

КАПУСТИН ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ
И КОНСТРУКЦИЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ШАРНИРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ МАНИПУЛЯТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

Специальности: 2.5.3 – Трение и износ в машинах,
2.6.17 – Материаловедение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Памфилов Евгений Анатольевич,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Научный консультант:

Пилюшина Галина Анатольевна
доктор технических наук

**Официальные
оппоненты:**

Мукутадзе Мурман Александрович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Высшая математика»
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
университет путей сообщения»;

Камынин Виктор Викторович
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Общетехнических
дисциплин и физики» ФГБОУ ВО «Брянский
государственный инженерно-технологический
университет».

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государствен-
ный университет (национальный исследова-
тельский университет)»

Защита состоится «20» сентября 2022 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 99.0.033.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д.10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», а также на сайте университета <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/kapustin-vladimir-vasilevich>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.0.033.02
кандидат технических наук, доцент

В.А. Хандожко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Успешное развитие промышленности России невозможно без использования отечественной надёжной и высокопроизводительной техники. Её отсутствие ставит под вопрос обеспечение национальной безопасности страны, так как на российском рынке во многом доминируют зарубежные компании. Для устранения этой проблемы необходимо создание отечественных машин, обладающих высокой износостойкостью и другими эксплуатационными параметрами. Поэтому исследования в указанном направлении являются актуальными и востребованными.

Подтверждением актуальности работы являлось выделение гранта «Исследование и создание подшипников скольжения повышенной износостойкости», в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, (проект № 9.10677.2018/11.12), в выполнении которого принимал участие автор диссертации.

Степень разработанности темы. Исследования в сфере создания манипуляторных технологических машин и обеспечения их высоких эксплуатационных показателей проводились отечественными и зарубежными учеными: В.В. Амалицким, А.Е. Алексеевым, В.А. Александровым, Э.Д. Авдеевым, С.А. Воскресенским, В.П. Ивановским, Ю.П. Иванищевым, В.И. Мелеховым, А.В. Моисеевым, Г.Ф. Прокофьевым, А.А. Санниковым, М.Н. Симоновым, А.И. Серебрянским, А.А. Шадриним, Д. Андерсеном, М. Мейером, Д. Джонсоном, Д. Харрисом, М. Матуя и др. В этих исследованиях изучались условия функционирования и повышения надежности рассматриваемых машин.

В части повышения износостойкости технологических машин существенный вклад внесен: А.С. Ахматовым, В.А. Белым, В.Ф. Безъязычным, Э.Д. Брауном, Н.А. Буше, И.А. Буяновским, В.В. Грибом, Д.Н. Гаркуновым, И.Г. Горячевой, Н.Б. Демкиным, Ю.Н. Дроздовым, И.В. Крагельским, В.И. Колесниковым, Б.И. Костецким, Е.А. Памфиловым, Ю.К. Машковым, Н.М. Михиным, Н.К. Мышкиным, Э.В. Рыжовым, П.А. Ребиндером, Г.М. Сорокиным, А. Г. Сусловым, Д.Н. Решетовым, А.В. Чичинадзе, М.М. Хрущовым, В.В. Шульцем, Х. Менгом, Д.Муром, К. Фуллером, Ф. П. Боуденом, Д. Тейбором, Х. Чаном и другими учеными.

В то же время для решения задач диссертационной работы необходимо расширение и конкретизация исследований применительно к трибосопряжениям технологических машин, работающих в условиях действия ударных и вибрационных нагрузок, повышенных эксплуатационных и низких климатических температур, абразивного и коррозионно-механического воздействия, наличия химически- агрессивных сред.

Цель и задачи исследования. Целью работы является обоснование и реализация путей увеличения износостойкости подшипников скольжения шарнирных соединений манипуляторов технологических машин на основе обеспечения их благоприятных триботехнических параметров, достигаемых за счёт уточнения состава антифрикционных материалов узлов скольжения, создания и исследования новых конструкций подшипников скольжения и шарнирных узлов.

Достижение поставленной цели требует решения следующих основных задач:

1. Уточнить условия работы узлов скольжения шарниров манипуляторов, выявить закономерности изнашивания их деталей и причины отказов, а также факторы, оказывающие наибольшее влияние на интенсивность изнашивания.

2. Выявить влияние эксплуатационных факторов и параметров, определяющих состояние контактирующих деталей, и функциональных поверхностных слоёв на их износостойкость.

3. Разработать основы создания антифрикционных материалов и конструкций узлов для повышения износостойкости шарнирных соединений и обосновать их новые составы и конструкции.

4. Усовершенствовать методики триботехнических исследований, обеспечивающие достоверную оценку влияния механических, теплофизических, демпфирующих и других функциональных характеристик материалов на работоспособность узлов трения.

5. Выполнить экспериментальные исследования влияния эксплуатационных условий и триботехнических свойств антифрикционных материалов и конструкций узлов трения на износостойкость, теплофизические и демпфирующие параметры, и установить наиболее перспективные из них.

6. Провести производственные испытания рекомендованных материалов и шарнирных соединений и установить технико-экономический эффект от их использования.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются шарнирные соединения манипуляторов технологических машин. Предмет исследования – закономерности изнашивания подшипниковых узлов шарнирных соединений, работающих при динамических нагрузках в условиях негативных температурных воздействий.

Теоретико-методологическая основа исследования заключается в применении комплексного подхода, включающего: анализ особенностей эксплуатации деталей, выявление возможных механизмов их изнашивания с учётом влияния эксплуатационных условий и обоснования состава используемых материалов и конструкций для достижения благоприятных режимов трения по механическим и тепловым показателям.

Научная новизна исследований

1. Разработка принципов достижения благоприятного температурного режима работы триботехнических узлов, отличающихся возможностью повышения теплопроводности и теплоёмкости материалов за счёт введения в их состав легкоплавких составляющих, или размещения их в полостях деталей подшипникового узла.

2. Разработка методов повышения триботехнических характеристик подшипников скольжения, отличающихся возможностью создания благоприятных остаточных напряжений в функциональных поверхностных слоях за счёт использования посадок с натягом и сжимающих пружин.

3. Разработаны новые композиционные материалы на основе искусственных и растительных полимеров, обоснованы их составы, обеспечивающие благоприятные триботехнические и тепловые характеристики.

4. Разработан способ определения твёрдости композиционных материалов, отличающийся дифференцированной оценкой свойств отдельных структурных составляющих.

Научные результаты, выносимые на защиту

1. Принципы снижения температурного режима работы триботехнических узлов путём повышения теплопроводности и теплоёмкости материалов подшипников скольжения, за счёт введения в их состав или в объём деталей легкоплавких элементов, и тем самым обеспечения более эффективного отвода и поглощения тепла из зоны трения.

2. Методы повышения износостойкости подшипников скольжения путём создания благоприятных остаточных напряжений сжатия в функциональных поверхностных слоях.

3. Материалы вкладышей подшипников скольжения повышенной износостойкости достигаемой за счёт обеспечения благоприятного их состава и повышенной теплопроводности и теплоёмкости.

4. Метод определения твёрдости композиционных материалов, отличающийся дифференцированной оценкой свойств отдельных структурных составляющих.

Теоретическая значимость работы заключается в уточнении закономерностей изнашивания шарнирных соединений и получении более информативных данных, необходимых для выбора материалов деталей шарнирных соединений, и благоприятного их состава, а также в создании подшипников скольжения, обладающих повышенными триботехническими свойствами. Разработаны принципы самоорганизации температурного режима работы триботехнических узлов. Усовершенствованы методики экспериментальных исследований, позволяющие повысить точность оценки триботехнических параметров.

