

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Брянский государственный технический университет»

На правах рукописи



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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Памфилов Евгений Анатольевич
Научный консультант:
доктор технических наук
Пилюшина Галина Анатольевна

Брянск 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАНИПУЛЯТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН.....	11
1.1. Виды и конструкции многооперационных технологических машин.....	11
1.2. Конструкции манипуляторов и их триботехнические узлы.....	12
1.3. Условия эксплуатации и особенности изнашивания деталей триботехнических узлов технологических машин.....	15
1.4. Особенности изнашивания деталей шарнирных соединений и факторы, определяющие его интенсивность.....	18
1.5 Влияние параметров фрикционного взаимодействия на величину износа и коэффициент трения в шарнирных соединениях.	23
1.6. Перспективы повышения износостойкости шарнирных узлов конструкторскими и технологическими методами.....	27
1.7. Выводы, цель и задачи диссертационной работы.....	30
2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ШАРНИРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ И ОПТИМИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	31
2.1 Особенности контактирования и изнашивания деталей шарнирных соединений.....	31
2.1.1 Эксплуатационное взаимодействие деталей шарнирных соединений манипуляторов.....	31
2.1.2 Механизм и закономерности изнашивания деталей шарнирных соединений.....	34
2.2 Генерация энергии в триботехнических парах скольжения и возможности её диссипации.....	40
2.3 Создания композиционных материалов с управляемыми фрикционными параметрами.....	46
2.4 Основы формирования новых антифрикционных композиционных материалов и вкладышей из них.....	57
2.4.1 Прогностическая оценка теплофизических параметров композиционных материалов.....	51
2.4.2 Обеспечение демпфирующих и виброгасящих параметров антифрикционных материалов.....	55
2.4.3 Минимизация потерь на трение и повышение износостойкости антифрикционных материалов в подшипниковых узлах шарнирных соединений.....	56
2.4.4 Новый антифрикционный композиционный материал на полимерной основе.....	57
Выводы по главе 2.....	59
3. НАУЧНО- ИНЖЕНЕРНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ.....	61

3.1 Общие принципы конструктивно- технологического повышения износостойкости подшипников скольжения шарниров манипуляторов.....	61
3.1.1 Выбор антифрикционных материалов, процессов модификации поверхностных слоёв деталей и эффективных смазок для снижения затрат на трение в шарнирных соединениях.....	62
3.1.2 Оптимизация теплового режима работы узлов трения шарнирных соединений.....	64
3.1.3 Оптимизация напряжённого состояния функциональных поверхностных слоёв деталей шарниров.....	66
3.1.4 Обеспечение износостойкости подвижных соединений и повышение демпфирующих характеристик в шарнирных соединениях.....	70
3.1.5 Обеспечение работоспособности неподвижных соединений в шарнирных соединениях.....	72
3.2 Новые конструкции шарнирных узлов с преимущественным обеспечением работоспособности подвижных соединений манипуляторов.....	73
3.2.1 Новые конструкции шарнирных узлов с преимущественным обеспечением повышенной работоспособности неподвижных соединений.....	77
3.2.2 Метало-полимерный подшипник скольжения с повышенными параметрами теплопроводности и демпфирующих свойств.....	82
Выводы по главе 3.....	85
4 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	86
4.1 Методика триботехнических исследований.....	87
4.2 Методика исследований теплофизических характеристик материалов и конструкций подшипников скольжения шарнирных соединений.....	94
4.3 Методика исследований демпфирующих характеристик материалов и устройств шарнирных узлов манипуляторов.....	97
4.4 Методики оценки триботехнических параметров исследуемых антифрикционных материалов.....	100
4.5 Планирование экспериментов и обработка их результатов.....	102
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	106
5.1 Влияние условий нагружения на износостойкость и коэффициент трения в триботехнических соединениях.....	106
5.2 Исследование триботехнических параметров и возможности оптимизации теплофизических характеристик антифрикционных материалов и деталей узлов машин.....	117
5.3 Влияние остаточных напряжений сжатия в функциональных слоях подшипников скольжения при конической посадке с натягом.....	121
Выводы по 5 главе.....	122
6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	125
6.1 Расчет экономической эффективности промышленного использования полученных результатов.....	125

6.2 Расчеты технико-экономической эффективности.....	128
Выводы к главе 6.....	129
Перспективы расширения сферы теоретических и прикладных исследований и разработок по направлениям представленной диссертационной работы и практического использования её результатов.....	130
Использование результатов работы в учебном процессе.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	132
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	134
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты апробирования и внедрения результатов работы по теме диссертации.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты, полученные по результатам диссертационных исследований.....	161

ВВЕДЕНИЕ

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. Харриса, 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. Ребиндера, 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 конструкций подшипников скольжения 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.

Научная новизна исследований

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

2. Разработка методов повышения триботехнических характеристик подшипников скольжения, отличающиеся 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. Полимерные 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, обеспечивающих повышенные триботехнические свойства. Разработаны принципы самоорганизации температурного режима работы триботехнических узлов. Усовершенствованы методики экспериментальных исследований, позволяющие повысить точность оценки триботехнических параметров.

Практическую значимость работы составляет:

1. Антифрикционный композиционный материал на основе политетрафторэтилена и антифрикционных наполнителей, стабилизирующих температуру работы триботехнического узла.

2. Новые конструкции шарнирных 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 триботехнических узлов.

Методология и достоверность. Методологической основой является в применении комплексного подхода, включающего: анализ эксплуатации деталей, выявление возможных механизмов их изнашивания с учётом влияния эксплуатационных условий и состава, используемых материалов, и конструкций на износостойкость, использование условий достижения режимов трения по механическим и тепловым показателям. 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 результатов для публикации научных статей и тезисов докладов, предложены идеи изобретений.

Соответствие диссертации паспортам научных специальностей. Диссертация соответствует специальности: 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 пункту: 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. 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.

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

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ И ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАНИПУЛЯТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

В главе рассматриваются основные виды технологических машин, конструкции их манипуляторов, условия эксплуатации, виды и механизм отказов деталей шарниров, а также перспективы и пути повышения работоспособности этих устройств.

1.1. Виды и конструкции многооперационных технологических машин

В промышленности применяются многооперационные технологические машины манипуляторного типа, с использованием которых выполняются операции погрузки, разгрузки, валки и переработки древесины и др. К этим машинам, предъявляются высокие требования по показателям надёжности, поскольку их эксплуатация осуществляется в тяжёлых условиях нагружения, а восстановление во многих случаях проводится вне оборудованных помещений, вдали от ремонтных и сервисных подразделений.

Некоторые образцы технологических машин приведены на рисунке 1.1 [62,77,88,145,152].



а



б



в



г

Рисунок 1.1 - Технологические машины: а - экскаватор «Doosan»; б- «Hyundai» R210-LC3 Forestry; в- экскаватор E200NC; г- харвестер «Daewoo».

1.2. Конструкции манипуляторов и их триботехнические узлы

Манипуляторы рассматриваемых машин состоят из опорно- поворотного механизма, стрелы, рукояти и рабочего органа [4,42,43,85,145,186,196-198]. По конструкции манипуляторы разделяются на шарнирно-сочленённые и телескопические. Для осуществления рабочих перемещений используются гидроцилиндры [4,83].

Совокупности триботехнических функциональных узлов манипуляторов, причины их отказов и перечень параметров, определяющих работоспособность, приведены на схеме, представленной на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 - Основные триботехнические узлы манипулятора и рабочих органов многооперационных машин [116]

Преобладающие виды изнашивания деталей основных триботехнических узлов, характерные механизмы их протекания, а также факторы, способствующие интенсификации поверхностного разрушения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1- Функциональные триботехнические узлы технологических машин и особенности изнашивания их деталей [116]

Номер графы на схеме рис.1.2	Наименование функционального узла	Характерные эксплуатационные условия, определяющие работоспособность.	Прогнозируемые преобладающие механизмы изнашивания	Воздействие, усугубляющее процессы изнашивания
1	Шарнирные соединения	Динамическое нагружение; высокие пиковые давления; граничная смазка	Адгезионно- механическое изнашивание, схватывание	Поверхностное деформирование; высокая локальная температура, реверсивность трения
2	Разъёмные соединения гидросистемы	Вибрации, циклические контактные давления	Фреттинг-коррозия	Пластическое деформирование, потеря герметичности
3	Исполнительные устройства гидропривода	Динамическое нагружение; абразивное действие; граничная смазка; кавитация.	Усталостное адгезионно- механическое и кавитационное изнашивание	Микрорезание абразивными частицами; повышенная температура, пенообразование рабочей жидкости
4	Протаскивающие вальцовые механизмы	Циклические и ударные нагрузки; действие химически активных сред и абразива	Коррозионно-механическое и абразивное изнашивание	Изменение геометрии шипов, выкрашивание и сколы
5	Сучкорезные ножи	Многоосное напряжение, ударные нагрузки, действие химически активных сред, абразива и микроорганизмов	Коррозионно-механическое и абразивное изнашивание	Антиплоская деформация режущего лезвия; электрохимическое воздействие, микровыкрашивание
6	Пильный аппарат	Ударные и вибрационные нагрузки, действие химически активных сред, абразива и микроорганизмов	Усталостное, коррозионно-механическое и абразивное изнашивание	Выкрашивание, сколы, растяжение пильных цепей, недостаток смазки

Конструкции манипуляторов технологических машин характеризуются наличием в них многочисленных триботехнических узлов, преимущественно- шарнирных соединений. При этом срок службы таких соединений во многих случаях недостаточен [55,135,137,139,157]. Конструктивно шарнирные устройства представляют подшипники скольжения, устанавливаемые в соединениях стрелы, руко-

яти, рабочего органа и гидроцилиндров. Однако в них часто используются комбинированные кинематические пары, представляющие собой сочетание цилиндрических и сферических поверхностей скольжения.

Схемы соединений звеньев манипуляторов: опорно-поворотного механизма, стрелы и рукояти, а также узлов присоединения гидроцилиндров представлены на рисунке 1.3.

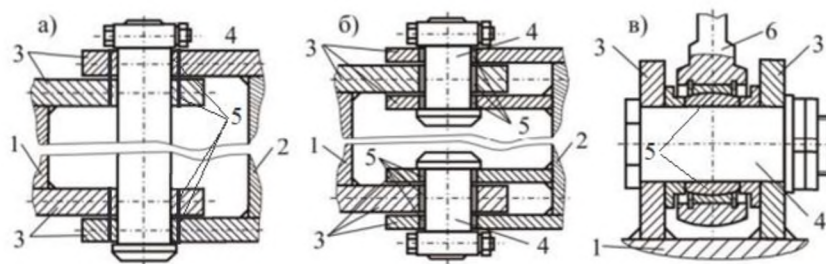


Рисунок 1.3 – Схемы соединений смежных секций манипуляторов, представляющих цилиндрические и комбинированные шарнирные соединения лесозаготовительных машин: а, б – рукояти и стрелы; в – гидроцилиндров; 1- стрела; 2 –рукоять; 3 – проушина; 4 – шарнирный палец; 5 – подшипники скольжения; 6 – гидроцилиндр [135]

Шарнирные соединения представляют собой проушины смежных звеньев, которые имеют соосные отверстия и установленные в них шарнирные пальцы. За счёт такого соединения обеспечивается требуемая относительная подвижность звеньев манипулятора. Натурные образцы шарнирных соединений представлены на фотографиях рисунок 1.4.



Рисунок 1.4 – Образцы шарнирных соединений манипуляторов: а – стрелы и рукояти; б, в – рукояти и рабочего органа.

В отверстия проушин для минимизации трения размещаются вкладыши, изготавливаемые из различных антифрикционных износостойких материалов, которые должны сформировать надёжное соединение с шарнирным пальцем и обеспе-

чить требуемую работоспособность соединения [55,157]. В ряде случаев применяются сферические шарнирные соединения, например, в проушинах гидроцилиндров, которые имеют рабочие поверхности скольжения сферической формы.

Для выявления основных механизмов изнашивания деталей шарнирных соединений анализировались условия их эксплуатации и особенностей изнашивания деталей триботехнических узлов, на основе чего выявлялись возможные перспективы и способы увеличения их долговечности.

1.3. Условия эксплуатации и особенности изнашивания деталей триботехнических узлов технологических машин

Эксплуатация триботехнических узлов технологических машин происходит в широком диапазоне жёстких природно-производственных условий, таких как, сложный рельеф местности, состояние грунтов, характеристики разрабатываемого древостоя, климатические условия, а также температура, влажность, вид и количество осадков и т.д. [131,133,139]. Эти машины используются в течение всего года, причём максимальная их загрузка приходится на зимний период, когда машины работают в снегу, при температурах, достигающих минус 40 °С, что несомненно сказывается на особенностях изнашивания шарнирных соединений.

Огромную роль в протекании изнашивания играет и динамико- скоростной характер нагружения рассматриваемых деталей и многие другие факторы. Так низкие температуры негативно сказывается на эксплуатационных свойствах материалов деталей шарнирных соединений и применяемых смазок. При низких температурах повышается вязкость смазок, снижаются смазочные свойства, а материалы трущихся пар охрупчиваются. В результате снижается их ударная вязкость, что интенсифицирует изнашивание деталей узлов, особенно при действии динамических нагрузок [44,170].

Наоборот, в летний период при высокой температуре, смазочный материал нагревается, и вязкость его снижается. В результате смазка вытекает из зоны трения, что негативно сказывается на процессах трения, смазки и охлаждении триботехнических соединений [44,136,170].

Кроме того, при колебаниях температур происходят температурные деформации деталей, вызывающие изменение характера соединений. Вследствие этого, при высоких нагрузках возрастает вероятность возникновения схватывания между деталями, появляются локальные микроочаги сваривания сопрягаемых поверхностей [29-31,37,82,102].

Также следует учитывать, что технологические машины во многих случаях работают, в условиях большой загрязнённости и повышенной влажности. Последнее способствует проявлению коррозионно- механического и водородного изнашивания [100,165,183,188]. А абразивные частицы, попадая в зазоры триботехнических соединений, деформируют и царапают функциональные поверхности контактирующих деталей, приводя к интенсификации изнашивания [21,57,60,102,103,140,173,174,179].

Таким образом, процесс изнашивания деталей шарнирных соединений, протекает при действии циклических, вибрационных и ударных нагрузок, величины которых определяются массой переносимого груза, скоростью технологических перемещений машин и их рабочих органов, сил трения и т.д.

Уровень этих нагрузок, определяются неравномерностью скоростей перемещения, непостоянством сил трения, инерционных сил и т.д. Соответственно, высокие нагрузки воспринимаются и триботехническими узлами, которые работают в режиме реверсивного возвратно-вращательного движения [48,119].

В этом случае происходит быстрое изменение величины и знака сдвиговых деформаций и напряжений, увеличение температуры трения, наклеп и перестройка дислокационной картины в поверхностных слоях деталей. В результате возрастает дефектность структуры используемых материалов, увеличение свободной поверхностной энергии, а также интенсифицируются электрофизические и химические процессы на поверхностях трения и в контактной зоне [19,44,49,200].

Кроме того, при повышенных зазорах динамические напряжения в звеньях манипулятора в момент соударения могут превышать номинальные в 5...6 раз. К тому же, по мере износа происходит изменение геометрической формы контактирующих поверхностей, что дополнительно содействует увеличению динамических нагрузок и интенсифицирует износ. На рисунке 1.5 представлены характерные виды отказов деталей шарнирных соединений по причине которых происходит потеря работоспособности манипуляторов.

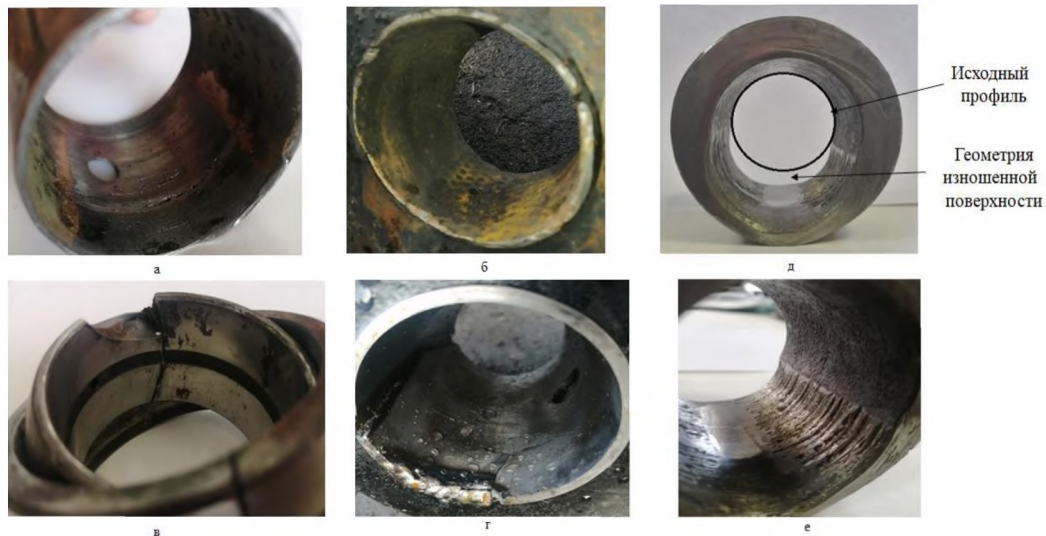


Рисунок 1.5 - Характерные примеры износа деталей шарнирных соединений: а – абразивный износ поверхностей антифрикционной втулки; б – отслоение упрочняющего покрытия; в, г – трещины и разрушения комбинированной и цилиндрической втулок; д – износ цилиндрической втулки шарнира; е – поверхность изнашивания при 5 кратном увеличении рис. д.

Что касается влияния смазки на протекание процессов трения в шарнирных соединениях, то можно считать, что они работают преимущественно при граничной смазке. При этом в случае наличия в контакте абразивных частиц, изнашивание ещё больше интенсифицируется [29-31,102,161,182,190].

Наиболее изнашиваемыми деталями являются цилиндрические и сферические подшипники скольжения, а также контактирующие с ними пальцы. При этом преобладающая роль износа в причинах отказов подтверждается наличием практически на всех дефектных деталях, признаков фрикционного взаимодействия рабочих поверхностей (царапин, следов схватывания, отслаивания упрочняющих покрытий материала, трещин, разрушений, коррозии и т.д.).

1.4. Особенности изнашивания деталей шарнирных соединений и факторы, определяющие его интенсивность

Анализ [55,105,139,135,155,175] деталей, вышедших из строя по причине износа, показал, что их изнашивание происходит по причине проявления адгезионно-механического воздействия; локальной поверхностной пластической деформации; фреттинг- коррозии; а также вследствие окислительного, водородного, или коррозионно- механического проявления. При этом наиболее вероятными в условиях эксплуатации шарнирных соединений являются: усталостное адгезионно- механическое изнашивание; изнашивание при абразивном воздействии, пластическая деформация и фреттинг- коррозия.

При адгезионно – механическом изнашивании происходит разрушение за счёт одновременного проявления молекулярной (адгезионной) и механической составляющих. При наличии граничной смазки изнашивание реализуется при нарушении режима смазывания и разрушения при этом масляной плёнки [25,36,40,41,185].

Такой механизм наиболее характерен для пары трения шарнирный палец – вкладыши подшипников скольжения. При этом наиболее опасной формой проявления молекулярно-механического изнашивания является "схватывание", сопровождающееся переносом металла с одной поверхности на другую или вырыванием частиц с поверхности детали и налипания их на сопряжённую [29,30,170,185?192?193]. Необходимым условием для схватывания является соприкосновение ювенильных поверхностей деталей, которое возникает в процессе изнашивания, сопровождающегося разрушением окисных и адсорбированных на поверхности плёнок. Трение приводит к повышению температур в зоне контакта деталей, что способствует дальнейшему снижению износостойкости.

Что касается коэффициента трения, то он, как и износостойкость определяются не только исходными свойствами материалов деталей, но и влиянием окружающей среды [67,70,103].

Важным в формировании картины изнашивания является и то, что на поверхностях деталей имеются неровности, включающие волнистость, шероховатость и субшероховатость. В процессе их контакта происходит внедрение твёрдых выступов микрорельефа в более мягкие элементы структуры, после чего внедрившийся индентор контртела, перемещаясь, деформирует более мягкий материал [37,38,41].

Причиной повышения сил трения является и то, что контактирование деталей, при наличии шероховатостей на их поверхностях происходит на весьма малых участках, поэтому контактные давления в зоне соприкосновения имеют высокие значения. В этих условиях тонкая граничная пленка смазки не предохраняет поверхности от пластического деформирования, что ведет к изнашиванию деталей [1,9,24,29,33,44,64,150,176,177].

Среди возможных механизмов изнашивания деталей большое значение имеет развитие усталостных повреждений поверхностного слоя [1,21], происходящих вследствие воздействий знакопеременных нагрузок и деформаций, приводящих к образованию микротрещин и их развитию с последующим отделением продуктов изнашивания [29,102,185].

При наличии в контактной зоне абразива или абразивно- жидкостной среды при трении на поверхностях возникает следы в виде рисок и царапин. Они образуются при действии абразивных частиц, жёстко или относительно свободно фиксирующимися в зоне фрикционного взаимодействия. Перемещаясь эти частицы ситуативно внедряются в поверхность и производят её абразивное изнашивание.

Абразивные частицы обладают различными физико- механическими свойствами, размерами, геометрической формой и т.д. Их размеры соизмеримы с величиной зазора в шарнирных соединениях. Попадая в него, они разрывают масляную пленку и вызывают контактирование поверхностей деталей с абразивно- масляной прослойкой. При этом осуществляется многократное упругое или пластическое деформирование поверхностей деталей [19,39,51,150,173]. Особое негативным является проявление при трении отдельных фактов микрорезания.

Наличие в абразивной прослойке несущей жидкой среды может в отдельных случаях благоприятствовать характеру взаимодействия элементов трибосопряжения за счет проявления охлаждающего и смазывающего действия. Особенно это характерно, если на изнашиваемой поверхности за счёт оптимизации её микрогеометрии направленно образуются карманы, куда попадают абразивные частицы, что минимизирует их участие в процессе изнашивания [102,185].

Исходя из выше изложенного, можно полагать, что взаимодействие поверхностей деталей при граничной смазке и наличии в контакте загрязнённой абразивом среды протекает по схеме, приведённой на рисунке 1.6. Изнашивающее действие абразивных частиц может происходить в результате однократного, или многократного контактирования. При микропластическом деформировании поверхности зёрнами абразива металл при последующих воздействиях зёрен на края ранее выдавленной царапины может усугублять уже имеющиеся повреждения. Такое передоформирование приводит к образованию трещин и отделению частиц износа, но уже в условиях малоциклового усталости [79,181].

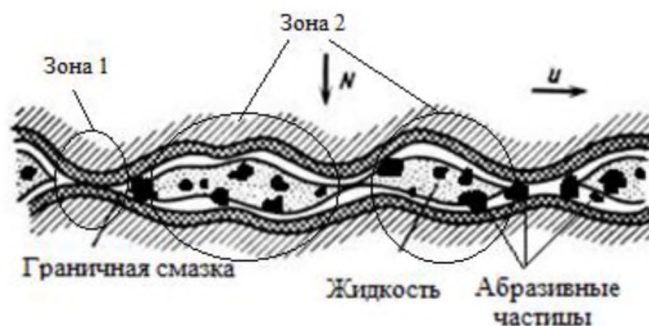


Рисунок 1.6 – Схемы фрикционного взаимодействия поверхностей при граничной смазке: зона 1- адгезионно- механическое контактирование; зона 2- абразивное воздействие шаржированными частицами в присутствии смазки.

На процесс и интенсивность изнашивания в указанных условиях влияют структура и физико- механические свойства материала деталей и абразивных частиц, геометрия абразивных зерен, их концентрация в зоне фрикционного взаимодействия, температура поверхностей трения, скорость трения, возможности смазывания поверхностей и т.д.

Условия эксплуатации манипуляторов способствуют и проявлению в их отдельных триботехнических соединениях фреттинг-коррозии. Она протекает при

взаимодействии плотно контактирующих пар в результате малых колебательных относительных перемещений [109,141]. При этом образующиеся продукты износа не могут выйти из зоны контакта, в результате чего в значительной степени активизируется их изнашивающее действие.

Одной из возможных причин увеличения износа деталей является водородное изнашивание. При этом абсорбированный водород может: образовывать с металлом твердые растворы, сегрегироваться на несовершенствах кристаллической решетки, абсорбироваться на микронесплошностях и скапливаться в них уже в молекулярной форме, а также вступать во взаимодействие с металлом, образуя гидриды. Водородное изнашивание может протекать по механизмам внутреннего давления, декогезии, внутренней адсорбции и повышенного давления гидридов [56,115,183].

Окислительное изнашивание возникает в результате взаимодействия материала детали с кислородом, в результате чего происходит насыщение металлов кислородом за счёт его, проникновения в поверхностные слои деталей и растворением в этих слоях. Тепловыделение при трении способствует интенсификации образования твёрдых растворов и плёнок окислов, защищающих исходные материалы сопряжённых деталей от интенсивного износа [18,69,70,161,102]. Окислительное изнашивание происходит в том случае, когда на поверхностях образуются плёнки окислов, которые в периодически разрушаются и затем вновь образуются. Поэтому продукты износа преимущественно состоят из диспергированных окислов. Повышение температуры также способствует росту окисных плёнок, а вибрация и высокие нагрузки приводят к их разрушению.

Часто наблюдаемое коррозионно- механическое изнашивание представляет собой сочетание двух механизмов. Первый происходит за счёт химических явлений, реализующихся в зоне фрикционного контакта, а второй – посредством механических воздействий. Для такого изнашивания характерен синергизм механических и химических явлений, когда их взаимное влияние не может быть представлено как сумма эффектов отдельных составляющих. Степень проявления коррозионно- механического изнашивания зависит от особенностей взаимодействия хими-

ческих веществ, находящихся в зоне трения, друг с другом и с материалами контактирующих поверхностных слоев, что может, как увеличивать, так и уменьшать износ поверхностей пары трения [29-31,33,103,185].

Электрохимические процессы в зоне контактного взаимодействия могут повышать интенсивность изнашивания поверхности, поскольку продукты коррозии во многих случаях являются менее прочными, чем металл, на котором они образуются, и имеют слабую к нему адгезию. С ростом механического воздействия роль электрохимического фактора убывает и может сводиться к «разрыхлению» поверхности, что способствует разрушению поверхностного слоя.

Увеличение механической нагрузки приводит к повышению интенсивности протекания коррозионных процессов в зоне фрикционного контакта, поскольку механическое удаление образовавшихся продуктов коррозии при трении приводит к восстановлению химического потенциала и замедлению процесса пассивации. Негативно влияет и пластическая деформация, приводящая к движению и выходу на поверхность дислокаций.

Конечно в шарнирных соединениях, возможно проявление и других механизмов изнашивания, однако степень их влияния на общую величину износа невелика. При этом некоторые из них могут вообще не проявляться.

1.5. Влияние параметров фрикционного взаимодействия на величину износа и коэффициент трения в шарнирных соединениях

Выявить параметры, определяющие сопротивляемость изнашиванию и коэффициент трения, а также обосновать пути повышения износостойкости, исследуемых узлов, возможно на основе анализа закономерностей, установленных и предложенных различными авторами [18,29-31,33,65-70,184,185]. Зависимости, созданные применительно к условиям изнашивания деталей рассматриваемых шарнирных соединений, систематизированы и представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Расчётные зависимости для оценки коэффициента трения и износа при трении скольжении и факторы состояния поверхностных слоёв их определяющие.

Прогнозируемые механизмы изнашивания	Рассматриваемые детали	Зависимости для оценки коэффициента трения (f) и величины износа (I)	Факторы, определяющие величины устанавливаемых параметров.	Источник информации
Адгезионно- механическое	Шарнирные пальцы и втулки, сферические поверхности	$f = f_m + f_d = \frac{\tau_n}{F_n} + k_1 \sqrt{\frac{h}{R}}$	R h F _п	[65]
		$f = \frac{2,4\tau_0(1-\mu^2)^{2/3}R^{2/3}}{F_n^{1/3}E^{2/3}} + \beta + \frac{0,172\alpha_{эф}(1-\mu^2)^{1/3}F_n^{1/3}}{E^{2/3}R^{1/3}}$	E R F _n	[65,66]
		$f = \frac{0,25\alpha_{эф}Eh_i^2}{1-\mu^2} + (\tau_0 + \frac{0,4\beta E\sqrt{h_i}}{(1-\mu^2)\sqrt{R}})\pi R h_i$	E R h	[185]
Усталостное	Цилиндрические и сферические поверхности подшипников скольжения;	$I_h = \frac{0,3}{(\nu+1)} \sqrt{\frac{h_b}{r}} \frac{p_a}{p_r} \frac{1}{n}$	h r	[21,102,185]
		$I = c \left(\frac{F_n \theta}{K'_v} \right)^{1+t\beta} \times \Delta_z^{t(1-\beta)} \times \left(\frac{K_f^y}{\sigma_0 \theta} \right)^t \times \eta_{c,a}^{-t\beta} (1 + \alpha \tau f)^{-1/2},$ $C = \frac{\frac{1}{\nu^2} \Gamma(\nu) \Gamma(1+\frac{t}{2})}{4(\nu+1) \Gamma(\nu+\frac{t}{2})}; K'_v = \frac{K_v}{2\sqrt{\pi}}; \beta = \frac{1}{2\nu+1}; K_f^y = \frac{4kf}{3\pi};$ $\Delta = \frac{R_{max}}{\gamma b^{1/\nu}} \quad K_v = \frac{\Gamma(\nu+1)}{\Gamma(\nu+\frac{3}{2})} \quad \theta = \frac{1-m_1^2}{E_1} + \frac{1-m_2^2}{E_2}$	Δ σ_0 θ F _n β ν	[68,102,185]
Изнашивание при воздействии абразива	Шарнирные пальцы и втулки, цилиндрические и сферические поверхности подшипников скольжения.	$I = \frac{\pi \cdot \varepsilon^{\nu+1} \cdot R_{max} \cdot d_k}{4(\nu+1) \cdot n} \cdot \gamma_{ш},$	R _{max} $\gamma_{ш}$ d _k	[184]
		$I = \frac{tg \theta}{2(\nu+1)} \frac{q_a}{HB}$	HB	[68]
		$I = c \nu_1^n = \frac{k \alpha \gamma_1 \gamma_2 (V \Pi) N \nu_1^2 (1-k_2^2)}{2g H_m},$	H _m	[65]
		$I = \frac{tS}{K} \times \frac{Nq}{F2\pi R \sigma_{TC}}$	σ_T R K N C	[65]
Фреттинг-коррозия	Проушины и условно неподвижные посадки цилиндрических втулок шарниров	$I = \delta \frac{\sigma_T}{G}$	σ_T G	65

Обозначения параметров в зависимостях, приведенных в таблице 1.2 представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Обозначение параметров расчётных зависимостей, приведённых в таблице 1.2.

Механизм изнашивания	Обозначения параметров
Адгезионно-механическое	τ_n - средние касательные напряжения на границе раздела, обусловленные межмолекулярными взаимодействиями; k_1 - коэффициент, зависящий от микротопографии поверхностей трущихся тел, F_n - нагрузка, R - радиус закругления микронеровностей, h (hi)- глубина внедрения неровности; E , μ - модуль упругости и коэффициент Пуассона деформируемого материала; $\alpha_{эф}$ - приведённый коэффициент гистерезисных потерь закругления микронеровности, β - коэффициент упрочнения молекулярных связей под воздействием нормальных напряжений (пьекоэффициент), τ_0 - напряжение среза.
Усталостное	v - микрогеометрия поверхности, h_p/r - относительная глубина внедрения неровности, p_a/p_r - соотношение номинального и фактического давления, n - числом циклов, зависящих от контактных напряжений и деформаций; K'_v - интенсивность изнашивания; F_n – нормальное давление; β , v - параметры степенной аппроксимации кривой опорной поверхности; Δ - безразмерный комплекс, характеризующий шероховатость; K_v - коэффициент, зависящий от V ; θ - упругая постоянная Кирхгофа; E_j -модуль упругости и коэффициент Пуассона тел; $\eta_{c,a}$ - безразмерная площадь; $\eta_{c,a}$ -отношение контурной площади к номинальной; f - коэффициент трения; σ_0 - значение, полученное путем экстраполяции кривой фрикционной усталости до $n=1$ (n -число циклов до разрушения материала); k - коэффициент пропорциональности; t - показатель степени кривой фрикционной усталости.
Изнашивание при воздействии абразива	$\gamma_{ш}$ - плотность шаржированных зерен; R_{max} - максимальный радиус абразивной частицы; θ - средний угол, составляемый фактической площадью контакта с направлением силы трения, q_a - нагрузка.
	k - коэффициент; γ_1 - плотность абразивного материала; γ_2 - плотность металла поверхности; P - содержание абразивных частиц в масле в процентах по объёму; V - объём масла, по которому ударяет образец; N - число ударов; v_1 - скорость удара абразивных частиц; k_2 - коэффициент восстановления; g - ускорение силы тяжести; H_m - твёрдость металла (динамическая) по Мейеру; α - коэффициент, учитывающий межзёрновое пространство.
	K - число повторений контактирования для удаления продуктов износа; N - сила; q - коэффициент учитывающий разновысотность абразивных зёрен; F - площадь контактирования; C - коэффициент формы;
Фреттинг-коррозия	σ_T – предел текучести; G – модуль сдвига; δ – декремент колебаний при действии тангенциальных нагрузок.

Анализ этих зависимостей, позволяет установить связь коэффициента трения и сопротивления изнашиванию поверхностей с их физико-механическими и геометрическими параметрами, а также факторами фрикционного контактирования, поэтому эти зависимости можно использовать для создания основ конструкторско-

технологического управления работоспособностью и фрикционными характеристиками исследуемых триботехнических узлов.

Из этих параметров можно выделить 4 основные группы факторов, определяющих сопротивляемость трению и изнашиванию деталей при адгезионно- механическом изнашивании

- 1) механические свойства изнашиваемого материала- θ , t , σ_0 ;
- 2) микрогеометрические характеристики изнашивающей поверхности- b , v , h , $R_{\max}$, Δ , β ;
- 3) характеристики контакта $\eta_{c,a}$, d , d_k , γ_ω , ε , f ;
- 4) внешние условия трения F_n (q_a).

Как видно, факторами, определяющим износостойкость, являются микрогеометрические характеристики изнашивающей поверхности (радиус закругления R и высота микронеровностей h). Снижение этих показателей способствует уменьшению коэффициента трения, и соответственно, износа. Кроме того, интенсивность изнашивания поверхностей определяется относительной глубиной внедрения неровностей h_b/r и микрогеометрией поверхности v , соотношением номинального и фактического давлений p_a/p_r , числом циклов n , зависящих от контактных напряжений и деформаций, поэтому, снижение микрогеометрических характеристик (h , r , v) способствует снижению износа рассматриваемых поверхностей.

Взаимосвязь износа с упруго-прочностными свойствами материала в условиях реализации усталостного механизма изнашивания определяется комплексом $\theta^{1+\beta-t} \times \sigma_0^{-t}$. При абразивном изнашивании шаржированными частицами, величина износа определяется комплексом $\theta^{1+2\beta-t} \times \sigma_0^{-2t}$. В случае для снижения износа необходимо уменьшение упругой постоянной Кирхгофа, $\theta = \frac{1-\mu^2}{E}$, и увеличение прочностных свойств материала - σ_0 и t . Причём, чем больше σ_0 , тем прочнее материал при однократном нагружении, а чем больше t , тем большее количество циклов требуется для отдаления частиц износа.

Для снижения усталостного износа необходимо уменьшение характеристики контакта $\eta_{c,a} \times f \times \varepsilon$, и увеличение среднего диаметра пятна контакта – d .

При абразивном изнашивании без приложения значительных динамических

нагрузок снижение износа можно достичь за счёт увеличения твёрдости материала. Также при абразивном изнашивании по данным [65,69,70], износ уменьшается при снижении параметра ε и увеличении диаметра пятна контакта с шаржированным зерном, d_k , и плотности активных абразивных частиц в воздействующей абразивно-масляной прослойке [53,153].

