм формирования величины износа трибосопряжений из керамико-металлических материалов (с износостойкими покрытиями и без покрытий) и на этой основе разработать принципы выбора и применения керметов, обеспечивающих повышение надежности шаровых кранов запорной арматуры.
6. Выполнить стендовые испытания шаровых кранов запорной арматуры из изученных керамико-металлических материалов на основе карбида титана.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выявлены обобщенные закономерности влияния твердой основы из карбида титана TiC и износостойких покрытий на функциональные свойства тяжело нагруженных трибосопряжений (в том числе «шар-седло») из керамико-металлических материалов;
- показано, что износостойкие покрытия не только экранируют поры в керметах, но препятствуют выходу на поверхность трения твердых включений TiC, этим самым снижая абразивно-механическое и окислительное изнашивание в парах трения и уменьшая суммарный износ трибосопряжений;
- установлено, что объемный износ трибосопряжений из керметов (с близкой по величине микротвердостью) зависит от коэффициента β упрочнения адгезионных связей и описывается степенной функцией;
- выявлено, что на поверхностях трения керметов без покрытий формируются вторичные структуры в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, могут в них внедряться, увеличивая изнашивание;
- коэффициент трения скольжения в трибосопряжении «шар-седло» из керметов на основе TiC определяется в значительной мере величиной молекулярной (адгезионной) составляющей этого коэффициента.

Практическую ценность представляют:

1. Выполненные исследования послужили научной основой работы для разработки рекомендаций по применению керметов на основе карбида титана TiC и жаропрочного сплава ЖС6У (ВЖЛ14Н) и позволили сформулировать критерии повышения износостойкости путем выбора материалов покрытия для трибосопряжений «шар-седло».
2. Разработанная и апробированная оригинальная методика стендовых испытаний трибосопряжения «шар-седло» шарового крана с помощью модернизированной четырехшариковой машины трения ЧМТ-1 и выводом результатов на экран, которая может быть использована для исследования материалов, применяемых в запорной арматуре.
3. Установленная функциональная зависимость износа трибосопряжения «шар-седло» от адгезионной составляющей коэффициента трения, позволяющая уже на стадии проектирования трибосопряжений прогнозировать их надежность.
4. Выявленные закономерности по влиянию адгезионной составляющей на трение и износ трибосистемы «шар-седло» позволили разработать технологические методы управления фрикционными свойствами данного узла трения.

Методы и методология диссертационного исследования.

Задачи, поставленные в работе, решались на основе системного подхода, включающего теоретические и экспериментальные исследования адгезионного контактного взаимодействия между поверхностями твердых тел, имеющих физическую (Ван-дер-Ваальсовы силы) и химическую природу, теории трения и износа, теории вероятности и математической статистики. При проведении экспериментальных исследований использовались стандартизированные и известные достоверные методы триботехнических испытаний и оценки механических свойств. Для исследования структуры поверхностей трения использовалась металлографическая оценка, с помощью растровой микроскопии выполнялся химанализ этих поверхностей. Достоверность и обоснованность полученных научных результатов подтверждена многочисленными экспериментальными данными.

Основные научные положения и результаты, полученные лично автором и выносимые на защиту:

- закономерности влияния твердой основы из карбида титана TiC и износостойких покрытий на функциональные свойства тяжело нагруженных трибосопряжений (в том числе, шар-седло) из керамики-металлических материалов;
- положение, согласно которому износостойкие покрытия не только экранируют поры в керметах, но и препятствуют выходу на поверхности трения твердых включений TiC, этим самым снижая абразивно-механическое и окислительное изнашивание поверхностей трения и уменьшая суммарный износ трибосопряжений;
- подтвержденный экспериментальный факт зависимости суммарного износа тяжело нагруженных трибосопряжений, из керметов (с близкой по величине микротвердостью) от коэффициента β упрочнения адгезионных связей в виде степенной функции;
- закономерности формирования на поверхностях трения керметов вторичных структур в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, могут в них внедряться, увеличивая изнашивание;
- установленное преимущественное влияние молекулярной (адгезионной) составляющей на величину коэффициента трения в трибосопряжении «шар-седло» из керметов на основе TiC.

Степень достоверности.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректной постановкой задач исследования: использованием современных представлений физической и химической природой адгезионного контактного взаимодействия.

Результаты экспериментального исследования получены с помощью растрового электронного микроскопа «JSM-6490LV», с помощью стандартизованных средств измерений (прошедших государственную проверку) и обработаны в соответствии с классическими соотношениями математической статистики и теории ошибок.

Личный вклад соискателя.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В перечисленных в автореферате работах соискателем, статья [14] подготовлена единолично. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работах [1;8;10;14] проведены эксперименты на трибометре и рассчитаны величины износа исследуемых пар трения с учетом твердости материалов трибосопряжений; в работах [2;4;6;13;14;16;17] проведена экспериментальная оценка триботехнических характеристик керамико-металлических материалов на основе карбида титана в различных условиях нагружения; [3;5;12] проведен анализ вопросов использования керамико-металлических материалов в запорной арматуре с учетом их триботехнических характеристик; [11;17] обработаны результаты металлографического исследования и определена роль керметов в механизме формирования износа изучаемых трибосопряжений; [10] проведены экспериментальные исследования и обработаны результаты влияния нефтяной среды на триботехнические характеристики изучаемых керметов.

Реализация результатов работы.

Результаты работы используются при проектировании и изготовлении шаровых кранов ООО «МАРОМА Технологии» (г.Уфа).