Практическую значимость работы составляет:

1. Антифрикционные композиционные материалы на основе политетрафторэтилена и антифрикционных наполнителей, стабилизирующих температуру работы триботехнического узла.

2. Новые конструкции подшипниковых узлов, отличающиеся повышенной работоспособностью неподвижных соединений за счёт резьбовой фиксации деталей и точного их позиционирования.

3. Новые конструкции подшипников скольжения, обладающие температурной стабильностью работы и повышенной износостойкостью.

Достоверность результатов и выводов подтверждается их сопоставимостью с известными теоретическими закономерностями и экспериментальными данными; использованием апробированных методик при проведении исследований, сходимостью теоретических выводов с результатами опытно-промышленных и лабораторных испытаний.

Лично автором выполнен обзор состояния вопроса, определены цель и задачи работы, проведены экспериментальные исследования, обобщены их результаты; сформулированы выводы, подготовлены совместно с научным руководителем результаты для публикации научных статей и тезисов докладов, предложены идеи изобретений.

Соответствие диссертации паспортам научных специальностей. Диссертация соответствует специальности научных работников: 2.5.3 – «Трение и износ в машинах» по следующим пунктам: 7. Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных слоев и 12. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем.

Одновременно существенная часть выполненных разработок соответствует паспорту научной специальности 2.6.17 – «Материаловедение» по пунктам: 1. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий и 6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических и неметаллических материалов и функциональных покрытий.

Апробация результатов диссертации. Положения и результаты исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на международных конференциях: «Новые материалы и технологии в машиностроении» (г. Брянск, 2016-2021 г.); «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе:

проблемы и перспективы рационального использования» (г. Воронеж, 2017 г.); «Новые горизонты» (г. Брянск, 2017-2021 г.); «Современные технологии в машиностроении», (г. Чебоксары, 2018 г.); «Трибология - машиностроению», посвященная 80-летию ИМАШ РАН (2018 г. Москва); «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» ИМАШ РАН (г. Москва 2021 г.); «Механика и трибология транспортных систем» (Ростов-на-Дону 2021 г.)

Публикации. Опубликовано 34 работы, 4 из них в журналах из Перечня ВАК Минобрнауки России, 4 – в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 19 в сборниках международных и всероссийских конференций, получено 7 патентов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка цитируемой литературы (205 наименований), содержит 175 страницы машинописного текста, в том числе 48 рисунков, 21 таблицы и 2 приложения.

Во введении представлены актуальность проблемы, обоснование и сущность реализации перспективных научно-технических путей разработке трибосистем шарниров манипуляторов технологических машин, путём обеспечения самоорганизации режимов трения в подшипниках скольжения по механическим и тепловым показателям, особенности новых антифрикционных материалов и конструкций подшипников скольжения и шарнирных соединений; сформулированы цель, задачи исследования и научная новизна.

В первой главе рассматриваются условия эксплуатации, причины отказов и возможности повышения триботехнических характеристик деталей манипуляторов. Выявляются механизмы и интенсивность изнашивания деталей шарнирных соединений, анализируются перспективы повышения их износостойкости. Установлены характерные виды износа деталей подшипников шарнирных соединений (рис. 1).

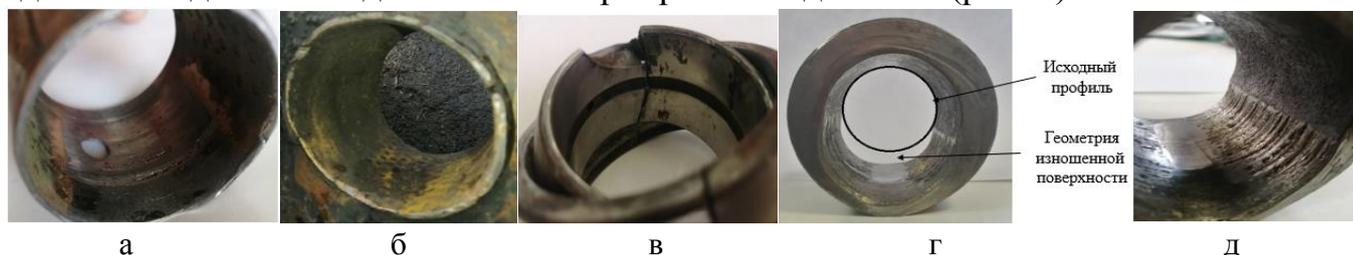


Рисунок 1 - Характерные виды износа деталей шарнирных соединений: а – абразивный износ; б – отслоение упрочняющего покрытия; в – трещины и разрушения; г – износ цилиндрической втулки; д – поверхность изнашивания при 5 кратном увеличении г.

Кроме того, отмечается износ неподвижных соединений, проявляющийся в виде фреттинг-коррозии. Значительно и влияние тепловыделения по причине недостаточной диссипации энергии.

Изложенное подчёркивает сложность и разнообразность процессов изнашивания деталей, что затрудняет выработку возможных путей повышения работоспособности трибосопряжений. В результате формулированы цель работы и пути её достижения.

Во второй главе рассмотрены особенности фрикционного взаимодействия в шарнирных соединениях и установлены возможности оптимизации состава и структуры антифрикционных материалов.

В случае преобладающего адгезионно-механического изнашивания основными критериями являются напряженное состояние, площадь касания поверхностей, твёрдость соприкасающихся деталей.

Если основным механизмом изнашивания является усталостное поверхностное разрушение, то величину износа целесообразно оценивать с использованием критерия:

$$K_i = v_l p / \sigma_0, \quad (1)$$

где p – давление в контакте; σ_0 – предел усталости; v_l – скорость скольжения.

Оценка влияния шероховатости считается достаточно эффективной при использовании фактора Крагельского-Комбалова:

$$K_i = R_{max} / (r_{ш} b_{ш}^{1/v_{ш}}), \quad (2)$$

где R_{max} – максимальная высота неровностей; $r_{ш}$ – приведённый радиус неровности; $b_{ш}$ и $v_{ш}$ – параметры опорной кривой.

Для выявления зон повышенной интенсивности изнашивания удобно использовать критерии структурной и геометрической неоднородностей триботехнических материалов $K_{H\mu}$ и K_R :

$$K_{H\mu} = \frac{H_{\mu max}}{H_{\mu min}}; \quad K_R = \frac{R_{max}}{n R_a}, \quad (3)$$

где $H_{\mu min}$ и $H_{\mu max}$ – минимальное и максимальное значения микротвёрдости материала; R_a – среднеарифметическое отклонение профиля; R_{max} – максимальная высота неровностей; n – коэффициент, учитывающий способ формирования шероховатости при обработке деталей.

В качестве критерия изнашивания в виде хрупкого микровыкрашивания при действии ударных нагрузок, может быть использован предложенный показатель:

$$K_i = HRA \times K_c \times \Pi_c / a_c, \quad (4)$$

где HRA – твёрдость; K_c – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, МПа $m^{0.5}$; Π_c – количество микротрещин в объёме поверхностного слоя, приводящих к отделению продуктов износа; a_c – минимальная протяжённость микротрещин, приводящих к формированию продуктов износа.