Минимизация коэффициента трения может быть достигнута путем увеличения твердости или модуля упругости материала и уменьшения комплекса Δ за счёт увеличения радиусов единичных неровностей микрорельефа. Рост модуля упругости и уменьшение радиуса микровыступов вызывает и увеличение среднего диаметра пятна контакта. В то же время, количественные изменения вышеперечисленных характеристик контакта должны быть взаимосвязаны, так как например, коэффициент трения падает с ростом относительного сближения, а для повышения износостойкости необходимо уменьшение обоих этих параметров.

Что касается радиусов выступов единичных неровностей, то с одной стороны желательно их уменьшение, вызывающее требуемое для снижения износа изменение абсолютных значений характеристик $\eta_{c,a} \times d$, Поэтому, по-видимому, существует оптимум величин характеристик контакта, обеспечивающий наилучшие условия контактирования, и необходимо стремиться к его достижению.

Таким образом, очевидно, что с помощью формул можно проводить сравнение возможностей различных конструктивно-технологических способов обеспечения требуемого комплекса физико-механических и геометрических параметров поверхностных слоёв, включая подбор благоприятных материалов, и обоснование использования перспективных методов упрочняющей обработки, и условий её выполнения.

1.6. Перспективы повышения износостойкости шарнирных узлов конструкторскими и технологическими методами

Решение задач повышения износостойкости шарнирных узлов представляется достаточно сложными. Сложен и выбор перспективных путей достижения повышенной износостойкости создаваемых антифрикционных материалов и конструкций подшипниковых скольжения и шарнирных соединений.

Что касается материаловедческих аспектов, то традиционно в качестве антифрикционных материалов в шарнирных соединениях манипуляторов можно эффективно применять бронзу, сталь или антифрикционный чугун. Так же перспективно использование биметаллических и триметаллических материалов с различными покрытиями [26,36,49,67,76,79,132]

Важное значение придаётся и геометрической форме вкладышей подшипников скольжения. В ряде случаев функциональные поверхности изготавливают с ромбовидными выемками или сквозными отверстиями для размещения в них смазки, необходимой для восстановления смазочной плёнки при её утрате [32,62,129].

Эффективными являются трёхслойные подшипники из стали, бронзы и тефлона (политетрафторэтилена) отличающиеся устойчивостью к нагрузкам и свойством самосмазывания при опасности возникновения режима трения без смазки [6-8,92-96]. Дополнительная смазка при этом желательна, но даже и без неё втулка имеет низкий коэффициент трения. В состав смазок рекомендуется введение таких твёрдосмазочных материалов, как, графит или сульфид молибдена. Это повышает уровень допустимых нагрузок и теплопроводность, а также способствует уменьшению коэффициента трения и интенсивность изнашивания [8,74,93,95].

По данным [156,158] возможно применение антифрикционных пластиков типа АМАН, материалов на основе древесины и древесно-металлических композитов, углеграфитных, металлокерамических материалов. Однако отсутствие достоверных сведений об их эксплуатационных возможностях не позволяет уверенно рекомендовать их для исследуемых нами триботехнических пар.

Возможно также обеспечение избирательного переноса в шарнирных узлах за счёт применения металлоплакирующих смазочных материалов, обеспечивающих получение антифрикционных сервовитных пленок на трущихся поверхностях. Такой подход по данным [5,15,138] позволяет увеличить срок службы трибоузлов в 3-4 раза. Кроме того, сервовитная пленка может длительно работать при отсутствии штатного режима смазывания функциональных поверхностей деталей.

Важнейшим негативным фактором при работе узлов трения скольжения является интенсивное тепловыделение. Поэтому обеспечение благоприятных температурных режимов работы триботехнических узлов является исключительно важным. Для этого при создании подшипников скольжения необходимой является оптимизация их конструкций и используемых конструкционных материалов, направленная на повышение их теплофизических характеристик и диссипативных свойств.

Снизить уровень температурного режима эксплуатации подшипников скольжения возможно за счет увеличения теплопроводности и теплоемкости материалов деталей узлов скольжения [107,108,46,47]. Благоприятного уровня этих показателей можно достигнуть путём размещения в деталях узла трения специальных теплопередающих и теплопоглощающих элементов. При этом следует стремиться к созданию условий для обеспечения более равномерного распределения тепловых потоков в паре трения, чтобы избежать перегрева менее теплостойких деталей за счёт целесообразного размещения в конструкции триботехнического узла теплоаккумулирующих элементов [47,107,108,117].

В части снижения динамических нагрузок эффективно использование различных демпферных устройств [22,23,156]. Целесообразно также применение композиционных материалов с внутрискруктурными виброгасящими составляющими. Их наличие позволяет обеспечить диссипацию энергии в процессе реализации технологических функций манипулятора. Они также дают возможность снизить ударные нагрузки, что существенно может повысить работоспособность шарниров.

Для этого возможно использовать направленно создаваемые поверхностные слои, обладающие благоприятной совокупностью физико-химических и механических характеристик. Однако этого трудно достигнуть одним из возможных способов упрочнения, поэтому для повышения износостойкости конкретных деталей целесообразно применение комплексной аддитивной упрочняющей обработки, в том числе с использованием концентрированных потоков энергии, в том числе [27,50,78,99,166,171,172] лазерного и электроискрового воздействия.

1.7 . Цель и задачи диссертационной работы

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.

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.

2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ШАРНИРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ И ОПТИМИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Для повышения работоспособности шарнирных соединений манипуляторов [55,113,117,135,155,157], необходимо обеспечение благоприятных уровней значительного числа показателей материалов и деталей триботехнического узла. К этим деталям относятся шарнирные пальцы и вкладыши подшипников скольжения, которые, наряду с высокой износостойкостью, должны обладать достаточной технологичностью при их изготовлении.

2.1. Особенности контактирования и изнашивания деталей шарнирных соединений

Для выработки путей повышения износостойкости деталей необходимо располагать достаточно надёжными закономерностями, позволяющими оценить вклад возможных механизмов в суммарную величину износа, поскольку только на основе такого подхода становится возможным достижение минимизации интенсивности изнашивания и снижение потерь на трение.

2.1.1 Эксплуатационное взаимодействие деталей шарнирных соединений манипуляторов

Для уточнения закономерностей фрикционного взаимодействия и изнашивания деталей в шарнирном соединении рассматривалась его упрощённая схема, представленная на рисунке 2.1. Базовой деталью этого узла является шарнирный палец 1. Он неподвижно зафиксирован в проушинах одного из смежных звеньев манипулятора 2. В проушинах другого звена расположены, запрессованные в него,

вкладыши подшипников скольжения, в которых совершается возвратно-вращательное движение звеньев друг относительно друга в процессе работы.

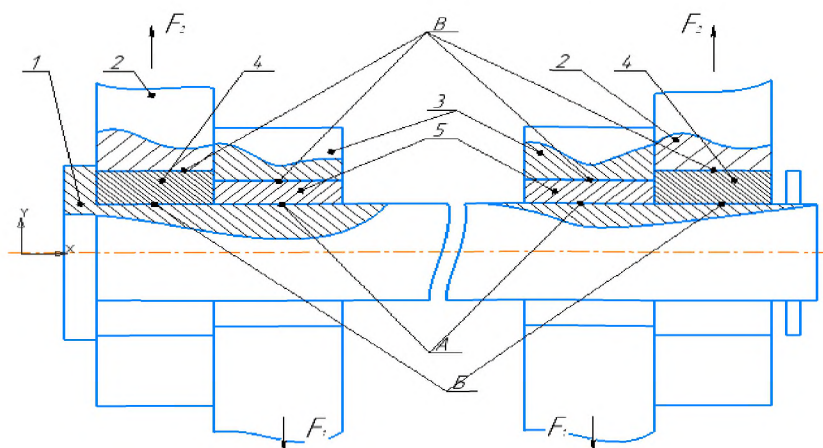


Рисунок 2.1 – Схема шарнирного соединения манипулятора и основные зоны его изнашивания: 1- шарнирный палец; 2 – проушины одного из элементов манипулятора; 3- проушины другого элемента манипулятора; 4- вкладыши неподвижного звена; 5 – подшипники скольжения; А – подвижные соединения; Б, В – неподвижные соединения.

Схема нагруженности шарнирных соединений манипуляторов технологических машин представлена на рисунке 2.2

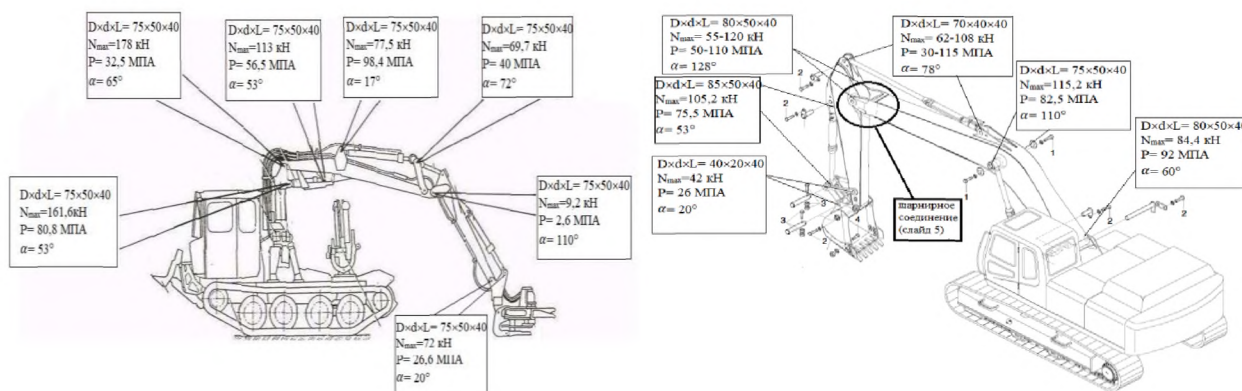


Рисунок 2.2- Схема нагруженности шарнирных соединений манипуляторов технологических машин: $D \times d \times \ell$ – соответственно внешний, внутренний диаметры и длина подшипника скольжения, мм; N_{max} – максимальная нагрузка на шарнир, кН; P – максимальное давление в шарнире, МПа; α – угол поворота шарнира, град

В процессе выполнения технологических операций происходит поворот одного звена манипулятора относительно другого в каждую сторону от некоторого среднего положения. Скорость скольжения при этом составляет от 0,08 до 0,13 м/с [77,135,155].

Пример эпюр давлений в подвижном контакте шарнирного пальца и его опорных элементов при выполнении технологических операций представлены на рисунке 2.3. В различных сечениях опорной зоны они имеют аналогичный характер, но могут существенно отличаться по своим величинам в зависимости от особенностей выполняемой операции.

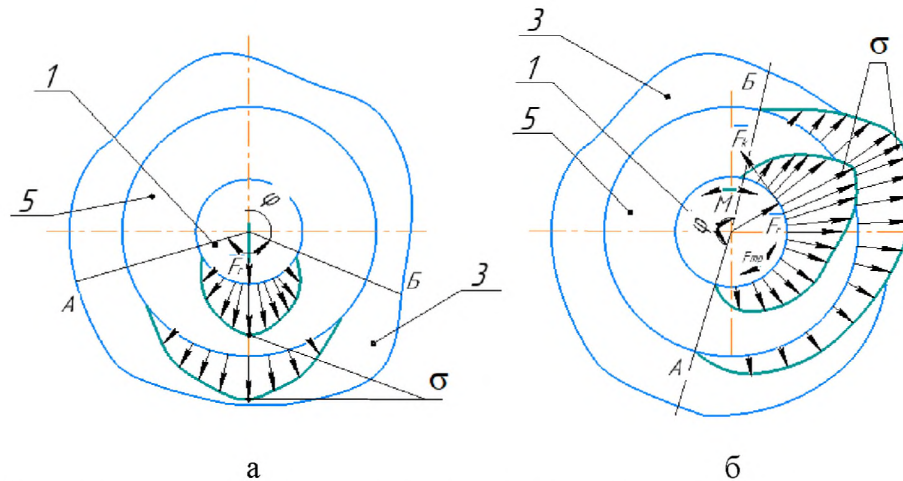


Рисунок 2.3 - Схема радиальных сил и напряжений в контактной зоне действующих в подвижных опорах шарнирного соединения: а- исходное положение; б- при выполнении технологических операций; 1- шарнирный палец; 2 – проушины одного из элементов манипулятора; 3- проушины другого элемента манипулятора; 4- вкладыши неподвижного звена; 5 – подшипники скольжения; φ - угол поворота, σ - напряжения; F_r - радиальная сила; F_k - касательная нагрузка; M - момент трения; F_{tr} – сила трения.

В исходном положении звеньев со стороны шарнирного пальца на контактирующие с ними вкладыши подвижного соединения действует нагрузка, определяемая массой рабочих элементов манипулятора, площадью контакта, величиной зазора, упругие постоянные материалов деталей шарнира. При выполнении технологических операций нагрузка на шарнирное соединение возрастает, достигая некоторого максимального значения. В таких условиях взаимодействия по многим данным [102,103,135,155] стабильный режим смазывания не обеспечивается.

Особо следует отметить, что при выполнении большинства операций начало перемещений в шарнирных соединениях происходит при максимально нагруженном манипуляторе. Соответственно, для страгивания деталей шарнирного соединения необходимо преодолеть высокий порог трения покоя. В этот же момент реализуются и наиболее неблагоприятные условия смазывания деталей, поскольку при

нагружении шарнира происходит выдавливание смазки из зоны фрикционного контактирования. При этом наблюдаются высокие контактные деформации при перемещении фрикционных поверхностей. Коэффициент трения покоя в этот момент имеет величину, составляющую 0,2 – 0,35. С началом относительного перемещения коэффициент трения снижается [9,67]. Высокие значения коэффициента трения в сочетании с большими нагрузками приводят к соответствующему энерговыделению в рассматриваемых триботехнических узлах. Это обуславливает необходимость её интенсивной диссипации, поскольку повышение температуры взаимодействующих деталей приводит к существенному изменению фрикционных параметров таких как твёрдость, сопротивление срезу и др. [9,29-31,49,82,185].

Что касается особенностей нагружения и изнашивания неподвижных соединений, то они подвергаются микровращательному колебательному нагружению с амплитудой 10-15 мкм. Такой характер нагружения способствует возникновению фреттинг- коррозии и интенсивному изнашиванию контактирующих деталей.

2.1.2 Механизм и закономерности изнашивания деталей шарнирных соединений

При эксплуатации деталей шарнирных соединений наиболее вероятным является проявление трения в условиях граничной смазки в сочетании с элементами сухого и гидродинамического взаимодействия. При сухом трении контактируют поверхности, на которых находятся окисные плёнки и слои молекул газов и жидкостей, адсорбированных из окружающей среды. При граничной смазке она обычно располагается в полостях микрорельефа и волнистости, а её действие является локальным.

Механизм трения [18,19,21,44,178,180,184,185] в рассматриваемых условиях имеет, преимущественно, молекулярно- механическую природу при этом относительное перемещение начинается с деформации выступов шероховатостей которое носит в основном упругий характер и исчезает при снятии сдвигающего усилия.

Далее, по мере роста сдвигающего усилия предварительное смещение приобретает пластичный характер и становится частично необратимым.

Минимизировать силу трения можно за счёт создания благоприятной формы микронеровностей, позволяющих обеспечить сохранение в контакте смазочного вещества. Кроме этого, важным является достижение способности поверхностных слоёв к структурной приспособляемости в условиях эксплуатации, что позволяет повысить износостойкость. Отсутствие такой приспособляемости может способствовать возникновению неконтролируемого поверхностного разрушения, например, проявлению схватывания, усугубляемого интенсивным тепловыделением.

В неподвижных посадках механизм изнашивания также является достаточно сложным. Это связано с отсутствием заметных относительных перемещений контактирующих поверхностей. Однако, несмотря на это, они подвергаются интенсивному малоамплитудному воздействию, способствующему проявлению изнашивания, называемого фреттинг-коррозией. Естественно, к обеспечению их износостойкости требуется иной подход.

В то же время имеющиеся для разработки путей её повышения расчётные зависимости по данным [164] использовать затруднительно, поскольку они не учитывают влияние многих важных факторов. Например, теплофизического состояния трибоконтакта, адсорбционных и диффузионных явлений, модификации материала трущихся поверхностей и т.д. Поэтому расчёты во многих случаях дают только приближенные значения, пригодные лишь для качественной оценки влияния, рассматриваемых триботехнических параметров. Особенно это касается узлов трения, функционирующих в сложных эксплуатационных условиях. Поэтому необходимым является использование, наряду с расчётными, экспериментальных данных при прогнозировании ресурса рассматриваемых соединений.

Тем не менее, на основании теоретических зависимостей, характеризующих процесс, можно выявить доминирующие факторы, определяющие интенсивность протекания изнашивания. Получение более точных результатов достигается при использовании расчетных зависимостей и уточнённых с учётом данных экспери-

ментальных исследований. Применительно к условиям изнашивания, рассматриваемых в настоящей диссертационной работе по фундаментальным научным данным, преимущественное влияние оказывают многочисленные механические, геометрические и теплофизические факторы, а также параметры, определяющие несущую способность контакта.

В случае преобладающего адгезионно-механического изнашивания [164] такими критериями являются напряженное состояние контакта и площадь фактического касания поверхностей, оцениваемое как:

$$K_i = p/HB = fp/HB, \quad (2.1)$$

где p - давление; f - коэффициент трения скольжения; HB - твёрдость.

Однако при использовании этого критерия более корректным и информативным является использование предложенного нами обобщённого показателя твёрдости, описанного ниже.

Критерий, учитывающий относительную толщину и совокупность свойств смазочного слоя может быть представлен следующим образом:

$$K_i = h/\zeta, \quad (2.2)$$

где h — толщина смазочного слоя; ζ — показатель свойств и особенностей внесения смазки в зону трения.

Усталостная прочность трущихся поверхностей регламентируется на основе критерия:

$$K_i = v_l p / \sigma_0, \quad (2.3)$$

где p - давление; σ_0 - предел усталости; v_l - скорость скольжения.

Влияние шероховатости оценивается на основе использования фактора Крагельского — Комбалова [164]:

$$K_i = R_{\max} / (r_{\text{ш}} b_{\text{ш}}^{1/v_{\text{ш}}}), \quad (2.4)$$

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

Дополнительно, к выше отмеченным критериям, предложены критерии влияния структурной и геометрической неоднородностей поверхностных слоёв фрикционных материалов $K_{\text{Нц}}$ и K_{R} [110],

$$K_{H\mu} = \frac{H\mu}{H\mu i}; K_R = \frac{R_{max}}{nRa} \quad (2.5)$$

где $H\mu$ – максимальное значение микротвёрдости материала; $H\mu i$ – минимальное значение микротвёрдости материала; R_{max} – максимальная высота неровностей; Ra – средняя высота неровностей соприкасающихся поверхностей; n – коэффициент, отражающий способ формирования шероховатости при обработке деталей.

Критерий изнашивания при приложении ударных нагрузок [110] может быть записан как:

$$K_i = HRA \times K_c \times P_c / a_c \quad (2.6)$$

где HRA – твёрдость; K_c – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, МПа $m^{0,5}$; P_c – количество микротрещин, приводящих к отделению продуктов износа в процессе изнашивания находящихся в функциональном слое; a_c – геометрические размеры микротрещин, протяжённостью более критических.

Что касается теплофизических факторов, то их влияние на интенсивность изнашивания определяются следующими критериями:

Критерий, определяющий влияние контактной температуры и значения критической температуры $t_{кр}$ работоспособности триботехнического узла (например, температура плавления, температура характерных физико-химических и структурных превращений в материалах трущихся тел):

$$K_i = t_k / t_{кр}, \quad (2.7)$$

где t_k – контактная температура.

Критерий, определяющий влияние температурного градиента и параметров теплового пограничного слоя может быть определён на основании следующей зависимости:

$$K_i = q \delta_T / (\lambda_{1,2} t_{кр}) \quad (2.8)$$

где q — удельный тепловой поток (плотность теплового потока), действующего на контактирующие детали; $\lambda_{1,2}$ – коэффициенты теплопроводности материалов контактирующих деталей; δ_T – толщина теплового пограничного слоя

Ориентировочно установить толщину критически прогретого поверхностного слоя, формирующегося в деталях при трении, возможно с использованием уравнения [164]:

$$\frac{t_{\delta}}{t_k \sqrt{\pi}} = i \operatorname{erf} c \left(\frac{\delta_T}{2\sqrt{a_T \tau}} \right), \quad (2.9)$$

где t_{δ} — температура на расстоянии δ_T от поверхности; t_k — температура в контакте; a_T — коэффициент температуропроводности; τ — время контактирования; c — удельная теплоемкость материала тела.

Возможные погрешности в указанных расчётах указываются, как интеграл вероятности, в связи с чем формула (2.9) может быть представлена следующим образом:

$$\frac{t_{\delta}}{t_k \sqrt{\pi}} = i \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^c e^{-t^2} dt \left(\frac{\delta_T}{2\sqrt{a_T \tau}} \right), \quad (2.10)$$

Термонапряженность приповерхностного слоя выражается следующей зависимостью

$$R = \frac{E a_t \Delta t}{(1-\nu) \sigma_{\text{пр}}}, \quad (2.11)$$

где E — модуль упругости; a_t — коэффициент линейного температурного расширения; Δt — приращение температуры; ν — скорость; $\sigma_{\text{пр}}$ — предельное напряжение, необходимое для разрушения поверхностного слоя.

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

$$K_m = pc(t_{\text{к.п.}} - t) / \sigma_s, \quad (2.12)$$

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

При этом минимальные значения отношения теплосодержания материала при его нагреве до температуры контактного плавления $[pc(t_{\text{к.п.}} - t)]$ к пределу текучести соответствует меньшим значениям коэффициента трения и склонности к схватыванию.

Использование приведённых теплофизических критериальных соотношений позволяет более обоснованно подойти к выявлению связи интенсивности изнашивания с температурой в месте контакта, температурным градиентом, термонапряжениями, теплостойкостью материала, его составом и структурой. Поэтому, важнейшим является снижение температурного режима эксплуатации за счёт диссипации тепловой энергии, достигаемой путём повышения теплопроводности и температуропроводности используемых антифрикционных материалов, а также путём обеспечения аккумуляции тепловой энергии в объёме используемых материалов и деталей.

К критериям, определяющим характер и интенсивность изнашивания относятся и несущая способность трибоконтакта. При этом напряжения в поверхностных слоях контактирующих деталей σ_{ij} можно представить состоящим из механических (силовых) и температурных напряжений [164]:

$$\sigma_{ij} = \sigma_m [\sigma_{ij}^{-i}(x, y, v, f) + \Phi_t \sigma_{ij}^{-t}(x, y, v, F_0)] \quad (2.13)$$

где σ_{ij}^{-i} - изотермическое безразмерное напряжение; σ_{ij}^{-t} температурное безразмерное напряжение; σ_m — максимальное напряжение; x — координата; f — коэффициент трения скольжения; y — координата поперёк смазочного слоя; v — коэффициент Пуассона.

Безразмерные функции: σ_{ij} зависит от координат точки x, y , коэффициента Пуассона v , коэффициента трения скольжения f ; σ_{ij}^{-t} — от x, y, v , и числа Фурье F_0 , где

$$F_0 = \frac{2a_T}{v r_k}. \quad (2.14)$$

Температурный фактор

$$\Phi_t = \frac{2(1+v)a_T G}{(1-v)\lambda} \gamma f v r_k, \quad (2.15)$$

где F_0 - число Фурье; f - коэффициент трения скольжения; G — модуль сдвига; Φ_t - температурный фактор; λ - коэффициент теплопроводности; v - коэффициента Пуассона; a_T — коэффициент температуропроводности, v — скорость, r_k — радиус пятна фактического контакта; γ — коэффициент распределения тепловых потоков.

Действие механических и температурных напряжений приводит к снижению несущей способности трибоконтакта, к возникновению пластических деформаций и изнашиванию контактирующих тел.

Вместе с тем, можно полагать, что создание в функциональных поверхностных слоях благоприятного уровня остаточного напряжённого состояния σ_i , снижающих величину эксплуатационных напряжений, возникающих при работе машин и минимизирующих, тем самым, интенсивность изнашивания деталей. С учётом этого формула (2.12) может быть записана следующим образом:

$$\sigma_{ij} = \sigma_m [\sigma_{ij}^{-i}(x, y, v, f) + \Phi_t \sigma_{ij}^{-t}(x, y, v, F_0) + \sigma((x, y, v))]. \quad (2.16)$$

Таким образом создаваемые технологические напряжения сжатия в поверхностных слоях способствует снижению уровня напряжений, возникающих в процессе воздействия механических нагрузок и температурного режима эксплуатации.

2.2 Генерация энергии в триботехнических парах скольжения и возможности её диссипации

В триботехнических системах генерируемая энергия, представляет собой сумму кинетической и потенциальной энергии, выделяющейся при взаимном относительном перемещении контактирующих деталей. Эта энергия переходит в энергию неупорядоченного процесса, преимущественно, в тепловую. Таким образом происходит трансформация до 90 - 95 процентов механической энергии. Уровень и интенсивность генерации тепловой энергии определяют температурное состояние зоны фрикционного контакта взаимодействующих деталей. При этом развивающиеся температуры могут достигать высоких значений, что является решающим фактором при оценке износостойкости узлов трения [102,103].

При этом количество выделившейся в зоне трения теплоты Q (Дж) составляет [148,185]:

$$Q = N \times v \times f \times t \quad (2.17)$$

где f - коэффициент трения; N — нормальная нагрузка, Н; t - время скольжения, с; v - скорость скольжения, м/с.

Выделяющееся тепло распространяется в глубь вала и втулки подшипника, а также идет на нагревание смазочного материала, причем тепловые потоки распределяются в зависимости от теплофизических свойств материалов контактирующих деталей, их размеров и условий теплоотвода [185]. В общем случае, уравнение теплового баланса может быть записано следующим образом

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (2.18)$$

где Q - количество тепла, выделяющегося в подшипниковом узле в единицу времени, Дж/с; Q_1 - количество тепла, отводимого смазочным материалом, Дж/с; Q_2 - количество тепла, отводимого во внешнюю среду через детали шарнирного узла, Дж/с; Q_3 - количество тепла, аккумулируемого антифрикционным материалом находящимися в его структуре теплоаккумулирующими структурными и конструктивными элементами.

Обычно доля теплоотвода через вал и вкладыш распределяются в примерном соотношении 30 и 70%, т.е. большая часть всего генерируемого тепла идет в подшипник. В связи с этим целесообразно обеспечение более равномерного распределения тепловых потоков между валом и подшипником и перенаправления большего количества тепла в сторону вала, например, за счёт повышения его теплоёмкости.

Для улучшения условий работы узлов трения желательно обеспечивать протекание термо-диссипативных процессов в триботехнической системе на различных размерных уровнях, т. е. в макро – микро - и субмикрообъемах. Они также могут реализовываться как в структуре конструкционных материалов, так и в применяемых смазках, а также в функциональных промежуточных покрытиях.

Очевидно так же, что генерацию энергии в триботехнических узлах необходимо в максимальной степени минимизировать, например, за счет снижения потерь на трение. При этом на всех этапах контактирования необходимо прогнозировать ту долю энергии, которую следует рассеивать во избежание недопустимого нагрева

деталей триботехнических узлов, который может привести к необратимым разрушениям или недопустимым потерям функциональных характеристик.

При этом повышенного уровня рассеяния энергии можно достигнуть в том случае, если элементы структуры антифрикционных материалов обладают возможностью обмениваться друг с другом и с окружающей средой потоками вещества или энергии, а также обеспечения рассеяния. Обычно такое рассеяние происходит по следующей схеме превращений: механическая энергия $\rightarrow$ тепловая энергия $\rightarrow$ энергия структурных превращений или, плавления отдельных легкоплавких составляющих конструкционного материала. Такие структуры являются диссипативными, а их устойчивое состояние может обеспечиваться при условии достаточного уровня диссипации энергии, поступающей извне при работе узлов [82].

Таким образом, при работе машин, требующих высоких затрат энергии, необходимо достаточно интенсивное выведение её за пределы локальных зон контактирующих деталей, где она концентрируется. Для этого требуется обоснование возможности формирования каналов её удаления и рассеивания. Используя такой подход, можно обосновать более эффективные антифрикционные материалы, обладающие повышенными триботехническими параметрами, обеспечивающими как минимизацию генерации энергии при трении, так и её повышенную диссипацию. При этом достижение благоприятных значений совокупностей свойств целесообразно осуществлять посредством улучшения объемных характеристик материала деталей, и путем оптимизации состояния функциональных поверхностных слоев.

Это позволяет еще до решения конкретной тепловой задачи ориентировочно определить долю тепла, идущего в каждое из контактирующих тел и выработать рекомендации по сокращению её негативного влияния на работоспособность рассматриваемых деталей. Для этого необходимо установить коэффициенты распределения тепловых потоков и тем самым упростить расчеты тепловых полей в каждом из трущихся тел [82,185].

Важную роль в повышении триботехнической эффективности работы машин, помимо минимизации генерации энергии, играет и её интенсивная диссипация. Поэтому выявление перспектив повышения диссипации «излишков» энергии,

генерируемой в процессе трения и изнашивания способствует увеличению износостойкости рассматриваемых объектов [30,33,40,84,102,190].

Одним из возможных путей рассеяния механической энергии является демпфирование упругих колебаний и преодоление неупругих сопротивлений в процессе выполнения рабочих перемещений. При этом необходимым является использование диссипативных параметров материалов деталей и разделяющих их промежуточных сред, к которым относятся и смазочные материалы. Также необходимо иметь в виду, что диссипативные системы характеризуются спонтанным проявлением в них сложных, а во многих случаях, и хаотичных явлений, в результате которых возможна трансформация их исходного объёма и геометрической формы.

Исключительно важным фактором является диссипация тепловой энергии [46, 82]. Особо следует отметить важность термического фактора для композиционных материалов. Это связано с достаточно нередким наличием в их структуре легкоплавких или термически неустойчивых фаз, деструкция которых, может существенно снижать износостойкость материала или повышать его коэффициент трения.

Генерирование тепла при трении преимущественно обусловлено упругим и пластическим деформированием материала при трении, также этот процесс связан с гистерезисом, диспергированием, хрупким выкрашиванием и вязким течением. Кроме того, выделение тепла происходит по причине возникновения и разрушения адгезионных связей между контактирующими поверхностями.

Тепло, выделяемое в зоне трения, распределяется между трущимися телами, переносится от более нагретых элементов к менее нагретым. Поэтому теплопроводность, за счет которой тепло удаляется из зоны трения является важнейшим параметром антифрикционных материалов [82,107]. При этом наиболее температура нагруженными являются поверхностные слои деталей фрикционной пары. Для оценки уровня их нагрева целесообразно оперировать температурой вспышки, которая определяет локальное приращение температуры при фрикционном взаимодействии неровностей шероховатости и волнистости сопряженных поверхностей. Длительность взаимодействия этих неровностей очень мала и составляет 10^{-3} - 10^{-9}

с. Вместе с тем микронеровности испытывают многочисленные термоциклические воздействия, в результате чего наблюдается повышение температуры, поскольку объём генерируемого тепла превышает объём рассеиваемого за этот же промежуток времени. Увеличивается и площадь ее локализации. Расчет этой температуры может проводиться по известным формулам [185], согласно которым температура микронеровностей составляет величину, равную T :

$$T = 2 \frac{q}{\lambda} \left(\frac{a}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{j=1}^N (\sqrt{j t_* + t} - \sqrt{j t_* + t - t_c} + \sqrt{t} - \sqrt{t - t_c}), \quad (2.19)$$

где t_c – длительность контакта; r – радиус пятна контакта; q – интенсивность теплового источника.

Термическая нестабильность проявляется и при смене режимов трения. Например, быстрое увеличение температуры поверхности трения возможно вследствие возрастания, генерируемого тепла, при страгивании с места нагруженного шарнирного соединения в момент преодоления при этом силы трения покоя и технической сложностью её диссипации за очень короткий промежуток времени. В результате на соприкасающихся поверхностях происходит формирование тонкого поверхностного слоя, в котором накапливается тепло [185].

При достижении нагреваемым слоем некоторой критической температуры, например, температуры плавления может происходить оплавление поверхностных слоёв деталей, приводящее к уменьшению коэффициента трения и, соответственно, снижению тепловыделения на контакте. Со снижением тепловыделения возрастает вязкость сформировавшегося квазизжидкого слоя и коэффициент трения снова возрастает. Периодическое проявление такой нестабильности может являться основой обеспечения саморегулирования фрикционного поведения трущихся пар, в том числе и стабилизация теплового режима.

Аналогичное саморегулирование может быть достигнуто и за счет введения в состав композиционных, в том числе полимерных материалов, формиатов и оксалатов пластичных металлов, таких как свинец, медь, висмут. Это позволяет снизить тепловую напряженность узла трения благодаря разложению вводимых в композит соединений под действием фрикционного нагрева. Разложение происходит с

поглощением тепла и выделением металла, который образует на поверхности трения антифрикционную пленку. Периодический износ этой пленки и соответствующее повышение контактной температуры приводит к повторению этого процесса вплоть до полного исчерпания возможностей введенных соединений.

Значительными возможностями повышения устойчивости работы трибосистем обеспечивается путём стабилизации температурного режима за счёт введения в объем, используемых антифрикционных материалов, легкоплавких фаз. Такие фазы можно располагать либо в виде изолированных локальных включений, либо путем заполнения ими специальных внутренних полостей. В основе такого подхода лежит обеспечение повышенной теплоемкости антифрикционных материалов [47].

При этом количество тепла, аккумулируемого антифрикционным материалом и теплоаккумулирующими средами, может быть определено по следующей формуле:

$$Q = m \{C_m(T_{пл} - T_{ср}) + r\}, \quad (2.20)$$

где m – масса плавящегося вещества, кг; C_m – удельная теплоемкость твердой фазы плавящегося вещества Дж/кг °С; $T_{пл}$ – температура плавления, °С; $T_{ср}$ – температура окружающей среды, °С; r – удельная теплота плавления, Дж/кг.

Большую роль также играет изучение явлений, возникающих в условно неподвижных соединениях деталей при изнашивании вкладышей подшипников в проушинах соединяемых звеньев манипулятора, и в соединениях шарнирного пальца в его неподвижной посадке во вкладыше.

Это следует из предпосылки, что фактически в них реализуются высокочастотные микроперемещения. Поэтому и в таких соединениях необходимо предусматривать возможность обеспечения диссипации энергии, генерируемой при микроколебаниях. Для этого целесообразным является создание промежуточных аморфных покрытий, в которых диссипация происходит за счёт проявления внутреннего трения в тонких, адаптируемых к изменяющимся условиям трения, слоях. Это даёт возможность минимизировать возможности возникновения фреттинг-коррозии в таких соединениях.

2.3 Создания композиционных материалов с управляемыми фрикционными параметрами

При создании новых антифрикционных материалов ставилась задача достижения таких функциональных свойств, как достаточная теплопроводность, теплоаккумулирующая способность, высокие значения износостойкости и антифрикционности, а также способность демпфировать ударные и вибрационные нагрузки. Для решения такой задачи было принято рациональным создание композитов на основе растительных и искусственных полимеров, таких как полиамиды, полиэтилен, полипропилен, полистирол, фторопласт-3,4, полиформальдегид, поликарбонат и др. Они имеют меньшую массу и обладают высокой демпфирующей способностью. Кроме того, детали из них могут обходиться без смазки, а также работать в химически активных средах при повышенных и низких температурах, в широких диапазонах нагрузок и скоростей скольжения.

Наиболее рациональным [5-8,92-96,201-203] представляется использование композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), обладающего высокой степенью кристалличности, аморфная часть которого находится в высокоэластическом состоянии, а надмолекулярная структура ПТФЭ носит ламellarный характер. Наслоение ламелей образует монокристаллы, а более мелкие вторичные структуры (пачки, пластины, глобулы, фибриллы) разных размеров и ориентации образуют аморфную фазу.

При трении надмолекулярные образования в ПТФЭ претерпевают значительные изменения: они могут дробиться, объединяться, перестраиваться, уноситься из зоны трения. В молекулах полимера могут происходить разрывы химических связей, приводящие к образованию свободных атомов, которые в дальнейшем могут вступать в химические реакции с наполнителями матрицы полимера. В поверхностных слоях при трении могут возникать процессы, приводящие к текстурированию или пластической деформации.