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению», проводившаяся институтом машиноведения им. А.А. Благоврадова Российской академии наук, (г. Москва, 2014 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий» (г. Уфа, 2013 г., 2015 г., 2016 г.); Мавлютовские чтения: XIII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция (г. Уфа, 2015 г.); Мавлютовские

чтения: Российская научно-техническая конференция (г. Уфа, 2016 г.); Интеллектуальная собственность XXI век – Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Региональные программы и проекты в области интеллектуальной собственности глазами молодежи» (г. Уфа, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 11 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения в виде основных выводов и результатов работы, списка литературы и приложений (актов практического использования). Работа изложена на 168 страницах, включая 79 рисунков, 21 таблицу, 114 наименований цитируемой литературы и приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, представлена практическая значимость и приведены основные результаты работы, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведено обоснование постановки задач исследования.

Литературный обзор содержит анализ публикаций, посвященных трению и износу тяжелонагруженных трибосопряжениях.

К числу тяжелонагруженных трибосопряжений в сфере нефтедобычи и нефтепереработки относятся трубопроводная арматура. Главными условиями для безотказной и безопасной работы арматуры являются выбор типа запорной арматуры, параметры эксплуатации и подбор материала деталей арматуры. В главе приведена классификация конструктивных особенностей запорной арматуры, выявлены наиболее приспособленные конструкции для работы в экстремальных условиях нагружения, среди которых задвижки и шаровые краны. Представлены основные требования, предъявляемые к материалу затворного узла: высокая твердость, износостойкость, прочность, малый коэффициент трения в затворе и стойкость против термических и механических ударов. Кроме того среди традиционных материалов, используемых в запорной арматуре, выявлено ряд недостатков: у металлических узлов наблюдается интенсивное изнашивание в потоке абразивных сред и, как следствие, потеря герметизации затворного узла, а использование керамики повышает долговечность узла, но трудоемкость изготовления и малая стойкость к механическим и термическим ударам ограничивает их использование. Наиболее перспективным материалом в данной области является керамико-металлический материал (кермет) на основе карбида титана с металлической связкой из сплава ЖС6У (TiC-ЖС6У) и сплава

ВЖЛ14Н (TiC-ВЖЛ14Н), который обладает уникальными свойствами. Высокий комплекс служебных характеристик достигается за счет твердости тугоплавкого керамического и пластичности металлического компонентов.

Важным показателем при эксплуатации шаровых кранов является крутящий момент, который отражает усилия, необходимые для преодоления трения шара о седло при открытии и закрытии. Увеличение сил трения в элементах затворного узла происходит из-за роста перепада давления в процессе работы. Шар и седло подвергаются интенсивному износу, который влияет на характеристики привода и герметичность шарового затвора. При нарушении функциональности узла необходимо техническое обслуживание или ремонт оборудования, которое приводит к простою и большим убыткам.

Большой вклад в изучение проблемы трения и изнашивания трибосопряжений внесли отечественные ученые Арчegov В.А, Буше Н.А., Буяновский И.А., Гаркунов Д.Н., Горячева И.Г., Демкин Н.Б., Дроздов Ю.Н., Захаров С.М., Костецкий Б.И., Крагельский И.В., Колесников В.И., Лужнов Ю.М., Матвеевский Р.М., Михин Н.М., Мышкин Н.К., Семенов А.П., Сорокин Г.М., Хрущов М.М., Чичинадзе А.В. и др. Однако, в этих работах мало изучены триботехнические характеристики керамико-металлических материалов (керметов).

Литературный обзор показал также, что актуальными остаются вопросы влияния температуры и агрессивной среды на совместимость трущихся поверхностей керамико-металлических материалов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н. Нерешенными остаются также вопросы минимизации коэффициента трения и изнашивания керметов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н (с покрытиями TiN, TiCrN, Zr-Ti-N-C и без покрытий), работающих при повышенных температурах в агрессивной среде. Изложенное выше обусловило необходимость настоящей работы, определило ее цель и задачи.

Во **второй главе** приведены данные по технологиям изготовления шара и седла из керамико-металлических материалов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н и нанесения на них износостойких покрытий, методике экспериментальных исследований, применяемом оборудовании и аппаратуре.

Изучение триботехнических характеристик, микроструктуры и механических свойств проводили в основном на керметах TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н с различным содержанием карбида титана (без покрытия и с покрытиями TiN, Zr-Ti-N-C, TiCrN). Для сравнения исследовали трибоконтакт с жаропрочным сплавом ЖС6У и нержавеющей сталью 12Х18Н10Т. Материалы для образцов и инденторов вырезали непосредственно из шара и седла, изготовленных по заводской технологии.

Для проведения исследований адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей применяли установку, в которой реализована физическая модель, в первом приближении отражающая реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте, в том числе для тяжелонагруженных трибосопряжений машин и механизмов. Согласно этой модели сферический индентор (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твердых тел), сдавленный двумя плоско-параллельными образцами (с высокой точностью и чистотой контактирующих поверхностей) вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила $F_{\text{экс}}$, расходуемая на вращение индентора, связана главным образом со сдвиговой прочностью τ_n адгезионных связей (ГОСТ 16429-70). Установка позволяет осуществлять нагрев зоны контакта и обеспечить характерное распределение температуры по глубине контактирующих тел.

Для определения зависимости прочности τ_n адгезионных связей на срез от нормальных напряжений p_r на подвижном фрикционном контакте использовали метод постепенно снижающихся нагрузок: от максимальных соответствующих пластическим деформациям на контакте, до минимально возможных по точности измерительных приборов.

Образцы для исследований представляли собой диски $\varnothing$ 20-25 мм и толщиной 5-7 мм, инденторы – цилиндры $\varnothing$ 5 мм со сферическими торцами ($R_{\text{сф}} = 2,5$ мм). Исследуемые поверхности имели шероховатость $Ra = 0,2-0,4$ мкм.

Как показали исследования, достоверные данные о величине τ_n (при различных температурах и давлениях) получаются при 2-3 кратном повторении эксперимента; при этом вероятное отклонение не превышает 8-5 %.