Коррозионно-механическое изнашивание, наблюдаемое при совместном действии механических нагрузок и агрессивной среды, зачастую сопровождается синергизмом механических и химических явлений, которое может быть определено суммированием эффектов отдельных составляющих. Синергетическая составляющая определяется по формуле:

$$J_{cw} = J_w + J_c + \Delta J_s, \quad (5)$$

где ΔJ_s – синергетическая составляющая износа, состоящая из индуцированного коррозией износа ΔJ_w и индуцированной изнашиванием коррозии ΔJ_c ; J_c , J_w – коррозионная и механическая составляющие износа.

Критерий, определяющий влияние температуры на изнашивание соединений триботехнического узла, может быть записан следующим образом:

$$K_i = t_k / t_{kp}, \quad (6)$$

где t_k – температура в контакте, t_{kp} – критическая температура, достижение которой приводит к недопустимой деструкции поверхностного слоя (например, температуры плавления, характерных физико-химических и структурных превращений и др.)

Важным является и критерий, отражающий влияние температурного градиента и некоторых других параметров теплового пограничного слоя, определяемый по формуле:

$$K_i = q \delta_T / (\lambda_{1,2} t_{kp}), \quad (7)$$

где q – удельный тепловой поток, действующий на контактирующие детали; $\lambda_{1,2}$ – коэффициенты теплопроводности материалов деталей; δ_T – толщина теплового пограничного слоя; t_{kp} – критическая температура.

Термомеханический критерий, который характеризует склонность материалов к схватыванию, имеет следующий вид:

$$K_m = pc(t_{к.п.} - t) / \sigma_s, \quad (8)$$

где σ_s – предел текучести; t – температура контакта; $t_{к.п.}$ – температура плавления материала в контактной зоне; p – плотность материала; c – удельная теплоёмкость материалов деталей.

Минимизация влияния теплофизических явлений достигается за счёт обеспечения диссипации тепловой энергии путём повышения теплопроводности материалов и аккумуляцией тепловой энергии в объёме деталей или специально введённых теплоаккумулирующих элементов.

Большое влияние на износ оказывает напряжённое состояние поверхностных слоёв, при этом желательным является создание остаточных напряжений сжатия, а также поддержание их в процессе эксплуатации. Уровень напряжённого состояния может быть определён по формуле:

$$\sigma = \vec{\sigma}_{\text{эксп.}} + \vec{\sigma}_{\text{темп.}} + \vec{\sigma}_{\text{остат.}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{техн.}}$ – эксплуатационные напряжения; $\sigma_{\text{темп.}}$ – температурные напряжения; $\sigma_{\text{ост.}}$ – формируемые остаточные напряжения.

На основании теоретического анализа предложена концепция создания новых композиционных антифрикционных материалов. Один из них представляет политетрафторэтиленовую основу (ПТФЭ), включающую 1-3% дисульфида молибдена (MoS_2), 2-6% скрытокристаллического графита (СГ) и 15-20% легкоплавкого материала (ЛМ), заключенного в тонкостенные капсулы.

В таких материалах тепло, помимо теплоотвода, расходуется на плавление содержимого капсул. Это препятствует увеличению температуры материала и снижает тепловую нагрузку на узлы скольжения. При этом оболочки капсул с легкоплавким материалом могут выполняться из металла с высокой теплопроводностью, а температура его плавления выбирается исходя из благоприятной температуры работы подшипников скольжения, не превышая её на 10-20 °С.

Установлена также возможность использования подшипников скольжения, представляющих слоистую структуру, состоящую из чередующихся слоёв модифицированной древесины и материалов высокой теплопроводности.

Третья глава посвящена обоснованию основ создания новых конструкций подшипников скольжения повышенной износостойкости. При этом отмечается, что обеспечение термической стабильности их работы может быть достигнуто за счёт введения в объём деталей узла соответствующих элементов, вследствие чего происходит оптимизация теплового режима работы таких узлов трения. Для расчёта и обеспечения необходимой диссипации выделяющегося тепла в зоне контактирования вкладыша $Q_{\text{вкл}}$ и вала $Q_{\text{в}}$ при принятом допустимом нагреве узла скольжения можно воспользоваться следующими формулами:

$$Q_{\text{в}} = N_i \times \tau \times v_{\text{в}}; \quad Q_{\text{вкл}} = N_i \times \tau \times v_{\text{вкл}}, \quad (10)$$

где N_i – мощность, реализующаяся в процессе выполнения технологической операции, Вт; τ – продолжительность операции, с; v – доля мощности, приходящаяся на подшипниковый узел на входящие в его состав вал – $v_{\text{в}}$ и вкладыш – $v_{\text{вкл}}$.

Объём, заполняемых легкоплавким веществом полостей вала $V_{\text{в}}$ и вкладыша $V_{\text{вкл}}$:

$$V_{\text{в}} = \frac{N_i \times \tau \times v_{\text{в}}}{\rho m [c_{\text{т}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{ср}}) + r]}; \quad V_{\text{вкл}} = \frac{N_i \times \tau \times v_{\text{вкл}}}{\rho m [c_{\text{т}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{ср}}) + r]}, \quad (11)$$

где p - плотность легкоплавкого материала кг/м^3 , m – масса плавящегося материала, кг ; C_m – удельная теплоемкость твердой фазы материала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $T_{пл}$ – температура плавления, $^\circ\text{C}$; $T_{ср}$ – температура окружающей среды $^\circ\text{C}$; r – удельная теплота плавления, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Также существенным фактором повышения износостойкости является оптимизации напряжённого состояния поверхностных слоёв, что обеспечивается использованием составных вкладышей, соединяемые по конической посадке с натягом. Его величина регулируется, обеспечивая возможность управлять величиной формируемых напряжений.

Расчёт напряжённого состояния подшипника скольжения производится по формулам:

$$\sigma_{\text{остат.}} = \sigma_{\Delta} + \sigma_{\text{пруж.}} \quad (12)$$

$$\sigma_{\Delta} = \sigma_t = -p_c \frac{1 + (\frac{d_1}{d})^2}{1 - (\frac{d_1}{d_2})^2}, \quad (13)$$

где d_1 – диаметр отверстия внутренней втулки; d – посадочный диаметр; d_2 – диаметр отверстия наружной втулки; σ_t – тангенциальные напряжения; P_c - контактное напряжение.

$$P_c = \Delta/d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right), \quad (14)$$

где Δ - натяг в соединении; E_1 - модуль упругости внутренней втулки 1; E_2 - модуль упругости наружной втулки 2; C_1, C_2 - коэффициенты радиальной податливости.

$$\sigma_t = -P_c \frac{1 + (\frac{d_1}{d})^2}{1 - (\frac{d_1}{d_2})^2} = -\Delta/d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) \left(\frac{1 + (\frac{d_1}{d})^2}{1 - (\frac{d_1}{d_2})^2} \right) \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{d}{2E_1} \left[\frac{1 + (d_1/d)^2}{1 - (d_1/d)^2} \right] - \mu_1 ; C_2 = \frac{d}{2E_2} \left[\frac{1 + (d/d_2)^2}{1 - (d/d_2)^2} \right] - \mu_2, \quad (16)$$

где μ_1 и μ_2 - коэффициенты Пуассона внутренней и наружной втулок.

Схема узла скольжения, в котором реализован теплоаккумулирующий эффект и формирование напряжений сжатия в функциональном поверхностном слое, представлена на рисунке 2.