Благоприятная роль ПТФЭ в структуре композита проявляется вследствие того, что коэффициент его трения по стали без смазки, находится на уровне 0,04-

0,05 при скоростях скольжения до 1×10^{-2} м/с, а увеличение нагрузки вызывает существенное снижение коэффициента трения.

Модифицированная древесина также обладает перспективной совокупностью свойств, позволяющих в достаточной степени обеспечить необходимые эксплуатационные характеристики в условиях недостаточного смазывания, наличия абразивных сред, а также и при высокоинтенсивном динамическом нагружении [111,146,163,187]. Вместе с тем низкие механические характеристики и сравнительно невысокие значения рабочих температур, допускаемые полимерными материалами, существенно ограничивают скорости и давления, реализуемые в подшипниках скольжения шарнирных соединений.

Для увеличения сопротивляемости термической деструкции полимерной основы предлагаемых антифрикционных материалов за счет повышения их теплофизических характеристик, ранее в ряде работ [146,163,187] предлагалось размещать в матрице металлические теплопроводящие и теплоаккумулирующие армирующие элементы. При этом металлической фазе рекомендовалось задавать различную геометрическую форму - тавр, конус, сфера, сетка и др. Изготавливать их предлагалось из материалов, обладающих повышенным уровнем, теплопроводности, теплоемкости и антифрикционных характеристик. В результате были созданы более работоспособные композиционные материалы, отличающиеся содержанием металлической фазы, ее дисперсностью и химическим составом. Схематично структуры некоторых из таких материалов представлены на рисунке 2.6.

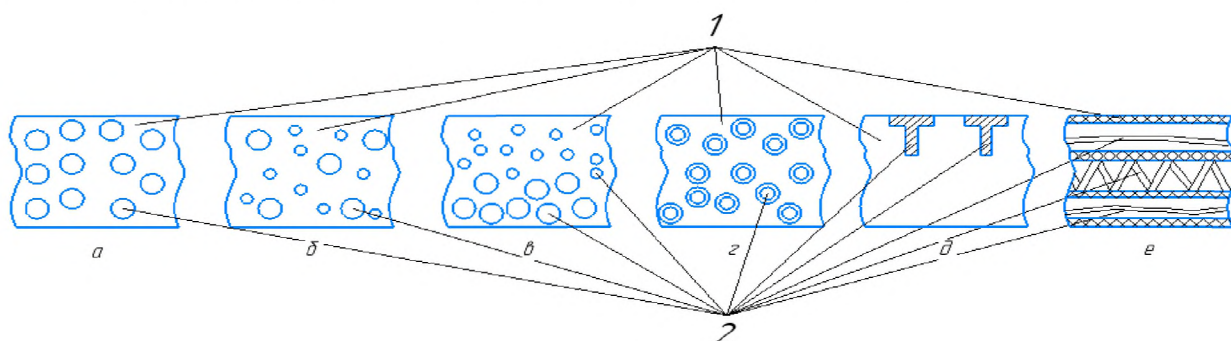


Рисунок 2.6 – Схемы размещения и форма металлической фазы в полимерно-металлических композиционных материалах: 1- полимерная матрица, 2- металлическая фаза; а- сферическая фаза одинаковой дисперсности [120]; б- сферическая фаза разной дисперсности [121]; в- фаза различной дисперсности, послойно размещенная в матрице [122]; г- биметаллическая фаза; д – поверхностно расположенные теплоотводящие макроэлементы [124]; е- чередование древесного шпона и металлической составляющей в виде металлической полосы, сетки или пружин [123,125].

К оптимизирующим составляющим этих материалов относятся теплопоглощающие, демпфирующие и твёрдосмазочные компоненты. Они обеспечивают дополнительное повышение работоспособности композитов, используемых для изготовления вкладышей подшипников скольжения. Важным также является задание благоприятного уровня дисперсности отдельных составляющих композита и особенностей их распределения в матрице и др.

Необходимо регламентировать и расстояние между отдельными оптимизирующими включениями в полимерной основе. Благоприятный уровень такого показателя позволяет стабилизировать температурный режим эксплуатации полимерно-металлических композиционных подшипниковых материалов и повысить их диссипативные и виброгасящие характеристики. Увеличение уровня последних показателей достигается введением в состав композитов эффективных демпфирующих элементов, изготовленных из упругих или пластически деформируемых материалов.

Характерные проявления изнашивания деталей шарнирных соединений, пути и направления оптимизации функциональных параметров подшипниковых материалов, перспективы и возможные пути обеспечения износостойкости подшипников скольжения представлены в систематизированном виде таблицы 2.1.

Таблица 2.1- Пути повышения триботехнических параметров антифрикционных материалов и контактирующих поверхностей подшипников скольжения.

Преобладающие виды изнашивания деталей шарнирных соединений	Направления оптимизации функциональных параметров подшипников скольжения	Возможные пути обеспечения износостойкости подшипников скольжения
Изнашивание в виде усталостного диспергирования	Формирование благоприятной структуры поверхностного слоя, его антифрикционности и усталостной прочности	Целесообразный выбор основы материала; обоснование размещения в ней оптимизирующих составляющих; создание остаточных напряжений сжатия.
Микровыкрашивание и сколы	Повышение сопротивляемости хрупкому разрушению; минимизация в объёме детали концентраторов напряжений	Вибропоглощение, демпфирование и диссипация энергии; минимизация дефектного состояния материала; торможение микротрещин; снижение геометрической и структурной неоднородностей; повышение коэффициента K_c

Абразивное изнашивание	Повышение сопротивляемости микрорезанию и малоцикловой усталости	Повышение твёрдости и прочности; снижение концентрации абразива в зоне фрикционного контакта
Термо-механическое воздействие	Повышение теплоёмкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности; теплоустойчивости материала	Обеспечение эффективного теплоотвода и теплопоглощения; обеспечение смазывания. Минимизация коэффициента трения
Фреттинг- коррозия	Уменьшение микроперемещений и колебаний; оптимизация структуры в зоне фрикционного контакта	Использование антифреттинговых смазочных материалов и покрытий; удаление продуктов износа из контактной зоны; создание регулярного микрорельефа
Схватывание	Снижение склонности материалов к схватыванию	Увеличение твёрдости контактирующих поверхностей; снижение прочности адгезионных связей, применение антифрикционных смазок
Коррозионно- механическое изнашивание	Повышение сопротивляемости коррозии и механическому изнашиванию	Создание защитных слоёв, поверхностное легирование материалов; увеличение твёрдости

Представленный анализ свидетельствует о целесообразности введения в структуру предложенного композиционного материала оптимизирующих составляющих, среди которых наиболее значимыми являются те, которые обеспечивают оптимизацию теплофизических свойств. В результате достигается повышение теплопроводности материала, определяющее интенсивность отвода теплоты из зоны трения и диссипации энергии. Это обеспечивается за счёт использования наполнителей, обладающих высокой теплопроводностью. Кроме того, для увеличения диссипации тепловой энергии рациональным является введение в полимерную матрицу достаточно крупных теплопоглощающих элементов, например, в виде капсул, заполненных легкоплавкими сплавами.

Представляется также полезным введение в структуру материала демпфирующих элементов виде упруго или пластически деформируемых составляющих, а

также твёрдых смазочных материалов. При этом важной является рациональная локализация структурных составляющих по зонам создаваемых вкладышей подшипников скольжения

Кроме того, по данным [7,92,93] целесообразно введение в полимерную матрицу ультрадисперсных, дисперсных и волокнистых наполнителей. Волокнистые наполнители (углерод, ткани, различные волокна, в том числе углеродные и металлические) придают получаемой композиции прочность, жёсткость и термохимическую стойкость. Дисперсные наполнители- твёрдо смазочные материалы, сульфиды и селениды металлов повышают теплопроводность, минимизируют сопротивляемость трению и повышают диссипативные характеристики.

Так же установлено, что использование компонентов в ультрадисперсном состоянии позволяет в гораздо широкой степени управлять функциональными свойствами создаваемых материалов [5,7,8,93-96]. По этим же данным для комплексного улучшения свойств композиционных материалов в их матрицу целесообразно одновременное введение нескольких наполнителей, которые приводят к изменению надмолекулярной структуры и свойств композита.

2.4 Основы формирования новых антифрикционных композиционных материалов и вкладышей из них

Таким образом, при создании антифрикционных материалов и изделий из них принимался следующий алгоритм их формирования. Вначале производится выбор состава и основных свойств основы (матрицы) композиционного материала [7, 92-96]. Затем назначаются основные оптимизирующие структурные составляющие, обеспечивающие получение требуемых функциональных свойств. При этом полагалось, что суммарное содержание наполнителей в объёме композита может составлять от 15 до 90% от массы или объёма полимерного материала. Такой высокий допустимый объём вводимых наполнителей позволяет в значительной степени расширить диапазон варьируемых эксплуатационных свойств.

Наполнители разделяют по их дисперсности на крупные и малоразмерные. К крупным относятся теплоаккумулирующие, теплоотводящие и демпфирующие. Геометрическая форма их может существенно отличаться. Они могут быть локально размещаемыми, армирующими, волокнистыми, витыми и сетчатыми, ткаными и др. Наполнители маломерные- это преимущественно теплоотводящие и антифрикционные. Наполнители промежуточных размеров могут выполнять функции теплоотводящие и демпфирующие, и вводиться в компонент в виде высокодисперсных порошков, волокон, зёрен различной формы.

2.4.1 Прогностическая оценка теплофизических параметров композиционных материалов

При создании полимерно-металлических композиционных материалов, как правило, важной проблемой является обеспечение требуемого теплоотвода из зоны фрикционного контактирования.

Количество тепла Q_n , передаваемое через втулку с металлическими теплопроводящими элементами в единицу времени, может быть приближенно определено по формуле [185]

$$Q_n = (\lambda_D \times F_D + \lambda_M \times F_M) \times \Delta t / l, \quad (2.21)$$

где λ_D – теплопроводность полимерной матрицы материала по радиусу втулки, Вт/м×К; λ_M - теплопроводность металлических элементов, Вт/м×К; F_D - площадь цилиндрической поверхности стенки втулок (за вычетом отверстий для металлических включений), m^2 ; F_M — площадь поперечного сечения всех металлических включений, m^2 ; Δt - разность температур внутренней и наружной поверхностей втулки подшипника, К; l - радиус втулки подшипника, м.

Если принять площадь внутренней поверхности втулки, ее радиус и перепад температуры по толщине стенки за единицу, то

$$Q_n = \lambda_D (1 - x) + \lambda_M \times x = \lambda_D + (\lambda_M - \lambda_D) \times x, \quad (2.22)$$

где x — относительная величина площади, занимаемой металлическими включениями,

Полагая $\lambda_M / \lambda_D = 200$, получим:

$$Q_n = \lambda_D + 199 \lambda_D x = \lambda_D (1 + 199x), \quad (2.23)$$

Отсюда следует, что наличие металлической фазы способствует существенному увеличению количества отводимого через стенку втулки тепла, а приведённые расчёты показывают, что в металло-полимерном вкладыше даже 10% металлических включений от общего объёма вкладыша, позволяет увеличить количество тепла, отводимого из зоны трения, приблизительно в 20 раз. Это подтверждает целесообразность насыщения полимерно-металлических подшипников, работающих в условиях повышенного тепловыделения, металлическими теплопроводящими элементами.

Однако, даже введение в полимерную основу большого объёма теплопроводящей металлической составляющей не всегда позволяет достигнуть приемлемого теплового режима работы такого подшипника. Для дополнительной оптимизации теплофизических свойств возможным является повышение теплоемкости имплантируемого материала. В этом случае существенная часть тепла может поглотиться за счет расходования его на расплавление вводимого легкоплавкого материала. Возможность реализации такого подхода подтверждается анализом графика зависимости величины теплотеплопоглощения металла или эвтектического сплава при его нагреве, включая процесс расплавления и дальнейший нагрев расплава (рис. 2.8.).

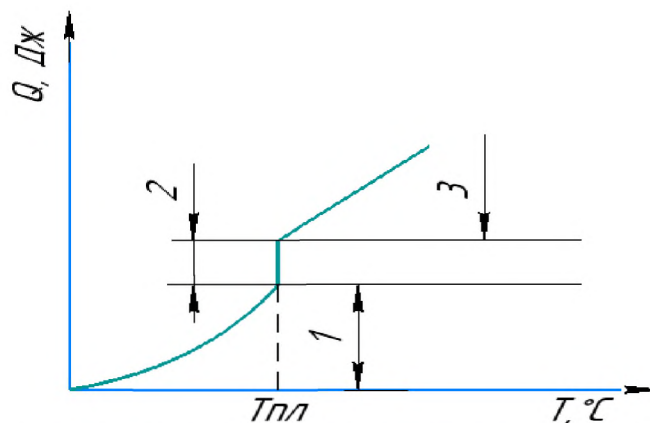


Рисунок 2.8 - Зависимость теплотеплопоглощения Q , Дж материала от температуры нагрева T , К: 1- теплотеплопоглощение при нагреве в твердом состоянии; 2- теплотеплопоглощение при плавлении (процесс теплоаккумуляции при плавлении сплава); 3- теплотеплопоглощение при нагреве в жидком состоянии; $T_{пл}$ - температура плавления.

Как видно, при нагреве таких материалов в них происходит теплопоглощение, во всём диапазоне повышения рабочей температуры начиная с точки плавления $T_{пл}$ теплопоглощение возрастает без повышения температуры антифрикционного материала, вплоть до исчерпания теплоты плавления материала. Таким образом такие материалы можно применить для дополнительного отвода тепла из зоны трения и снижения температуры эксплуатации используемых материалов.

Размещение их в структуре композита, используемого для изготовления вкладыша подшипника скольжения, способствует тому, что энергия, выделяемая при трении, идет на плавление сплава, при этом дальнейшего роста температуры вкладыша не происходит, а выделяющееся тепло аккумулируется в его объём. При снижении рабочей температуры вкладыша легкоплавкий материал затвердевает, что сопровождается тепловыделением. За счёт реализации циклов плавления-затвердевания возможной становится определённая температурная стабилизация работы триботехнического узла.

Соответственно, температура плавления материала теплоотводящих элементов подшипника должна быть на 20-25 °С ниже температуры возможной температурной деструкции полимерной матрицы и находиться в пределах от 100 до 140 °С. Это связано с тем, что температуру плавления ниже 100 °С выбирать нецелесообразно, так как чем она выше, тем больше требуется теплоты для её расплавления и тем больше увеличивается стойкость подшипника к повышенным температурам. Однако при температуре, большей 140 °С, полимерная составляющая подшипника скольжения может подвергаться термической деструкции.

Некоторые из возможных для использования сплавов [80], температура плавления которых находится в диапазоне от 80 до 138 °С представлены в таблице 2.2.

Таблица 1.2 – Перспективные теплоаккумулирующие сплавы.

Состав сплава	Удельная теплоёмкость, Дж/кг °С(К)	Удельная теплота плавления, Дж/кг	$T_{пл}$, °С	Примечание
висмут 57%, олово 43%	202	65	138	Эвтектический сплав
висмут 28,5%, свинец 43%, олово 28,5%	194	62	132	
висмут 56,5%, олово 43,5%	187	57	125	Эвтектический сплав

висмут 33,4%, свинец 33,3%, олово 33,3%	185	55	123	
висмут 53%, олово 26%, кад- мий 21%	178	49	103	
висмут 50%, свинец 28%, олово 22%	176	47	100	сплав Роуза
висмут 50%, свинец 31,2%, олово 18,8%	174	45	96	Сплав Ньютона
висмут 50%, олово 25%, сви- нец 25%	172	42	93,7	сплав Розе
висмут 35,3%, кадмий 9,5%, свинец 35,1%, олово 20,1%	-	38	80	
олово — 12,5 %; свинец — 25 %; висмут — 50 %; кадмий — 12,5 %	170	35	65	Сплав Вуда
кристаллический азотнокис- лый никель	1800	155	56,7	

Положительная роль большинства из рассматриваемых в таблице 2.1 сплавов дополняется тем, что содержащееся в них олово и свинец придают им повышенные антифрикционные характеристики и обеспечивают хорошую прирабатываемость, повышенную износостойкость. Кроме того, используемые металлы недороги и достаточно доступны.

Нами на основании предварительных исследований предложена локализация и некоторые другие параметры теплоотводящих и теплопоглощающих составляющих композита, а также минимальный объём теплоаккумулирующей составляющей. Теплопоглощающие элементы предложено выполнять в виде включений эллипсоидной формы диаметром 3-4 мм и длиной 4-6 мм. Снаружи рекомендуется содержимое капсул покрывать слоем меди толщиной 8-12 мкм, например, используя химические или электрофизические методы. В ряде случаев, этим капсулам, при введении в основу из модифицированной древесины, более удобно задавать форму в виде двух сферических сегментов, соединённых воедино основаниями. Такие капсулы являются более технологичными, поскольку ниши для их размещения в объёме матрицы могут выполняться методами сверления. В полученном для этого глухом отверстии размещается капсула, после чего отверстия заглушаются антифрикционным сплавом, имеющим температуру деструкции на 50-70 °С большую,

чем температура плавления термоаккумулирующего сплава, размещаемого в капсуле.

2.4.2 Обеспечение демпфирующих и виброгасящих параметров антифрикционных материалов

Гашение колебаний и диссипация энергии в композиционных материалах возможно благодаря уменьшению модуля упругости материала основы, которая достаточно эффективно демпфирует колебания. Дополнительно для повышения демпфирующих свойств целесообразно введение в объём антифрикционного материала соответствующих структурных составляющих. При этом демпфирующие элементы должны обладать повышенными упругими и пластическими свойствами. В качестве упруго деформирующего материала может служить твёрдая резина, достаточно мягкие пластически деформируемые материалы, например, сплавы олова, свинца и др.

Важным является обеспечение рационального сочетания демпфирующих и теплоотводящих элементов. Это связано с тем, что возможное превышение некоего уровня концентрации металлических частиц в полимерной матрице может повлечь за собой связывание отдельных металлических частиц в единый каркас. При наличии такого каркаса нагрузка с поверхности трения на внутренние слои подшипника передаётся не через полимерную матрицу, а посредством металлического несущего каркаса, у которого демпфирующие свойства могут оказаться недостаточными для гашения возникающего уровня вибраций и динамических нагрузок.

Кроме того, следует отметить, что сплавы, используемые для изготовления теплоаккумулирующих структурных элементов, являются достаточно пластичными, а значит, при повышенном их содержании можно обеспечить увеличение демпфирующих характеристик вкладышей подшипников, поскольку пластическое

деформирование теплоаккумулирующих капсул с легкоплавким и легкодеформируемым материалом способствует повышению диссипативных характеристик антифрикционных материалов.

2.4.3 Минимизация потерь на трение и повышение износостойкости антифрикционных материалов в подшипниковых узлах шарнирных соединений

Для минимизации потерь на трение и повышения износостойкости композиционных материалов на полимерной основе в них вводятся дисперсные смазочные модификаторы, к которым относятся графит, дисульфид молибдена, окись свинца и др [5,7, 92-96]. Также в структуру антифрикционного композита включаются углеродные волокна и ультрадисперсионный скрытокристаллический графит. Размещение этих антифрикционных составляющих рекомендуется осуществлять на глубину поверхностного слоя вкладышей подшипников скольжения, равную двух-трёхкратной величине допустимого износа – 3-5 мм.

Достаточно эффективным может оказаться введение указанных выше антифрикционных составляющих композита в поверхностный функциональный слой вкладыша с использованием метательных технологий, реализующих высокоскоростное действие либо взрывчатого вещества, либо использование энергии сжатого воздуха

2.4.4 Новый антифрикционный композиционный материал на полимерной основе

Предложенный материал создавался применительно к конструкции подшипника скольжения шарнирного соединения манипуляторов технологических машин, и представляет собой политетрафторэтиленовую основу и наполнители,

состоящие из дисульфида молибдена, ультрадисперсного порошка скрытокристаллического графита и легкоплавкого материала, заключенного в тонкостенную оболочку. Все компоненты композита задаются в следующем соотношении их объёмов: политетрафторэтилен 70-75%, дисульфид молибдена 1-3%, скрытокристаллический графит 2-6%, легкоплавкий материал, заключенный в капсулу с тонкостенной оболочкой 15-20%.

Основа антифрикционного материала - политетрафторэтилен, обладает низким коэффициентом трения, способностью к самосмазыванию, задиристостью, коррозионной стойкостью и пластичностью. Его компоненты не шаржируются в поверхностный слой контртела. Использование дисульфида молибдена и скрытокристаллического графита способствует повышению триботехнических свойств антифрикционного материала и уменьшает потери на трение. Оболочки капсул с легкоплавким материалом рекомендуется выполнять из металла с высокой теплопроводностью, например, из меди или латуни в форме сферы, эллипсоида или цилиндра с коническими основаниями и др. Фотографии капсул с легкоплавким материалом приведены на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Элементы металлической фазы нового композиционного материала: 1- легкоплавкий материал; 2- капсулы в виде цилиндра, изготовленные путём деформации оснований; 3 – сферические капсулы, заключенные в оболочку, выполненную электрохимическим способом.

Схематическое представление структуры предложенного антифрикционного материала приведено на рисунке 2.10.

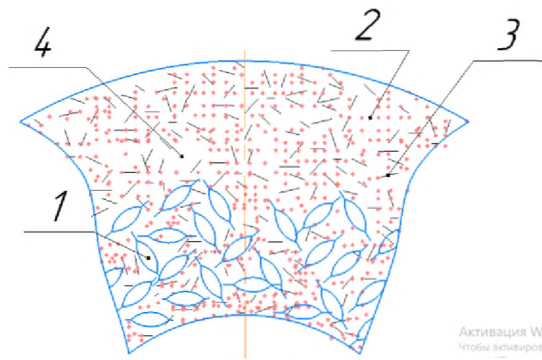


Рисунок 2.10 – Рекомендуемая структура предложенного антифрикционного материала: 1 – теплопоглощающие капсулы; 2,3 – твердосмазочные включения (графит, дисульфид молибдена); 4 – полимерная матрица (основа).

Соответственно разрабатывались и технологические основы создания вкладышей из предложенного материала. Для этого готовится шихта следующего состава: политетрафторэтилен 70-75%, дисульфид молибдена 1-3%, скрытокристаллический графит 2-6%, легкоплавкий материал, заключенный в капсулу с тонкостенной оболочкой 15-20%. При этом в качестве основы антифрикционного материала принимался политетрафторэтилен - фторопласт-4 марки ПН, дисульфид молибдена, скрытокристаллический графит с удельной поверхностью 50-75 м²/г, легкоплавкий материал (висмут 50%, олово 25%, свинец 25%), материал оболочки – медь.

Затем шихта перемешивалась в смесителе при вращении ротора с частотой не менее 7000 мин⁻¹ в течение 2,0-2,5 мин. После этого в композиционной смеси размещают капсулы с легкоплавким материалом, занимающие в общем объеме материала 15-20 %. При этом локализация теплопоглощающих капсул осуществляется преимущественно в поверхностном слое, формируемого вкладыша подшипника скольжения, прилегающем к функциональной поверхности, и составляющим 25-50% его общей толщины.

Полученную таким образом смесь помещали в пресс-форму и прессовали при давлении 90-100 МПа. Затем полученную заготовку спекали в печи при температуре 360±5°C с выдержкой из расчета 8-9 мин на 1 мм толщины стенки заготовки. При этом нагрев заготовок до температуры спекания производили со скоростью 1,5-2,0 град/мин, а охлаждение до температуры 327°C - со скоростью 0,3-0,4

град/мин и от температуры 327°C до 20-25°C охлаждали в термошкафе со скоростью 1-1,5 град/мин.

Выводы по главе 2

1. Установлено, что для повышения износостойкости материалов вкладышей подшипников скольжения шарнирных соединений манипуляторов необходимо взаимно согласованное создание в них благоприятных уровней значительного числа показателей, относящихся к механическим, геометрическим, физико-химическим, теплофизическим факторам и фактором, определяющим несущую способность трибоконтакта. При этом полагалось, что преобладающими для них механизмами изнашивания являются механическое и тепловое поверхностное разрушение.

2. Выявлены, систематизированы и уточнены основные факторы и критерии, определяющие интенсивность изнашивания при совокупном механическом и теплофизическом воздействии, обоснованы возможности прогнозирования и оптимизации триботехнических показателей деталей шарнирных соединений.

3. Предложены более информативные оценочные расчётные модели, учитывающие влияние на износ при действии динамических нагрузок, коэффициентов геометрической и структурной неоднородности, критерия хрупкого разрушения K_c , наличие и протяжённость дефектов функционального слоя в виде микротрещин.

4. Обоснована целесообразность введения в структуру предложенного композиционного антифрикционного материала составляющих, обладающих высокой теплопроводностью и теплопоглощающей способностью, а также антифрикционных и демпфирующих составляющих в следующем процентном соотношении: политетрафторэтилен 70-75%, дисульфид молибдена 1-3%, скрытокристаллический графит 2-6%, легкоплавкий материал, заключенный в тонкостенную оболочку 15-20%. Показано, что важными факторами структурного состояния композиционных

материалов, определяющие их триботехнические свойства, являются помимо химического состава и дисперсность наполнителей, а также целесообразная локализация их в объеме подшипникового материала.

5. Обоснована целесообразность повышения триботехнических характеристик подшипников скольжения за счет достижения регламентированного благоприятного уровня остаточных напряжений сжатия в функциональных поверхностных слоях, и формирования благоприятной формы микрорельефа для сохранения в процессе выполнения технологических операций в зоне контактирования функциональных поверхностей в контакте смазочного материала.

6. Предложен и обоснован принцип стабилизации температурного режима работы триботехнических узлов шарнирных соединений за счёт увеличения теплоёмкости, предложенных композиционных материалов путём введения в них легкоплавких структурных составляющих, содержащих включения, обладающих температурой плавления в диапазоне температур от 65 до 140 °С, в виде изолированных локальных капсул, располагаемых в материале или путём заполнения ими внутренних полостей деталей подшипникового узла.

7. Для более убедительного подтверждения целесообразности использования предлагаемых материалов при изготовлении подшипников скольжения и уточнения теоретических предположений, изложенных в настоящей главе, необходимо провести цикл экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния структурного состояния полимерных композиционных материалов, на теплофизические, виброгасящие и триботехнические параметры.

3. НАУЧНО- ИНЖЕНЕРНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Анализ перспектив дальнейшей оптимизации триботехнических показателей антифрикционных материалов, используемых при изготовлении подшипников скольжения шарнирных соединений, для повышения их износостойкости показал, что такие возможности в значительной степени исчерпаны. Поэтому увеличение работоспособности указанных триботехнических узлов требует обоснования и осуществления комплексных решений, в том числе и за счёт создания новых более эффективных конструкций узлов скольжения.

В основу создания таких конструкций был положен принцип одновременного или аддитивного обеспечения отмеченных выше совокупностей важных функциональных свойств, таких как высокие показатели антифрикционности (а в ряде случаев и фрикционности), повышенных теплоотводящих и теплоаккумулирующих показателей, высокой демпфирующей способности и износостойкости, применительно к условиям функционирования как подвижных, так и неподвижных посадок деталей в шарнирных соединениях.

3.1 Общие принципы конструкционно- технологического повышения износостойкости подшипников скольжения шарниров манипуляторов

Для успешного создания новых более совершенных конструкций шарнирных соединений манипуляторов необходимо решение ряда основополагающих задач, к которым относятся выбор рациональных материалов, покрытий и смазочных сред; совершенствование конструкций шарнирного узла как в целом, так и в части исполнения его отдельных деталей. При этом их решение следует осуществлять с использованием комплексных научно-инженерных подходов как при обосновании новых конструкций шарнирных соединений повышенной износостойкости, так и

выбора рациональных технологических процессов изготовления и упрочнения деталей шарнирных узлов манипулятора.

3.1.1 Выбор антифрикционных материалов, процессов модификации поверхностных слоёв деталей и эффективных смазок для снижения затрат на трение в шарнирных соединениях

В качестве антифрикционных конструкционных материалов для изготовления деталей в рассматриваемых узлах могут применяться антифрикционные чугуны, баббиты, бронзы и т.д. [158] Их структура чаще всего представляет мягкую матрицу с твёрдыми включениями или, наоборот, твёрдую матрицу и мягкими включениями. Мягкая матрица обеспечивает защитную реакцию подшипникового материала при увеличении сил трения и хорошую его прирабатываемость. Твёрдые включения позволяют получить высокую износостойкость.

К таким материалам относятся оловянистые и оловянисто-цинково-свинцовистые бронзы. Например, БрО10Ф1, БрО10Ц2, БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3 и др. [13,79]. Их структура представляет собой α -твёрдый раствор с дендритным строением кристаллов. При содержании в бронзе олова более 8 %, кроме α -твёрдого раствора, образуется эвтектонид ($\alpha+\delta$) [161,162], положительно влияющий на триботехнические параметры материала. Перспективным является и использование пористых порошковых материалов. Благодаря смазке, содержащейся в порах, коэффициент трения таких материалов невелик и может составлять 0,01–0,04. [49, 29-31,185].

К материалам второго типа относятся антифрикционные чугуны, свинцовистые бронзы и сплавы алюминия с оловом, например, АО 9–2 (9% Sn и 2% Cu) [162]. Функцию мягкой составляющей в этих сплавах выполняют включения графита, свинца и олова. Кроме того, из-за хорошей теплопроводности граничный слой смазочного материала на этих сплавах сохраняется даже при высоком давлении.

нии [161]. Поэтому такие материалы целесообразно использовать при значительных давлениях и малых скоростях. Однако их недостатком является плохая прирабатываемость и недостаточная стойкость к воздействию ударных нагрузок [23,160].

Во многих случаях перспективно использование композиционных материалов, в состав которых вводятся твердые смазочные компоненты, например, графит, дисульфид молибдена и др. В машиностроении получили широкое распространение антифрикционные материалы, типа железо-графит, железо-медь-графит, сульфидированные железграфитовые материалы, а также материалы, содержащие в качестве твердых смазок фториды кальция, бария, медь, олово, свинец. При стабильном наличии во фрикционном контакте смазочного слоя их коэффициент трения находится в пределах 0,005-0,09, а при граничной смазке составляет 0,02-0,125 [93,94,96,].

При умеренных режимах эксплуатации в рассматриваемых парах трения возможно применение полимерных материалов, среди которых выделяются полиамиды и композиты на их основе. Они обладают инертностью ко многим активным средам, имеют низкий коэффициент трения и невысокую склонность к схватыванию. Полиамиды могут работать при температурах до 260 °С, отличаются повышенной износостойкостью и достаточно низким коэффициентом трения, равным 0,05-0,1. Для улучшения антифрикционных свойств полиамидов в них используют в качестве наполнителей графит, MoS_2 , тальк, а для повышения прочности - углеродные и стеклянные волокна [92-96,103,159].

Для снижения затрат на трение и предотвращения схватывания при фрикционном контактировании деталей шарнирных соединений является создание на них антифрикционных покрытий [6,11,102,185]. При использовании аморфных покрытий в процессе трения происходит частичный избирательный перенос их составляющих на сопряженные поверхности, что снижает износ, и повышает надежность ресурс работы шарниров манипуляторов.

При высоких нагрузках наиболее эффективным для смазывания шарнирных соединений является применение поляризованного графита и дисульфида молиб-

дена [55, 93,95,135]. Однако, существенным недостатком графита является его недостаточная адгезия к металлическим поверхностям. Важным является и выбор конкретного способа нанесения антифрикционных покрытий, зависящий от многих конструктивно- технологических факторов, в том числе, и от геометрии деталей и от их возможности в достижении желаемого результата.

3.1.2 Оптимизация теплового режима работы узлов трения шарнирных соединений

Анализ условий эксплуатации шарнирных соединений показал [55,111,135,139] , что благоприятная температура их эксплуатации составляет от 50 до 110 °С. Для исключения чрезмерного нагрева и минимизации изнашивания необходима интенсификация отвода тепла из теплонагруженной зоны путём обеспечения более интенсивного его рассеивания или поглощения аккумулирующей средой, находящейся в полостях деталей шарнирного узла. Это требует оптимизации конструкций шарнирных соединений, включающей обоснование требуемого объёма и рациональной локализации теплоотводящих и теплоаккумулирующих элементов в конструкциях создаваемых узлов трения. Для этого необходима оценка, химического состава и объёма аккумулирующего тепловую энергию легкоплавкого материала, потребного для поддержания благоприятного режима работы шарнирного узла.

Целесообразным является размещение легкоплавкого материала в обеих контактирующих деталях триботехнической пары, подвергающейся тепловому воздействию. При этом желательно располагать в полости вала легкоплавкий материал, имеющий более низкую температуру плавления. Это позволяет в определённой степени перенаправить тепловой поток в сторону вала и уменьшить тем самым теплонагруженность фрикционного соединения в целом. При этом предварительные исследования показали, что допустимая кратковременная в течении техноло-

гической операции температура нагрева деталей шарнирного соединения составляет около 90-100 °С. Для стабилизации температурного режима в указанных условиях возможно применение таких легкоплавких материалов, как парафин, нафталин, сплавы Вуда и Розе и некоторые другие. Они характеризуются устойчивой обратимостью процессов плавления и затвердевания, отсутствием коррозионного воздействия на конструкционные материалы шарнирных соединений и т.д.

На рисунке 3.1 представлена схема рассеивания тепловой энергии.

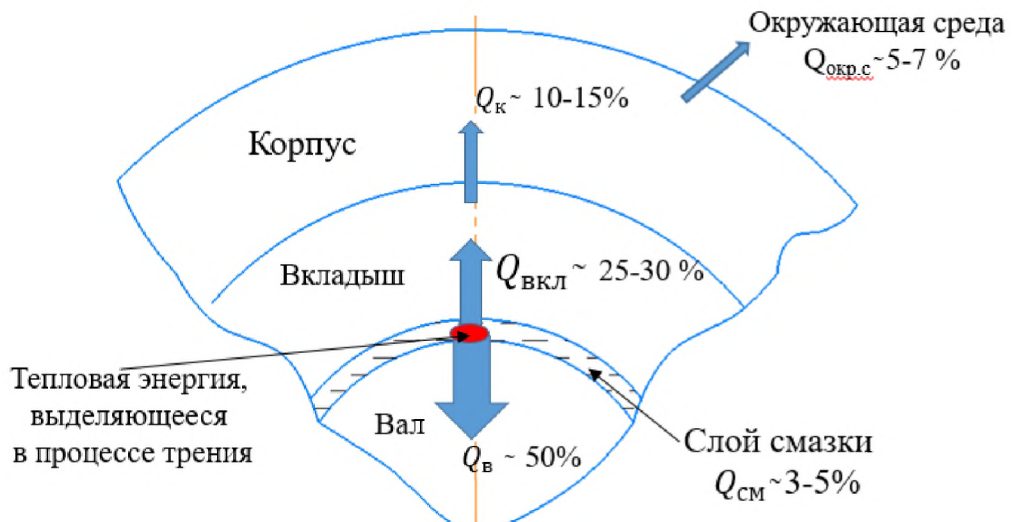


Рисунок 3.1- Схема рассеивания тепловой энергии: Q_v - тепловая энергия отводимая в вал; $Q_{вкл}$ - тепловая энергия отводимая во вкладыш; Q_k - тепловая энергия отводимая в корпус; $Q_{окр.с.}$ - тепловая энергия отводимая в окружающую среду; $Q_{см}$ - тепловая энергия отводимая в смазку;

Для расчёта и обеспечения необходимой диссипации выделяющегося тепла в зоне контактирования вкладыша $Q_{вкл}$ и вала Q_v при принятом допустимом нагреве узла скольжения можно воспользоваться следующими формулами:

$$Q_{v_i} = N_i \times \tau \times d_v; \quad (3.1)$$

$$Q_{вкл_i} = N_i \times \tau \times d_{вкл}, \quad (3.2)$$

где N_i – мощность, реализующаяся в процессе выполнения технологической машиной рассматриваемой операции, Вт; τ – машинная продолжительность рассматриваемой операции, с; d – доля мощности, приходящаяся на выбранный подшипниковый узел, в том числе на входящие в его состав вал – d_v и вкладыш – $d_{вкл}$.