Для оценки изнашивания трибосопряжений эксперименты проводили по схеме «шар-диск» на трибометре «NANOVEA TRB». В качестве диска использовались плоские образцы, в качестве шаров - сферические инденторы. Трибометр воспроизводил износ и трение с использованием вращательного режима. Эксперименты проводили при нормальном нагружении 2 Н и постоянной скорости скольжения 0,15 м/с. Диаметр поверхности трения на образце составлял 6 мм. Количество циклов воздействий в испытаниях для всех пар трения было одинаковое и составляло $N = 15000$ оборотов. Испытания проводились при комнатной температуре 23 °С. Программное обеспечение позволило в режиме реального времени получить данные по коэффициенту трения. Результаты представляли как усредненное значение, полученное по трем экспериментам.

Высоту h_r и объем V изношенного слоя вычисляли по данным веса и формы, полученными с помощью электронных весов «METTLER TOLEDO» и оптического микроскопа «OLYMPUS GX51».

Для обратной пары трения сравнение изнашивания проводили по величине K , пропорциональной линейной интенсивности:

$$K = h_r / N \quad (1)$$

где N – число циклов воздействий, приводящих к линейному износу h_r , т.е. по существу величина K представляет собой износ, приходящийся на одно воздействие.

Изнашивание в прямой паре трения оценивали линейной интенсивностью:

$$J_h = \frac{h_r}{L} \quad (2)$$

где L – длина пути трения, обуславливающая износ h_r .

Износ трибосопряжения оценивали как сумму объемных износов индентора (шара) и образца (седла).

Для изучения морфологии поверхностей трения и изнашивания использовался оптический «OLYMPUS GX51» и сканирующий «JSM-6490LV» микроскопы. Сканирующий микроскоп «JSM-6490LV» позволял сделать качественный и количественный микрохиманализы.

Для нанесения покрытий использовалась ионно-плазменная вакуумная камерная установка ННВ-6,6-И1.

Определение твердости по Виккерсу проводили на автоматическом микротвердомере EMCO-Test DuraScan 50 при нагрузке 100 Г и 200 Г по стандарту ГОСТ 9450 – 76.

Исследования механических свойств керметов выполняли с помощью динамометра «Schenck»

В третьей главе рассмотрено влияние состава керметов и покрытий на их механические и триботехнические характеристики с учетом температуры, давления и среды.

Как показали исследования, структура керметов (рис. 1) характеризуется наличием в них металлической связи в виде непрерывной фазы и изолированных частиц карбида титана, образовавшихся после разрушения карбидного каркаса, и незначительных пор, образовавшихся при инфильтрации расплава металла. Частицы карбида титана и их процентное содержание существенно влияют на микротвердость и предел прочности на сжатие керметов (табл. 1 и 2). Износостойкие покрытия не только экранируют поверхности трения, но повышают их микротвердость (табл. 3).

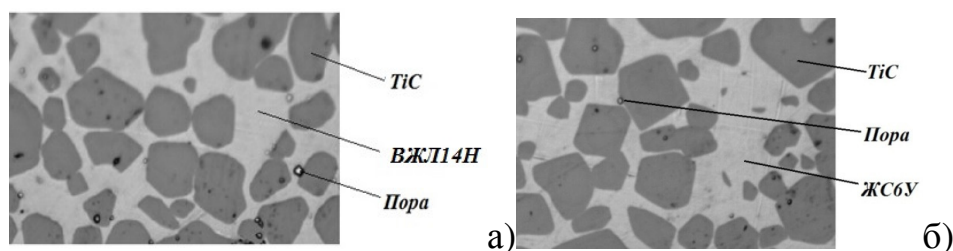


Рисунок 1 Структура керметов: а) TiC-ВЖЛ (увеличение $\times 50$);
б) TiC-ЖС6У (увеличение $\times 50$)

Таблица 1

Результаты определения микротвердости

№	Материал	Микротвердость $H_{0,1}$, МПа	Микротвердость $H_{0,2}$, МПа
1.	TiC-ЖС6У (TiC 50%)	980	1400
2.	TiC-ЖС6У (TiC 45%)	600	–
3.	TiC-ВЖЛ14Н (TiC 50%)	690	950
4.	TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%)	860	1050
5.	ЖС6У	540	650
6.	12Х18Н10Т	–	260

Таблица 2

Данные по пределу прочности материалов при сжатии (МПа)

	Температура испытания, °С	Кермет TiC-ЖС6У	Сплав ЖС6У
1	20	2440	1500
2	300	2270	1200
3	600	2215	980
4	900	1100	750

Таблица 3

Твердость образцов и покрытий, нанесенных на исследуемые образцы

№	Материал	Микротвердость $H_{0,1}$, МПа	Микротвердость $H_{0,2}$, МПа
1.	TiC-ЖС6У	983	1400
2.	TiC-ЖС6У+TiCrN	1870	–
3.	ЖС6У	540	650
4.	TiC-ЖС6У + TiN	1561	1590
5.	TiC-ЖС6У + Zr-Ti-N-C	1313	1380

Установлено, что для всех изучаемых фрикционных пар при трении скольжения всухую и в среде сырой нефти зависимость прочности τ_n адгезионных связей на срез от давления p_r на контакте в исследованном диапазоне температур имеет прямо пропорциональный характер и описывается биномиальной функцией со свободным членом τ_0 (прочности адгезионных

связей при $p_r = 0$) и коэффициентом пропорциональности β (упрочнения адгезионных связей от действия давления).

Выявлено, что контактирующие материалы и температура оказывают существенное влияние на несущую способность фрикционного контакта (предельные упругие контактные напряжения p_{rn}), фрикционные параметры τ_0 и β , а также предельную прочность τ_{nn} на срез адгезионных связей и молекулярную составляющую f_m коэффициента трения (табл. 4, 5 и 6).