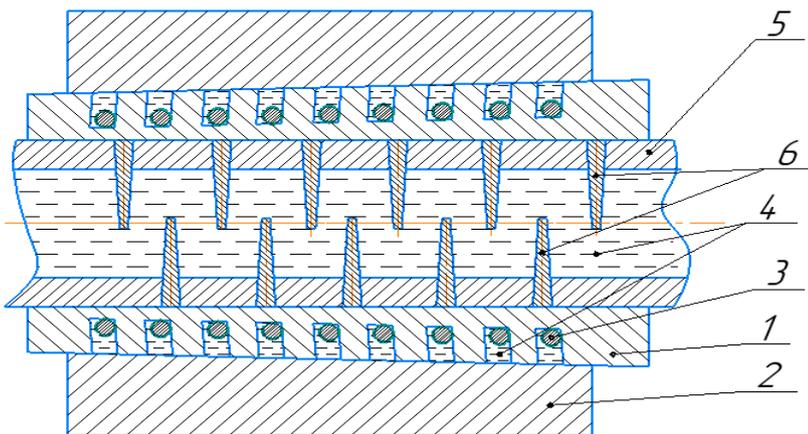


Рисунок 2 – Узел скольжения шарнирного соединения: 1 и 2 – внутренняя и наружная втулки; 3 – пружина; 4 – легкоплавкий материал; 5 – вал; 6 – теплоотводящие элементы.

Важным является формирование благоприятной микрогеометрии и структуры фрикционных поверхностей, позволяющие повысить антифрикционные и демпфирующие характеристики подшипникового узла.

Эффективна и аморфизация материала поверхностного слоя для чего вал подвергают приработке с введением в зону контакта специальной технологической среды.

Что касается неподвижных соединений, то их прочность достигается фиксацией пальца за счёт использования резьбовых соединений и применения точного осевого позиционирования деталей соединениях. Конструкция соединения с резьбовым закреплением вкладышей представлена на рисунке 3.

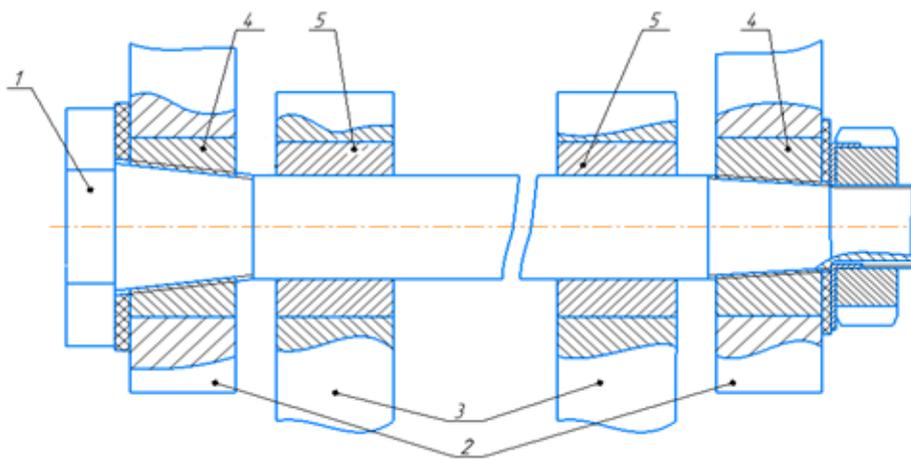


Рисунок 3 - Конструкция шарнира с неподвижным резьбовым соединением: 1 - шарнирный палец с конической наружной резьбой; 2, 3 - проушины смежных элементов манипулятора; 4 - вкладыши с внутренней конической резьбой; 5 - вкладыши подшипников скольжения.

Конструкция с повышенной точностью позиционирования деталей представлена на рисунке 4. В этом варианте фиксация и закрепление пальца осуществляется с помощью подвижных элементов 5 с помощью которых обеспечивается повышенная точность.

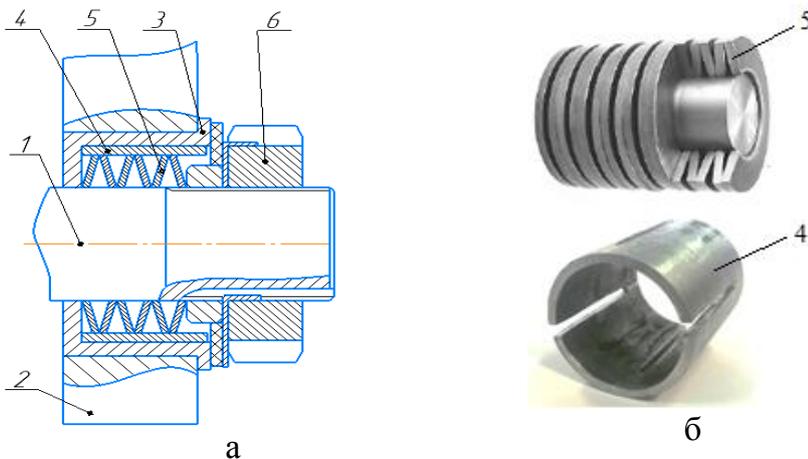


Рисунок 4 - Шарнирное соединение с повышенной точностью позиционирования деталей: а- неподвижная опора шарнирного соединения; б - блок позиционирующих элементов и промежуточная втулка; 1 – шарнирный палец; 2 – проушина; 3 – стакан; 4 – промежуточная втулка; 5 – позиционирующие элементы; 6 – гайка.

Четвёртая глава отражает существо экспериментальных исследований и методические основы их выполнения. Для проведения исследований в условиях изнашивания использовалась установка, кинематическая схема которой и общий вид представлены на рисунке 5.

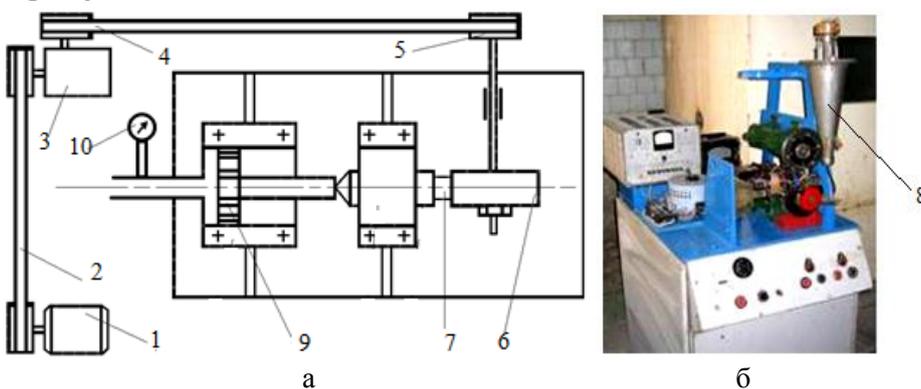
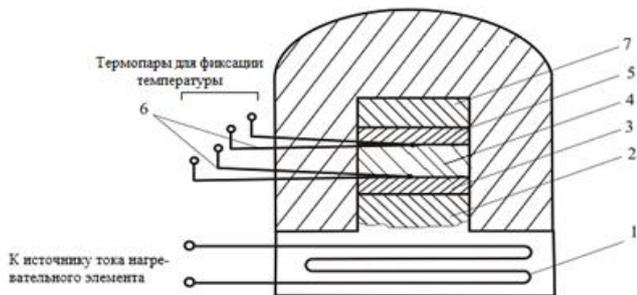


Рисунок 5 - Схема установки (а) и её общий вид (б) для испытаний на изнашивание: 1- электродвигатель; 2,4- клиноременная передача; 3- редуктор; 5-шкив; 6- контрообразец; 7- образец; 8- дозирующее устройство; 9- пневмоцилиндр; 10- манометр.