В приведённом примере расчётов для их упрощения предполагается, что нагрев деталей в процессе эксплуатации не превышает более, чем на 3-8 °С темпе-

ратуры плавления используемых легкоплавких материалов. Принимая во внимание это допущения, необходимый объём, заполняемых легкоплавким веществом полостей вала v_v и вкладыша $v_{вкл}$ может быть рассчитан по приведённым ниже формулам:

$$V_v = \frac{N_i \times \tau \times v_v}{\rho m [C_T (T_{пл} - T_{ср}) + r]}; \quad V_{вкл} = \frac{N_i \times \tau \times v_{вкл}}{\rho m [C_T (T_{пл} - T_{ср}) + r]}, \quad (3.3)$$

где ρ - плотность легкоплавкого материала кг/м^3 , m – масса плавящегося материала, кг ; C_T – удельная теплоемкость твердой фазы плавящегося 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, Дж/кг .

При этом полагалось желательным располагать в нём легкоплавкий материал, имеющий более низкую температуру плавления, например, кристаллический азотнокислый никель теплофизические характеристики которого представлены в таблице 2.1. Это позволяет в значительной степени перенаправить тепловой поток в сторону вала и уменьшить за счёт этого теплонагруженность шарнирного соединения в целом.

3.1.3 Оптимизация напряжённого состояния функциональных поверхностных слоёв деталей шарниров

Одним из основных факторов повышения износостойкости является оптимизации напряжённого состояния функциональных поверхностных слоёв путём формирования в них благоприятных остаточных напряжений сжатия [51,52,58,59,78,89,99,101,106,134,168-172]. Для этого возможно применение методов поверхностного пластического деформирования, например, дробеструйного наклепа, вибронакатывания, а также путём выполнения электроискровой, химической и химико-термической обработки деталей [32,50,27,99,101,106,134,168-172].

Требуемый уровень остаточных напряжений сжатия можно обеспечить за счёт применения посадок с натягом. Для этого было предложено использовать составные вкладыши, соединяемые друг с другом по конической посадке с натягом, в которых натяг поддается регулированию. Это даёт возможность управлять величиной напряжений, формируемых в функциональных поверхностных слоях. В результате сборки составного вкладыша происходит формирование в рабочих слоях внутренней втулки напряжений сжатия. При этом величина создаваемых напряжений зависит от величины натяга; механических свойств материалов, из которых изготовлены соединяемые детали; условий сборки соединения; микро- и макрогеометрии сопрягаемых поверхностей; конструктивных особенностей соединяемых деталей; наличия покрытий и др.

При создании такого сборного вкладыша желательным является использование в качестве материала для внутренней втулки- бронзы или другого антифрикционного сплава, а для опорной – материала с повышенным значением модуля упругости. Вследствие того, что модуль упругости бронзовой втулки меньше модуля упругости материала опорной втулки, то вследствие посадки с натягом соединяемых втулок подшипников скольжения величина сжимающих напряжений во внутренней втулке будет больше чем опорной. В результате на рабочей поверхности внутренней втулки создаются благоприятные остаточные напряжения сжатия.

При рациональном использовании конической посадки с натягом, возможно достижение требуемой величины управляемых остаточных напряжений сжатия в функциональном поверхностном слое внутреннего диаметра исследуемых подшипников скольжения. Наличие таких напряжений способствует увеличению контактной усталостной прочности и износостойкости подшипника скольжения. При этом для регулирования создаваемых остаточных напряжений целесообразной является регламентированная поэтапная осевая запрессовки с текущим контролем внутреннего функционального диаметра и введения его по мере необходимости в заданное поле допуска.

Для оценки уровня формируемых остаточных напряжений возможно применение формул Ляме, предложенных для решения плоской осесимметричной задачи

теории упругости [3,10,12,16,28,34,63,71,72,78,134,149,151]. Использование в настоящей работе расчётная схема представлена на рисунке 3.2.

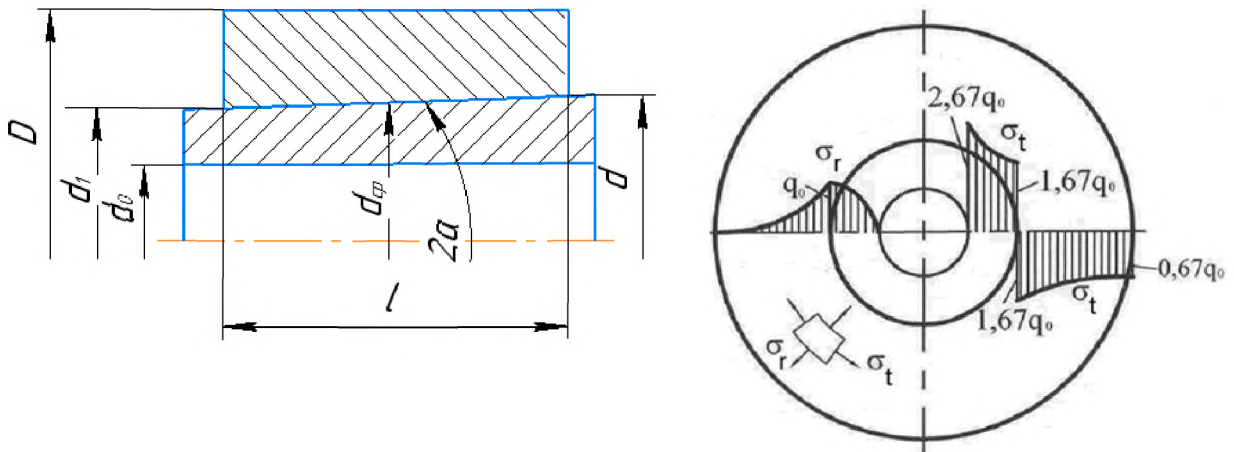


Рисунок 3.2- Коническое соединение с натягом: 1 – внутренняя втулка; 2 – наружная втулка

Контактное давление q_0 , возникающее в соединении после запрессовки охватываемой детали на полый вал может быть вычислено по формуле:

$$q_0 = \frac{\delta}{d_{cp} \left(\frac{C_1 + C_2}{E_1 + E_2} \right)}, \quad (3.4)$$

где C_1 и C_2 - коэффициенты жёсткости, определяемые по формулам:

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{d_0}{d_{cp}} \right)^2}{1 - \left(\frac{d_0}{d_{cp}} \right)^2} - \mu_1, \quad C_2 = \frac{1 + \left(\frac{d_{cp}}{D} \right)^2}{1 - \left(\frac{d_{cp}}{D} \right)^2} + \mu_2, \quad (3.5)$$

d_{cp} - средний диаметр соединения; d_0 — диаметр отверстия в охватываемой детали; D - наружный диаметр охватывающей детали; δ - натяг; E_1 , E_2 , μ_1 , μ_2 — модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов охватываемой и охватывающей деталей соответственно.

При использовании формулы (3.4) предполагалось, что контактное давление равномерно распределено по поверхности сопряжения; сумма абсолютных значений радиальных перемещений поверхностей сопряжения обеих деталей, вызванных действием контактного давления, равна половине натяга. При этом напряжения, возникающие в материале деталей, не превышают предела пропорциональности. Формула (3.5) справедлива для двух бесконечных цилиндров и не учитывает влияния на величину контактного давления, предлагаемой нами конической формы создаваемого из двух частей вкладыша по причине его достаточно малого влияния

на напряжения, создающиеся на функциональной поверхности подвижного вкладыша подшипника скольжения.

Необходимо также иметь в виду, что в материале соединяемых деталей возникают нормальные напряжения σ_r (радиальные) и σ_t (окружные), величины которых в i -м слое охватывающей детали, имеющем диаметр d_i , можно определить по формулам:

$$\sigma_r = q_0 \frac{1 - (\frac{D}{d_i})^2}{(\frac{D}{d_{cp}})^2 - 1}, \quad \sigma_t = q_0 \frac{1 + (\frac{D}{d_i})^2}{(\frac{D}{d_{cp}})^2 - 1}. \quad (3.6)$$

Величина U_{2i} радиального перемещения деформируемого слоя определяется по следующей расчетной зависимости [51,56,68]:

$$U_{2i} = \frac{q_0 d_{cp}^2}{2 E_2 (D^2 - d_{cp}^2) d_i} [(1 - \mu_2) d_i^2 + (1 + \mu_2) D^2]. \quad (3.7)$$

Напряжения в j -м слое охватываемой детали (вала), имеющем диаметр d_j , вычисляются по формулам:

$$\sigma_r = q_0 \frac{1 - (\frac{d_0}{d_i})^2}{(\frac{d_0}{d_{cp}})^2 - 1}, \quad \sigma_t = q_0 \frac{1 + (\frac{d_0}{d_i})^2}{(\frac{d_0}{d_{cp}})^2 - 1}. \quad (3.8)$$

Для охватываемой детали формирующиеся напряжения являются сжимающими. При проектировании рассматриваемых соединений следует исключить возможность возникновения пластических деформаций. В соответствие с третьей теорией прочности условие отсутствия пластических деформаций имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_t - \sigma_r = \frac{2q_0}{1 - (\frac{d_{cp}}{D})^2} \leq \sigma_{T2}, \quad (3.9)$$

где σ_1 и σ_2 - предел текучести материала охватывающей и охватываемой деталей.

$$\sigma_t = \frac{2q_0}{(\frac{d_0}{d_{cp}})^2 - 1} \leq \sigma_{T1}, \quad (3.10)$$

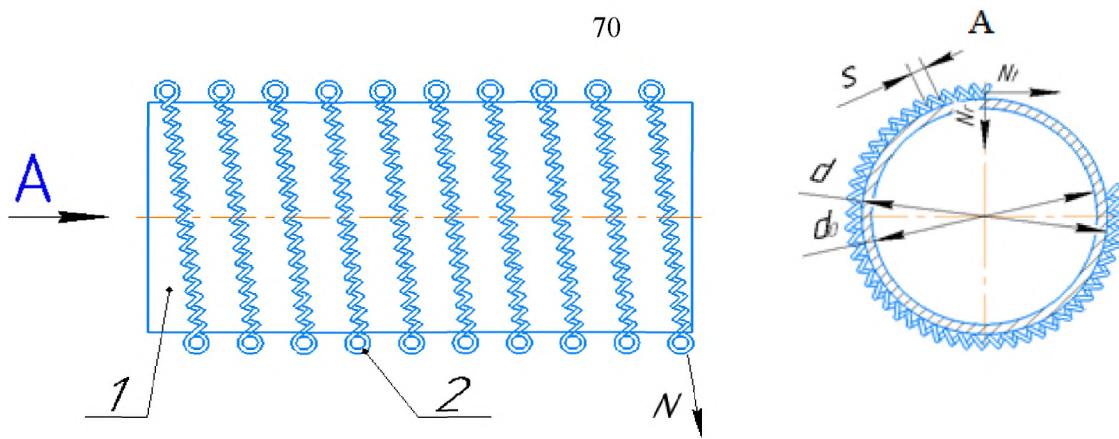


Рисунок 3.3 – Схема действия сил растянутой пружины, охватывающей тонкостенную втулку: 1- тонкостенная втулка; 2 – пружина.

Величина остаточных напряжений сжатия за счёт действия охватывающей нагрузки, формируемой растянутой пружиной (рисунок 3.3) может быть определена на основе известных расчётных зависимостей [149].

3.1.4 Обеспечение износостойкости подвижных соединений и повышение демпфирующих характеристик в шарнирных соединениях

Анализ возможных путей повышения износостойкости подвижных соединений показал, что основным путём решения этой задачи может являться создание благоприятного микрорельефа на контактирующих поверхностях деталей. Одновременно может также обеспечено уменьшение коэффициента трения, особенно в момент начала движения в подвижном соединении. Удачно выбранный микрорельеф также может приводить к снижению ударных, циклических и вибрационных нагрузок, интенсифицирующий изнашивание.

Требуемое состояние поверхностного слоя может обеспечиваться воздействием ряда взаимно дополняющих друг друга технологических методов. В результате на функциональной поверхности образуется слой, существенно отличающийся по своим признакам от нижележащих слоев основного металла и фактически определяющий ресурс работы детали.

При этом благоприятные свойства рабочего слоя формируются с учётом влияния технологической наследственности на всех этапах изготовления деталей,

начиная с получения заготовки, вплоть до финишной обработки, в процессе которой формируется определенная шероховатость, в том числе регулярный микрорельеф, нанесение покрытий и т. п. Получаемая шероховатость оказывает влияние на величину прирабочного износа, определяет деформирование микронеровностей, формирование фактической площади фрикционного контакта [29,65,66,102]. Нанесение покрытий на поверхность деталей подвижного соединения повышает положительный градиент механических свойств, и способствует повышению износостойкости шарнирного соединения.

При создании регулярного микрорельефа возможно образование на рабочей поверхности деталей канавок и «масляных карманов», улучшающих процесс смазки трущихся поверхностей, что сокращает время приработки контактирующих поверхностей. При этом одновременно происходит образование напряжений сжатия за счёт поверхностного деформирования.

Одним из эффективных конструктивно-технологических приемов повышения износостойкости подвижных соединений, является введение в зону контакта восстанавливающего материала, обладающего повышенной пластичностью и позволяющего заполнить изношенные места деталей металлическими или полимерными компонентами.

Для снижения уровня циклических, ударных и вибрационных нагрузок негативно сказывающихся на износостойкость шарнирных соединений целесообразно применение промежуточных элементов, обладающих повышенной демпфирующей способностью. Кроме того, для эффективного достижения демпфирующих показателей на наружных и внутренних поверхностях вкладышей подвижных опор рекомендуется наносить аморфное виброгасящее покрытие, обладающее повышенной пластичностью, например, латуни, меди, фторопласта и др.

3.1.5 Обеспечение работоспособности неподвижных соединений в шарнирных соединениях

Для повышения прочности неподвижных соединений эффективным является создание более надёжной фиксации пальца, например, за счёт использования конических резьбовых соединений и применения промежуточных втулок повышенной податливости, в результате чего увеличивается прочность неподвижного соединения вкладыша.

Кроме того, прочность неподвижного соединения можно обеспечить за счёт сжатия разжимных, плавающих в осевом направлении позиционирующих элементов. При увеличении их диаметра при сборке шарнира происходит позиционирование и технологическая фиксация шарнирного пальца во вкладыше неподвижного звена.

Перспективным для создания неподвижных соединений шарниров манипуляторов является обеспечение благоприятной геометрической топографии контактирующих поверхностей и достижение структурной приспособляемости материалов к конкретным условиям фрикционного взаимодействия. Таким образом представляется необходимым формирование благоприятного уровня шероховатости, волнистости, структурного и фазовых состояний функциональных поверхностей путем нанесения аморфных или анизотропных поверхностных слоев, за счет направленного технологического воздействия. При этом создаваемые покрытия должны обладать достаточной технологичностью, а их состояние должно обеспечивать возможность трансформации структуры применительно к изменяющимся условиям эксплуатации. Также недопустим срыв покрытий при приложении сдвигающей нагрузки, а все микроперемещения должны реализовываться во внутренних слоях покрытия. В таких условиях, аморфное покрытие практически исключает фреттинг-изнашивание, что повышает прочность сцепления и долговечность неподвижного соединения.

Снизить негативное проявление действия при работе динамических нагрузок можно за счёт применения промежуточных элементов, обладающих повышенной

демпфирующей способностью. При этом следует принимать во внимание, что демпфирующие свойства, реализуются на макро, микро- и субмикро- уровнях в самом материале, в промежуточных покрытиях.

В то же время в соединениях, неподвижность которых достигается за счет действия сил трения, определяемых величиной создаваемого натяга, наряду с формируемой площадью фактического контакта поверхностей, необходимо достижение максимального значения коэффициента трения, чтобы обеспечивалась необходимая прочность неподвижных соединений.

3.2 Новые конструкции шарнирных узлов с преимущественным обеспечением работоспособности подвижных соединений манипуляторов

Для создания перспективных конструкций шарнирных узлов и подшипников скольжения были предложены следующие конструктивно- технологические принципы повышения их работоспособности [167-170]. К ним относятся минимизация выделения свободной энергии при трении, оптимизация теплового режима работы, оптимизация напряжённого состояния поверхностных слоёв деталей, обеспечение повышенной работоспособности неподвижных соединений, оптимизации состояния поверхностных слоёв подвижных и неподвижных соединений. Поэтому дальнейшая работа была направлена на создание конструкций и деталей шарнирных узлов, учитывающих и оптимизирующих значительное число параметров, определяющих их работоспособность, надёжность и долговечность.

С использованием предложенного подхода создана конструкции подшипника скольжения, позволяющая реализовать его теплоаккумулирующие возможности, при одновременном обеспечении благоприятных остаточных напряжений сжатия в функциональном поверхностном слое, представленная на рисунке 3.4.

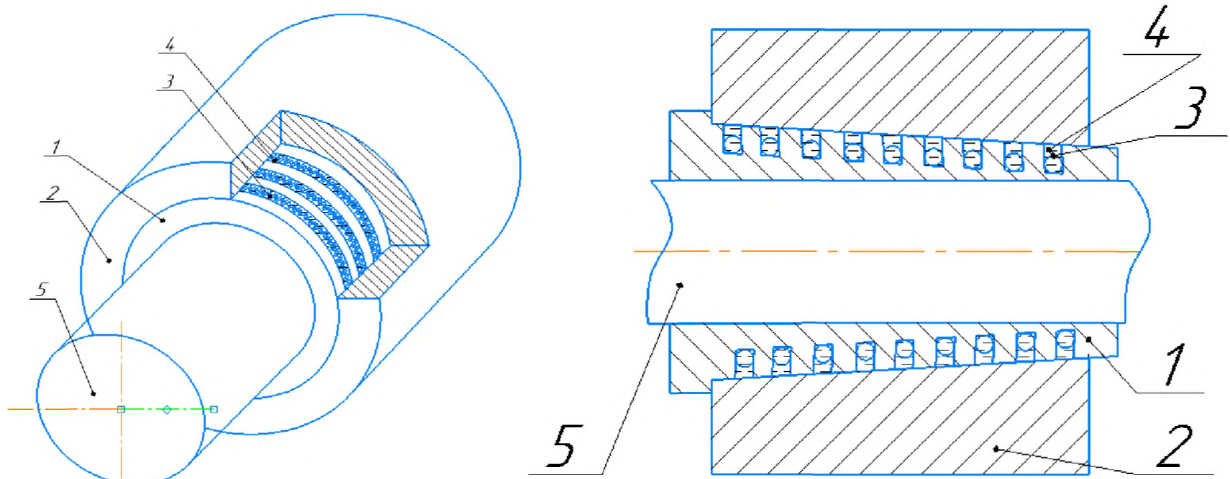


Рисунок 3.4 - Схема теплоаккумулирующего подшипника с регламентированным уровнем напряжённого состояния функциональных слоёв: а – общий вид; б – продольный разрез; 1 – внутренняя антифрикционная втулка; 2 – опорная наружная втулка; 3 – пружина растяжения; 4 – легкоплавкий материал; 5 – шарнирный палец

Предложенный подшипник содержит сборный вкладыш [118], состоящий из внутренней антифрикционной втулки 1, и наружной опорной втулки 2, соединённых между собой по неподвижной конической посадке с гарантированным натягом. На наружной поверхности внутренней втулке вкладыша выполнена винтовая канавка, для размещения в ней пружины растяжения 3. В этой же винтовой канавке предусмотрена полость для размещения в ней легкоплавкого материала 4. Его основным назначением является стабилизация теплового режима работы подшипника при колебаниях рабочей температуры.

Для этого, оставшийся свободным от пружины объём канавки заполняется на 90-95% легкоплавким материалом, например, сплавом, содержащим висмут - 35,3%, кадмий - 9,5%, свинец - 35,1%, олово - 20,1% (температура плавления $T_{пл}$ 80°C), или сплавом Розе, содержащем висмут - 50%, олово - 25%, свинец - 25% ($T_{пл}$ 90°C), а также сплава висмута - 57% и олово - 43% ($T_{пл}$ 138°C). Теплопоглощение в процессе работы предложенного подшипника скольжения происходит за счёт аккумуляции энергии, выделяющейся в результате трения в подшипнике скольжения. Это способствует оптимизации температурного режима работы подшипникового узла, при этом требуемый температурный режим определяется температурой плавления используемого сплава.

Наружную втулку 2 рекомендуется изготавливать из среднеуглеродистой термически обработанной конструкционной стали. Для внутренней втулки 1 целесообразно использовать антифрикционные материалы, например, бронзу. При этом модуль упругости материала наружной втулки 2 задаётся равным не менее 1,5-2 кратного значения модуля упругости внутренней втулки 1.

За счёт натяга обеспечивается неподвижность соединения втулок, и формируются в функциональном слое вкладыша благоприятные остаточные напряжения сжатия. С этой же целью в конструкцию подшипника скольжения введена достаточно жёсткая пружина растяжения 3, при этом степень растяжения пружины, размещаемой в винтовой канавке, составляет 20-35% от её номинальной длины. Эта же пружина позволяет гасить колебания, возникающие в триботехнических соединениях.

В результате создаются условия для достижения повышенных значений износостойкости и контактной усталостной прочности, за счёт создания управляемых благоприятных остаточных напряжений сжатия на рабочей поверхности. Одновременно происходит и снижение вибраций при работе подшипника.

При сборке подшипника соединение его внутренней 1 и наружной втулки 2 осуществляется путём поэтапной запрессовки с текущим контролем внутреннего диаметра подшипника и введением его фактического размера, по мере необходимости, в заданное поле допуска. Одновременно обеспечивается корректировка напряжённого состояния за счёт осевого относительного перемещения сопрягаемых втулок 1 и 2 и увеличения тем самым величины натяга и, соответственно, напряжённого состояния рабочего поверхностного слоя подшипника.

Дополнительно для повышения износостойкости и снижения коэффициента трения на рабочей подвижной поверхности внутренней втулки подшипника скольжения целесообразно создавать условия для реализации избирательного переноса, например, путём многократного поверхностного пластического деформирования или электроискровой обработки. Формирование таким образом благоприятной поверхностной структуры даёт возможность повысить антифрикционные и демпфирующие характеристики в контакте вал-подшипник.

Дополнительно снизить рабочие температуры подшипника скольжения и не допустить его перегрева и термодеструкции материала вкладыша возможно, если дополнительно разместить теплоаккумулирующий элемент ещё и внутри вала. При этом температура плавления этого элемента желательно задавать ниже температуры плавления теплопроводящих элементов вкладыша, что позволяет в определённой степени перенаправить тепловые потоки в область вала и уменьшить тепловую нагрузку на материал вкладыша подшипника.

Для теплоаккумулирующего элемента, располагаемого в теле вала рационально подбирать легкоплавкие, желательно эвтектические сплавы, с температурой плавления ниже 100-120 °С. Таким образом создана конструкция, позволяющая обеспечить достаточный теплоотвод и стабилизацию температурного режима работы узла, увеличив тем самым его износостойкость. Согласно предложенной конструкции [127], представленной на рисунке 3.5, в теле вала выполняется внутренняя полость, заполняемая легкоплавким материалом и соединенная с рабочей зоной формируемого подшипника скольжения теплоотводящими элементами, изготавливаемыми из материала, обладающего высокой теплопроводностью.

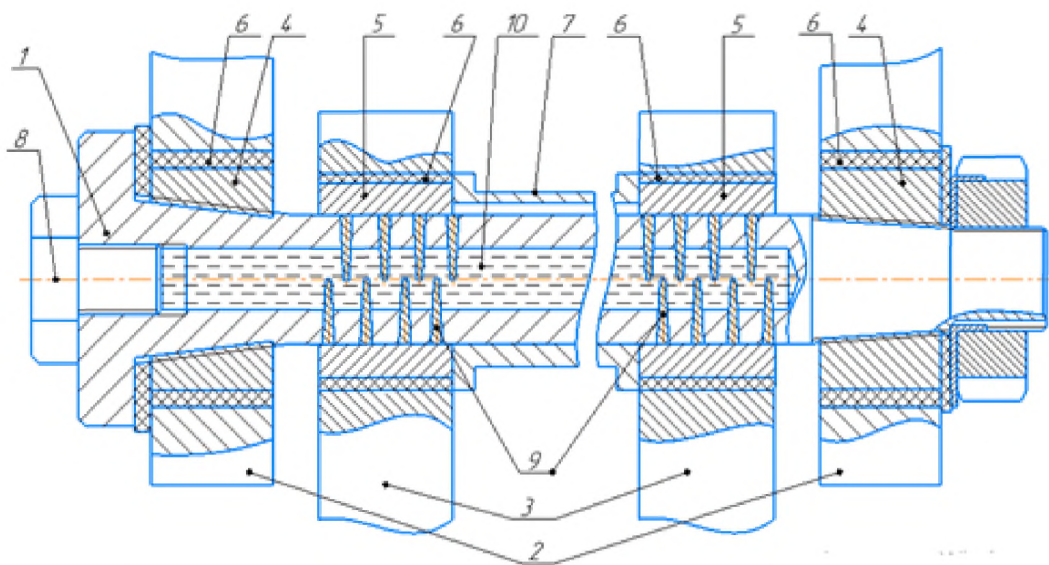


Рисунок 3.5 – Конструкция шарнирного соединения с теплопоглощающим валом: 1 - шарнирный палец; 2,3 – проушины смежных элементов манипулятора; 4 - вкладыши с внутренней конической резьбой; 5- вкладыши подшипников скольжения; 6 демпфирующий элемент; 7 эластичная уплотнительная шайба; 8 – болт; 9- теплоотводящие элементы; 10 – легкоплавкий материал.

Теплоотводящие элементы диаметром 2-4 мм имеют коническую форму с конусностью 0,5 -1,5° и размещаются в конических радиальных отверстиях, выполненных в пустотелой зоне пальца, методом запрессовки на глубину, примерно равную радиусу пальца таким образом, чтобы на рабочей поверхности пальца оставалась выступающая часть высотой 0,4- 0,6 мм

При этом теплоотводящие элементы располагают по винтовой линии с шагом 8-10 мм и расстоянием между соседними отверстиями окружности наружного диаметра пальца 15-20 мм.

После формирования конструкции вала его наружную поверхность подвергают пластической обработке, например, обкатке шариком, или алмазным выглаживателем. В результате чего выступающая часть материала теплоотводящих элементов, после специальной аморфизирующей обработки, образует аморфное покрытие на поверхности вала.

После формирования конструкции шарнирного пальца его подвергают совместной приработке вместе с вкладышами подшипника скольжения для создания аморфного антифрикционного промежуточного слоя толщиной 10-20 мкм, обладающего высокой износостойкостью.

3.2.1 Новые конструкции шарнирных узлов с преимущественным обеспечением повышенной работоспособности неподвижных соединений

Повышенная прочность неподвижных соединений создаваемых шарнирных узлов достигается путём использования более надёжной неподвижной фиксации пальца в звеньях проушин за счёт резьбового соединения и применение антиизносных и демпфирующих промежуточных слоёв в зоне контактирования деталей. При этом фиксация шарнирного пальца в проушинах одного из звеньев манипулятора осуществляется через промежуточные вкладыши, обладающие повышенной радиальной податливостью. Предложенная новая конструкция шарнирного соединения [126] представлена на рисунке 3.6.

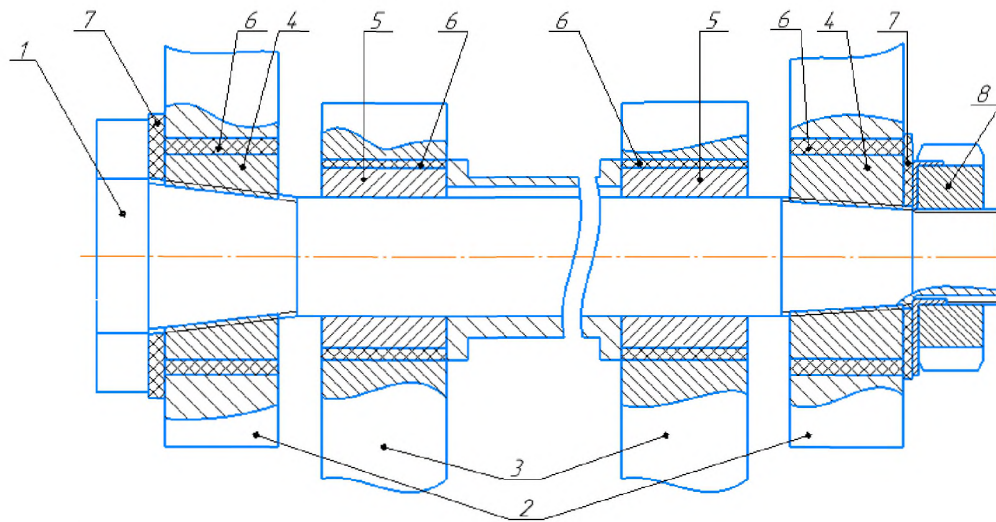


Рисунок 3.6 - Конструкция шарнирного соединения манипулятора: 1- шарнирный палец; 2,3 – проушины смежных элементов манипулятора; 4 - вкладыши с внутренней конической резьбой; 5- вкладыши подшипников скольжения; 6 демпфирующий элемент; 7 эластичная уплотнительная шайба; 8 – гайка.

Согласно конструкции, шарнирный палец 1 фиксируется в проушинах одного из элементов манипулятора 2 с использованием неподвижного конического резьбового соединения. Его вращение относительно другого смежного элемента манипулятора 3 осуществляется во вкладышах подшипников скольжения 5. Вкладыши с внутренней конической резьбой 4 устанавливаются в проушины смежных элементов манипулятора 2. При этом между ними устанавливается демпфирующий элемент 6. Фиксация шарнирного соединения осуществляется с помощью гайки 8.

При этом неподвижность соединения достигается посредством использования конической резьбовой посадки между пальцем 1 и вкладышем 4. Коническая резьба изготавливается многозаходной с мелким шагом что увеличивают прочность шарнирного соединения. Кроме того, применение конической резьбы обуславливает ряд существенных преимуществ, к которым относятся: удобство и возможность многократной сборки- разборки, высокая надёжность и простота конструкции, возможность регулировки силы зажатия, технологичность и т.д.

Вкладыши с внутренней конической резьбой 4 устанавливаются в соответствующее отверстие неподвижного звена по переходной посадке, обеспечивающей формирование среднего натяга, равного 5 -20 мкм. Для повышения податливости

вкладыша, то есть способности деформироваться под действием силы затяжки шарнирного пальца, обеспечивающей более надёжного закрепления вкладыша в процессе работы, во них выполнены пазы по внутреннему и наружному диаметру на глубину $2/3$ толщины вкладыша, а ширина пазов задаётся равной 0,2-0,3 мм. Таким образом вкладыш с внутренней конической резьбой деформируясь обеспечивает более прочную неподвижную посадку в шарнирном соединении.

При этом неподвижность шарнирного соединения оси с вкладышем достигается за счёт использования конической резьбовой посадки между вкладышем и осью при заворачивании которого, в последней, за счёт деформации, увеличивается прочность неподвижного соединения вкладыша с металлоконструкцией смежного звена.

Вкладыши подвижной опоры 5 устанавливаются в соответствующие отверстия подвижного звена 3 посадкой с гарантированным натягом и для увеличения триботехнических свойств подвижного соединения на функциональных поверхностях формируется благоприятный микрорельеф. Формирование микрорельефа способствует образованию канавок и «масляных карманов» на функциональной поверхности контактирующих деталей, улучшающих процесс смазки.

Для снижения влияния циклических, ударных и вибрационных нагрузок на работоспособность шарнирных соединений целесообразно включение в триботехническую систему промежуточных элементов, обладающих повышенной демпфирующей способностью. В результате повышаются диссипативные характеристики узла. С этой же целью между вкладышем с пазами 4 и проушиной неподвижного соединения 2 для снижения динамических нагрузок устанавливаются демпфирующие, и одновременно компенсирующие погрешности изготовления и сборки, элементы 6, типа сайлент-блока.

Кроме того, для более эффективного демпфирования в системе на наружных и внутренних диаметрах вкладышей подвижной и неподвижной опоры рекомендуется наносить аморфное виброгасящее покрытие, обладающее повышенной пластичностью за счёт наличия промежуточных металлических или полимерных слоев, например, латуни, меди, фторопласта и др. При этом в результате действия

сдвигающей нагрузки срыв покрытия с материала деталей не происходит, а микро- и макроперемещения реализуются во внутренних слоях покрытия. Поэтому, аморфное покрытие практически исключает фреттинг-изнашивание, повышает прочность сцепления и долговечность неподвижного соединения.

При этом создаваемые покрытия должны обладать достаточной технологичностью и износостойкостью, а структурное состояние материала покрытий должно обеспечивать возможность трансформации их структуры при приработке.

Предложен также перспективный вариант новой конструкции неподвижного соединения шарнирного узла достигаемой за счёт повышения точности осевого позиционирования деталей. В рассматриваемом варианте фиксация пальца в одной из проушин звеньев манипулятора осуществляется с помощью подвижных в осевом направлении позиционирующих элементов.

С этой целью конструкция шарнирного соединения содержит, запрессованные в проушины неподвижных элементов манипулятора подшипники скольжения, и зафиксированную изначально в одном из них шарнирный палец. Причём фиксация пальца в неподвижном звене в одной из проушин смежных звеньев манипулятора осуществляется через промежуточный вкладыш.

Неподвижность деталей в шарнирном соединении с одной стороны достигается за счёт использования конической резьбовой неподвижной посадки между вкладышем и пальцем, а с другой стороны окончательное позиционирование пальца достигается за счёт сжатия разжимных плавающих в осевом направлении позиционирующих элементов. При увеличении их диаметра происходит фиксация оси во вкладыше неподвижного звена. Неподвижность этого соединения достигается за счёт разжима промежуточной втулки вкладыша, имеющей повышенную податливость за счёт наличия прорезей в её теле, например, за счёт воздействия тарельчатых деформируемых в различных направлениях элементов при их осевом сжатии в результате затягивания гайки. Предложенная конструкция шарнирного соединения [128] представлена на рисунке 3.7.

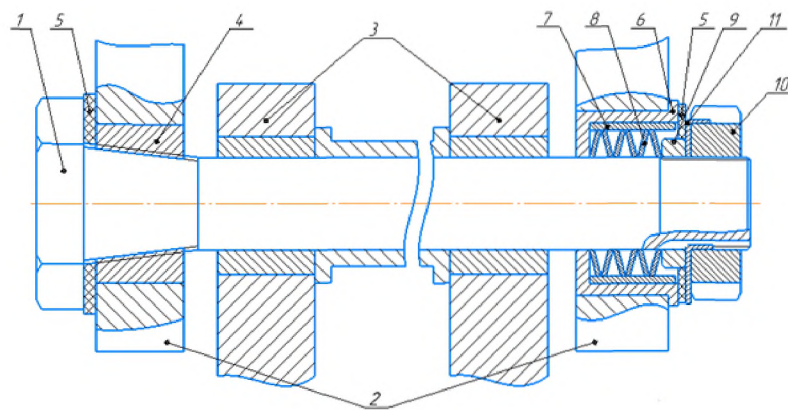


Рисунок 3.7 - Конструкция шарнирного соединения: 1- шарнирный палец; 2,3 – проушины смежных элементов манипулятора; 4 - вкладыш с внутренней конической резьбой; 5- эластичная уплотнительная шайба, 6- стакан, 7- промежуточная втулка, 8- позиционирующие элементы, 9- упорная гайка, 10- гайка, 11- стопорная шайба.

Согласно предложенному конструктивному решению, шарнирный палец 1 фиксируется в проушинах неподвижных элементов манипулятора 2 через промежуточный вкладыш 4 с одной стороны конической неподвижной резьбовой посадкой, а с другой за счёт осевого сжатия гайкой 9 разжимных плавающих позиционирующих элементов 8, размещённых в стакане 6. А окончательная фиксация шарнирного пальца осуществляется с помощью гайки 10 и стопорной шайбы 11.

При этом неподвижность соединения достигается за счёт разжима промежуточной втулки 7 путём воздействия позиционирующих элементов 8, деформируемых в осевом и радиальном направлениях при их осевом сжатии.

Требуемая деформация промежуточной втулки 7 осуществляется за счёт того, что она имеет повышенную податливость, достигаемую за счёт наличия прорезей в её теле. Создание таких прорезей осуществляется, например, электроэрозионным способом. Конструкция блока таких элементов и общий вид разжимной втулки представлены на рисунке 3.8.



а

б

Рисунок 3.8 - Конструкция блока позиционирующих элементов (а) и общий вид промежуточной втулки (б).