Некоторые результаты исследования адгезионного взаимодействия приведены в табл. 4, 5 и 6, а также на рис. 2, 3 и 4.

Таблица 4

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении
по сплаву ЖС6У

	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$p_{rn}, \text{МПа}$	$\tau_{nn}, \text{МПа}$	f_m	β	$\tau_0, \text{МПа}$
Индендор: TiC-ЖС6У Образец: ЖС6У	20	3316	368	0,111	0,097	47
	150	2720	938	0,345	0,345	0
	300	2271	811	0,357	0,337	47
	450	1702	676	0,397	0,384	22
Индендор: ЖС6У Образец: ЖС6У	20	3459	871	0,252	0,226	89
	150	2937	1627	0,554	0,554	0
	300	1988	1095	0,551	0,551	0
	450	1164	385	0,331	0,331	0
Индендор: TiC-ВЖЛ14Н Образец: ЖС6У	20	3459	419	0,121	0,109	43
	150	2720	925	0,340	0,340	0
	300	1808	702	0,388	0,388	0
	450	1516	635	0,419	0,419	0

Таблица 5

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении
керамико–металлических материалов

	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$p_{rn}, \text{МПа}$	$\tau_{nn}, \text{МПа}$	f_m	β	$\tau_0, \text{МПа}$
Инд.: TiC-ЖС6У (TiC-55%) Обр.: TiC-ЖС6У (TiC-45-50%)	20	3611	321	0,089	0,087	6
	300	2720	843	0,310	0,281	80
	450	2195	863	0,393	0,393	0
Инд.: TiC-ВЖЛ14Н(TiC-64%) Обр.: TiC-ЖС6У (TiC-45-50%)	20	3946	500	0,127	0,095	126
	300	2825	800	0,283	0,263	56
	450	2053	620	0,302	0,302	0
Инд.: TiC-ВЖЛ14Н(TiC-64%) Обр.: TiC-ВЖЛ14Н (TiC-64%)	20	8489	962	0,113	0,113	0
	300	5581	1171	0,210	0,187	128
	450	3056	862	0,282	0,243	121

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении
керамико–металлических материалов с покрытием

	$\Theta, ^\circ\text{C}$	$p_m, \text{МПа}$	$\tau_{nn}, \text{МПа}$	f_m	β	$\tau_0, \text{МПа}$
Инд.: TiC-ВЖЛ14Н + TiCrN Обр.: TiC-ЖС6У + TiCrN	20	6237	711	0,114	0,074	249
	300	4775	642	0,134	0,114	97
	500	3459	732	0,212	0,181	106
Инд.: TiC-ЖС6У + TiCrN Обр.: TiC-ЖС6У + TiCrN	20	6609	705	0,107	0,104	17
	300	4331	516	0,119	0,088	135
	500	3611	796	0,220	0,175	165

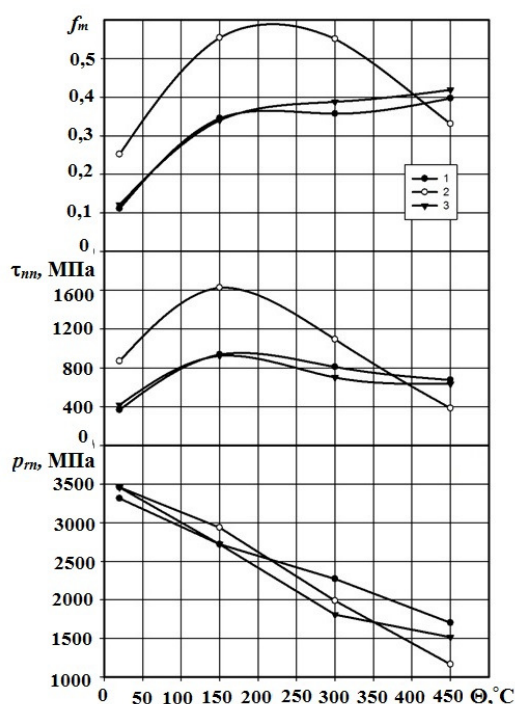


Рисунок 2 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта образцов ЖС6У с инденторами:
1-TiC-ЖС6У; 2-ЖС6У; 3-TiC-ВЖЛ14Н

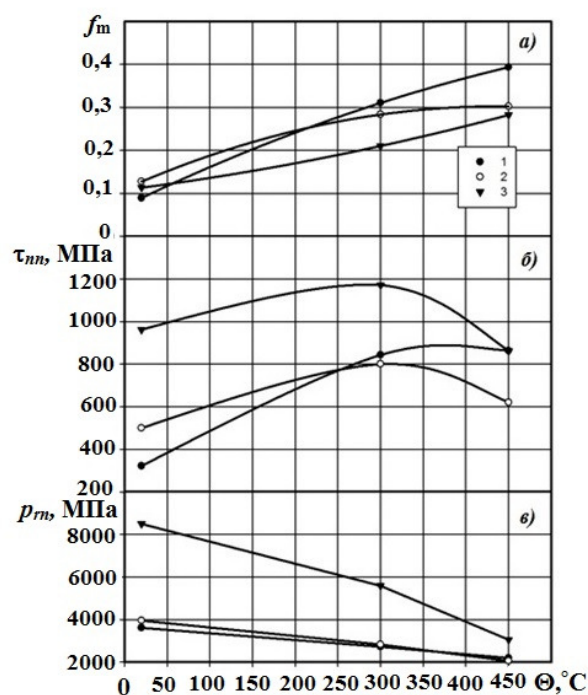


Рисунок 3 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики индентора с образцами:
1) TiC-ЖС6У (TiC 55%) – TiC-ЖС6У (TiC 45-50%);
2) TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%) – TiC-ЖС6У (TiC 45-50%);
3) TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%) – TiC-ВЖЛ14Н (TiC 64%).