Для проведения теплофизических исследований использовался, модернизированный прибор ИТ-λ-400, усовершенствованная схема которого представлена на рисунке 6.



а



б

Рисунок 6 – Схема прибора (а) и общий вид (б) определения теплопроводности и теплоёмкости: 1- нагреватель; 2- тепловой источник; 3- теплоотдающая пластина; 4 - образец; 5 - контактная теплоприемная пластина; 6- термопары; 7 –теплоизолирующий элемент.

Исследование демпфирующих характеристик материалов проводились на стенде, общий вид которого изображён на рисунке 7.



Рисунок 7 – Стенд для оценки демпфирующих характеристик материалов и деталей триботехнических узлов.

В качестве регистратора вибраций использовался акселерометр модели ВС 111 с чувствительностью 10 мВ/г; частотным диапазоном 1...15000 Гц; амплитудным диапазоном ± 500g; в пределах рабочих температур от -40 до +70 °С.

Для получения информативных результатов осуществлялось планирование экспериментов, их выполнение и соответствующая математическая обработка, что позволяло получать количественные оценки влияния совокупностей значимых эффектов.

При этом выполнялись: составление план-матрицы эксперимента; рандомизация опытов; реализация плана эксперимента; проверка воспроизводимости опытов; проверка адекватности линейной модели; оценка значимости коэффициентов регрессии.

Обоснована целесообразность использования для гетерогенных материалов, предложенного нами более информативного обобщённого показателя твёрдости, дифференцированно учитывающего роль отдельных составляющих исследуемого материала. Методика определения обобщённого показателя твёрдости исследуемого антифрикционного материала включает в себя следующие отдельные операции: расчёт долей структурных составляющих, расположенные в пределах оценочной площади и определение величины их микротвёрдости. Обобщённый показатель твёрдости $H_{об}$ вычисляют по размерам полученных отпечатков:

$$H_{об} = \frac{H_1 \times S_1 + H_2 \times S_2 + H_3 \times S_3 \dots + H_i \times S_i}{S_{оц}}, \quad (17)$$

где H_i – микротвёрдость каждой из структурных составляющих; S_i – площадь каждой из структурных составляющих в пределах оценочной площади; $S_{оц}$ - площадь зоны оценки микротвёрдости.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований изнашивания, коэффициента трения, а также теплофизических и демпфирующих характеристик.

В экспериментальных исследованиях на изнашивание при постоянной нагрузке предложенного композиционного материала на основе политетрафторэтилена были получены значения величины износа при различном содержании оптимизирующих компонентов (рисунок 8).

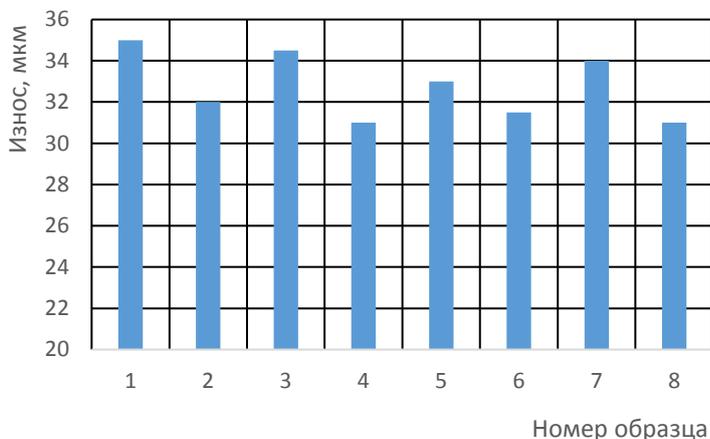


Рисунок 8 – Диаграмма величины износа образцов исследуемого материала при различном содержании оптимизирующих компонентов

формы капсул (τ), в которых он заключался на величину износа и коэффициента трения

В результате для величины износа получено уравнение регрессии имеющее следующий вид:

$$J=32,75-1,375\delta - 0,125v - 0,375\tau - 0,25 \delta v + 0,25 \delta \tau+0,25 v \tau \quad (18)$$

Оценка уровня значимости установленных коэффициентов регрессии проводилась с помощью t-критерия Стьюдента. А оценка адекватности полученного уравнения регрессии осуществлялась по критерию Фишера. В результате установлено, что уравнение регрессии адекватно описывает проведённый эксперимент и отражает, что наиболее значимое влияние на величину износа в исследованном диапазоне изменяющихся параметров оказывает содержание смазывающих компонентов (графит + дисульфид молибдена).

Аналогичным образом определялось уравнение регрессии для оценки коэффициента трения:

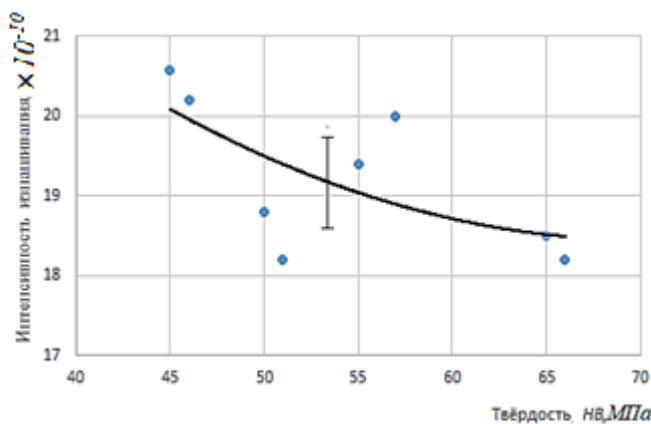
$$f=0,0835+0,00375\delta-0,0005v+0,0025\tau +0,00325\delta v-0,00125\delta\tau+0,0055v\tau \quad (19)$$

Это уравнение регрессии показывает, что исследовавшиеся параметры прямо или косвенно связаны с показателями твёрдости исследуемого материала. Поэтому устанавливалось её влияние на износ и коэффициент трения рассматриваемого композита. Показатели твёрдости образцов и соответствующей ей значения износа и коэффициента трения приведены в таблице 1.

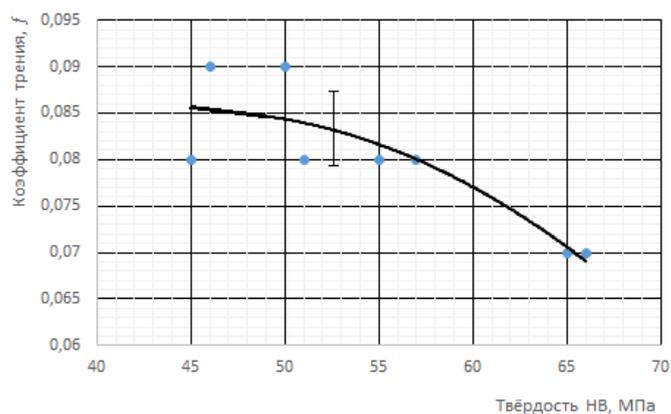
Таблица 1 - Твёрдость образцов HV и $H_{об.}$, и соответствующие ей значения износа и коэффициента трения.