После приложения нагрузки со стороны позиционирующих элементов к промежуточной втулке, за счёт наличия прорезей в её теле, она разжимается и прижимается к стакану. В результате этого происходит окончательная фиксация шарнирного пальца в неподвижном соединении. При этом для более надёжной фиксации промежуточная втулка изготавливается из фрикционного материала, или же на её контактных поверхностях наносятся покрытия, обеспечивающие коэффициент трения, равный 0,2 - 0,25.

Коническое и цилиндрическое резьбовое соединение шарнирного пальца имеют различные направления нарезки резьбы, правое и левое соответственно. Это предотвращает возможность самоотвинчивания резьбовых соединений. Кроме того, при этом в результате затягивания тарельчатых деформируемых элементов гайкой, происходит дополнительная затяжка шарнирного пальца и в коническом резьбовом соединении.

Таким образом достигается возможность фиксации шарнирного пальца после базирования с помощью конической резьбовой посадки в одной из проушин неподвижного соединения, и последующего закрепления путём сжатия разжимных плавающих в осевом направлении позиционирующих элементов.

Благодаря такой конструкции повышается точность и работоспособность шарнирного соединения, а также снижается трудоёмкость изготовления и его сборка.

3.2.2 Метало-полимерный подшипник скольжения с повышенными параметрами теплопроводности и демпфирующих свойств

Для обеспечения повышенной теплопроводности и демпфирующих показателей была предложена новая конструкция подшипника скольжения, состоящая из наружных металлических втулок и промежуточного вкладыша, состоящего из чередующихся металлических и полимерных колец.

Вкладыш выполняется из проклеенных листов древесины, чередующихся с теплоотводящими элементами в виде армирующей сетки, расположенной между слоями проклеенной древесины. При этом теплоотводящие элементы размещаются в сквозных отверстиях нечётных слоев шпона, изготовленного, например, из модифицированной древесины, чередующихся со сплошными слоями древесного шпона. Общее количество соединяемых слоёв, образующих вкладыш, задаётся нечётным. Конструкция такого подшипника скольжения, представлена рисунке 3.9.

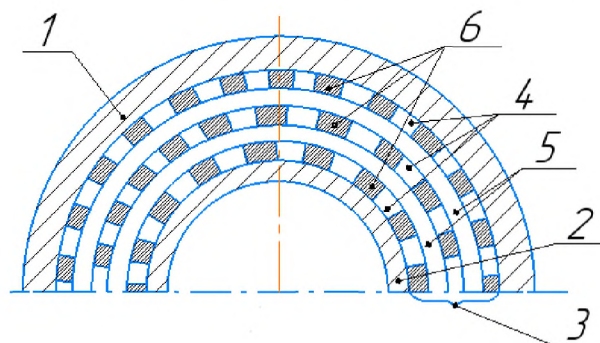


Рисунок 3.9 – Схема поперечного сечения подшипника скольжения: 1- опорная втулка; 2 – внутренняя втулка; 3 – вкладыш; 4 – нечётные слои; 5 – чётные слои; 6 – армирующая сетка.

Подшипник скольжения содержит опорную 1 и внутреннюю 2 втулки, и вкладыш 3, состоящий из нечетных 4 и четных слоёв 5. Нечетный слой состоит из шпона с теплоотводящими элементами в виде армирующей теплопроводящей сетки 6 в нём размещаемой. Для размещения в нечётных слоях теплоотводящих элементов в древесном шпоне предварительно выполнены соответствующие отверстия, представленные на рисунке 3.10 а. Чётные слои изготавливаются из древесного шпона сплошным.

Перед сборкой вкладыша древесный шпон как четных, так и нечётных слоёв подвергается модифицирующей обработке, например, методом пластифицирования и прессования.

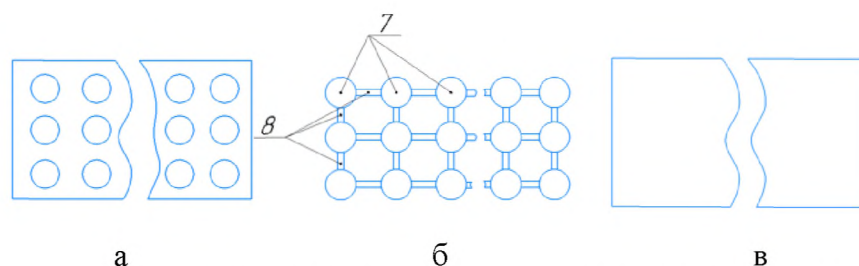


Рисунок 3.10 - Развёртки нечетных (а) и четных (в) слоёв, армирующей сетки (б): 7- теплоотводящие элементы; 8 – полосы.

Перед установкой каждого чётного слоя в специально выполненных отверстиях нечетных слоёв размещается армирующая сетка, состоящая из теплоотводящих элементов 7, соединенных между собой полосками 8 (рисунок 3.10 б). Теплоотводящие элементы 7, одновременно являющиеся основой армирующей сетки 6, изготавливаются из листовой меди и объединяются в единый каркас полосками 8, выполненными из медьсодержащего сплава шириной 3-5 мм и толщиной 0,1-0,2 мм, и соединяются с теплоотводящими элементами методами сварки. При этом размеры теплоотводящих элементов 7 соответствуют размерам отверстий нечётных слоёв 4 и составляют 10-12 мм, и толщиной 1-2 мм.

Четные слои 4, представленные на рисунке 3.10 в, выполняются сплошными из древесного шпона толщиной 1–2 мм.

Схема формирования слоёв вкладыша представлена на рисунке 3.11

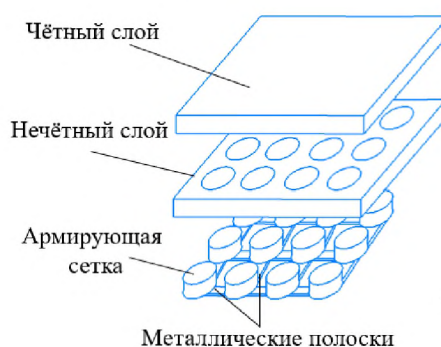


Рисунок 3.11- Схема формирования слоёв вкладыша

Вкладыш 3 подшипника располагается между опорной 1 и внутренней 2 антифрикционной втулкой с толщиной 3–8 мм. Слои 4 и 5, составляющие вкладыш 3, последовательно размещаются в опорной втулке 1, затем на контактные поверхности каждого из размещаемых слоёв 4 и 5 наносится клеевая масса и выполняется обжатие с помощью специальной оправки.

После формирования композитного вкладыша 3 устанавливается внутренняя втулка 1, которая затем развальцовывается, окончательно сжимая композитный вкладыш 3. При деформации внутренней втулки 1 формируется посадочный размер подшипника и создаётся функциональная шероховатость его рабочей поверхности.

В результате указанных действий повышается износостойкость подшипника и снижается коэффициент трения [143,144].

Выводы по главе 3.

1. Разработаны научные основы создания подшипников скольжения, обладающих повышенными триботехническими параметрами по теплофизическим показателям, уровню благоприятных остаточных напряжений и демпфирующих характеристик.
2. Предложены шарнирные узлы, обладающие температурной приспособляемостью к условиям эксплуатации за счёт использования в их конструкциях легкоплавких термоаккумулирующих составляющих. Предложены расчётные модели определения их объёма и уровня остаточных напряжений сжатия, для повышения износостойкости подвижных соединений.
3. Обоснованы пути создания шарнирных соединений, обладающих повышенной прочностью неподвижных посадок за счёт более надёжной фиксации шарнирного пальца с применением конических резьбовых соединений и промежуточных вкладышей, обладающих повышенной радиальной податливостью.
4. Предложено шарнирное соединения повышенной работоспособности и технологичности, достигаемых за счёт повышения точности рабочего расположения неподвижных деталей шарнирного узла, для чего фиксация пальца осуществляется с помощью подвижных в осевом направлении специальных позиционирующих элементов, обеспечивающих окончательное закрепление деталей шарнира после их рабочего позиционирования.
5. Предложена конструкция подшипника скольжения теплопроводности и демпфирующих свойств за счёт использования многослойного вкладыша, состоящего из слоёв древесного шпона, выполняющего демпфирующие функции, чередующихся с теплоотводящими элементами, выполненными в виде армирующей сетки.

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментального уточнения закономерностей влияния геометрических, механических и теплофизических параметров материалов и деталей шарнирных соединений манипуляторов технологических машин на сопротивляемость их изнашиванию в различных эксплуатационных условиях, а также для проверки обоснованности предложенных в диссертационной работе конструкторских и технологических путей создания перспективных многофункциональных антифрикционных материалов и новых конструкций подшипников скольжения шарнирных сочленений создавались, или выбирались из числа известных, методы оценки эффективности различных способов формирования благоприятного уровня показателей функциональных поверхностных слоёв.

Также разрабатывались конструкции и способы изготовления экспериментальных и натурных образцов подшипников скольжения, применительно к установленным особенностям эксплуатационного воздействия на них триботехнических, демпфирующих и теплофизических характеристик, а также выбиралась и создавалась соответствующая испытательная техника.

Для обеспечения должной достоверности результатов планируемых исследований подбиралось испытательное оборудование и контрольно-измерительные приборы, а также вырабатывались методы проведения испытаний и оценки достоверности полученных экспериментальных результатов.

Для обеспечения единого подхода к проведению экспериментальных исследований и оценки их результатов была разработана универсальная блок-схема, которая использовалась при проведении всех серий испытаний. Их принятая последовательность представлена на рисунке 4.1.

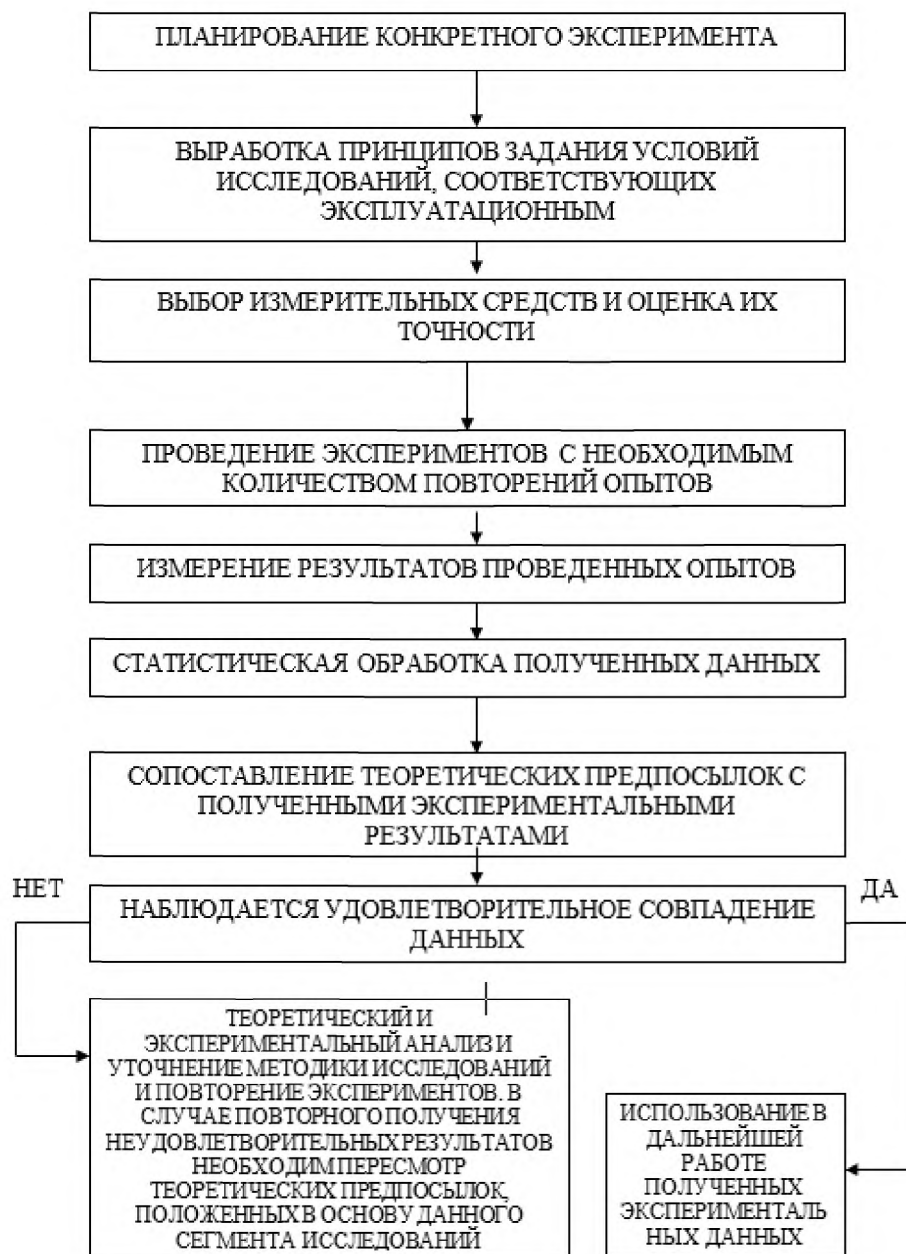


Рисунок 4.1- Блок-схема проведения экспериментальных исследований и оценки их результатов.

4.1 Методика триботехнических исследований

Основной задачей планируемых исследований было выявление сопротивляемости изнашиванию и величин коэффициента трения в различных эксплуатационных условиях. При этом устанавливались закономерности влияния на указанные характеристики таких факторов контактирования как скорость скольжения, прилагаемая нагрузка, вид и количество подаваемого смазочного материала, а

также степень загрязнения зоны фрикционного контактирования образцов абразивными частицами при учёте возможности попадания в неё агрессивных сред.

В качестве основной схемы триботехнических исследований было принято использование методики [147], согласно которой изнашивание образцов производится радиальной поверхностью вращающегося контробразца, на которую наносится смазочная или абразивно-масляная прослойка. Схема выполнения исследований приведена на рисунке 4.2.

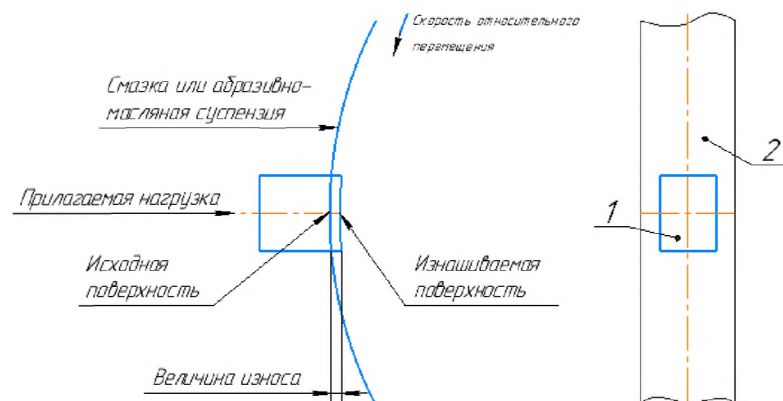


Рисунок 4.2 - Схема испытаний на изнашивание в условиях трения скольжения: 1- исследуемый образец; 2- контробразец.

Для реализации этой схемы при проведении исследований в условиях приложения постоянных нагрузок использовалась экспериментальная установка [112,114], кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.3, общий вид - на рисунке 4.4.

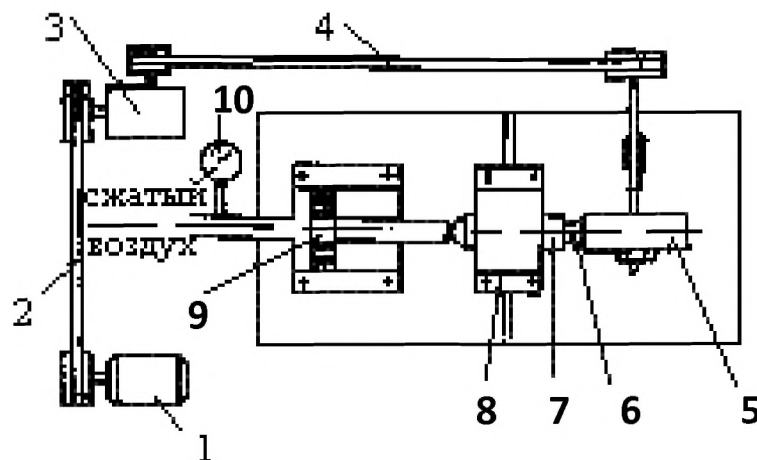


Рисунок 4.3 - Схема установки для проведения испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой: 1- электродвигатель, 2,4- клиноременные передачи, 3- червячный редуктор, 5- контробразец, 6- образец, 7- державка, 8- направляющая, 9- пневмоцилиндр, 10 - манометр

При работе установки вращение контробразца (5) с окружной скоростью, задаваемой в пределах от 0,5 до 10 м/с, осуществляется от электродвигателя 1 через клиноременные передачи (2,4) и червячный редуктор (3). Исследуемый образец (6) крепится в державке (7), которая перемещается в направляющей (8), закрепленной на станине. Требуемая нагрузка на образец задается с помощью пневмоцилиндра (9), который одновременно является демпфером, позволяющим гасить вибрации в системе нагружения. Величина нагрузки на образец в пределах от 10 до 100 Н регулируется путём изменения давления в системе и контролируется манометром (10). Для фиксации пути трения при испытаниях установка снабжена счетчиком числа оборотов контробразца.



Рисунок 4.4 - Общий вид экспериментальной установки для испытаний на трение и изнашивание: а - общий вид;

Изнашивающая среда в зоне фрикционного контакта создавалась с помощью автоматического дозирующего устройства подачи абразивно-масляной суспензии, схема которого представлена на рисунке 4.5. Дозатор состоит из корпуса (1), трубки (2) с насадкой (3), клапана (4), толкателя (5) с пружиной (6), электромагнита, состоящего из неподвижной части (7) и токовой катушки (8) с подвижным якорем (9), к которому прикреплен толкатель (5). Корпус (1) перед испытаниями заполнялся смесью (10) смазочного материала с абразивом.

В нижней части корпуса установлена полупроницаемая перегородка (12), а трубка (11) соединенная с полостью (13). Перегородка (12), пропуская жидкость

и воздух, не допускает проникновения абразивных частиц в полость (13) и трубку (11), через которую подается сжатый воздух, обеспечивающий равномерное перемешивание суспензии. Коническая форма корпуса позволяет локализовать оседающий абразив на небольшой площади и устранить тем самым застойные зоны.

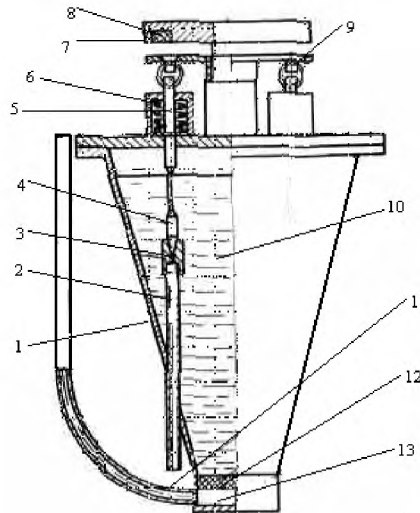


Рисунок 4.5- Схема автоматического дозатора абразивно-масляной суспензии: 1 – корпус; 2 – трубка; 3 – насадка; 4 – клапан; 5 – толкатель; 6 – пружина; 7 – неподвижная часть электромагнита; 8 – токовая катушка; 9 – якорь электромагнита; 10 – смесь смазочной жидкости с абразивом; 11 – трубка для подачи сжатого воздуха; 12 – полупроницаемая перегородка; 13 – полость.

Для обеспечения дозированной подачи в зону трения абразивно-масляной суспензии в токовую катушку (8) электромагнита (7) подается импульс тока, определенной продолжительности под действием, которого якорь (9), преодолевая действие пружин (6), притягивался к неподвижной части магнита и поднимал клапаны (4), открывая отверстия насадок (3) для поступления суспензии (10). Продолжительность импульса тока, которая определяет объем подачи абразивно-масляной суспензии задается с помощью реле времени. При отсутствии тока клапаны (4) за счёт действия пружин (6) перекрывают отверстия насадок (3), прекращая, таким образом, и подачу абразивно-масляной суспензии.

В качестве абразива применяется кварцевый песок с размером частиц от 0,05 до 0,1 мм. Его объемная концентрация в смазке (масло промышленное 20), составляла $5 \pm 0,15\%$, что при расходе суспензии $0,25 \pm 0,01$ мл/мин обеспечивало подачу 80-100 зерен абразива на 1 см^2 истирающей поверхности контробразца.

Применение указанного дозирующего устройства позволяло обеспечить стабильную подачу смазки или абразивно-масляной суспензии с неизменным фракционным составом.

В сериях испытаний на изнашивание в условиях приложения циклических и ударных нагрузок использовалась машина трения, схема которой представлена на рисунке 4.6 [110,114]. Согласно этой схеме изнашивающий диск (1), через клиноременную передачу (2) со сменными шкивами, приводятся во вращение двигателем обеспечивая задание требуемой окружной скорости. При проведении указанных исследований образец (4) закрепляется на качающемся коромысле (5), свободно поворачивающемся вокруг неподвижной оси. Циклическая нагрузка силового воздействия на образец обеспечивалась путем сжатия в течение одного цикла предварительно сжатой пружины (7).

Ударное нагружение производилось с помощью пружины (7). Для этого осуществлялось сжатие пружины за счет подъема рычага (5) кулачком (13). Кулачок (13) имел участки плавного подъема и резкого падения до минимального радиуса. В результате происходил удар образца по вращающемуся диску. Энергия удара образца регулировалась путем использования пружин различной жесткости и изменения величины сжатия пружины перед её разжимом. Цикличность нагружения изменялась путем установки редукторов (10) с различным передаточным отношением и подбором сменных зубчатых колес (12).

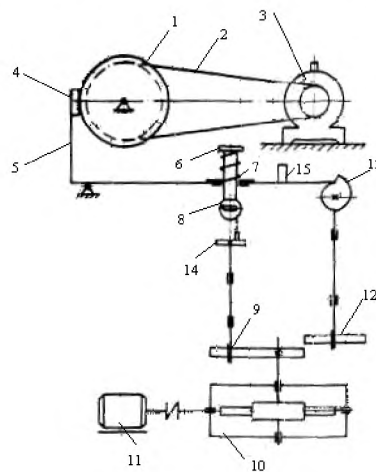


Рисунок 4.6- Схема машины для испытаний на изнашивание при циклической и ударной нагрузках: 1 – контрообразец; 2 - ременная передача; 3 – электродвигатель; 4 – образец; 5 - рычаг; 6 – шток; 7 – нагружающая пружина; 8 – приводная шайба; 9 и 12 – сменные шестерни; 10 – червячный редуктор; 11 – электродвигатель; 13 – кулачок; 14 – поводок.

В экспериментах использовались изнашивающие диски (контробразцы), изготовленные из стали 45 твердостью HRC 40-42. Рабочая поверхность диска периодически шлифовалась для возобновления исходной шероховатости Ra 0,16-0,32 мкм.

Максимальное значение силы при испытаниях с приложением плавно изменяющейся нагрузки принимались равным 50 Н, минимальное 0. Энергия удара при испытаниях с ударным нагружением была равна 1,2 Дж. Удельная энергия соударения определялась по формуле:

$$T_{y\partial} = mgh/bl, \quad (4.1)$$

где b – ширина образца, мм, l – длина дуги контакта, мм.

Нагрузки и энергия удара, действующие на образец, рассчитывались таким образом, чтобы обеспечить давление на номинальной площади контакта $7 \cdot 10^5$ Па и удельную энергию удара $1 \cdot 10^4$ Дж, что соответствует эксплуатационным характеристикам, подшипников скольжения, используемых в шарнирных соединениях. Частота нагружения при испытаниях с переменной и ударной нагрузками составляла – 3 цикла в секунду.

Критерием для оценки сопротивляемости исследуемых материалов изнашиванию при различных видах нагружения была принята величина линейного износа образцов, достигаемого за определённый промежуток времени испытаний. Одновременно оценивался реализующейся при этом коэффициент трения. Величина износа оценивалась по изменению линейных размеров исследуемых образцов и устанавливалась с использованием метода искусственных баз и профилографирования. При этом показатели износостойкости и сопротивления износу определялись в зависимости от обобщённого показателя твёрдости исследуемых материалов, их теплофизических параметров- теплопроводности и теплоёмкости, а также демпфирующей способности.

Оценка коэффициента трения исследуемых фрикционных пар в процессе триботехнических испытаний осуществлялась одновременно с фиксацией температурного режима с использованием машины трения СМЦ-2. Испытания проводился при нагрузке 200 Н и частоте вращения вала 300 об/мин, что обеспечивало

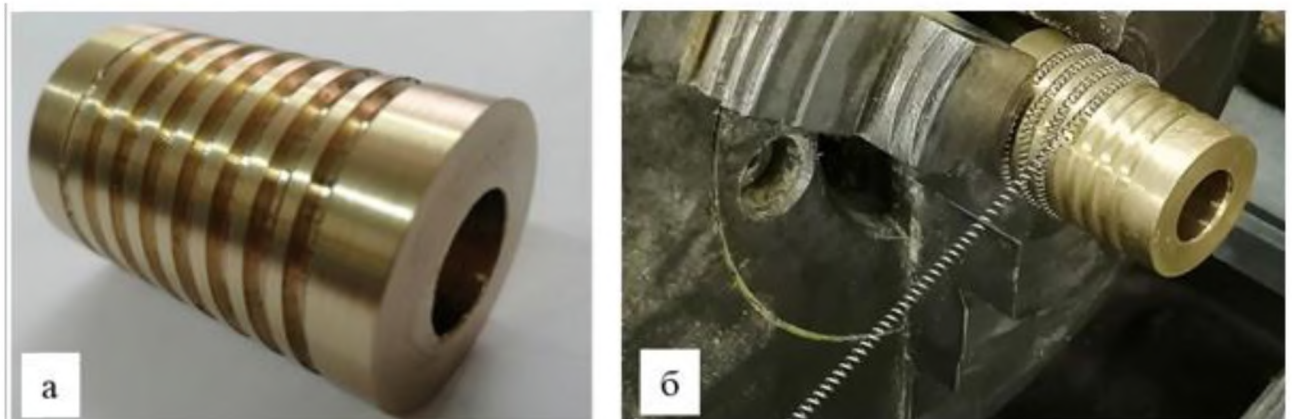
скорость скольжения 0,8 м/с. Внешний вид испытательной машины и размещенного на ней измерительного оборудования представлен на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7- Машина СМЦ-2 с набором измерительного оборудования: 1- испытательная машина СМЦ-2; 2- потенциометр ПСР-49; 3- потенциометр ПСР-2

При одновременной регистрации температуры и момента трения использовались потенциометры ПСР-49 и ПСР-2, которые позволяли фиксировать значения исследуемых параметров и закономерности их изменения во время испытаний на бумажном носителе.

Кроме того, в процессе выполнения работы проводились исследования изнашивания экспериментальных натуральных образцов подшипников скольжения, изготовленных из предложенных материалов в виде новых перспективных конструкций, один из вариантов которых представлен на рисунке 4.8.



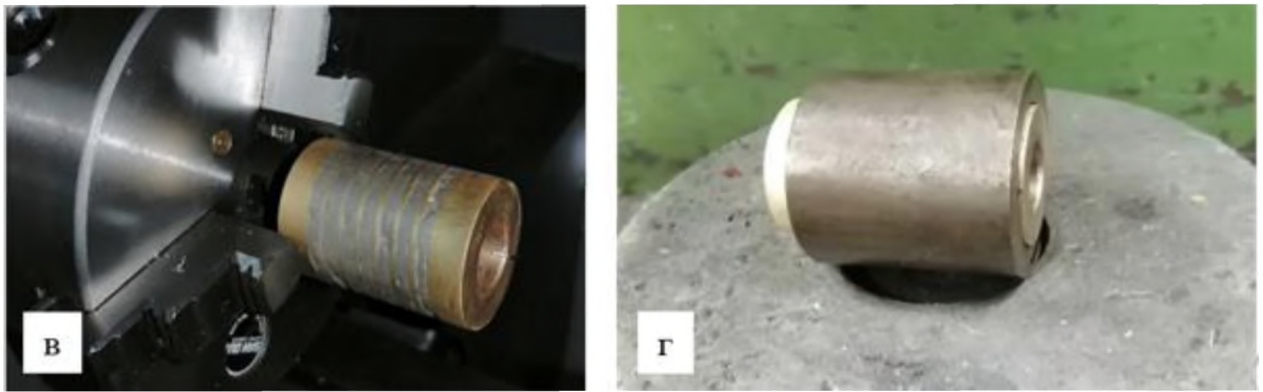


Рисунок 4.8 – Натурный образец предложенного подшипника скольжения: а - готовая внутренняя втулка до запрессовки в опорную втулку; б – навивание сжимающей пружины на внутреннюю втулку; в – нанесение легкоплавкого материала в винтовую канавку внутренней втулки; г – подшипник скольжения в сборе.

4.2 Методика исследований теплофизических характеристик материалов и конструкций подшипников скольжения шарнирных соединений

В процессе теплофизических исследований оценивались показатели теплопроводности и теплоёмкости предложенных материалов, в зависимости от их химического состава и структурного состояния, а также конструктивного исполнения. Для проведения указанных исследований использовался, модернизированный прибор ИТ-λ-400, усовершенствованная схема которого представлена на рисунке 4.9.

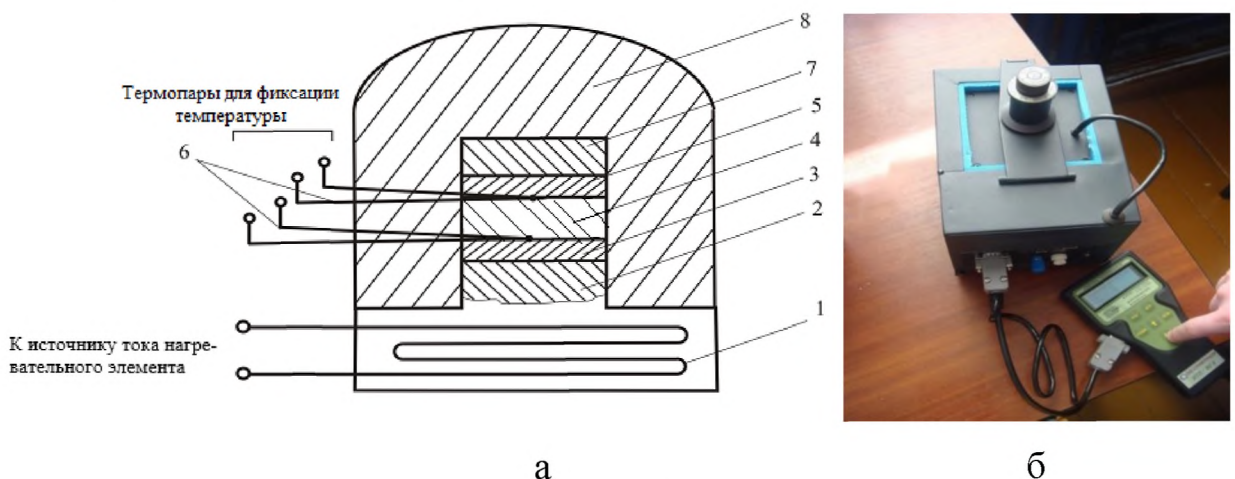


Рисунок 4.9 – Схема (а) и фото прибора (б) для определения теплопроводности и теплоёмкости образцов : 1-нагреватель; 2- тепловой источник; 3- контактная теплоотдающая пластина; 4 - образец; 5 - контактная теплоприемная пластина; 6- термопары; 7 – прижимной теплоизолирующий элемент; 8 – теплоизолирующий кожух.

Согласно разработанной методике для определения теплопроводности и теплоёмкости исследуемого материала образец 4 устанавливался на контактную теплоотдающую пластину 3, нагретую до температуры 120-200 °С, которая поддерживалась постоянной до окончания эксперимента. На противоположной стороне образца размещалась контактная теплоприемная пластина 5. Между обеими контактными пластинами и образцом размещались рабочие спайи термопар, подключаемых к потенциометру. Для снижения теплоотдачи в окружающую среду прибор накрывался теплоизолирующим кожухом. Для выполнения указанных исследований использовались образцы, выполненные в форме квадратных пластин, имеющих габаритные размеры 80×80 мм и толщину 10-15 мм.

Оценка теплофизических свойств осуществлялась путём сравнения в процессе эксперимента температур противоположных поверхностей образцов через определённые контрольные промежутки времени равные 3, 5, 10 минутам. Поскольку исходная температура на нагреваемой поверхности образца задается одинаковой для всех исследуемых образцов, то за сравнительный показатель теплопроводности принималась температура на противоположной поверхности образца, достигаемая через установленное время нагрева, назначаемое в зависимости от теплопроводности и теплоёмкости образцов. При этом отношение температур нагреваемой и противоположной поверхностей исследуемого образца к разности температур контрольного образца принималось за условный показатель теплопроводности. Расчет этого показателя производился по формуле:

$$\lambda' = \frac{T_{\text{кон.}}}{T_{\text{нагр.}}}, \quad (4.2)$$

где $T_{\text{нагр.}}$ – температура нагрева теплоприемной поверхности образца; $T_{\text{кон.}}$ – температура его противоположной стороны, по прошествии принятого промежутка времени.

Сравнивая показатели λ_i , полученные для различных образцов, можно судить о степени их теплопроводности и теплоёмкости. При этом чем выше показатель λ' , тем более теплопроводным является исследуемый материал.

Аналогичным образом осуществлялась оценка влияния на температурно-тепловой режим образцов состава и структуры антифрикционного материала вкладышей подшипников скольжения в части наличия или отсутствия в них теплоаккумулирующих элементов и их теплофизических параметров. Для обеспечения большего соответствия условий исследования эксплуатационным предусматривалось использование в качестве образцов натуральных подшипников скольжения, рекомендуемых для последующего практического использования.

Кроме этого оценка показателей теплопроводности и степени теплопоглощения (аккумуляции) тепловой энергии в триботехнической системе шарнирного узла осуществлялась на основе сравнения динамики изменения температуры приёмного нагреваемого в процессе исследований элемента в зависимости от времени испытаний, и температуры плавления используемых термоаккумулирующих легкоплавких материалов (рисунок 4.10).

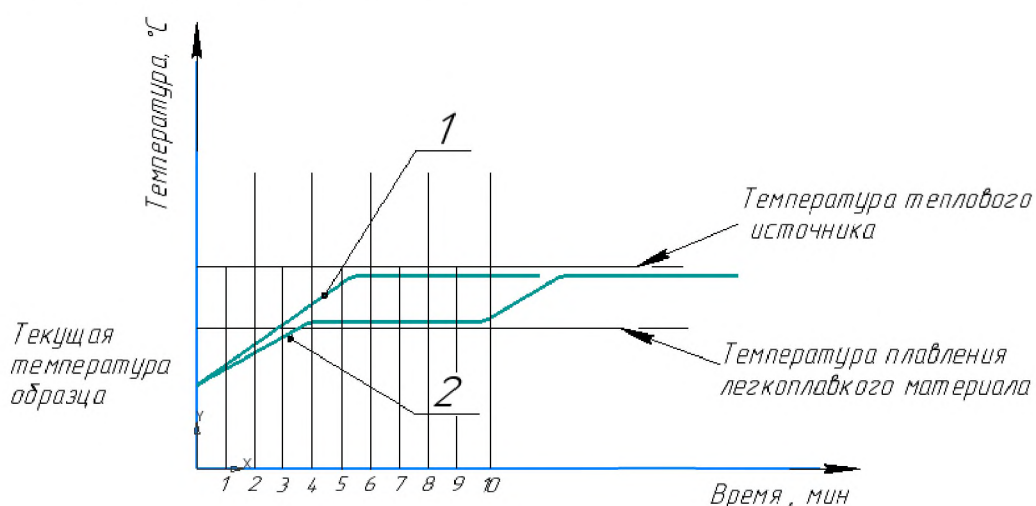


Рисунок 4.10 – График зависимости температуры исследуемого образца в зависимости от времени испытаний: 1- материал, не имеющий в своей структуре легкоплавкой фазы, 2- материал или конструкция вкладыша, включающий легкоплавкую составляющую.

Однако более информативным является изучение изменения температуры нагретого до высокой температуры теплоотдающего элемента (близкой к температуре деструкции исследуемого материала). Динамика изменения указанных температур элемента приведена на рисунке 4.11.