Из рис. 2 следует, что использование кермета в качестве материала хотя бы для **одной** детали пары трения существенно уменьшает триботехнические характеристики τ_{nn} и f_m во всем исследованном диапазоне температур.

Применение керметов (рис. 3) в **обеих** деталях пары трения: повышает величину p_m нагрузочной способности фрикционного подвижного контакта примерно в 1,2-2 раза по сравнению с парами, в которых лишь одна деталь из кермета. При этом повышение температуры не оказывает столь значительного

влияния на уменьшение несущей способности фрикционного контакта. При температурах контакта выше $\sim 100^\circ\text{C}$ f_m уменьшается (примерно в 1,5-2 раза).

С нанесением покрытия (рис. 4) величина p_m мало изменяется. Это можно объяснить тем, что величина p_m , определяется в основном физико-механическими свойствами подложки, а с нанесением покрытий эти свойства мало изменяются. Нанесение износостойких покрытий Zr-Ti-N-C или TiN на поверхность **одной** из пар трения заметно (в 1,3-2 раза) уменьшает величины τ_{nn} и f_m . При этом существенной разницы в полученных результатах по трению с покрытиями Zr-Ti-N-C или TiN практически не получили.

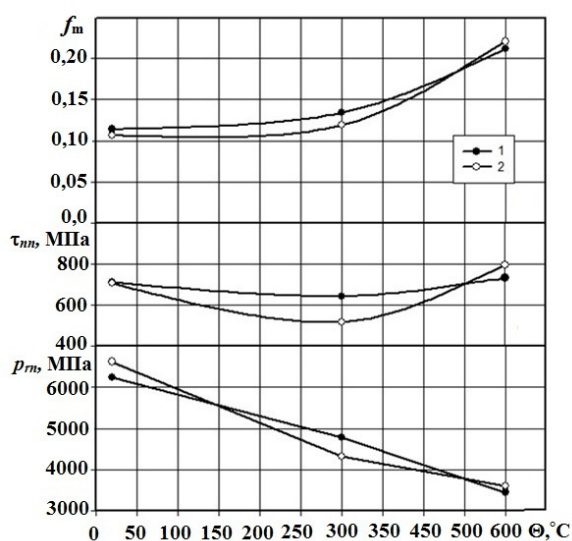


Рисунок 4 Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта образцов TiC–ЖС6У + TiCrN с инденторами:
1 - TiC-ВЖЛ14Н + TiCrN
2 - TiC- ЖС6У + TiCrN

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что нанесение износостойкого покрытия на поверхности **обеих** деталей из керметов пары трения существенно изменяет их триботехнические параметры: в 1,5-1,8 раза повышается несущая способность фрикционного контакта; изменяется характер зависимости фрикционного параметра τ_{nn} от температуры Θ контакта: с минимум при $\Theta \approx 450^\circ\text{C}$; температура Θ начинает оказывать заметное влияние на величину коэффициента f_m , начиная примерно с 450°C : при дальнейшем повышении температуры величина f_m повышается.

На основании теоретического анализа полученных результатов показано, что значительный вклад в улучшение триботехнических характеристик изучаемых керметов и покрытий вносит уменьшение пластичности «третьего тела», формирующегося на фрикционном контакте, а также повышение энергии активации его вязкого течения.

Установлено, что сырая нефть из-за наличия в ней абразивных включений, воды, соли и прочего не может быть смазочным материалом при трении, поэтому результаты по адгезионному взаимодействию, полученные в условиях сухого трения, вполне применимы для трения в среде сырой нефти.

В четвертой главе представлены результаты исследования изнашивания прямых и обратных пар трения (без покрытий и с покрытиями с металлическими и керамико-металлическими подложками); суммарного износа трибосопряжений.

Установлена функциональная связь интенсивности изнашивания исследуемых образцов (седла) при контактировании с более мягким индентором из сплава ЖС6У от величины фрикционного параметра β при температуре $\Theta = 150^\circ\text{C}$ (рис. 5). Функциональная зависимость интенсивности изнашивания индентора (шара) из кермета TiC-ЖС6У при трении с более мягкими образцами от величины β представлена на рис. 6.

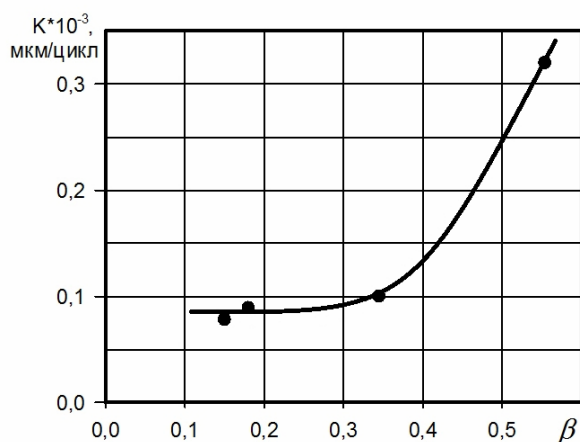


Рисунок 5 Влияние адгезионного параметра β на изнашивание образцов в обратных парах трения

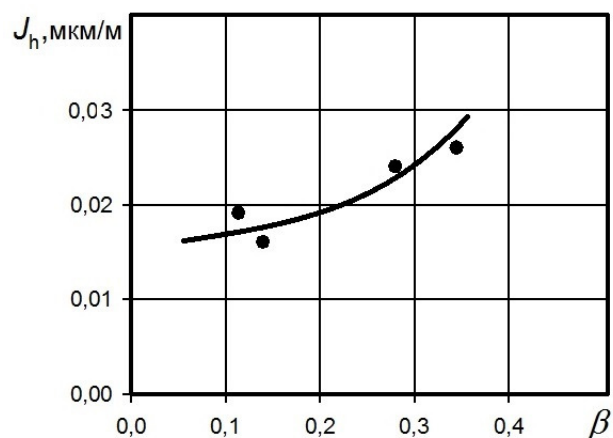


Рисунок 6 Влияние адгезионного параметра β на изнашивание индентора из кермета TiC-ЖС6У в прямых парах трения

Из рис. 5 и 6 следует, что в обоих случаях преобладающим было адгезионно-усталостное изнашивание поверхностей трения. Установлено, что уровень износа мягких образцов (седла) значительно повышается за счет дополнительного абразивно-механического изнашивания твердыми включениями TiC в кермете TiC-ЖС6У – материале индентора (шара).