Номер и содержание структурных составляющих исследуемого материала образцов, соответствующих номеру опыта					Твёрдость HV , МПа	Коэффициент трения, f	Интенсивность изнашивания $I \times 10^{-10}$, м/км	Обобщённый показатель твёрдости, $H_{об.}$, МПа
Номер	Содержание, %							
	ПТФЭ	MoS ₂	СГ	ЛМ				
1.	82	1	2	15	45	0,08	20,58	256
2.	76	3	6	15	50	0,09	18,8	273
3.	82	1	2	15	46	0,09	20,2	240
4.	76	3	6	15	51	0,08	18,2	288
5.	76	1	2	21	55	0,08	19,4	280
6.	70	3	6	21	65	0,07	18,5	342
7.	76	1	2	21	57	0,08	20,0	285
8.	70	3	6	21	66	0,07	18,2	340
Известные аналоги композитов и их свойства								
Ф4К20	Ф-4 +20% кокса				45	0,08	15,0	-
Ф4С15	Ф-4 +15% стекловолокна				55	0,09	24,2	-
Ф4К15М5	Ф-4+15% кокса и 5% MoS ₂				49	0,1	28	-

На основании представленных в ней данных построены соответствующие графики (рисунок 9). Их аппроксимации позволила получить математические модели, где величина среднеквадратичного отклонения полученных экспериментальных данных составила для величины износа $R^2=0,4241$, для коэффициента трения $R^2 = 0,7457$.



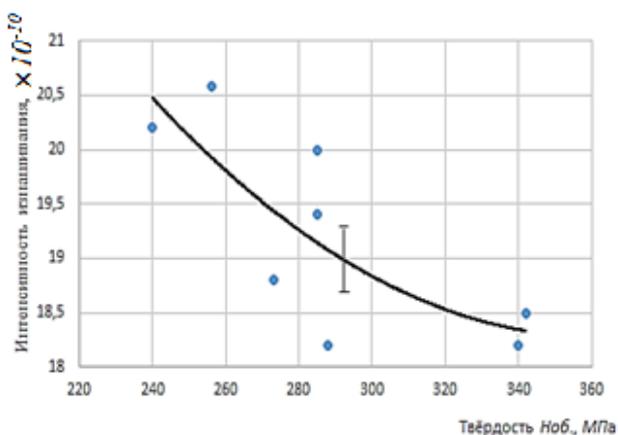
а



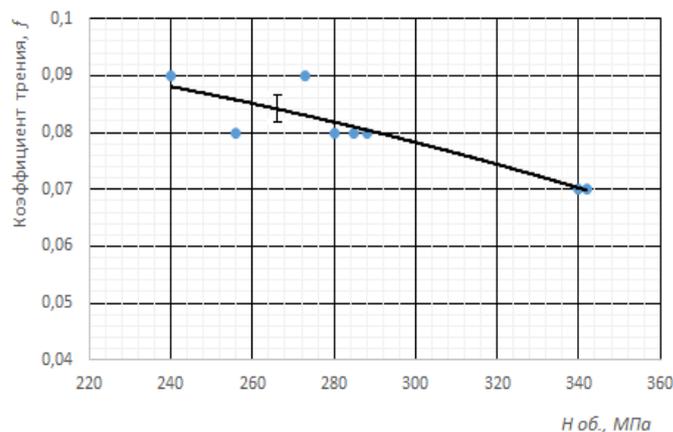
б

Рисунок 9 – Взаимосвязь между твердостью, величиной износа (а) и коэффициентом трения по стали (б) композитов на основе ПТФЭ.

Аналогичные зависимости от предложенного нами обобщённого показателя твердости приведены на рисунке 10.



а



б

Рисунок 10 - Зависимости износа (а) и коэффициента трения (б) от обобщённого показателя твердости образцов на основе политетрафторэтилена.

Обработка приведенных данных позволила получить экспериментальные зависимости, где среднеквадратичное отклонение представленных экспериментальных данных для обеих для величины износа составила $R^2 = 0,2811$, для коэффициента трения $R^2 = 0,4278$. Таким образом, при использовании в качестве оценочного параметра обобщённого показателя твёрдости достигается более точное определение исследуемых показателей. Таким образом можно считать, что при использовании в качестве обобщённого показателя твёрдости достигается повышенная точность эксперимента при исследовании твёрдости композиционных материалов на 35-45%.

Для исследования возможностей повышения теплофизических характеристик предложенных материалов использовались образцы вкладышей подшипников скольжения, содержащие различные теплоаккумулирующие легкоплавкие элементы. Для этого задавались такие условия проведения экспериментов, как температура плавления выбираемого легкоплавкого материала $t_{пл}$, объём вводимого в конструкцию исследуемого вкладыша легкоплавкого материала V и толщина внутреннего антифрикционного кольца подшипника скольжения Δ .

На основании обработки полученных экспериментальных результатов строились регрессионные зависимости времени достижения принятой эксплуатационной температуры T и относительной теплопроводности λ исследуемого материала.

Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$T=26,6+3,71t+1,84V+0,24\Delta+0,14tV-0,36t\Delta-0,14V\Delta, \quad (20)$$

$$\lambda=1,44+0,0675t-0,0075V-0,01125\Delta-0,01tV-0,02t\Delta-0,03V\Delta. \quad (21)$$

При этом влияние на время достижения принятой эксплуатационной температуры значимыми оказались все задаваемые параметры. Что касается относительной теплопроводности в исследованном диапазоне изменяющихся входных параметров значительным является лишь объём легкоплавкого материала. Толщина же теплоприёмной пластины и температура плавления теплоаккумулирующего легкоплавкого материала существенного влияния на полученный результат не оказывает. При этом образцы в которых в качестве легкоплавкого материала применялся сплав Розе оказались более теплоёмкими.

Экспериментально оценивалось и влияние остаточных напряжений сжатия в функциональных слоях предложенного подшипника скольжения при конической посадке с натягом. При запрессовке конических втулок на различную величину производилась экспериментальная оценка интенсивности изнашивания. Зависимость интенсивности изнашивания от величины натяга представлены на рисунке 11.

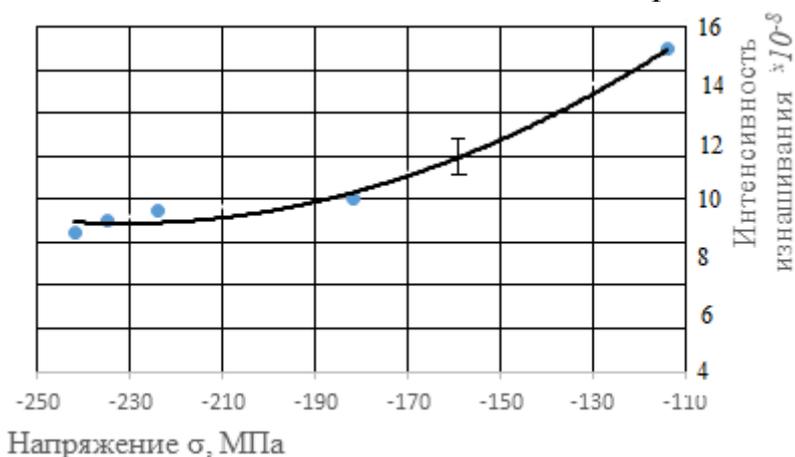


Рисунок 11 – Влияние интенсивности изнашивания от величины натяга в коническом соединении.

Таким образом установлено, что величина натяга в коническом соединении подшипника скольжения, и соответственно, остаточных напряжений сжатия способствуют снижению интенсивности изнашивания предложенного подшипника.