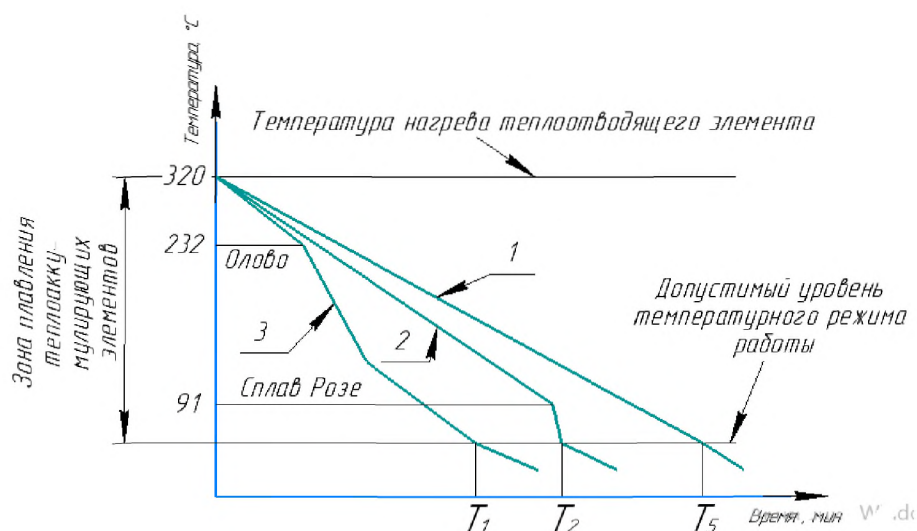


Рисунок 4.11 - Динамика изменения температурного режима образцов при наличии в них теплоаккумулирующих элементов и в их отсутствии: 1- образец без теплоаккумулирующих элементов; 2,3 – образцы с теплоаккумулирующими элементами с различной температурой плавления

Для более тщательного изучения тепловой динамики процессов, протекающих в объёме материала вкладыша подшипника скольжения, наряду с оценкой коэффициента трения исследуемых материалов одновременно определялась температурное состояние образцов по объёму вкладыша. Для измерения температуры применялись термопары ХК с диапазоном измеряемых температур от минус 50 до 200 °С. Размещенные таким образом термопары позволяли оценивать температуру вкладыша по его глубине, а также оценить среднюю температуру элемента вкладыша.

4.3 Методика исследований демпфирующих характеристик материалов и устройств шарнирных узлов манипуляторов

Исследование демпфирующих характеристик материалов деталей шарнирных соединений проводились на стенде, общий вид которого изображён на рисунке 4.12. Его конструкция разработана и изготовлена с непосредственным участием автора в рамках выполнения гранта № 9.10677.2018/11.12 «Исследование и

создание подшипников скольжения повышенной износостойкости на основе древесно-металлических композиционных материалов» [54].

Указанные испытания проводились в два этапа. На первом этапе устанавливалась относительная демпфирующая способность вкладышей подшипников скольжения из различных материалов, и сравнивалась с контрольным материалом, демпфирующая способность которого устанавливалась изначально. На втором проводилась выявление влияния свойств и состава композиционного материала на его демпфирующую способность и осуществлялись пути оптимизации демпфирующих элементов шарнирных соединений манипуляторов.

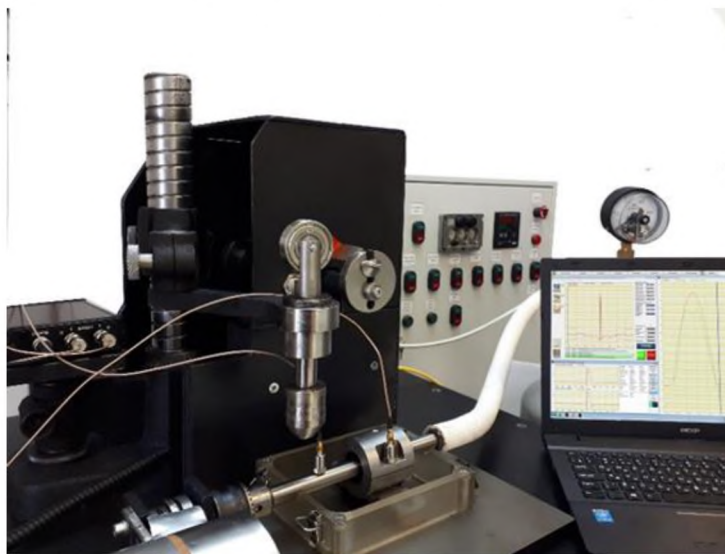


Рисунок 4.12 – Стенд для оценки демпфирующих характеристик исследуемых материалов и деталей триботехнических узлов шарнирных соединений.

Сущность методики указанных испытаний состоит в том, что по вращающемуся в подшипнике скольжения валу производят заданное количество ударов с определенной энергией и частотой соударения, затем останавливают вращение и производят однократное ударное воздействие. После чего оценивают относительную демпфирующую способность материала втулки подшипника по результатам анализа декремента затухания колебаний, фиксируя их максимальную амплитуду.

Фото и схема установки для испытаний подшипников скольжения на демпфирующую способность приведена на рисунке 4.13. Её конструкция включает в себя ударный механизм и узел трения. Ударный механизм содержит ударник 2, на

котором закрепляются сменные грузы 1 и ударная призма 6. Механизм обеспечивает нанесение удара по валу 4 с энергией от 0,25 до 4 Дж. Это значение соответствует условиям ударного нагружения для подшипников скольжения шарнирных узлов манипуляторов. Узел трения включает в себя подшипниковую опору 5, жестко связанный со станиной стенда, в котором вращается с заданной частотой вал 4. Привод ударника обеспечивает его подъем на высоту, заданную геометрией эксцентрика 3, и свободное падение на вал 4 с частотой 0,5-1,5 Гц. Масса ударника 3 с закрепленным контробразцом 2 не должна превышать 1 кг.

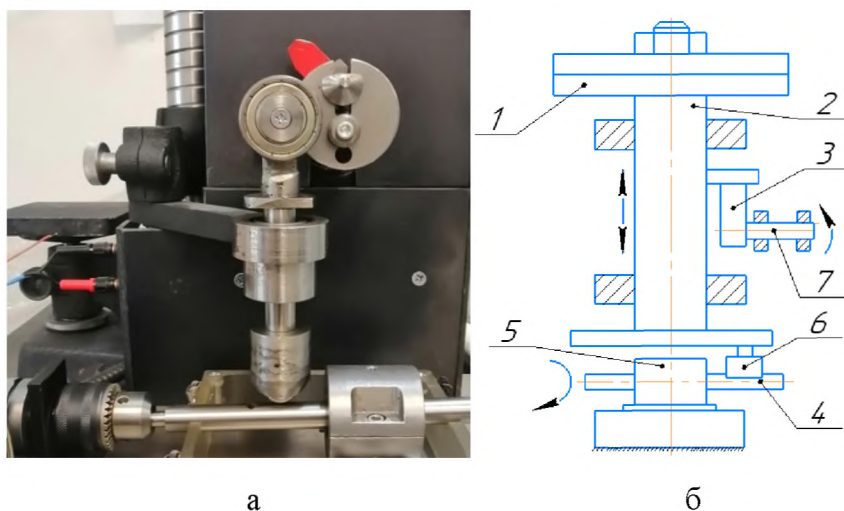


Рисунок 4.13– Фото (а) и схема (б) испытательной установки на демпфирующую способность: 1- сменные грузы; 2- ударник; 3- эксцентрик; 4- вал; 5 -подшипник; 6- ударная призма; 7- вал эксцентрика.

В качестве регистратора первичных сигналов используется акселерометр модели ВС 111. Схема его подключения представлена на рисунке 4.14. Выбранный акселерометр может применяться для измерения параметров вибраций (виброускорения) на движущихся частях машин и механизмов с чувствительностью 10 мВ/г; частотным диапазоном 1...15000 Гц; амплитудным диапазоном $\pm 500g$; в пределах рабочих температур от -40 до $+70$ °С.



Рисунок 4.14- Схема подключения акселерометра ВС 111.

В результате испытаний определялся декремент затухания колебаний, по которому устанавливалась демпфирующая способность различных исследуемых материалов.

4.4 Методики оценки триботехнических параметров исследуемых антифрикционных материалов

Как указывалось выше, в качестве основных исследуемых триботехнических параметров принимались износостойкость, коэффициент трения, температурный режим работы и демпфирующие характеристики антифрикционных материалов. При этом на основе многих литературных источников и выполненного нами теоретического анализа [2,14,20,35,61,75,86,87,90,91,154,194,195,204,205], было принято целесообразным на первом этапе экспериментальных исследований установить взаимосвязь приведенных выше триботехнических параметров с задаваемыми характеристиками исследуемых материалов. К таким характеристикам на настоящем этапе были выбраны следующие факторы- твёрдость, теплопроводность, теплоёмкость, характеристики хрупкого разрушения (K_c , ударная вязкость), уровень дефектного состояния, геометрическая и структурная неоднородность. Анализ возможностей корректного выбора указанных параметров показывает, что указанной цели сложно достигнуть, используя существующие способы их оценки.

Применительно к получению результатов нашей работы это касается показателей твёрдости, степени неоднородности материалов и коэффициента интенсивности напряжений, исследуемых гетерогенных композиционных материалов. В частности, для композиционных материалов многие методы определения твёрдости трудно применимы в связи с наличием существенного количества фаз, отличающихся по своим свойствам. Поэтому нами был предложен новый способ определения обобщённого показателя твёрдости, учитывающий особенности

структурного строения исследуемых материалов. Этот показатель твёрдости является достаточно универсальным, что даёт основание связывать с его значением многие триботехнические показатели.

Согласно предложенному способу определения обобщённого показателя твёрдости композиционного материала в процессе предварительного исследования его шлифа, методами планиметрирования определяются площади расположенных в пределах рассматриваемой площади шлифа структурных составляющих и рассчитываются их доли, расположенные в пределах общей оценочной площади:

$$S_{\text{оц}} = S_1 + S_2 + \dots + S_i. \quad (4.3)$$

Затем осуществляется измерение показателей микротвёрдости выделенных структурных составляющих ($H_1, H_2, \dots, H_i$) известными методами внедрения инденторов. В том случае, когда размеры структурных композиционных материалов недостаточны для оценки их микротвёрдости, возможно использование образцов-свидетелей, обладающих достаточными для измерения микротвёрдости размерами. Для обеспечения точности оценки обобщённого показателя твёрдости в большинстве случаев достаточным является ограничение зоны измерения площадью равной 80-100 мм². После выполнения замеров обобщённый показатель твёрдости $H_{\text{оц}}$ вычисляют по размерам полученных отпечатков с использованием формулы:

$$H_{\text{оц}} = \frac{H_1 \times S_1 + H_2 \times S_2 + H_3 \times S_3 + \dots + H_i \times S_i}{S_{\text{оц}} \times i}, \quad (4.4)$$

где i - количество учитываемых структурных составляющих; $S_{\text{оц}}$ - площадь зоны оценки микротвёрдости.

Кроме того, в ряде случаев полезным является определение закономерностей распределения получаемого значения микротвёрдости по глубине поверхностного слоя. Для определения этого показателя после оценки микротвёрдости поверхности производится последовательное снятие слоёв толщиной до 50 мкм лезвийным инструментом путём шабрения или наружного протягивания на величину предполагаемого предельного износа и определяется коэффициент обобщённой структурной неоднородности (K_H) исследуемого материала по формуле

$$K_n = \frac{H_{max}}{H_{min}}, \quad (4.5)$$

где H_{max} , H_{min} - максимальное и минимальное значения микротвёрдости.

4.5 Планирование экспериментов и обработка их результатов

Для получения более информативных результатов осуществлялось планирование многофакторных экспериментов, поскольку при таком подходе достигаются более полные сведения в сравнении с экспериментами, выполненными без учета комбинаций исходных параметров, влияющих на результат испытаний, а также обеспечивается сокращение объема требуемых экспериментальных исследований [17,81,130].

Такое планирование эксперимента позволяет, варьируя рядом факторов, получать количественные оценки влияния совокупностей значимых эффектов, анализируя соответствующие уравнения регрессии, приводимые ниже.

$$y(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^n b_{iju} x_i x_j x_u + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (4.6)$$

где b_0 - свободный член; b_i — линейные эффекты; b_{ij} — эффекты парного взаимодействия; b_{ii} — квадратичные эффекты; b_{iju} — эффекты тройного взаимодействия

При планировании, проведении и обработке результатов полного факторного эксперимента (ПФЭ) выполнялись следующие этапы: кодирование факторов; составление план-матрицы эксперимента; рандомизация опытов; реализация плана эксперимента; проверка воспроизводимости опытов; проверка адекватности линейной модели; оценка значимости коэффициентов регрессии.

При этом для построения план-матрицы задавался комплекс основных параметров X , определяющих условия проведения эксперимента и выходные параметры Y - показатели исследуемых процессов. При использовании ПФЭ реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Количество опытов N при этом определяется по формуле:

$$N = n^k, \quad (4.7)$$

где n - количество уровней; k - число факторов.

Уровни факторов представляют собой границы исследуемой области по выбранному параметру (минимальное и максимальное значение фактора). Зная максимальное $z_i^{\max}$ и минимальное $z_i^{\min}$ значения исследуемого параметра (фактора) определялись координаты центра плана, так называемый основной уровень z_i^0 , а также интервал (шаг) варьирования Δz_i :

$$z_i^0 = \frac{z_i^{\max} + z_i^{\min}}{2}, \text{ где } i=1,2,3,\dots,n, \\ \Delta z_i = \frac{z_i^{\max} - z_i^{\min}}{2}. \quad (4.8)$$

От систем координат $z_1, \dots, z_n$ необходимо перейти к безразмерной системе координат $x_1, \dots, x_n$ с помощью линейного преобразования:

$$x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\Delta z_i}, \text{ где } i=1,2,3,\dots,n, \quad (4.9)$$

В настоящей работе планировалось проведение триботехнических и теплофизических исследований. При проведении триботехнических исследований к выходным параметрам y были отнесены величины износа и коэффициент трения, к основным важные параметры структурного состояния новых антифрикционных материалов, где x_1 – суммарное процентное содержание смазочных компонентов, а именно дисульфида молибдена и скрытокристаллического графита; x_2 – форма капсул включений, легкоплавкого теплоаккумулирующего материала; x_3 – объём капсул, в которых заключался легкоплавкий материал

При теплофизических исследованиях выходными параметрами устанавливались время достижения принятой эксплуатационной температуры и относительная теплопроводность исследуемого материала, а основными параметрами назначались: x_1 - температура плавления легкоплавкого материала; x_2 . объём в теплоаккумулирующей ёмкости вкладыша; x_3 – толщина внутренней антифрикционной втулки подшипника скольжения.

Матрица планирования полного факторного эксперимента для триботехнических и теплофизических исследований для трех факторов представлена в таблице 1. В этом случае число возможных комбинаций из трех факторов на двух

уровнях равно $N=n^k=2^3=8$. При выполнении исследований для получения более точных результатов каждый эксперимент повторялся для каждого выходного параметра y . Для того чтобы внести элемент случайности влияния этих факторов на результат эксперимента для обоснованного использования математической статистики, устанавливалась рандомизация опытов.

Таблица 4.1 – План комбинаций параметров при полнофакторном эксперименте с использованием 3 факторов

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат			Выходные параметры
	Z_1	Z_2	Z_3	X_1	X_2	X_3	Y
1	z_1^{min}	z_2^{min}	z_3^{min}	-1	-1	-1	Y_1
2	z_1^{max}	z_2^{min}	z_3^{min}	+1	-1	-1	Y_2
3	z_1^{min}	z_2^{max}	z_3^{min}	-1	+1	-1	Y_3
4	z_1^{max}	z_2^{max}	z_3^{min}	+1	+1	-1	Y_4
5	z_1^{min}	z_2^{min}	z_3^{max}	-1	-1	+1	Y_5
6	z_1^{max}	z_2^{min}	z_3^{max}	+1	-1	+1	Y_6
7	z_1^{min}	z_2^{max}	z_3^{max}	-1	+1	+1	Y_7
8	z_1^{max}	z_2^{max}	z_3^{max}	+1	+1	+1	Y_8

Коэффициенты регрессии определялись по формуле:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji} y_i. \quad (4.10)$$

Коэффициенты взаимодействия для ПФЭ 2^3 , учитывающие эффект двойного и тройного взаимодействия факторов определялся следующим образом:

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1 x_2)_i y_i}{N}, \quad b_{13} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_1 x_3)_i y_i}{N}, \quad b_{23} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_2 x_3)_i y_i}{N}. \quad (4.11)$$

При отсутствии дублированных опытов дисперсию, характеризующую ошибку эксперимента, оценивают с помощью специально проведенной серии из некоторого числа m дублированных опытов. Оценка дисперсии этой серии принимается за оценку дисперсии, характеризующей ошибку эксперимента:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y})^2}{m-1} = \frac{\sum_{j=1}^m y_j^2 - m\bar{y}^2}{m-1}, \quad (4.12)$$

где $\bar{y} = \frac{\sum_{j=1}^m y_j}{m}$, а величина $f_y = (m-1)$ является в данном случае числом степеней свободы, связанным с $S^2\{y\}$.

Проверка адекватности линейной модели осуществлялась с помощью критерия Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{S^2\{y\}} \quad (4.13)$$

Для проверки адекватности математической модели вычислялась сумма квадратов, характеризующая адекватность модели $S_{\text{ад}}$. При отсутствии дублированных опытов $S_{\text{ад}}$ рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{ад}} = \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2, \quad (4.14)$$

где $\hat{y}_j$ - значение выходной величины в j -м опыте, предсказанное уравнением регрессии; y_j - значение выходной величины в j -м опыте, полученное экспериментальным путём.

Расчетное значение критерия адекватности сравнивалось с табличным значением (при уровне значимости $q=0,05$). При этом, если расчетное значение меньше табличного, то полагалось, что полученное уравнение регрессии адекватно описывает эксперимент.

Оценка значимости коэффициента регрессии производится с помощью критерия Стьюдента:

$$S_{b_j} = \frac{S_{\text{воспр}}}{\sqrt{N}}. \quad (4.15)$$

Расчетное значение критерия Стьюдента определяется по формуле:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}. \quad (4.16)$$

Полученное значение критерия Стьюдента сравнивается с табличным значением для соответствующего уровня значимости. Если расчетное значение доверительного интервала меньше табличного, то данные коэффициенты при работе с моделью исключаются из уравнения регрессии.

Далее на основании принятых методических принципов выполнялись запланированные экспериментальные исследования.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Экспериментальные исследования выполнялись по нескольким основным направлениям. Это сопротивляемость изнашиванию, коэффициент трения, а также теплофизические и демпфирующие характеристики, оцениваемые в зависимости от ряда важных конструкторских и технологических факторов

5.1 Влияние условий нагружения на износостойкость и коэффициент трения в триботехнических соединениях

Исследованиям в различных условиях нагружения подвергались некоторые из предложенных в настоящей работе антифрикционных материалов. На первоначальном этапе исследований величина износа и коэффициент трения композиционных полимерных материалов, выполненных на основе использующегося в качестве матрицы политетрафторэтилена (ПТФЭ) и модифицированной древесины, характеризующиеся приведённым ниже структурным составом.

Образцы, изготовленные на основе ПТФЭ, содержали 70-75% политетрафторэтилена, 1-3% дисульфида молибдена, 2-6% скрытокристаллического графита и 15-20% легкоплавкого материала, заключенного в тонкостенные капсулы различной формы и дисперсности. Образцы, сформированные на основе модифицированной древесины, состояли из прессованного шпона древесины берёзы и теплоотводящих элементов, выполненных в виде армирующего каркаса из листовой меди марки М1 или латунной сетки Л80.

Испытания на износ осуществлялись абразивно-масляной прослойкой по схеме, приведённой на рисунке 4.3. Зависимости износа исследуемых образцов от

времени истирания в принятых условиях нагружения представлены в виде графиков, приведённых на рисунке 5.1.

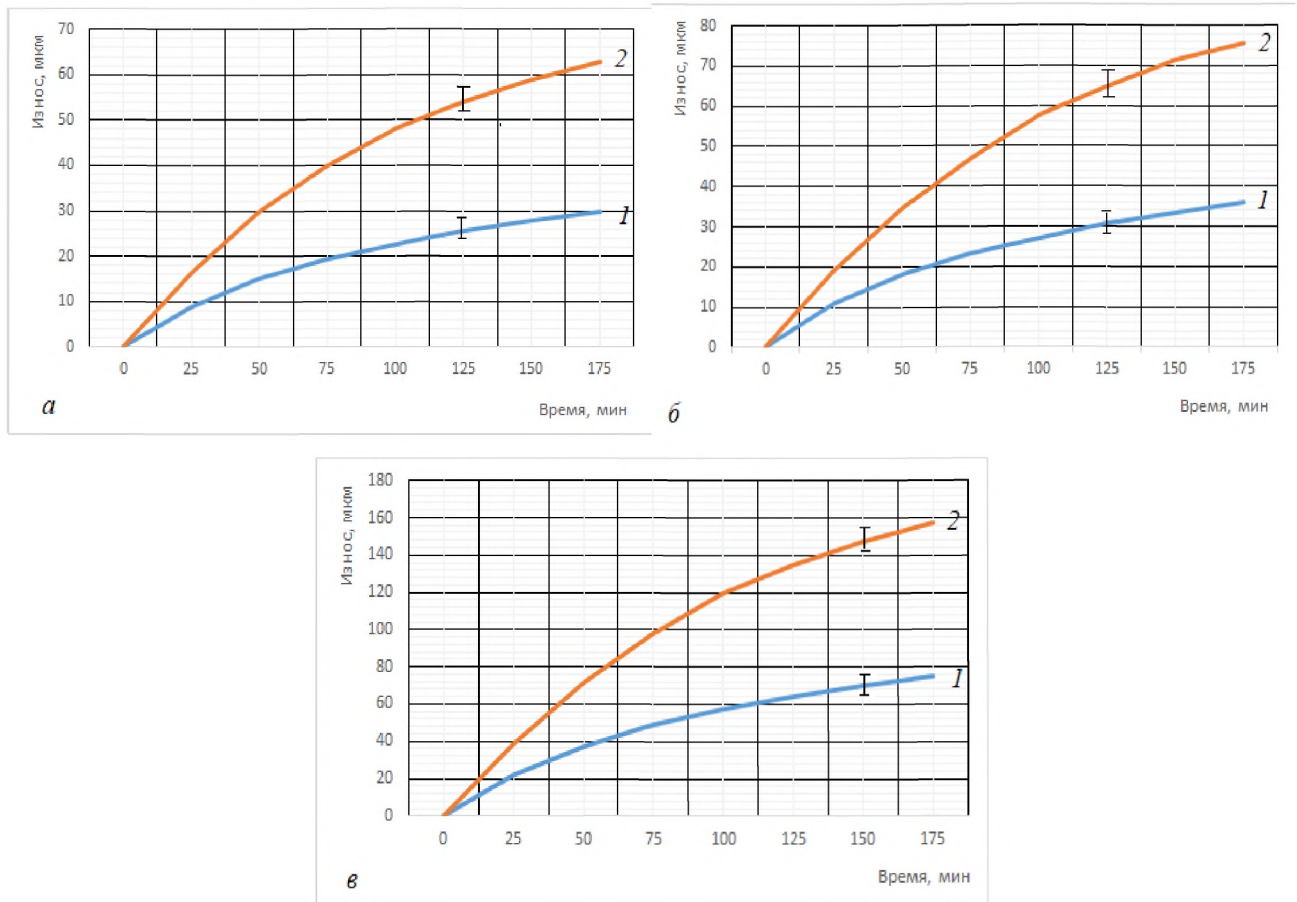


Рисунок 5.1 – Зависимости величины износа композиционных материалов от времени исследований при приложении постоянной (а), переменной (б) и ударной (в) нагрузок (1- образцы из композита на основе политетрафторэтилена, 2- древесно-металлический материал с армирующей сеткой).

Как видно из указанных графиков, полученные закономерности изнашивания идентичны для различных видов нагружения и различных исследуемых материалов, но существенно отличаются величиной износа. В то же время исследуемые материалы показали сравнимые коэффициенты трения, находящиеся в пределах от 0,08 до 0,15. При этом, как и ожидалось, гораздо большей износостойкостью обладает композит, выполненный на основе полимера ПТФЭ.

Износ материалов, имеющих древесную основу, оказался значительно выше, поэтому, даже, по предварительной оценке, можно считать, что такие материалы без дополнительной упрочняющей обработки или введения в их структуру оптимизирующих составляющих вряд ли могут быть использованы для изготовления

относительно легко нагруженных подшипников скольжения манипуляторов технологических машин.

Одновременно, в связи с ограниченным объёмом настоящей диссертационной работы, было признано целесообразным углубленные дальнейшие исследования выполнять применительно к более перспективным образцам, изготавливаемым из композиционного материала на основе ПТФЭ.

При этом основной задачей предложенных исследований было уточнение возможных путей повышения износостойкости и снижения коэффициента трения, а также выявление влияния ряда важных структурных параметров рассматриваемых композиционных материалов, таких как суммарное содержание в них твёрдосмазочных компонентов - дисульфида молибдена и скрытокристаллического графита (δ), объём легкоплавкого теплоаккумулирующего материала (v) и форма капсул (τ), в которых он заключался.

Для оценки влияния на величины износа и коэффициента трения выбранной совокупности структурных параметров предложенного материала осуществлялась постановка исследований с использованием полного факторного эксперимента. При его реализации важным этапом являлся выбор шага варьирования каждого из входных параметров. Величина этого шага задавалась таким образом, чтобы изменение выходного параметра «у» можно было выявить и при наличии нескольких источников влияния на получаемые результаты в условиях выполнения наименьшего числа параллельных опытов. Задаваемые уровни входных факторов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Уровни величин входных факторов и их размерность.

Входные факторы и их обозначения	Уровни задаваемых входных параметров	Единица измерения
Суммарное содержание смазывающих компонентов (графит + дисульфид молибдена) (δ)	3; 9	Процентное содержание
Форма капсул легкоплавкого теплоаккумулирующего материала (v)	Сферическая; Эллипсоидная	
Объём капсул, в которых заключался легкоплавкий материал (τ)	100; 200	мм ³

Для получения более точной математической модели, адекватно описывающей эксперимент, использовали и эффект оценки влияния взаимодействия входных параметров. Поэтому при получении уравнения регрессии для расчёта коэффициентов уравнения регрессии использовались и взаимодействия входных параметров $\delta \times v$; $v \times \tau$; $\delta \times \tau$.

На основании полученных результатов опытов, выполненных в соответствии с указанным планом экспериментальных исследований, определялись соответствующие уравнения регрессии для оценки величин износа и коэффициента трения. Коэффициенты уравнений регрессии рассчитывались по формулам 4.10 и 4.11. В результате для определения величины износа исследуемого материала было получено уравнение регрессии имеющее следующий вид:

$$J = 32,75 - 1,375\delta - 0,125v - 0,375\tau - 0,25\delta v + 0,25\delta\tau + 0,25v\tau \quad (5.1)$$

Для оценки адекватности полученного уравнения регрессии по критерию Фишера, в него подставлялись значения факторов δ , v , τ , соответствующие условиям каждого опыта и вычислялись значения выходной величины $J_{расч.}$, предсказанные уравнением регрессии для каждого из опытов. Их значения как экспериментальные, так и расчётные представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2– Экспериментальные значения величины износа J и величины $J_{расч.}$, полученные при решении уравнения регрессии для каждого из приведённых опытов.

Номер опыта	$J_{мкм}$	$J_{расч., мкм}$
1	35	34,875
2	32	31,875
3	34,5	34,625
4	31	30,875
5	33	33,125
6	31,5	29,875
7	34	33,875
8	31	31,125

Затем для выявления значимости полученных коэффициентов регрессии проводили серию из 5 дублированных опытов для выявления дисперсии воспроизводимости, характеризующей разброс отклика в параллельных опытах около среднего его значения, при этом оценка дисперсии этой серии принималась за оценку

дисперсии, характеризующей ошибку эксперимента. Её значение рассчитывалось по формуле 4.12 и составляет для принятых условий $S^2\{J\} = 0,25$.

Оценка уровня значимости установленных коэффициентов регрессии проводилась с помощью t-критерия Стьюдента по формулам 4.15, 4.16. Полученные значения критерия Стьюдента сравнивались с табличным значением для выявления их уровня значимости. Если расчетное значение доверительного интервала меньше табличного, то данные коэффициенты при работе с моделью исключались из уравнения регрессии. Расчетное критическое значение критерия Стьюдента составляет $t=2,06$ при уровне значимости $q=0,05$. Результаты расчёта и оценка уровня значимости коэффициентов регрессии приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Коэффициенты уравнения регрессии (5.1) и оценка уровня их значимости.

Коэффициенты b_i		Значения t- критерия		Значимость
b_0	32,75	t_0	185,2	Значим
b_1	–1,375	t_1	7,77	Значим
b_2	–0,125	t_2	0,7	Незначим
b_3	–0,375	t_3	2,12	Значим
b_{12}	–0,25	t_{12}	1,41	Незначим
b_{13}	0,25	t_{13}	1,41	Незначим
b_{23}	0,25	t_{23}	1,41	Незначим

Для проверки адекватности математической модели использовался критерий Фишера, согласно которому вычислялась сумма квадратов, характеризующая адекватность модели $S_{ад}$ по формуле 4.14, и определялось расчетное F-отношение Фишера по формуле 4.13. Результаты расчёта приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Расчетные значения дисперсии адекватности и F-отношение Фишера.

$S_{ад}$	F-отношение	Критическое (табличное) значение F- отношения
0,125	2	$F_{(1-0,05)(1;4)}=7,71$

Расчетное значение критерия адекватности сравнивалось с табличным значением (при уровне значимости 0,05) [17,130]. В нашем случае расчетное значение оказалось меньше табличного, поэтому полученное уравнение регрессии величины износа адекватно описывает проведённый эксперимент.

Таким образом установлено, что наиболее значимое влияние на величину износа в исследованном диапазоне изменяющихся параметров оказывает суммарное процентное содержание смазывающих компонентов (графит + дисульфид молибдена). При этом форма капсул, а также объём легкоплавкого материала по полученным данным не влияют на величину износа.

Аналогичным образом на основании проведения планируемых экспериментов определялось уравнение регрессии для оценки коэффициента трения. В результате полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$f=0,0835+0,00375\delta-0,0005\nu+0,0025\tau+0,00325\delta\nu-0,00125\delta\tau+0,0055\nu\tau \quad (5.2)$$

Как и при представленных выше исследованиях для оценки адекватности полученного уравнения регрессии по критерию Фишера, в него подставлялись значения факторов δ , ν , τ , соответствующие условиям каждого опыта и вычислялись значения выходной величины $f_{расч.}$, предсказанные уравнением регрессии для каждого из опытов. Их значения как экспериментальные, так и расчётные представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Экспериментальные значения коэффициента трения f и величины $f_{расч.}$, полученные при решении уравнения регрессии для каждого из приведённых опытов.

Номер опыта	f	$f_{расч.}$
1	0,08	0,08525
2	0,09	0,08875
3	0,09	0,06675
4	0,08	0,08325
5	0,08	0,08175
6	0,07	0,08675
7	0,08	0,08525
8	0,07	0,09675

Оценка дисперсии этой серии принималась за оценку дисперсии, характеризующей ошибку эксперимента. Её значение составляет для принятых условий $S^2\{f\} = 0,000034$.

Расчётное критическое значение критерия Стьюдента составляет $t=2,36$ при уровне значимости $q=0,05$. Результаты расчёта и оценка уровня значимости коэффициентов регрессии приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Коэффициенты уравнения регрессии (5.2) и оценка уровня их значимости.

Коэффициенты b_{fi}		Значения t - критерия		Значимость
b_{f0}	0,08350	t_0	41,38	Значим
b_{f1}	0,00375	t_1	2,82	Значим
b_{f2}	0,00050	t_2	0,24	Незначим
b_{f3}	0,00250	t_3	1,21	Незначим
b_{f12}	0,00325	t_{12}	1,57	Незначим
b_{f13}	0,00125	t_{13}	0,60	Незначим
b_{f23}	0,00550	t_{23}	2,66	Значим

Так как большинство расчётных значений t - критерия меньше табличного, был сделан вывод об отсутствии фиксируемого их влияния на коэффициент трения f .

Для проверки адекватности полученной математической модели использовался критерий Фишера, согласно которому вначале вычислялась сумма квадратов, характеризующая адекватность модели $S_{ад}$. И определялось расчётное F -отношение Фишера. Результаты расчёта приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Расчётные значения дисперсии адекватности и F -отношение Фишера.

$S_{ад}$	F -отношение	Критическое (табличное) значение F - отношения
0,000169	4,97	$F_{(1-0,05)(1;4)} = 7,71$

Расчетное значение критерия адекватности сравнивалось с табличным значением (при уровне значимости 0,05) [17,130]. Поскольку полученное расчетное значение оказалось меньше табличного, то уравнение регрессии для оценки коэффициента трения адекватно описывает результаты проведённого эксперимента.

Учитывая, что исследовавшийся выше параметры в существенной степени прямо или косвенно связаны с показателями твёрдости исследуемого материала была предпринята попытка установить её влияние на износ и коэффициент трения рассматриваемого композита. Показатели твёрдости исследуемых образцов и соответствующей ей значения износа и коэффициента трения приведены в таблице 5.8. В этой же таблице представлены те же самые показатели, относящиеся к известным композитам Ф4К20 и Ф4С15 [92-96].

Таблица 5.8 - Показатели твёрдости исследуемых образцов и соответствующей ей значения износа и коэффициента трения.

Номер и содержание структурных составляющих исследуемого материала образцов, соответствующих номеру опыта					Твёрдость, <i>HV</i>	Износ, мкм	Коэффициент трения, <i>f</i>	Интенсивность изнашивания, $I \times 10^{10}$	Обобщённый показатель твёрдости, $H_{об.}$
Номер	Содержание, %								
	ПТФЭ	MoS ₂	СГ	ЛМ					
1.	82	1	2	15	45	35	0,08	20,58	61
2.	76	3	6	15	50	32	0,09	18,8	62
3.	82	1	2	15	46	34,5	0,09	20,2	60
4.	76	3	6	15	51	31	0,08	18,2	64
5	76	1	2	21	55	33	0,08	19,4	69
6	70	3	6	21	65	31,5	0,07	18,5	72
7	76	1	2	21	57	34	0,08	20,0	69
8	70	3	6	21	66	31	0,07	18,2	71
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	-

Диаграмма износа исследуемых образцов абразивно-масляной прослойкой от времени истирания представлены на рисунке 5.2.

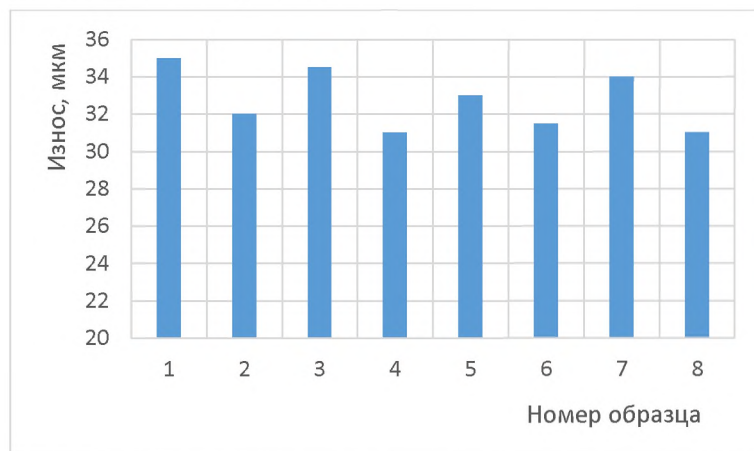


Рисунок 5.2– Диаграмма износа исследуемых образцов на основе политетрафторэтилена

На основании данных приведенных в таблице 5.8 построены графики зависимости величины износа и коэффициента трения от твердости *НВ* различных материалов на основе ПТФЭ представленные на рисунках 5.3 и 5.4. Их аппроксимации с использованием полинома 2 степени позволила получить следующие математические модели:

$$J = 0,0026HB^2 - 0,3646HB + 31,227 \quad (5.3)$$

$$f = -0,0005HB^2 - 0,0034HB + 0,0089 \quad (5.4)$$

Для оценки их достоверности рассчитывалась величина среднеквадратичного отклонения полученных экспериментальных данных, которая составила для зависимости величины износа $R^2 = 0,4622$, для коэффициента трения $R^2 = 0,7457$.