При работе запорной арматуры изнашиваются обе контактирующие детали – в шаровых кранах это шар и седло. Поэтому исследовали суммарный износ контактирующих деталей (табл. 7 и рис. 7).

На рис. 7 в логарифмических координатах представлена зависимость суммарного износа V от адгезионного параметра β (при температуре $\Theta = 150^\circ\text{C}$) для одноименных пар трения из материалов ЖС6У, TiC-ЖС6У и TiC-ЖС6У с покрытиями TiN и Zr-Ti-N-C.

Результаты исследования износа трибосопряжений

Инденторы		Суммарный износ, $V, \text{мм}^3 * 10^{-2}$			
		Образцы / Микротвердость, МПа			
Материалы	Микро- твердость, МПа	ЖС6У 567	TiC-ЖС6У 1271	TiC-ЖС6У +TiN 1388	TiC-ЖС6У+ Zr-Ti-N-C 2060
ЖС6У	550	6,43	5,22	1,05	1,75
TiC-ЖС6У	1597	14,96	3,41	0,91	0,52
TiC-ЖС6У +TiN	2083	0,91	1,17	0,48	2,92
TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C	3420	0,35	0,54	0,81	0,32

Эта зависимость может быть описана степенной функцией:

$$V = C \cdot \beta^m, \quad (3)$$

где C – коэффициент, зависящий от условий и режима работы пар трения (в данном конкретном случае $C = 27$); m – показатель степени (в исследованиях получено $m = 2$), β – коэффициент упрочнения адгезионных связей от действия нормальных напряжений (давлений) на подвижном фрикционном контакте.

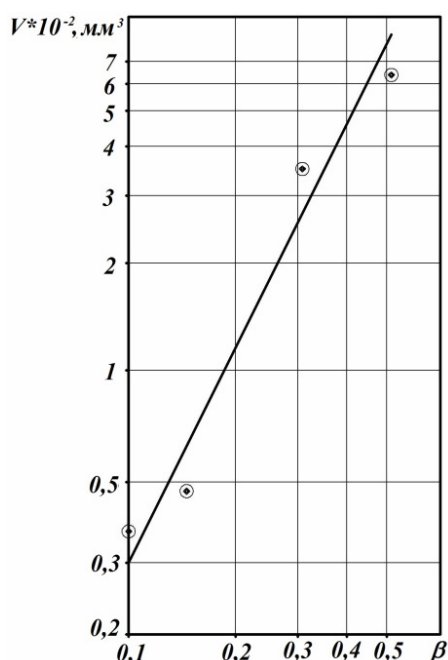


Рисунок 7 Зависимость суммарного износа трибосопряжений из одинаковых материалов (ЖС6У; TiC-ЖС6У и TiC-ЖС6У с покрытием из TiN и Zr-Ti-N-C) от адгезионного параметра β

Это, по существу, является прямым доказательством главенствующей роли адгезионных процессов в износе трибосопряжений, составленных из деталей из одноименных материалов на поверхностях трения.

Установленная зависимость (3) позволяет уже на стадии проектирования запорной арматуры трубопроводов давать оценку и прогнозировать работоспособность и надежность с учетом трибологических свойств материалов, из которых изготавливаются детали узла трения.

Из табл. 7 видно, что из полученных пар трения наименьший суммарный износ ($0,32 \text{ мм}^3 * 10^{-2}$) или наибольшую износостойкость

обеспечивает пара, изготовленная из кермета TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C (с коэффициентом $\beta = 0,11$).

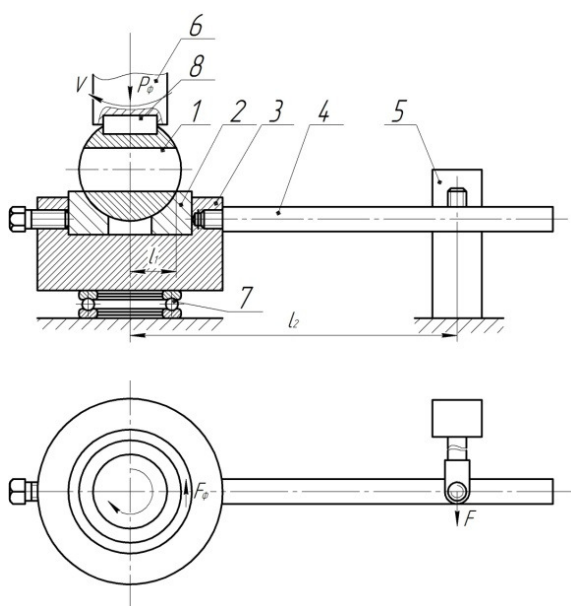
Металлографические исследования подтвердили абразивно-механический и адгезионно-усталостный характер изнашивания контактирующих поверхностей в изучаемых парах трения. Установлено, что на поверхностях трения могут образовываться вторичные структуры в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей могут в них внедряться, повышая изнашивание. Нанесение износостойких покрытий на **обе** контактирующие поверхности из керметов практически полностью исключает их абразивно-механическое изнашивание. Показано для пар трения из одноименных материалов превалирующим является адгезионно-усталостное изнашивание.