В шестой главе представлена оценка технико-экономического эффекта промышленного использования полученных результатов исследований. Разработаны промышленные рекомендации, которые предложены для производственного использования в сервисных центрах и на предприятиях лесного комплекса конструкции подшипников скольжения, а также вкладыши из полимерных антифрикционных композиционных материалов. Результаты подконтрольной эксплуатации показали, что такие подшипники обладают высокими эксплуатационными качествами, а их использование не снижает качества выпускаемой продукции.

Использование новых конструкций подшипников скольжения в узлах трения шарнирных соединений, в частности, применительно к условиям эксплуатации манипуляторов технологических машин в сервисном центре ООО «ГидроРемСервис», обеспечило повышение межремонтного периода шарнирных узлов в 1,4-1,6 раза.

На основании результатов производственных испытаний установлен чистый дисконтированный доход от внедрения новых материалов и конструкций подшипников скольжения, составляющий 415.000 рублей.

Заключение и выводы диссертационной работы

В диссертационной работе установлены основные причины и механизмы потери работоспособности подшипников скольжения шарнирных устройств манипуляторов технологических машин. Показано, что их отказы происходят вследствие недостаточной износостойкости, на основании чего поставлена и решена задача увеличения их износостойкости, для чего выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых позволяют обеспечить повышенную работоспособность рассматриваемых машин путём использования новых материалов и конструкторских исполнений шарнирных соединений и составляющих их подшипниковых узлов. Таким образом решена научно-техническая проблема – повышение износостойкости шарнирных соединений манипуляторов технологических машин.

1. В работе обоснованы и реализованы пути повышения износостойкости подшипников скольжения шарнирных соединений за счёт создания благоприятного уровня их триботехнических параметров, достигаемых путём самоорганизации температурного режима эксплуатации и создания новых конструкций подшипников и использования в них износостойких композиционных материалов.

2. Выявлены, систематизированы и уточнены основные факторы и критерии, определяющие интенсивность изнашивания при механическом и теплофизическом воздействии, обоснованы возможности повышения триботехнических показателей деталей подшипников скольжения. Предложены более информативные расчётные зависимости, учитывающие влияние нагрузок, геометрической и структурной неоднородностей, критерия хрупкого разрушения K_s , наличия и протяжённости дефектов функционального слоя.

3. Предложен и обоснован принцип стабилизации температурного режима работы подшипниковых узлов за счёт увеличения теплоёмкости композиционных материалов путём введения в их состав легкоплавких составляющих в виде капсул, или посредством заполнения ими внутренних полостей деталей.

4. Обоснованы пути создания и новые конструкции шарнирных соединений, обладающих повышенной прочностью неподвижных посадок за счёт обеспечения более надёжной фиксации шарнирного пальца с помощью резьбовых и плавающих соединений. Предложено шарнирное соединения повышенной работоспособности, достигаемой за счёт повышения точности рабочего позиционирования деталей шарнирного узла с помощью специальных элементов, обеспечивающих закрепление деталей шарнира после их требуемой локализации.

5. Экспериментально установлено, что величина изнашивания композиционных полимерных материалов абразивно-масляной прослойкой, в существенной степени зависит от состава, структуры и содержание структурных составляющих предложенных антифрикционных композиционных материалов, что позволяет обеспечить достижение повышенных триботехнических характеристик путем рационального сочетания полимерной основы и теплопроводящих, и смазочных составляющих композита.

6. Установлено, что при использовании в качестве оценочного фактора обобщённого показателя твёрдости, дифференцированно учитывающего твёрдость отдельных структурных составляющих композита, обеспечивается получение более точных результатов определения величины износа и коэффициента трения исследуемого материала по сравнению с использованием показателей объёмной твёрдости.

7. Натурные испытания опытных образцов подшипников скольжения манипуляторов технологических машин, проводившиеся в течении 2021-2022 года показали эффективность и целесообразность использования результатов диссертационной работы в серийных образцах машин и при создании перспективных конструкций рассматриваемой техники.

8. Экономическая эффективность использования результатов выполненных разработок в виде чистого дисконтированного дохода составляет около 415.000 рублей. Полученные результаты также используются в учебном процессе при подготовке специалистов.

Перспективы продолжения исследований по направлениям диссертационной работы и практического использования её результатов.

На последующих этапах исследований предполагается проведение работ, расширяющих возможности прикладного использования результатов диссертации и включающих:

- выполнение более широких исследований возможностей совершенствования шарнирных триботехнических узлов, повышение их технологичности, и доведение до уровня глубокого практического применения, в том числе в рамках организации серийного производства многооперационных технологических машин;

- адаптацию конструкций и технологий изготовления подшипников скольжения и шарнирных соединений к конкретной базовой технике и обоснование вариантов их конструкторской компоновки, применительно к условиям предприятия-изготовителя;

Использование результатов работы в учебном процессе.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при подготовке специалистов в рамках бакалавриата по направлению 15.03.01 «Машиностроение» профиль - «Инженерия и реновация машин» в процессе чтения лекций, выполнении курсового проектирования по дисциплинам: «Трибология», «Проектирование

оснастки и инструмента», «Методы ремонта и испытания машин»; а также в рамках магистратуры и аспирантуры по специальностям 05.16.09 – «Материаловедение» в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях по перечню ВАК:

1. Памфилов, Е.А. Основы повышения износостойкости железоуглеродистых сплавов при коррозионно-механическом изнашивании / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, В.В. Капустин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2018. - №11(72). - С. 57-66. DOI: 10.30987/article_5be14a33a4b107.67349403
2. Пилюшина, Г.А. К вопросу обеспечения герметичности соединений на основе технологического индуцирования / Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, Е.А. Памфилов, В.В. Капустин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. - №19(2) - С. 170-178. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-170-178>
3. Пилюшина, Г.А. Обеспечение качества машин на основе совершенствования методов и средств оценки триботехнических параметров их функциональных узлов/ Г.А. Пилюшина, Е.А. Памфилов, П.Г. Пыриков, В.В. Капустин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2020. - № 2 (87). - С. 19-27. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-19-27
4. Капустин, В.В. Повышение износостойкости шарнирных соединений манипуляторов технологических машин / В.В. Капустин, Е.А. Памфилов, Е.В. Шевелева, Г.А. Пилюшина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. –№5. - С. 32-39. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-5-32-39
5. Памфилов, Е. А. Повышение износостойкости узлов скольжения технологических машин / Е. А. Памфилов, В. В. Капустин, Е. В. Шевелева, Г. А. Пилюшина // Вестник машиностроения. 2022. № 4. С.38-42. DOI: 10.36652/0042-4633-4-38-42. *
6. Пилюшина, Г.А. Модифицирование древесины для создания подшипников скольжения лесопромышленных машин / Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, Е.А. Памфилов, А.Я. Данилюк, В.В. Капустин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 155–165. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-5-155-165. *
7. Пилюшина, Г.А. Повышение работоспособности древесно-металлических подшипников скольжения лесопромышленных машин / Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, Е.А. Памфилов, А.Я. Данилюк, В.В. Капустин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 156–168. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-156-168. *
8. Памфилов, Е.А. Перспективы повышения работоспособности рабочих органов и деталей трибосистем лесозаготовительных машин / Е.А. Памфилов, В.В. Капустин, Г.А. Пилюшина, Е.В. Шевелева // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021 №6 С. 135-149. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-6-135-149. *

Звёздочкой отмечены публикации, входящие помимо перечня ВАК в базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus.