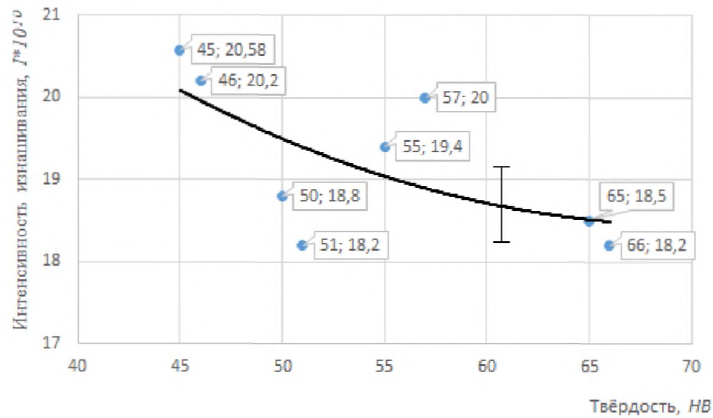


Рисунок 5.3-Взаимосвязь между твердостью и величиной износа композитов на основе ПТФЭ.

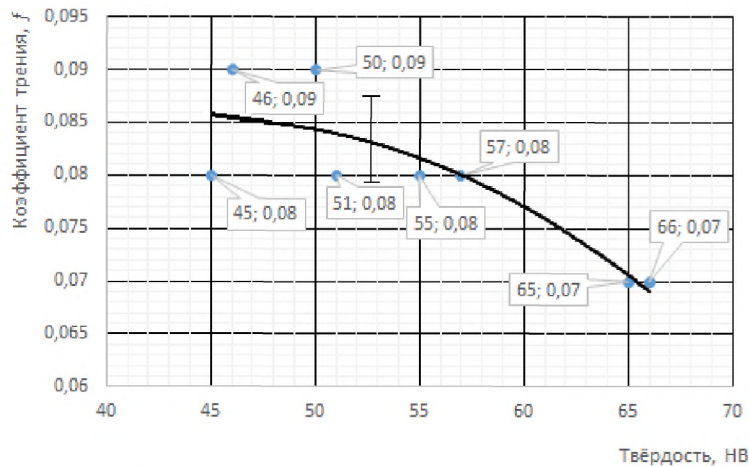


Рисунок 5.4 - Взаимосвязь между твердостью и коэффициентом трения по стали композитов на основе ПТФЭ.

Анализ представленных выше зависимостей износа и коэффициента трения от твердости HB показал, что величина износа и коэффициента трения варьируется в небольших пределах и зависит от наличия в материале наполнителей, а именно их объема и химического состава, дисперсности и концентрации в материале смазочной составляющей- скрытокристаллического графита и дисульфида молибдена, опосредованно влияющих на твердость композита. Вместе с тем установлено, что получаемые показатели отличаются значительным разбросом экспериментальных результатов.

Этот же анализ дал основание полагать, что установить повышение достоверности результатов исследования можно за счёт использования предложенного нами обобщённого показателя твёрдости, поскольку он в гораздо в большей степени отражает физико- механические показатели композитных материалов. Соответственно, была поставлена задача построить графики зависимостей влияния на износ и коэффициент трения исследуемого материала от обобщённого показателя твёрдости.

Таким образом, наряду с определением показателей твёрдости по методу Бринелля исследуемых композитных материалов, рассчитывали обобщённый показатель твёрдости каждого исследуемого образца, реализующемуся по способу по патенту № 2725902 .

Согласно экспериментальными данным приведенным в таблице 5.9 строились графики зависимостей износа и коэффициента трения от обобщённого показателя твёрдости материалов представленные на рисунках 5.5 и 5.6.

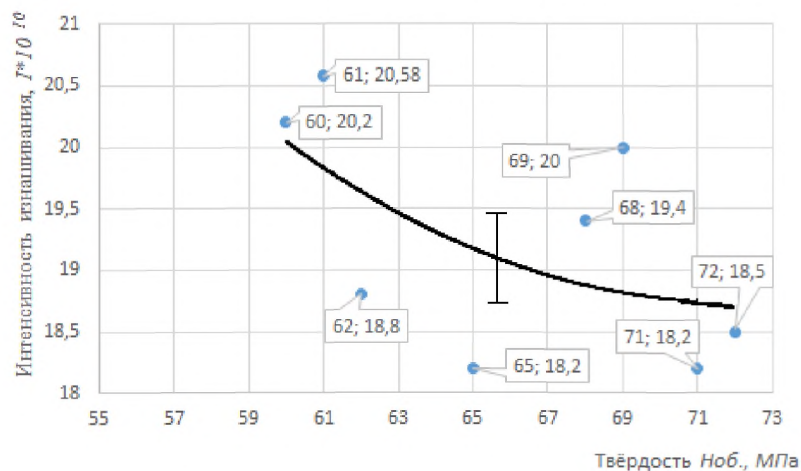


Рисунок 5.5 - Зависимость износа образцов на основе ПТФЭ от обобщённого показателя твёрдости.

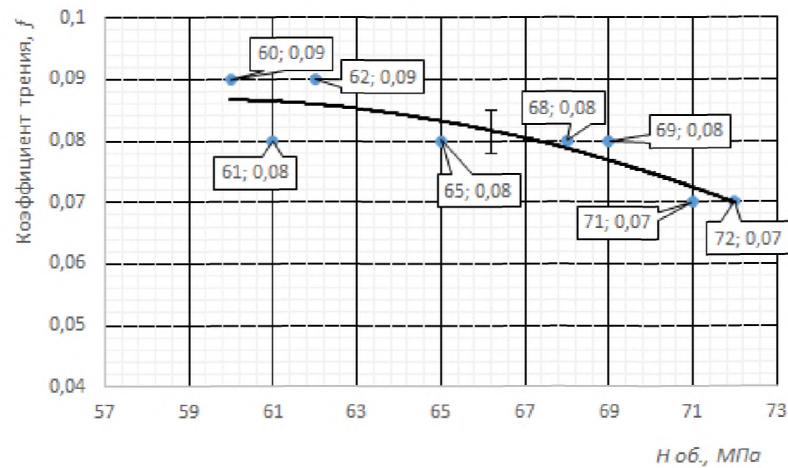


Рисунок 5.6 - Зависимость коэффициента трения образцов на основе ПТФЭ от обобщённого показателя твёрдости.

На основании обработки полученных данных были получены следующие экспериментальные зависимости

$$J' = 0,0094 H_{об}^2 - 1,3533 H_{об} + 67,279 \quad (5.5)$$

$$f' = -0,0001 H_{об}^2 + 0,0119 H_{об} - 0,2653 \quad (5.6)$$

Среднеквадратичное отклонение полученных экспериментальных данных для обеих зависимостей составила для величины износа $R^2 = 0,3024$, 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%.

Это по-видимому связано с тем, что в этом случае дифференцированно учитывается твёрдость отдельных структурных составляющих композиционного материала, а также занимаемые ими доли на функциональных поверхностях образцов. Соответственно достигается меньший разброс и дисперсия показателей изнашивания меньше при использовании в качестве оценочного показателя твёрдости, чем определяемой по способу Бринелля. Вместе с тем отмечено, что при использовании предложенного обобщённого показателя твёрдости подтверждено, что введение графита и дисульфида молибдена в предложенном объёме улучшает антифрикционные характеристики материалов.

При этом полагалось, что для достижения более оптимального содержания смазочных компонентов в исследуемом композите целесообразно использование метода крутого восхождения (Бокса-Уилсона) [17,130]. На основании, которого подтверждено, что коэффициенты линейного уравнения регрессии являются показателями градиентов восхождения и позволяют определить направление движения к экстремуму, установить оптимум задаваемых параметров переменных. В результате по полученным данным, при приведенных режимах трения, можно рекомендовать такую структуру материала в которой суммарное количество смазочных составляющих находится в пределах 8-9 %.

5.2 Исследование триботехнических параметров и возможности оптимизации теплофизических характеристик антифрикционных материалов и деталей узлов машин

Для исследования возможностей целесообразного повышения теплофизических характеристик предложенных материалов использовались образцы вкладышей подшипников скольжения, содержащие различные теплоаккумулирующие легкоплавкие элементы.

Указанные исследования выполнялись на основе реализации полнофакторного планируемого эксперимента, в процессе которого устанавливалось влияние температуры плавления используемого легкоплавкого материала, его объёма в теплоаккумулирующей ёмкости вкладыша и толщины внутреннего антифрикционного кольца подшипника скольжения на время достижения исследуемых образцов задаваемой температуры $t_{вр}$, равной 100°C и относительная теплопроводность исследуемых композиционных материалов $\lambda_{отн}$.

Для этого задавались такие входные параметры 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 , представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Входные параметры и их показатели.

Входные параметры (факторы)	Диапазон изменения	Единица измерения
Температуры плавления легкоплавких материалов (сплав Розе- сплав Вуда) (t)	68-91	°C
Объём теплоаккумулирующего материала (V)	18-25	см ³
Толщина теплоприёмной пластины (Δ)	4-6	мм

На основании обработки полученных в ходе экспериментальных исследований данных производилось определение регрессионных зависимостей времени достижения принятой эксплуатационной температуры и относительной теплопроводности исследуемого материала от температуры плавления легкоплавкого материала, объёма теплоаккумулирующей ёмкости вкладыша и толщины внутренней антифрикционной втулки подшипника скольжения.

На основании проведения планируемых экспериментов определялось уравнение регрессии для оценки достижения времени принятой температуры. Коэффициенты уравнения, как и в предыдущих опытах определялись по формулам 4.10, 4.11. Полученные их значения приведены в таблице 5.13, а полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$T=26,6+3,7125t+1,8375V+0,2375\Delta+0,1375tV-0,3625t\Delta-0,1375V\Delta \quad (5.7)$$

Как и при описанных выше исследованиях для оценки адекватности полученного уравнения регрессии по критерию Фишера, в него подставлялись значения факторов t , V , Δ , соответствующие условиям каждого опыта и вычислялись значения выходной величины $T_{расч.}$, предсказанные уравнением регрессии для каждого из опытов. Их значения как экспериментальные, так и расчётные представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Экспериментальные значения времени достижения принятой температуры T и величины $T_{расч.}$, полученные при решении уравнения регрессии для каждого из приведённых опытов.

Номер опыта	T	$T_{расч.}$
1	20,4	20,45

2	28,4	28,325
3	24,2	24,125
4	32,5	32,55
5	22,0	21,925
6	28,3	28,35
7	25,0	25,05
8	32,1	32,025

Далее для выявления значимости полученных коэффициентов регрессии проводили серию из 5 дублированных опытов, после чего рассчитывалась дисперсия воспроизводимости, характеризующая разброс отклика в параллельных опытах около среднего его значения, при этом оценка дисперсии этой серии исследований принималась за оценку дисперсии, характеризующей ошибку эксперимента. Её значение определялось и составило для принятых условий $s^2\{T\} = 0,015$.

Оценка уровня значимости установленных коэффициентов регрессии производилась с помощью t-критерия Стьюдента. При этом расчётное критическое значение критерия Стьюдента составляет $t_c=2,36$ при уровне значимости $q=0,05$. Результаты расчёта и оценка уровня значимости коэффициентов регрессии приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Коэффициенты уравнения регрессии (5.3) и оценка уровня их значимости.

Коэффициенты b_{Ti}		Значения t- критерия		Значимость
b_{T0}	26,6	t_0	614,3	Значим
b_{T1}	3,7125	t_1	85,7	Значим
b_{T2}	1,8375	t_2	42,4	Значим
b_{T3}	0,2375	t_3	5,48	Значим
b_{T12}	0,1375	t_{12}	3,17	Значим
b_{T13}	–0,3625	t_{13}	8,37	Значим
b_{T23}	–0,1375	t_{23}	3,17	Значим

Так как большинство расчётных значений t- критерия больше табличного, был сделан вывод о значимости их влияния на время достижения принятой температуры.

Для проверки адекватности полученной математической модели использовался критерий Фишера, согласно которому вначале вычислялась сумма квадратов, характеризующая адекватность модели $S_{ад.}$, и определялось расчётное F-отношение Фишера. Результаты расчёта приведены в таблице 5.12.

Таблица 5.12– Расчётные значения дисперсии адекватности и F-отношение Фишера.

$S_{ад}$	F -отношение	Критическое (табличное) значение F - отношения
0,0325	2,17	$F_{(1-0,05)(1;4)} = 7,71$

Расчетное значение критерия адекватности сравнивалось с табличным значением (при уровне значимости 0,05) [17,130]. Поскольку полученное расчетное значение оказалось меньше табличного, то уравнение регрессии для оценки времени достижения принятой температуры адекватно описывает результаты проведённого эксперимента.

Аналогичным образом определялось уравнение регрессии для оценки относительной теплопроводности исследуемого материала $\lambda_{отн.}$. Коэффициенты уравнения рассчитывались по формулам 4.10, 4.11, а их значения приведены в таблице 5.15. В результате полученное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\lambda = 1,44 + 0,0675t - 0,0075V - 0,01125\Delta - 0,01tV - 0,02t\Delta - 0,03V\Delta \quad (5.8)$$

Адекватность полученного уравнения оценивалась по критерию Фишера, при этом вычислялись значения выходной величины $\lambda_{расч.}$, предсказанные уравнением регрессии для каждого из опытов.

При этом для выявления значимости полученных коэффициентов уравнения рассчитывалась дисперсия воспроизводимости, характеризующая разброс отклика в параллельных опытах. Оценка дисперсии дублированных опытов принималась за оценку дисперсии, характеризующей ошибку эксперимента. Её значение рассчитывалось по формуле 4.12 и составляет для принятых условий $S^2\{\lambda\} = 0,0001$.

Оценка уровня значимости установленных коэффициентов регрессии проводилась с помощью t-критерия Стьюдента по формулам 4.15, 4.16. Расчётное критическое значение критерия Стьюдента составляет $t=3,50$ при уровне значимости $q=0,01$. Результаты расчёта и оценка уровня значимости коэффициентов регрессии приведены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Коэффициенты уравнения регрессии (5.8) и оценка уровня их значимости.

Коэффициенты $b_{\lambda i}$		Значения t- критерия		Значимость
$b_{\lambda 0}$	1,44	t_0	407,9	Значим

$b_{\lambda 1}$	0,0675	t_1	19,12	Значим
$b_{\lambda 2}$	0,0075	t_2	2,12	Незначим
$b_{\lambda 3}$	0,01125	t_3	3,18	Незначим
$b_{\lambda 12}$	0,01	t_{12}	2,83	Незначим
$b_{\lambda 13}$	0,02	t_{13}	5,66	Значим
$b_{\lambda 23}$	0,03	t_{23}	8,49	Значим

Таким образом установлено, что наиболее значимое влияние на относительную теплопроводность в исследованном диапазоне изменяющихся параметров в рассматриваемой серии экспериментов оказывает температура плавления легкоплавкого материала. При этом объём легкоплавкого материала, а также толщина внутренней антифрикционной втулки подшипника скольжения по полученным данным существенно не влияют на величину относительной теплопроводности.

Для проверки адекватности полученной математической модели использовался критерий Фишера, согласно которому вначале вычислялась сумма квадратов, характеризующая адекватность модели $S_{ад}$ по формуле 4.14, и определялось расчётное F-отношение Фишера по формуле 4.13. Результаты расчёта приведены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Расчётные значения дисперсии адекватности и F-отношение Фишера.

$S_{ад}$	F-отношение	Критическое (табличное) значение F- отношения
0,00142	14,21	$F_{(1-0,01)(1;4)} = 21,20$

Расчетное значение критерия адекватности сравнивалось с табличным значением (при уровне значимости 0,01) [17,130]. Поскольку полученное расчетное значение оказалось меньше табличного, то уравнение регрессии для оценки относительной теплопроводности исследуемого материала адекватно описывает результаты проведенного эксперимента.

5.3 Влияние остаточных напряжений сжатия в функциональных слоях подшипников скольжения при конической посадке с натягом

Благоприятные остаточные напряжения сжатия оценивались теоретическим методом путём расчёта натяга и, соответственно, напряжений сжатия за счёт посадки с натягом. При запрессовке конических втулок на различную величину производилась экспериментальная оценка интенсивности изнашивания. Влияние интенсивности изнашивания от величины напряжения представлены на рисунке 5.7.

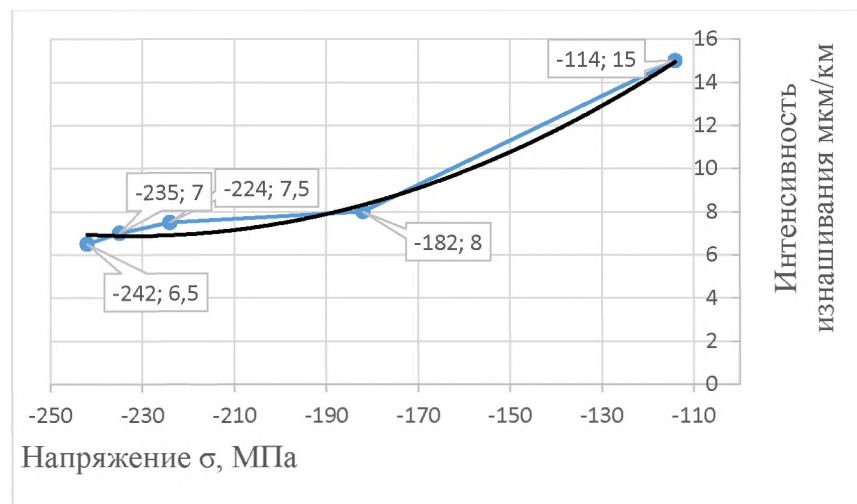


Рисунок 5.7 - Влияние интенсивности изнашивания от величины остаточных напряжений сжатия.

Таким образом что благоприятные остаточные напряжения сжатия способствуют снижению интенсивности изнашивания предложенного подшипника скольжения.

Выводы по 5 главе

1. Экспериментально установлено, что при изнашивании композиционных материалов, выполненных на основе искусственных и естественных полимеров в различных условиях нагружения процесс поверхностного разрушения, протекает

идентично, но отличаются величиной износа. При этом исследуемые образцы показали сравнимые коэффициенты трения в пределах 0,08- 0,15. Также отмечено, что среди исследующихся материалов более высокую износостойкость показали композиты, выполненные на основе ПТФЭ.

2. Установлено, что повышение твёрдости исследуемых в рамках одного типа материалов способствует уменьшению величины износа. Указанная картина справедлива если увеличение твёрдости достигается за счёт введения наполнителей-модификаторов, способствующих увеличению физико-механических и триботехнических показателей, а степень указанного влияния зависит от химического состава, дисперсии, объёма и концентрации модификаций в композиционном материале.

3. Анализ полученных результатов зависимости износа от твёрдости композиционных материалов показал, что они характеризуются значительным разбросом получаемых экспериментальных значений износа, особенно при оценке величины твёрдости с помощью способов Бриннеля, Роквелла и Виккерса, основной причиной чего является неполный учёт роли структурных составляющих композита, отличающихся повышенными размерами более 100мкм.

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

5. Установлено влияния структуры и состава исследуемых композитов, и режима работы трибосопряжения на теплофизические показатели работы пары трения, при этом основными параметрами являются температура плавления легкоплавкого материала, его объём, а также толщина внутренней антифрикционной втулки подшипника скольжения.

6. Установлено, что интенсивность нагрева исследуемого трибоспоражения до достижения эксплуатационной температуры наибольшее влияние оказывают температура плавления легкоплавкого материала и его объём.
7. Подтверждено, что предложенный антифрикционный композиционный материал, сочетающий в себе полимер, твёрдосмазочные компоненты и металлический наполнитель, изготовленный из различных антифрикционных материалов или представляющий собой капсулы, заполненные легкоплавкими материалами, позволяют оптимизировать тепловой режим работы вкладышей подшипников скольжения и открывают более широкие перспективы повышения их работоспособности.
8. Установлено, что состав и структуры предложенных антифрикционных материалов позволяют в существенной степени обеспечить достижение повышенных механических, теплофизических и триботехнических характеристик путем рационального комбинирования полимерной основы, а также металлических теплопроводящих и смазочных составляющих композита.
9. Установлено, что формирование благоприятных остаточных напряжений сжатия на функциональной поверхности за счёт посадки с натягом способствуют снижению интенсивности изнашивания.

6. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выводы о возможности и целесообразности научного обоснования, выполненных в диссертации инженерных разработок, производственного использования полученных теоретических и экспериментальных результатов, возможно, сделать только после натурного опробования их эффективности в реальных эксплуатационных условиях и проведения соответствующих технико-экономических расчетов.

Натурные испытания опытных образцов подшипников скольжения шарнирных соединений лесозаготовительных машин проводились в течении года, начиная с 2021 года. В качестве оценочного показателя принималось снижение денежных затрат, достигающееся за счет применения более износостойких материалов и деталей подшипников скольжения с повышенными теплофизическими свойствами, обеспечивающие повышение надёжности, увеличение межремонтного интервала и технического обслуживания шарнирных соединений манипуляторов технологических машин

На основании полученных результатов рассчитывался экономический эффект от внедрения их в производство. Для корректного расчета и подтверждения экономической эффективности от использования результатов научно-исследовательских разработок учитывался соответствующий инфляционный фактор.

6.1 Расчет экономической эффективности промышленного использования полученных результатов

Расчет экономической эффективности от использования результатов диссертационного исследования имеет следующие направления [97,98,104]:

1. Определение вида эффекта от использования результатов научно-технических разработок (НТР).

2. Выявление эффектообразующих показателей исследований.
3. Расчет фактического изменения эффектообразующих показателей в натуральном выражении.
4. Определение результата от использования научно-технических разработок.
5. Расчет единовременных затрат при использовании результатов научно-технических разработок.
6. Расчет фактического экономического эффекта от использования результатов диссертационного исследования.

Важнейшим показателем эффективности выработанных рекомендаций является чистый дисконтированный доход (ЧДД), представляющий собой накопленный дисконтированный эффект за срок полезного использования усовершенствованного оборудования или технологий. Ожидаемое значение ЧДД находим:

$$\text{ЧДД} = (P - Z) \alpha, \text{ руб.} \quad (6.1)$$

где P – стоимостная оценка результатов после внедрения НТР, руб.; Z – отток денежных средств на затраты, связанные с внедрением НТР, руб.; α – коэффициент приведения.

Притоки и оттоки денежных средств определяются в соответствии с данными актов использования результатов научно-технических разработок.

Приток денежных средств:

При совершенствовании технологий и разработок, цены на которые не устанавливаются, приток денежных средств рассчитывается:

$$P_{(t)} = Z'_{m(t)} - Z_{m(t)}, \text{ руб.}, \quad (6.2)$$

где, $Z'_{m(t)}$, $Z_{m(t)}$ - текущие изменяющиеся затраты, соответственно для условий до и после внедрения, руб.

Величина ежегодных амортизационных отчислений:

$$\text{АО}_{\text{нтр}} = K_p \cdot 1/T, \text{ руб.}, \quad (6.3)$$

где K_p – капитальные вложения, связанные с внедрением НТР, руб., $1/T$ – норма амортизации, где T – срок полезного использования НТР, лет.

Единовременные затраты (K), связанные с использованием результатов научно-технических разработок, определяются по формуле:

$$K = \sum_{i=1}^T K_i, \quad (6.4)$$

где K_t - капитальные вложения, связанные с использованием результатов НТР в году; руб.

К расходам по планам научно-исследовательских работ относятся все расходы, связанные с их выполнением [88,89], а именно затраты на оплату труда, приобретение расходных материалов, энергоресурсы и прочие.

При оценке эффективности результатов использования научно-технических разработок, обуславливающую стабильность достигнутых технико-экономических показателей годовой экономический эффект может быть определен:

$$\mathcal{E}_T = P_T - \mathcal{Z}_{m.T.} - N_p - K/T, \text{ руб.} \quad (6.5)$$

где P_T - годовой приток денежных средств (доходы), руб.; $\mathcal{Z}_{m.T.}$ - годовые текущие затраты, руб.; N_p - налог на прибыль; K - ожидаемые или подтверждаемые инвестиционные затраты на создание, производство и внедрение проекта НТР за расчетный период T , руб.

При оценке использования результатов, связанных с совершенствованием операций, цены на которые не устанавливаются, годовой приток денежных средств определяется по разности годовых текущих затрат.

Тогда годовой экономический эффект может быть определен:

$$\mathcal{E}_T = (\mathcal{Z}'_{m.T.} - \mathcal{Z}_{m.T.}) - N_p - K/T, \text{ руб.} \quad (6.6)$$

где $\mathcal{Z}'_{m.T.}$, $\mathcal{Z}_{m.T.}$ - ожидаемые или подтверждаемые годовые текущие затраты с учетом налога на имущество соответственно до внедрения и после внедрения, руб.

Налог на прибыль N_p рассчитывается по формуле:

$$N_p = (P_{(t)} - \mathcal{Z}_{m(t)}) \cdot p, \text{ руб.} \quad (6.7)$$

где $\mathcal{Z}_{m(t)}$ - текущие расходы в году t , включая амортизацию, руб. p - ставка налога на прибыль (в соответствии с Налоговым кодексом [166] и принимаемыми поправками).

Для расчета подтверждения экономического эффекта от использования результатов научно-технических разработок в производственной деятельности необходимо учитывать влияние инфляции, так как расчет ожидаемого экономического эффекта при разработке технико-экономического обоснования был выполнен в

действующих ценах. Учет инфляции осуществляется с использованием общего индекса внутри рублевой инфляции и изменением уровня макроэкономических показателей.

Для оценки влияния инфляции на эффективность используются следующие показатели:

- базисный общий индекс инфляции за период базового цикла до конца t-го шага расчета или отношение среднего уровня цен в конце t-го шага к среднему уровню цен в начальный момент времени;
- цепной общий индекс инфляции за t-ый шаг, отражающий отношение среднего уровня цен в конце t-го шага к среднему уровню цен в конце шага t -1.

При учете инфляции показатели эффективности определяются на основании учета денежного потока в дефлированных ценах.

$$\text{ЧДД}\varphi = \sum_{t=1}^{t=T} \varphi_t \cdot (P_t - Z_T) \cdot \alpha_t, \quad (6.9)$$

где φ_t – цепной общий индекс инфляции в году t к предыдущему году (t – 1), %

$$\varphi_t = \left(1 + \frac{\varphi_1}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{\varphi_2}{100}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 + \frac{\varphi_t}{100}\right). \quad (6.10)$$

При этом инфляция рассчитывается на основе индекса потребительских цен на товары и услуги, официально публикуемой Федеральной службой государственной статистики РФ [197].

6.2 Расчеты технико-экономической эффективности

На основании результатов производственных испытаний подшипников скольжения было предложено для внедрения в производство предоставить партию в количестве 340 штук, что было фактически выполнено. Исходя из полученных данных об их работоспособности рассчитывался экономический эффект от внедрения указанного объекта использования диссертационной работы.

Исходные данные и результаты расчета экономического эффекта от внедрения полученных результатов в 2021 году с учетом инфляции по состоянию на первый квартал 2022 года представлены в таблицах 6.1. и 6.2.

Таблица 6.1 - Исходные данные

Показатели	До внедрения НТР	После внедрения НТР
Количество замен подшипников скольжения, шт.	474	340
Стоимость замен, руб.	2860	3610

Таблица 6.2 - Расчет показателей экономической эффективности применения подшипников скольжения, руб.

Значение показателей по годам расчетного периода				
Наименование показателя	2022	2023	2024	2025
Денежные притоки	-	161.078	161.078	161.078
Первоначальные затраты	32.000	-	-	-
Амортизационные отчисления	-	3.200	3.200	3.200
Налог на прибыль	-	26.626	26.626	26.626
Чистая прибыль	-	134.452	134.452	134.452
Ставка дисконтирования	-	4%	4%	4%
Дисконтированный денежный поток	-	154.882	148.925	143.197
Чистый дисконтированный доход (ЧДД)	-	415.006		

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) за период с 2021 по 2024 год использования научно-технической разработки оценивается в размере 415 тыс. руб.

Выводы к главе 6

1. Разработаны промышленные рекомендации и предложена для производственного использования в сервисных центрах и на предприятиях лесного комплекса конструкция подшипника скольжения, а также вкладыши из полимерных антифрикционных композиционных материалов. Результаты подконтрольной эксплуатации показали, что такие подшипники скольжения обладают высокими эксплуатационными качествами, а их использование не снижает качества выпускаемой продукции.

2. 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 почти в 1,4-1,6 раза.

3. На основании результатов производственных испытаний установлена возможность получения чистого дисконтированного дохода за установленный период составит 415 006 рублей от внедрения конструкций подшипников скольжения.

Перспективы расширения сферы теоретических и прикладных исследований и разработок по направлениям представленной диссертационной работы и практического использования её результатов

На последующих этапах исследований предполагается проведение комплекса работ, расширяющих возможности использования результатов диссертации и доведение их до уровня более глубокого практического применения, в том числе в рамках организации серийного производства узлов многооперационных лесозаготовительных машин, включающие:

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

- исследование особенностей функционирования машин и обоснование необходимых их типоразмеров применительно к конкретным условиям эксплуатации и производства;

Использование результатов работы в учебном процессе

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при чтении лекций и проведении подготовки специалистов в рамках бакалавриата по направлению 15.03.01 «Машиностроение» профиль – «Инженерия и реновация машин» при чтении лекций, выполнении курсового проектирования по дисциплинам: «Трибофизика», «Трибология», «Оборудование ремонтных предприятий», «Проектирование оснастки и инструмента», «Методы ремонта и испытания машин»; магистратуры и аспирантуры по специальностям 05.16.09 – «Материаловедение», а так же при выполнении выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОодЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе установлены основные причины и механизмы потери работоспособности шарнирных устройств манипуляторов технологических машин лесного комплекса. Показано, что она происходит вследствие недостаточной износостойкости, входящих в конструкцию триботехнических узлов подшипников скольжения, на основании чего поставлены и решены задачи увеличения их износостойкости, для чего выполнен комплекс соответствующих теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых позволяют обеспечить повышенную работоспособность рассматриваемых машин.

Обоснованы и предложены для промышленного использования новые материалы и конструкторские исполнения шарнирных соединений и составляющих их подшипниковых узлов. В целом на основе комплексного решения задач оптимизации совокупностей функциональных характеристик конструкционных материалов и выполнения инженерных решений новых триботехнических узлов. Решена научно-техническая проблема – повышение износостойкости подшипниковых узлов шарнирных соединений манипуляторов технологических машин. Результаты выполненных исследований позволили сформулировать следующие выводы:

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 металлических 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 в рамках бакалавриата и магистратуры

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПТФЭ - политетрафторэтилен

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г./ Под общ. Ред. Арзамасова Б. Н., Мухина Г.Г.; Материаловедение: учебник для вузов /– 5-е изд., стереотип. - М.: // Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 648с.
2. Бакиров М.Б., Потапов В.В. Феноменологическая методика определения механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. 2000. – Т. 66. – № 12. – С. 35-44.
3. Балацкий, Л. Т. Прочность прессовых соединений / Л. Т. Балацкий. – Киев: Техника, 1982. – 152 с.
4. Бартенев И.М. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование / И.М. Бартенев, З.К. Емтыль, А.П. Татаренко, М.В. Драпалюк, П.И. Попиков, Л.Д. Бухтояров. – М.: ФЛИНТА: Наука, 2011. – 408 с.
5. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев/А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
6. Белый, В. А. Трение и износ материалов на основе полимеров / В. А. Белый, А. И. Свириденко М. И. Петроковец. – Минск.: Наука и техника, 1976. – 432 с.
7. Белый, В. А. О регулировании фрикционных свойств композиционных материалов / В. А. Белый, А. И. Свириденко, В. С. Дубровский // Докл. АН СССР. – 1974. – Т. 2, № 3 – С. 97–111.
8. Белый В.А. Проблемы создания композиционных материалов и управление их фрикционными свойствами // Трение и износ. Минск: Наука и техника. 1982, – т.3, – С. 389-395.
9. Беркович, И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский - Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
10. Берникер, Е. И. Посадки с натягом в машиностроении / Е. И. Берникер. – М.; Л.: Машиностроение, 1966. – 168 с.

11. Берсудский, А.Л. Технологическое обеспечение долговечности деталей машин на основе упрочняющей обработки с одновременным нанесением антифрикционных покрытий: автореф. дис.... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Берсудский Анатолий Леонидович. – Саратов, 2008. – 36 с.
12. Биргер, И. А. Расчеты на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 707 с.
13. Бишутин, С. Г. Износостойкость деталей машин и механизмов / С. Г. Бишутин, А. О. Горленко, В. П. Матлахов; под ред. С.Г. Бишутина. - Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.
14. Блюменштейн, В.Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин / Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. – М.: Машиностроение, 2007. – 399 с.
15. Бобров Г. В. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): учебное пособие для студентов вузов / Г. В. Бобров, А. А. Ильин. -М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 624 с.
16. Бородин, А. В. Высоконагруженные соединения с гарантированным натягом для локомотивов / А. В. Бородин, В. М. Волков, И. Л. Рязанцева. – Омск: ОмГУПС, 2011. –166 с.
17. Болдин А.П. Основы научных исследований / А.П. Болдин, В.А. Максимов. - М.: Издательский центр «Академия», 2012. — 336 с.
18. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твёрдых тел. Пер. с англ./ Под ред. д.т.н. И.В. Крагельского. - М.: Машиностроение, 1968. - 542с.
19. Браун, Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. –191 с.
20. Булычев С.И., Алехин В.П. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора - М: Машиностроение, 1990. - 224 с.
21. Буше, Н. А. Трение, износ и усталость в машинах: транспортная техника / учебник для вузов ж.-д. трансп. Москва: Транспорт, 1987. -223 с.

22. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). —М.: Машиностроение, 1981. — Т. 6. Защита от вибрации и ударов/Под ред. К. В. Фролова. - 1981. - 456 с.
23. Виноградов, В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагачиев. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
24. Виноградов, В. Н. Износостойкость сталей и сплавов: учебное пособие для вузов / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин - М.: Нефть и газ, 1994. – 417 с.
25. Виноградов, В.Н. Механическое изнашивание сталей и сплавов / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин. – М.: «Недра», 1996. – 361 с.
26. Власов, В.М. Работоспособность трущихся упрочненных поверхностей / В.М. Власов -М.: Машиностроение, 1987. -304 с.
27. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
28. Гаврилов, С.А. Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 4. – С. 33-39.
29. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: учебное пособие/Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В. С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – М.: Кнорус, 2013. – 408 с.
30. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин): учебник. – 5-е изд., перераб. и доп. / Д. Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2002. – 632 с.
31. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – М.: Кнорус, 2011. – 408с.
32. Горохов, В.А. Обработка деталей пластическим деформированием. – Киев: Техника, 1978. –191 с.
33. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. - М.: Наука, 2001.
34. Гречищев, Е. С. Соединения с натягом / Е. С. Гречищев, А. А. Ильяшенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.

35. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
36. Гуляев, А.П., Гуляев, А.А. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев, А.А. Гуляев, 7-е изд., перераб. и доп. М, ИД Альянс, 2011. – 644 с.
37. Демкин, Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 226 с.
38. Демкин, Н.Б. Расчет характеристик контакта при малых нагрузках // Фрикционный контакт при малых нагрузках / Н.Б. Демкин. - Калинин: Калинин. политехн. ин-т, 1989. - С. 4-7.
39. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин/Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
40. Демкин, М.Н. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей / М.Н. Демкин, В.В. Измайлов // Трение и износ. – 2010. – Т. 31. – № 1. – С. 68-77.
41. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон; Пер. в англ. – М.: Мир, 1989. – 510с.
42. Добрачев А.А. Кинематические схемы, структуры и расчёт параметров лесопромышленных манипуляторных машин: монография / А.А. Добрачев, Л.Т. Раевская, А.В. Швец. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – 128 с.
43. Добрачев А.А., Раевская Л.Т., Швец А.В. Математическое моделирование динамических реакций опор манипуляторной машины // Вестник машиностроения. – 2010. – № 1. – С. 17-20.
44. Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник // Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – Машиностроение, 1986. – 224с
45. Дроздов Ю. Я, Фролов К. В. Теоретико-инвариантный метод расчета интенсивности поверхностного разрушения твердых тел при трении // Поверхность. Физика, химия, механика. 1982. – N° 5. – С. 138-146.
46. Дубров Д. Ю. Повышение эффективности обработки резанием: монография / С. И. Брусов, Г. И. Добровольский, Д. Ю. Дубров и др.; под ред. А. В. Киричека – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 134-177.