На основании результатов металлографических исследований и данных по износу трибосопряжений предложены механизмы формирования суммарного износа трибосопряжений из различных материалов, в том числе из керметов с покрытиями и без покрытий. Это позволило рекомендовать - для уменьшения износа трибосопряжений использовать керметы в обеих парах трения при изготовлении деталей запорной арматуры. Наибольший эффект по износостойкости можно получить, если на поверхности этих деталей нанести износостойкие покрытия.

В **пятой главе** рассмотрены вопросы практической реализации полученных результатов.

Приведены обобщения по применению керметов TiC-ЖС6У и TiC-ВЖЛ14Н в шаровых кранах запорной арматуры. Показано, что для достижения наиболее высоких показателей качества работы шаровых кранов (одновременно и по энергетическим затратам, и по ресурсу герметичности) рекомендуется **обе** детали пары трения (шар и седло) изготавливать из кермета с нанесением на их поверхности износостойких покрытий.

Приведено оборудование (рис. 8), методика и результаты стендовых испытаний пары трения «шар-седло» шарового крана из кермета TiC-ЖС6У. Эти испытания подтвердили результаты лабораторных исследований (табл. 8). При этом установлено, что коэффициент трения скольжения в трибосопряжении «шар-седло» из кермета TiC-ЖС6У определяется в основном молекулярной (адгезионной) составляющей коэффициента трения. Поэтому для повышения качества работы шаровых кранов необходимо обратить особое внимание на мероприятия по уменьшению параметров адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей, в том числе путем нанесения на них износостойких покрытий.



а)



б)

Рисунок 8 Схема работы а) и общий вид ЧМТ-1 б) при исследовании трения пары «шар-седло» шарового крана: 1 – шар; 2 – седло; 3 – чаша; 4 – рычаг; 5 – датчик фиксирования силы трения F ; 6 – приводной вал; 7 – упорный подшипник качения; 8 – шпонка.

Таблица 8

Сравнение триботехнических характеристик, полученных в лабораторных и стендовых испытаниях трибосопряжений из керметов TiC-ЖС6У

Сравниваемые параметры	Лабораторные исследования	Стендовые испытания
Коэффициент трения	0,31	0,278-0,395
τ_0 , МПа	50	30
β	0,281	0,258

Как показали расчеты, экономия от использования одного нового шарового крана из кермета TiC-ЖС6У взамен существующей задвижки составляет 265 тыс. руб (за счет повышения эксплуатационной надежности и снижения энергетических затрат).

В **приложении** приведено заключение по результатам производственных испытаний шаровых кранов КШТ-50*2,5-600 в филиале АНК «Башнефть-УНПЗ» (г. Уфа).

В **заключении** приведены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что применение изучаемых керметов в обеих деталях пары трения (шара и седла) в 1,2-2 раза повышает несущую способность (предельные давления) подвижного фрикционного контакта и в 1,5-2 раза уменьшает молекулярную составляющую коэффициента трения по сравнению с парами, в которых лишь одна деталь из кермета. При этом повышение температуры не оказывает значительного влияния на уменьшение несущей способности контакта.

2. Проведенные экспериментальные исследования по определению прочности адгезионной связи на срез и молекулярной составляющей коэффициента трения показали, что эти значения для сопряжения «шар-седло» при наличии нефти несущественно отличаются от результатов при трении без нее.

3. На основании теоретического анализа полученных экспериментальных результатов исследования адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей в различных условиях трения, показано, что значительный вклад в улучшение триботехнических характеристик изучаемых керметов вносит уменьшение пластичности «третьего тела», формирующегося на фрикционном контакте.

4. Установлено, что в обратных парах трения (когда шар мягче седла) изнашивание более твердых поверхностей (седла) функционально связано с адгезионно-усталостными процессами, происходящими на подвижном фрикционном контакте с мягким телом, о чем свидетельствует впервые экспериментально полученная степенная зависимость изнашивания от коэффициента β упрочнения адгезионных связей от действия нагрузки.

5. Показано, что в прямых парах трения (когда шар тверже) уровень изнашивания более мягких больших поверхностей (седла) значительно повышается за счет дополнительного абразивно-механического изнашивания твердыми включениями TiC в кермете TiC-ЖС6У – материале более твердого тела (шара).

6. Износостойкие покрытия не только экранируют поры в керметах на основе карбида титана, но и препятствуют выходу на поверхности трения твердых включений TiC, этим самым снижая абразивно-механическое и окислительное изнашивание в порах трения и уменьшая суммарный износ трибосопряжений.

7. Впервые экспериментально установлено, что суммарный износ (объемный) трибосопряжений из пар трения (с близкой по величине микротвердостью) функционально зависит от коэффициента β упрочнения

адгезионных связей на подвижном фрикционном контакте и описывается уравнением:

$$V = C \cdot \beta^m.$$

Для полученных пар трения: $C = 27$; $m = 2$. Наибольшую износостойкость обеспечивает пара, изготовленная из кермета TiC-ЖС6У с покрытием Zr-Ti-N-C.

8. Металлографические исследования подтвердили абразивно-механический и адгезионно-усталостный характер изнашивания контактирующих поверхностей в изучаемых парах трения. Установлено, что на поверхностях трения формируются вторичные структуры в виде пленок-оксидов, которые в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, могут в них внедряться, повышая изнашивание. Нанесение износостойких покрытий на обе контактирующие поверхности из керметов практически полностью исключает их абразивно-механическое изнашивание. Для пар трения из одноименных материалов (с близкой микротвердостью) превалирующим является адгезионно-усталостное изнашивание.