Публикации в сборниках материалов конференций

1. Капустин, В.В. Исследование изнашивания подшипников скольжения шарнирных соединений / В.В. Капустин, Памфилов Е.А. // Научные труды VII Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: ИМАШ РАН. – 2021. – С.126- 128.
2. Памфилов, Е.А. Новые антифрикционные композиты на основе искусственных и растительных полимеров / Памфилов Е.А., Капустин В.В. // Механика и трибология транспортных

систем: сборник статей международной научной конференции, Рост. гос. ун-т путей сообщения, Ростов н/Д. – 2021. – 341-344.

3. Памфилов, Е.А. Принципы повышения работоспособности триботехнических узлов манипуляторов лесозаготовительных машин / Памфилов Е.А., Капустин В.В. В сборнике: повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Седьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, – 2021. – С. 143-146.

4. Капустин, В.В. Антифрикционные материалы на полимерной основе / Капустин В.В., Букреев О.Д. В сборнике: Актуальные вопросы техники, науки, технологии. Сборник научных трудов национальной конференции, посвященной 90-летию Брянского государственного инженерно-технологического университета. Брянск, – 2021. – С. 165-168.

5. Капустин, В.В. Перспективы повышения работоспособности триботехнических узлов лесозаготовительных машин / Капустин В.В., Тиняев А.Ю. В сборнике: Новые горизонты. VIII научно-практическая конференция с международным участием. Сборник материалов и докладов. Брянск, – 2021. – С. 178-182.

6. Капустин, В.В. Перспективные конструкции шарнирных соединений лесозаготовительных машин / Капустин В.В., Ибади М., В сборнике: Актуальные вопросы техники, науки, технологии. Сборник научных трудов национальной конференции, посвященной 90-летию Брянского государственного инженерно-технологического университета. Брянск, – 2021. – С. 193-196.

7. Капустин, В.В. Древесно-металлические подшипники скольжения / Капустин В.В., Оськин В.А. В сборнике: Актуальные вопросы техники, науки, технологии. Сборник научных трудов национальной конференции, посвященной 90-летию Брянского государственного инженерно-технологического университета. Брянск, – 2021. – С. 230-232.

8. Капустин, В.В. Пути повышения работоспособности шарнирных соединений манипуляторов технологических машин / Капустин В.В., Памфилов Е.А. Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2021. – № 33. – С. 17-20.

9. Шевелева, Е.В. Повышение работоспособности узлов скольжения технологического оборудования / Шевелева Е.В., Памфилов Е.А., Капустин В.В. Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2021. – № 33. – С. 58-61.

10. Капустин, В.В. Особенности упрочнения и восстановления деталей нанесением гальванических покрытий / В. В. Капустин, И.И. Майстров // В сборнике: Новые горизонты. Материалы VII научно-практической конференции с международным участием. 2020. С. 474-476.

11. Капустин, В.В. Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Технологическое обеспечение герметичности гидравлических систем машин лесного комплекса // Сборник научных трудов IV Международная научно-практическая конференция «Современные технологии в машиностроении и литейном производстве», – 2018. - С.341- 345.

12. Капустин, В. В. Методы повышения долговечности деталей и узлов аксиально-поршневых гидромашин / В. В. Капустин // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. БГИТУ. - Брянск, - 2018. - №28. - С. 88-93

13. Грядунов, С.С. Исследование изнашивания хромованадиевых сплавов в условиях трения с ударом по абразивной поверхности / С.С. Грядунов, В.В. Капустин // Международная научно-техническая конференции, посвящённая 80- летию ИМАШ РАН «Трибология- машиностроению» - М.- Ижевск: Институт компьютерных исследований, - 2018. – С.154- 157.

14. Капустин, В. В. Особенности изнашивания аксиально-поршневых насосов и гидромоторов // Новые горизонты Материалы IV Международной конференции-конкурса. - 2017. - С. 26-29.

15. Капустин, В. В. Условия эксплуатации и возможности повышения надёжности лесозаготовительных машин / Капустин В.В. //Актуальные проблемы лесного комплекса. - 2017. - № 50. -С. 6-8.

16. Пилюшина, Г.А. Восстановление подшипников скольжения гидроприводов технологических машин / Пилюшина Г.А., Капустин В.В. // Новые материалы и технологии в машиностроении. - 2017. - №25. - С. 91-95.
17. Капустин В.В. Восстановление работоспособности аксиально-поршневых насосов методом оппозитного деформирования / Капустин В.В., Пилюшина Г.А. В сборнике: Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием "Новые материалы". Сборник материалов. – 2017. – С. 277-280.
18. Пилюшина, Г.А. Особенности ремонта аксиально-поршневых насосов / Пилюшина Г.А., Капустин В.В. Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. –2017. – Т. 4. – № 1 (7). С. 209-215.
19. Капустин, В. В. Формирование функциональных слоёв подшипников скольжения за счёт наружного обжата поверхности заготовок / Капустин В.В. //Новые материалы и технологии в машиностроении. - 2016. - № 24. - С. 22-25.

Патенты:

1. Патент №2726348 Российская Федерация, МПК F16C 17/00, F16C 33/24 (2006.01) Подшипник скольжения: № 2019133054; заявл. 16.10.2019; опубл. 13.07.2020/ Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Шевелева Е.В.; заявитель БГТУ.
2. Патент № 2725902 Российская Федерация, МПК G01N 3/40 (2006.01) Способ определения твердости композиционных гетерогенных материалов: № 2019140373; заявл. 09.12.2019; опубл. 07.07.2020 / Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пыриков П.Г., Пилюшина Г.А.; заявитель БГТУ.
3. Патент № 2742669 Российская Федерация, МПК B25J 17/00, F16C 11/04 (2006.01). Шарнирное соединение: № 2020122062; заявл. 29.06.2020; опубл. 09.02.2021 / Капустин В.В, Памфилов Е.А.; заявитель БГТУ.
4. Патент № 203779 Российская Федерация, МПК B25J 17/00, F16C 11/04 (2006.01). Шарнирное соединение: № 2021103326; заявл. 10.02.2021; опубл. 21.04.2021/ Памфилов Е.А., Капустин В.В, Пилюшина Г.А., Ибади М.; заявитель БГТУ.
5. Патент № 207172 Российская Федерация, МПК B25J 17/00, F16C 11/04 (2006.01). Шарнирное соединение: № 2021117802; заявл. 16.06.2021; опубл.: 15.10.2021 / Памфилов Е.А., Капустин В.В.; заявитель БГТУ.
6. Патент № 2760819 Российская Федерация, МПК F16C 33/04, F16C 33/24 (2006.01) Подшипник скольжения: № 2021109702; заявл. 08.04.2021; опубл.: 30.11.2021 / Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Капустин В.В., Оськин В.А.; заявитель БГТУ.
7. Патент № 2769691 Российская Федерация, МПК C08L 27/18, C08J 5/16, C08K 3/08, 33/24 (2006.01) Антифрикционный композиционный материал № 2021106960, заявл.16.03.2021; опубл.05.04.22 / Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Букреев О.Д.; заявитель БГТУ.

Подписано в печать 28.06.2022 Формат 60×84^{1/16}
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,2 Тираж 100 экз. Заказ № 18.
Брянский государственный технический университет
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7,
Лаборатория оперативной полиграфии БГТУ, ул. Институтская, 16