9. Установлено, что коэффициент трения скольжения в трибосопряжении «шар-седло» из керметов на основе TiC определяется в основном величиной молекулярной (адгезионной) составляющей этого коэффициента, поэтому для повышения качества работы шаровых кранов сформулированы обобщенные рекомендации по уменьшению параметров адгезионного взаимодействия контактирующих поверхностей, путем нанесения на них износостойких покрытий.

10. Стендовые и натурные испытания шаровых кранов из керамико-металлического материала TiC-ЖС6У подтвердили результаты лабораторных исследований. Осуществлено внедрение шарового крана из кермета TiC-ЖС6У в реальную эксплуатируемую задвижку и экономия от использования только одного шарового крана составляет 265 тыс.руб. (за счет повышения эксплуатационной надежности и снижения энергетических затрат привода).

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы:

1. Представленные в работе результаты по исследованию применения керметов на основе карбида титана являются перспективными для последующего изучения в сопряжениях с применением полимерных материалов.

2. Установленные результаты по повышению надежности применения керамико-металлических материалов открывают возможности по их использованию в широком классе тяжело нагруженных узлов трибосопряжений: пресс-формы для литья под давлением, пуансоны, матрицы, раскатные ролики для раскатки дисковых турбин, лопатки газотурбинных двигателей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах из списка ВАК:

1. **Камалетдинова, Р.Р.** Износ трибосопряжений из керамико-металлического материала на основе карбида титана / Р. Р. Камалетдинова, Л. Ш. Шустер, Руст.Ф. Мамлеев, С. В. Чертовских, Р. М. Киреев // Трение и износ. – 2016. – Т. 37. № 2 – С. 214–218.
2. **Камалетдинова, Р.Р.** Триботехнические характеристики керметов на основе карбида титана в экстремальных условиях нагружения / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, С.В.Чертовских, Л.Ш. Шустер // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 1. – С. 31–33.
3. **Камалетдинова, Р.Р.** Вопросы применения керметов на основе карбида титана в трубопроводной запорной арматуре / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, С.В. Чертовских, Л.Ш. Шустер // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 2(11). – С. 3–6.
4. **Камалетдинова, Р.Р.** Влияние износостойких покрытий на триботехнические характеристики керамико-металлических материалов / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, Л.Ш.Шустер // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 2. – С. 5–9.
5. **Камалетдинова, Р.Р.** Применение керметов в запорной арматуре с учетом их триботехнических характеристик / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, Л.Ш. Шустер // Машиностроение и инженерное образование. – 2016. – № 1. – С. 12–21.
6. **Камалетдинова Р.Р.** Триботехнические характеристики керметов на основе карбида титана для изготовления деталей запорной арматуры / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, Л.Ш. Шустер // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2016. – № 3 – С. 30–35.
7. **Камалетдинова Р.Р.** Повышение эффективности применения керамико-металлических материалов в тяжело нагруженных трибосопряжениях / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер, Раф.Ф. Мамлеев, В.Л. Юрьев // Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 4 – С. 29–33.
8. **Камалетдинова Р.Р.** Зависимость износа трибосопряжений от материала деталей пары трения / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер, Н.К. Криони // Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 4 – С. 33–38.
9. **Камалетдинова Р.Р.** Влияние нефтяной среды на триботехнические характеристики скользящего контакта в запорной арматуре / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер, С.В. Чертовских // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 4(189). – С. 45–48.

10. **Камалетдинова Р.Р.** Влияние свойств материала деталей трибосопряжений на их изнашивание / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер // Вестник машиностроения. – 2016. – № 7 – С. 50–52.

11. **Камалетдинова, Р.Р.** Металлографические исследования изнашивания материалов, используемых в шаровых кранах / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер // Вестник УГАТУ. – 2016. – Т. 20, № 2(72) – С. 61–65.

Публикации в других изданиях:

12. **Камалетдинова, Р.Р.** Проблемы создания и применения высокотемпературных композиционных износостойких материалов / Р.Р. Камалетдинова, Руст.Ф. Мамлеев, Раф.Ф. Мамлеев, Л.Ш. Шустер // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий. Межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2013. – 218 с.

13. **Камалетдинова, Р.Р.** Триботехнические характеристики керамико-металлических композиционных материалов с учетом смазки / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер, Раф.Ф. Мамлеев, С.В. Чертовских // Трибология - машиностроению: Труды десятой юбилейной Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов, Москва 19 – 21 ноября 2014 г.: - Москва: Перо, 2014. – С. 60.

14. **Камалетдинова, Р.Р.** Триботехнические характеристики керамико-металлических композиционных материалов с износостойкими покрытиями / Р.Р. Камалетдинова // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Межвузовский научный сборник – Уфа: УГАТУ, 2015. – С. 114–115.

15. **Камалетдинова, Р.Р.** Исследование изнашивания металлокерамических материалов на основе карбида титана / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер, С.В. Чертовских // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: Межвузовский научный сборник – Уфа: УГАТУ, 2015. – С. 109–113.

16. **Камалетдинова, Р.Р.** Триботехнические характеристики керамико-металлических композиционных материалов в экстремальных условиях нагружения / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер // Мавлютовские чтения: XIII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция – Уфа: УГАТУ, 2015. – С. 613–617.

17. **Камалетдинова, Р.Р.** Анализ результатов исследования адгезионного взаимодействия при трении керамико-металлических композиционных материалов / Р.Р. Камалетдинова, Л.Ш. Шустер // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: VI Всероссийский межвузовский научно-технический сборник – Уфа: УГАТУ, 2016. – С. 158–164.

КАМАЛЕТДИНОВА РЕГИНА РАМИЛЕВНА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРМЕТОВ
НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА В ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЕ

Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.10.2016 г. Формат 60×84/16.

Печать офсетная. Бумага офсетная.

Ризография. Усл. печ. л. 1,5

Тираж 100 экз. Заказ № ____.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д,

пл. им. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2.