47. Дубров Д.Ю., Дубров Ю.С., Сыромятников Д.А. О возможности стабилизации температуры шпиндельного узла металлорежущего станка // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, – №6 – (2017). <https://naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана.
48. Евдокимов, В. Д. Реверсивность трения и качество машин / В. Д. Евдокимов. Киев "Техника". 1977. – 146 с.
49. Жарков, В. Я. Триботехническое материаловедение: учебное пособие / В. Я. Жарков. – Брянск: Изд-во БГТУ, 2005. –159 с.
50. Жарский, И.М. Технологические методы обеспечения надёжности деталей машин: учеб. пособие / И.М. Жарский - Мн.: Выш. шк., - 2005. – 299 с.
51. Зайдес, С.А, Нго Као Кыонг Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2017. – №3(69). – С. 25-30.
52. Зигварт Г. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости / Г. Зигварт // Усталость металлов. М. : Изд-во иностранной литературы, 1961. С. 27–30.
53. Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320с.
54. Исследование и создание подшипников скольжения повышенной износостойкости на основе древесно- металлических композиционных материалов: отчет о НИР (промежуточ.): Брянский государственный технический университет; рук. Пыриков П.Г. – Б., 2018. – 352 с. – Исполн.: Пыриков П. Г., Памфилов Е. А., Шалыгин М. Г., Грядунов С.С., Капустин В. В., Данилюк А.Я. – № ГР 9.10677.2018/11.12.
55. 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.
56. Касаткин, Г. Н. Водород в конструкционных сталях / Г. Н. Касаткин. - М. : Интернет Инжиниринг, 2003. – 336 с.

57. Кашеев, В.Н. Абразивное разрушение твердых тел / В.Н. Кашеев. – М.: Наука, 1970. – 248с.
58. Кобрин М. М. Изменение величины остаточных напряжений в стали при циклических нагружениях / М. М. Кобрин; под ред. И. В. Кудрявцева // Усталостная прочность и остаточные напряжения в стали и чугуне. М.: Машгиз, –1955. – Вып. 70. С. 35–49.
59. Когаев В. П., Дроздов Ю. Я. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. – 320 с.
60. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – М.: Машиностроение, 1964. – 176 с.
61. Колмаков, А.Г. Методы измерения твердости: справ. изд./А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Интермет Инжиниринг, 2005. -150 с.
62. Кондратюк, Д.В. Перспективы развития конкуренции гусеничных лесозаготовительных машин для заготовки древесины / Кондратюк Д.В., Крылов В.М., // Технология и оборудование лесопромышленного производства: научные труды. - Вып. 356. - М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2011. - С. 163-170.
63. Корона, А. Б. Взаимосвязь чистоты поверхности, точности и посадок / А. Б. Корона // Вестник машиностроения. – 1953. – № 9. – С. 34–42.
64. Костецкий, Б. И. Механо-химические процессы при граничном трении / Б. И. Костецкий, М. Э. Натансон, Л. И. Бершадский; АН СССР. Науч. совет по трению и смазкам. - Москва: Наука, 1972. - 170 с.
65. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М. Н. Добычин, В.С. Комбалов – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
66. Крагельский И. В. Трение изнашивание и смазка. Справочник // И. В. Крагельский, В.В. Алисина. — М.: Машиностроение. –1979. - 358 с.
67. Крагельский, И. В Коэффициенты трения: справ. изд. / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградова – М.: Машгиз, 1962. – 215 с.

68. Крагельский, И.В. Об усталостном механизме износа при упругом контакте / И.В. Крагельский, Е.Ф. Непомнящий // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1963. – № 5. – с. 190-195.
69. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: 191 Машиностроение, 1968. – 480с.
70. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: Справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280с.
71. Кудрявцев И. В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении / И. В. Кудрявцев. – М.: Машгиз, 1951. – 278 с.
72. Кудрявцев И. В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали / И. В. Кудрявцев. – М.: ВИНТИ, 1957. – 17 с.
73. Куксенова Л.И. Методы испытания на трение и износ: справ. изд./Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков–М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 152 с.
74. Кутьков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А.А. Кутьков –М.: Машиностроение, 1976, –152 стр.
75. Лаврентьев А.И. К методике определения сопротивления царапанию // Машиноведение. 1974. – № 6. – С. 94-99
76. Лахтин, Ю.М., Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева, М.: Альянс, 2011. – 448 с.
77. Лагереv, И.А. Сравнительный анализ характеристик крано- манипуляторов отечественных и зарубежных производителей / И.А. Лагереv // Подъемно-транспортное дело. – 2016. – №1-2. – С. 7-10.
78. Лебедев, В.А. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки/ под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 403 с.
79. Лебедев, Е. Л. Подшипниковые и шарикоподшипниковые материалы /Е. Л. Лебедев//Металлы и сплавы: справочник /В.К. Афонин, Б.С. Ермаков, Е.Л. Лебедев, и др., Ю. П. Солнцев. – СПб.:Профессионал: Мир и Семья, 2003. - 645 с.

80. Легкоплавкие сплавы, применяемые в современной мировой промышленности [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://4108.ru/u/legkoplavkie-splavyividyisostavyilegkoplavkihsplavov>, свободный. - Загл. с экрана. -12.11.21.
81. Лудченко, А.А., Лудченко, Я.А., Примаков, Т.А. Основы научных исследований: учеб. пособие/ Под ред. А.А. Лудченко. – 2-е изд., - К.: О-во "Знания", КОО, 2006. -113 с.
82. Лифшиц, Е.М. Влияние температуры на молекулярные силы притяжения между конденсированными телами / Е.М. Лившиц // ДАН СССР. – 1955. – Т. 100. – № 5. – 879 с.
83. Лозовский В.Н. Надежность гидравлических агрегатов. // В.Н. Лозовский. М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
84. Львов, П.Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин / П.Н. Львов –М.: Машгиз, 1962. – 89 с.
85. Мазуркин, П. М. Манипуляторные машины / П. М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. – 354 с.
86. Марковец М.П., Матюнин В.М., Шабанов В.М. Переносные приборы для измерения твердости и механических свойств // Заводская лаборатория. 1989. Т. 55. № 12. С. 73-76.
87. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. - М.: Машиностроение, 1979. - 191 с.
88. Матвейко А. П. Технология и оборудование лесозаготовительного производства: учебник / А. П. Матвейко. –Минск.: Техноперспектива, 2006. – 447 с.
89. Матлин, М.М., Лебский, С.Л. Прогнозирование глубины наклепанного слоя при комбинированном упрочнении // Вестник машиностроения. – 2001. – №4. – С. 56- 58.
90. Матюнин В.М. Методы и средства безобразцовой экспресс- оценки механических свойств конструкционных материалов. - М.: Изд-во МЭИ, 2001. - 94 с.
91. Матюнин В.М., Воков П.В. Испытания материалов царапанием // Технология металлов. 2000. № 2. С.27-3

92. Машков, Ю. К. Трение и модифицирование материалов трибосистем /Ю. К. Машков, К. Н. Полещенко, С. Н. Поворознюк. – М.: Наука, 2000. – 280 с.
93. Машков, Ю. К. Трибология конструкционных материалов: учебное пособие для вузов / Ю. К. Машков - Омск: Изд-во ОМГТУ, 1996. – 304 с.
94. Машков, Ю.К. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю. К. Машков – М.: Машиностроение, – 2005. – 240 с.
95. Машков Ю.К., Кропотин О.В. Трибофизика и структурная модификация материалов трибосистем: монография. – Омск, 2009. – 324 с.
96. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М: Недра, – 2004. – 262 с.
97. Методика расчета и подтверждения экономического эффекта от использования результатов научно-технических работ в деятельности ОАО «РЖД» по кругу ведения ЦП: утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2008 г. № 2884р. – М.: 2008. – 46 с.
98. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: утв. Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике от 21 июня 1999 № ВК 477: официальное издание. – М.: Экономика, 2000. – 26 с.
99. Миранович, А. В. Обработка заготовок деталей машин: учеб. пособие / под ред. Ж. А. Мрочка. – Мн: Выш. шк., - 2014. – 172 с.
100. Мороз, Л. С. Водородная хрупкость металлов / Л. С. Мороз, Б. Б. Чечулин. – М.: Металлургия, 1967. – 256 с.
101. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин: учебное пособие /Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
102. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: Физматлит, 2007. – 368с.

103. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трибология, Принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ. – 2002. – 310 с.
104. Налоговый кодекс Российской Федерации, часть первая//Собр. законодательства РФ 1998, № 31 ст. 3824, часть вторая //Собр. законодательства РФ 2000, № 32 ст. 3340.
105. Овчинников, В. Г. Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии / В. Г. Овчинников, Т. А. Хвалько. – Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т, 2003. – 176 с.
106. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
107. Памфилов, Е.А. Возможности и перспективные пути повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина // ИВУЗ. Лесной журнал.- № 5 (335), 2013.- С.129-141.
108. Памфилов, Е.А. Повышение износостойкости деталей узлов трения лесозаготовительной и деревообрабатывающей техники / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, Б.Н. Прусс // Деревообрабатывающая промышленность. - 2009. - N 6. - С.15-16
109. Памфилов, Е.А. Перспективные покрытия для неподвижных разъемных соединений/ Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А. // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: в сб. науч. тр. / ИМАШ РАН. – Москва, 2019. – С. 302-304.
110. Памфилов, Е.А. Исследование изнашивания материалов абразивно-масляной прослойкой при циклических и ударных нагрузках (Применительно к деталям цепных пил): автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.04/ Памфилов Евгений Анатольевич. - Гос. Научно-исследовательский институт машиноведения. – Москва, 1974. - 21 с.
111. Памфилов, Е.А. Антифрикционные армированные древесно-металлические материалы / Е.А. Памфилов, Е.В. Шевелева, Г.А. Пилюшина // Трение и износ. - 2019. - Т.40. - № 1. – С. 121-128.
112. Памфилов, Е.А. Машина для испытаний на износостойкость / Е.А. Памфилов // Заводская лаборатория. - 1971, № 5, с. 620-621.

113. Памфилов, Е.А., Машина трения / Е.А. Памфилов, В.В. Баранов/ В кн.: Вопросы повышения надежности и долговечности строительных, дорожных и лесозаготовительных машин. -Брянск. - 1972, вып. 2, С. 30-33.
114. Памфилов, Е.А. Установка для определения износостойкости материалов в условиях циклического изменения температуры и нагрузки /Е.А. Памфилов В.С. Рыжеванов, А.М. Буглаев // Заводская лаборатория – 1979. -№ 4.– с.372 -374.
115. 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.
116. Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Шевелева Е.В. Перспективы повышения работоспособности рабочих органов и деталей трибосистем лесозаготовительных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. - 2021- №6. - С. 135-149.
117. Памфилов Е. А., Капустин В. В., Шевелева Е. В., Пилюшина Г. А. Повышение износостойкости узлов скольжения технологических машин // Вестник машиностроения. 2022. № 4. С.38-42.
118. 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. – 5 с.
119. Патент № 2242644 Российская Федерация, МПК F16C 11/00. (2004.12). Шарнирное соединение: № 2003118950/11; заявл. 24.06.2003; опубл. 20.12.2004 /А.И. Серебрянский, Н.С. Смогунов, Ф.В. Пошарников; заявитель ВГЛТА. – 4 с.
120. Патент № 2286489 Российская Федерация, МПК F16C 33/18 (2006.01). Подшипник скольжения: № 2005107109/11; заявл. 14.03.2005; опубл. 27.10.2006 / Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Сидоров О.В., Муратов Д.И.; заявитель БГИТА. – 4 с.
121. Патент № 2289732 Российская Федерация, МПК F16C 33/24 (2006.01). Подшипник скольжения: № 2005121070/114 заявл. 05.07.2005; опубл. 20.12.2006 / Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Сидоров О.В., Муратов Д.И.; заявитель БГИТА. – 6 с.

122. Патент № 2432508 Российская Федерация, МПК F16C 33/04, 33/24 (2006.01). Подшипник скольжения: № 2007143028/11; заявл. 20.11.2007; опубл. 27.05.2009/ Памфилов Е.А., Сидоров О.В., Шевелева Е.В., Алексеева Е.В., Пилюшина Г.А.; заявитель БГИТА. – 4 с.
123. Патент № 108519 Российская Федерация, МПК F16 C33/04 (2006.01). Подшипник скольжения: № 2011113560/11; заявл. 07.04.2011; опубл. 20.09.2011/ Памфилов Е.А., Лукаш А.А., Прусс Б.А., Пилюшина Г.А.; заявитель БГИТА. – 2 с.
124. Патент № 2226240 Российская Федерация, МПК F16 C 33/04 (2000.01). Подшипник скольжения: № 2001131695/28; заявл. 23.11.2001; опубл. 27.03.2004 / Е.А. Памфилов, Евельсон Л.И., Симин А.П., Шевелева Е. В.; заявитель БГИТА. – 5 с.
125. Патент №177912 Российская Федерация, МПК F16C 33/04, 33/24(2006.01). Подшипник скольжения 2017120579; заявл. 13.06.2017; опубл. 15.03.2018 / Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Осипов А.А.; заявитель БГТУ. – 4 с.
126. 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.
127. 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.
128. Патент № 207172 Российская Федерация, 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.
129. 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.
130. Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке: учебник для вузов/ А.А. Пижурин, А.А. Пижурин.- М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005.- 305 с.

131. Питухин А. В., Шиловский В. Н., Костюкевич В. М. Надежность лесозаготовительных машин и оборудования: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 288 с.
132. Полимеры в узлах трения машин и механизмов: Справочник / Под ред. А.В. Чичинадзе. // –М.: Машиностроение. 1980. – 208 с.
133. Половко, А . М. Основы теории надежности: Учеб. пособие / А. М. Половко, С. В. Гуров. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб.: БВХ-Петербург, 2006. — 702 с
134. Поляков Б.М. Напряженно-деформированное состояние универсальных шарниров с вкладышами скольжения, их оптимизация и параметрический ряд несущей способности. –М.: Машиностроитель, 2006. –№ 3. – С. 22-29.
135. Прохоров, В.Ю. Повышение износостойкости шарнирных сопряжений манипуляторов лесозаготовительных машин / В.Ю. Прохоров // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2011. – Т. 2. – «НИИ-Краностроения», 2009. – 120 с.
136. Прохоров, В. Ю. Исследование влияния сочетания конструкционных материалов на противозадирные и противоизносные свойства смазок / В. Ю. Прохоров, Л. В. Окладников, Н. В. Синюков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 139-141.
137. Прохоров, В. Ю. Результаты исследований трибологических характеристик УУКМ для тяжелонагруженных узлов трения машин манипуляторного типа / В. Ю. Прохоров, А. В. Лаптев // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. - № 2-S'. Том 18. С. 166-168.
138. Прохоров, В. Ю. Пути реализации эффекта безызносности шарнирных сопряжений. Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 43-46.
139. Пошарников, Ф. В. Особенности работы узлов трения в лесопромышленном оборудовании / Ф. В. Пошарников, А. В. Усиков // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение. межвуз. сб. науч. тр. – ГОУ ВПО «ВГЛТА», 2009. – Вып. 4. – С. 95-100.

140. Пенкин, Н. С. Основы трибологии и триботехники: учебное пособие / Н. С. Пенкин, А. Н. Пенкин, В. М. Сербин – М.: Машиностроение, 2008. – 206 с.
141. 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.
142. 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.
143. Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Памфилов Е.А., Данилюк А.Я., Капустин В.В. Модифицирование древесины для создания подшипников скольжения лесопромышленных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 155–165.
144. Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Памфилов Е.А., Данилюк А.Я., Капустин В.В. Повышение работоспособности древесно-металлических подшипников скольжения лесопромышленных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 156–168.
145. Проектирование и расчет манипуляторов лесных машин: учебное пособие / Ю. Ю. Герасимов [и др.]. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2006. – 92 с.
146. Прусс, Б.Н. Повышение работоспособности подшипников скольжения деревообрабатывающего оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. / Прусс Борис Наумович. - Брянск, 2010. - 20 с.
147. РД 50-339-82. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний на изнашивание абразивно-масляной прослойкой / [Брянский технологический институт, Харьковский автодорожный институт; рук. темы Е.А. Памфилов (БТИ), И.В. Южаков(ХАДИ)]; Гос. Комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 8с.
148. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

149. Расчеты на прочность в машиностроении: в 3 т. / С. Д. Пономарев [и др.]. – М.: Машгиз, 1958. – Т. 2. – 974 с.
150. Рыжов Э.В. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э.В. Рыжов, Ю.В. Колесников, А.Г.Суслов - Киев: Наукова Думка, 1982. -170 с.
151. Рязанцева, И. Л. Соединения с натягом повышенной несущей способности / И. Л. Рязанцева, А. В. Бородин. – Омск: ОмГТУ, 2006. – 152 с.
152. Селиверстов А. А., Сюнёв В. С., Герасимов Ю. Ю., Соколов А. П. Повышение эффективности использования харвестеров // Системы. Методы. Технологии. – 2011. – № 4. – С. 133 – 139.
153. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
154. Семин А.М. Определение механических свойств металлов по характеристикам твердости. - М.: Современный гуманитарный университет, 2000. - 152 с.
155. Серебрянский, А.И. Повышение износостойкости шарниров лесных манипуляторов на основе замены реверсивного трения вращательным: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01: защищена 21.11.2003 / А.И. Серебрянский. – Воронеж, 2003. – 166 с.
156. Серебрянский, А. И. Влияние статических нагрузок на износостойкость пластиков типа АМАН / А. И. Серебрянский. – Воронеж, 2002. – 34 с. – Деп. в ВИНТИ № 975-В2002.
157. Серебрянский, А. И. Повышение износостойкости шарнирных соединений манипуляторов при ремонте/ А. И. Серебрянский, Д. Н. Афоничев, А. В. Ворохобин // Вестник Воронежского аграрного государственного университета. Теоретический и научно-практический журнал. – 2012. – Вып. 2 (33). – С. 107-111.
158. Серебрянский, А. И. Обоснование выбора антифрикционных материалов для узлов трения технологического оборудования лесозаготовительных машин / А. И. Серебрянский, В. В. Абрамов, Д. А. Канищев // Лесотехнический журнал. – 2014 – Том 4, №1 (13). – С. 194-200.

159. Серебрянский, А. И. О целесообразности изменения смазочного материала в шарнирных соединениях лесных манипуляторов / А. И. Серебрянский, Н. С. Смогунов // Повышение технического уровня машин лесного комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж, 1999. – С. 83-85.
160. Серебрянский, А.И. Рекомендуемые конструкционные материалы для узлов трения технологического оборудования лесных машин / А. И. Серебрянский, Д. А. Марфенко, Е. В. Дмитриев // Лес. Наука. Молодежь: материалы по итогам научно-исследовательской работы молодых ученых ВГЛТА за 2008-2009 г. – Воронеж, 2009. –Т.2. – С. 41-47.
161. Сильман, Г.И. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. для вузов / Г.И. Сильман, О.А. Горленко. – М.: Машиностроение, 2006. – 348 с.
162. Сильман, Г. И. Материаловедение: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Г. И. Сильман. – М.:Академия , 2008. – 336 с.
163. Симин, А.П. Повышение долговечности вкладышей подшипников скольжения, изготавливаемых из композиционных материалов на основе растительных полимеров / Автореф. дисс ...уч. степ. кандидата технических наук, Брянск, 2003. - 152 с.
164. Современная трибология: Итоги и перспективы. / отв. ред. К. В. Фролов. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
165. Сорокин, Г. М. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов / Г. М. Сорокин, А. П. Ефремов, Л. С. Саакян - М.: Нефть и газ, 2002 – 424 с.
166. Сорокин, В. М. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин / В. М. Сорокин, А. С. Курников. – Н. Новгород.: Издательство ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. – 296 с.
167. Справочник машиностроителя: в 6 т. / под ред. С. В. Серенсена. – М.: Машгиз, 1962. – Т. 3. – 650 с.
168. Справочник технолога - машиностроителя. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 2003. – 944 с.

169. Справочник по триботехнике в 3-х томах. Том.1 Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. Под. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 413с.
170. Справочник по триботехнике в 3-х томах. Том.2 Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. Под. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990. – 413с.
171. Суслов, А.Г. и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ под общ. ред. А. Г. Суслова – М.:Машиностроение, 2006. – 448 с.
172. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов.- М.: Машиностроение, 1987.- 208 с.
173. Тененбаум, М.М. О видах, процессах и механизмах абразивного изнашивания / М.М. Тененбаум // Долговечность трущихся деталей машин. 1990. – С. 202 - 215.
174. Тененбаум, М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании / М.М. Тененбаум. – М. Машиностроение, 1966. – 330с.
175. Теория механизмов и машин: учеб. для втузов / К.В. Фролов, С.А. Попов, А.К. Мусатов // под ред. К.В. Фролова. - М.: МГТУ им. Баумана, 2002. - 496 с.
176. Технология и инструменты отделочно- упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник: в 2-х т. Т.1 / под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.
177. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ А. Г. Сулов [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. - Москва: Машиностроение, 2006. - 447 с.
178. Тихомиров, В. П. Методы моделирования процессов в триботехнических системах / В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, В. В. Порошин. – М.: Изд-во МГИУ, 2004. – 292 с.
179. Тихомиров, В. П. Трибология: учеб. пособие для вузов/ В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, В. В. Порошин. –М.: Изд-во МГИУ, 2002. – 224 с.

180. Тихомиров, В.П. Применение теории подобия к исследованию характеристик пар трения / В.П. Тихомиров, В.И. Воробьёв, С.Г. Волохов, А.Н. Чвала // Современные проблемы математики, механики, информатики: материалы междунар. конф. - Тула, 2013. - С. 472-476. 82.
181. Тихомиров В.П. Контактная механика фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 1 (45). - С. 60-66.
182. Трение, износ, смазка // Э.Д. Браун [и др.]. -М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.
183. Трибохимия водородного износа: монография / Е. А. Лукашев, М. Е. Ставровский, А. В. Олейник. - Курск : Курск ГТУ, 2007. - 279 с.
184. Хрущёв М.М. износостойкость и структура твёрдых наплавов/ М. А. Бабичев, С.П. Козырев, Е. С. Беркович М., 1971 г- 93 с.
185. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для вузов. -2-е изд., перераб. и доп./ А.В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
186. Швец А.В., Добрачев А.А. Классификация и систематика лесных манипуляторов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2010. – №5. – С. 69–73.
187. Шевелева, Е.В. Повышение работоспособности подшипников скольжения деревообрабатывающего оборудования на основе использования древесно-металлических композиционных материалов / Автор. дисс...уч. степ. канд. тех. наук, Брянск, 2004. - 152 с.
188. Шеверя, В. В. Трибохимия и реология износостойкости: монография / В. В. Шеверя, В.П. Олександренко. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
189. Шиловский, В. Н. Надежность машин и оборудования: учеб. пособие / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин. — Петрозаводск: ПетрГУ, 2004. — 128 с.
190. Шорина, Н. С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учебное пособие под общ. ред. Н.Е. Денисовой. /Н. С. Шорина. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2006. – 176 с.

191. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л.Ш. Шустер. – Уфа.: Гилем, 1999. – 199с.
192. Archard, J.F. The temperature of rubbing surfaces / J.F. Archard // Wear. -1959. - № 2. - P. 438-455.
193. Ashby, M.F. Temperature maps for frictional heating in dry sliding / M.F. Ashby, J. Abulawi, H.S. Kong // Tribology Transactions. - 1991. - № 34. - P. 577-587. 94. Bhushan, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: Multiple asperity contact / B. Bhushan // Tribology Letters. - 1998. - V. 4. - P. 1-35.
194. Bakirov M.B. Modifiziert des Harteproofverfahren // Kontrolle (Germany). 1994. № 10. S. 120.
195. Bakirov Murat, Bulychyev Sergei /., Alekhin Velentin P Principles of kinetic indentation methodology. - International Indentation Workshop 2. Cavendish Laboratory, Cambridge, UK. 15-12 July 2000. P. 1-12.
196. Dobrachev A.A., Raevskaya L.T., Shvets A.V. Static stability of manipulator // Russian Engineering Research – 2009 – Vol. 29, No. 12 – Pp. 1221- 1224.
197. Dobrachev A.A., Raevskaya L.T., Shvets A.V. Simulating the dynamic reaction of manipulator supports // Russian Engineering Research – 2010 – Vol. 30, No. 1 – Pp. 11-16.
198. Hamilton G. M, Goodman L.E/ Trans ASME. Ser E. Journal of Applied Mechanics / 1966. Vol. 33. P. 371-376.
199. Effect of Phase Morphologies on the Mechanical Properties of Babbitt-Bronze Composite Interfaces/ Liaw P.K [et al.] Metallurgical Transactions. 2014. №5 P. 529-530.
200. Tin – and Copper- Based Electrochemical Coatings for Sliding Bearings/ A.Kh. Valeeva// Friction and Wear. 2012. № 1. P. 34-38
201. Lawrowski, Z. Polymers in the construction of serviceless sliding bearings // Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2007. Vol. VII, N. 4. P. 139 – 150.
202. Metal/Polymer Composite Plain Bearings // Schaeffler Technologies AG & Co. KG. 2012. URL: <http://www.ina.com> (дата обращения 11.01.2020).

203. Metal-Polymer Sliding Bearings // CLI Industrial Co., Ltd. URL: <http://www.cli-industrial.com> (дата обращения 11.01.2020).
204. Nayak, P. Primeneniye modeli sluchaynogo polya dlya issledovaniya sherokhovatykh poverkhnostey / P. Nayak // Problemy treniya i smazki. - 1971. - № 3. -P. 85-95
205. Reijf K., Herdt K. D., and Hoffmann R., Approximation of stress-strain curves by various functions. Steel Research. Vol. 57. N 12. 1986. P. 658-663.

Приложение А

Акты апробирования и внедрения результатов работы по теме диссертации

УТВЕРЖДАЮ

Директор



ООО «ГидроРемСервис» к.т.н.

Костюков В.В.

М.П.

« 13 » апреля 2022г.

А К Т

внедрения результатов научно-исследовательской работы

Настоящий акт составлен о том, что производственные рекомендации по теме, выполненной Брянским государственным техническим университетом: «Повышение триботехнических характеристик материалов и подшипников скольжения шарнирных соединений манипуляторов технологических машин» внедрены с января 2021 г. на предприятии ООО «ГидроРемСервис».

Для осуществления производственного использования предприятию были предоставлены рекомендации по повышению износостойкости подшипников скольжения шарнирных соединений манипуляторов, прошедшие предварительное опробование на ООО «ГидроРемСервис».

Назначение внедренной разработки - повышение износостойкости шарнирных соединений манипуляторов технологических машин. Опытные образцы вкладышей устанавливались на манипуляторах технологических машин.

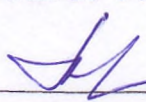
По полученным результатам ранее выполненных производственных испытаний в условиях подконтрольной эксплуатации была установлена ожидаемая технико-экономическая эффективность предложенных конструктивно-технологических решений, сводящаяся к следующему:

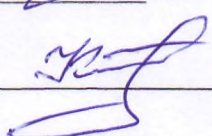
1. Применение подшипников скольжения шарнирных соединений позволяет обеспечить увеличение межремонтного периода за счет повышения долговечности соединений и работоспособности их использования, как минимум, в 1,4-1,6 раза по сравнению с серийными образцами.

2. Достигнуто уменьшение трудоемкости обслуживания шарнирных соединений за счет снижения периодичности и затрат на осуществление ремонта оборудования.

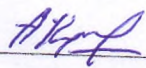
3. Ожидаемый расчётный экономический эффект от внедрения результатов научно- исследовательской работы в условиях ООО «Гидроремсервис», составляет 415.006 рублей.

Представители БГТУ:

д.т.н.  Г.А. Пилюшина

ассистент  В. В. Капустин

Ведущий инженер ООО «Гидроремсервис»

 Кирюшин А.А.



УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Гидроремсервис» к.т.н.

Костюков В.В.

«13» апреля 2022г.

А К Т

производственных испытаний опытных образцов вкладышей подшипников
скольжения шарнирных соединений манипуляторов технологических
машин

В соответствии с договором о сотрудничестве между ООО «Гидроремсервис» и ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» в области повышения износостойкости шарнирных соединений манипуляторов технологических машин в период с 15.01.2021 по 10.12.2021 г. в условиях ООО «Гидроремсервис» были проведены производственные испытания опытных образцов вкладышей шарнирных соединений, изготовленных по чертежам и техническим условиям, предоставленным кафедрой «Триботехническое материаловедение и технологии материалов».

Испытаниям подвергались подвижные вкладыши подшипников скольжения, установленные на манипуляторах технологических машин. Подвижные вкладыши представляли собой подшипники скольжения, изготовленные из двух конических втулок согласно патенту №2726348.

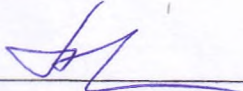
Испытания проводились в условиях подконтрольной эксплуатации, при этом продолжительность оценивалась по времени достижения внешних проявлений фиксируемых следов изнашивания фрикционно контактирующих поверхностей исследуемых деталей. Результаты подконтрольной эксплуатации показали, что срок работы до возникновения следов износа при испытаниях образцов в среднем составлял 3450 часов.

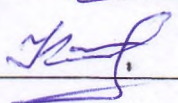
Все исследуемые опытные образцы, отработав увеличенный в 1,4-1,6 раза промежуток времени надежной работы серийных образцов сохранили в полной мере свою работоспособность.

Результат производственных испытаний опытных образцов вкладышей подшипников скольжения шарнирных соединений манипуляторов технологических машин показал, что использование таких подшипников не снижает качества продукции, обеспечивая необходимую работоспособность и долговечность, а также увеличения межремонтного интервала и технического обслуживания.

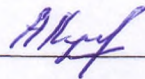
Указанное выше позволяет рекомендовать предложенную технологию повышения износостойкости шарнирных соединений к производственному использованию в условиях ООО «Гидроремсервис».

Представители БГТУ:

д.т.н.  Г.А. Пилюшина

ассистент  В. В. Капустин

Ведущий инженер ООО «Гидроремсервис»

 Кирюшин А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патенты, полученные по результатам диссертационных исследований

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2726348

Подшипник скольжения

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный
технический университет" (RU)**

Авторы: **Памфилов Евгений Анатольевич (RU), Капустин
Владимир Васильевич (RU), Пилушина Галина Анатольевна
(RU), Пыриков Павел Геннадьевич (RU), Шевелева Елена
Викторовна (RU)**

Заявка № 2019133054

Приоритет изобретения 16 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 13 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 октября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Назаров

АКТИВ
Событ
Раздел

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 726 348** ⁽¹³⁾ **С1**

(51) МПК

F16C 17/00 (2006.01)**F16C 33/24** (2006.01)

(52) СПК

F16C 17/00 (2020.02)**F16C 33/24** (2020.02)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 17.10.2021)

Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 17.10.2020 по 16.10.2021. При
уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 17.10.2021 по 16.04.2022
размер пошлины увеличивается на 50%.(21)(22) Заявка: **2019133054**, 16.10.2019(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.10.2019Дата регистрации:
13.07.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.10.2019

(45) Опубликовано: **13.07.2020** Бюл. № **20**(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2432508 С1, 27.01.2011. RU
2172678 С1, 27.08.2001. RU 2123624 С1,
20.12.1998. RU 2208724 С2, 20.07.2003. EP
0225569 А2, 16.06.1987.

Адрес для переписки:

241035, Брянск, б-р 50-летия Октября, 7,
ФГБОУ ВО "Брянский государственный
технический университет", патентная
группа

(72) Автор(ы):

Памфилов Евгений Анатольевич (RU),
Капустин Владимир Васильевич (RU),
Пилюшина Галина Анатольевна (RU),
Пыриков Павел Геннадьевич (RU),
Шевелева Елена Викторовна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВА-
НИЯ "Брянский государственный техни-
ческий университет" (RU)

(54) Подшипник скольжения

Формула изобретения

1. Подшипник скольжения, состоящий из двух соединенных между собой втулок - наружной, выполненной из высокопрочного материала, и внутренней, изготовленной из антифрикционного материала, между которыми расположено замкнутое пространство, где размещена пружина и легкоплавкий материал, отличающийся тем, что пружина находится в растянутом состоянии и размещена в винтовой канавке, выполненной на наружной поверхности внутренней втулки, а оставшийся свободный объем канавки заполнен легкоплавким материалом на 90-95%, внутренняя поверхность наружной втулки и наружная поверхность внутренней втулки выполняются коническими, имеющими одинаковую конусность, при этом соединение внутренней и наружной втулки осуществляется путем поэтапной запрессовки.

2. Подшипник по п. 1, отличающийся тем, что модуль упругости материала наружной втулки задается равным не менее 1,5-2 кратного значения модуля упругости материала внутренней втулки.

3. Подшипник по пп. 1, 2, отличающийся тем, что степень растяжения пружины, размещаемой в винтовой канавке, составляет 20-35% от ее номинальной длины.

4. Подшипник по пп. 1, 2, отличающийся тем, что на рабочей поверхности внутренней втулки подшипника скольжения создается регулярный рельеф способом поверхностного пластического деформирования, обладающий повышенными антифрикционными и демпфирующими характеристиками.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2725902

Способ определения твердости композиционных гетерогенных материалов

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Памфилов Евгений Анатольевич (RU), Капустин Владимир Васильевич (RU), Пыриков Павел Геннадьевич (RU), Пилюшина Галина Анатольевна (RU)*

Заявка № 2019140373

Приоритет изобретения 09 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 07 июля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 декабря 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин Г.П. Ильин

Актив.
Чтобы а

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU⁽¹¹⁾ 2 725 902⁽¹³⁾ C1

(51) МПК

G01N 3/40 (2006.01)

(52) СПК

G01N 3/40 (2020.02)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 02.07.2021)

Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 10.12.2020 по 09.12.2021. При
уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 10.12.2021 по 09.06.2022
размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: [2019140373](#), 09.12.2019(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.12.2019Дата регистрации:
07.07.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.12.2019

(45) Опубликовано: [07.07.2020](#) Бюл. № 19(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2323428 C1, 27.04.2008. RU
2002129872 A, 27.05.2004. UA 90564 U,
10.06.2014. EP 431395 A2, 12.06.1991.

Адрес для переписки:

241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Ок-
тября, 7, ФГБОУ ВО "Брянский государ-
ственный технический университет", па-
тентная группа

(72) Автор(ы):

Памфилов Евгений Анатольевич (RU),
Капустин Владимир Васильевич (RU),
Пыриков Павел Геннадьевич (RU),
Пилюшина Галина Анатольевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования «Брянский государственный
технический университет» (RU)

(54) Способ определения твердости композиционных гетерогенных материалов

Формула изобретения

1. Способ определения твердости композиционных гетерогенных материалов, отличающийся тем, что рабочая поверхность исследуемого образца выполняется в форме шлифа, на котором в процессе его подготовки обеспечивается получение четко различаемых границ раздела между отдельными структурными составляющими композиционного материала, после чего методами планиметрирования определяются площади шлифа структурных составляющих и рассчитываются их доли, занимаемые в пределах общей оценочной площади, а также измеряются показатели их микротвердости.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что при размерах структурных композиционных материалов, недостаточных для оценки микротвердости, возможно использование их образцов-свидетелей, обладающих достаточными для измерения микротвердости размерами.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что площадь зоны оценки микротвердости задается равной 80-100 мм².

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что усредненное оценочное значение микротвердости функциональной поверхности материала ($H_{\text{оц}}$) исследуемого образца устанавливается по фор-

$$H_{\text{оц}} = \frac{H_1 \times S_1 + H_2 \times S_2 + H_i \times S_i + H_i \times S_i}{S_{\text{оц}} \times i}$$

муле: , где H_1 , H_2 , H_i – показатели микротвердости отдельных структурных составляющих; S_1 , S_2 , S_i – площади структурных составляющих, занимаемые в пределах общей оценочной стоимости; i – количество структурных составляющих; $S_{\text{оц}}$ – площадь зоны оценки микротвердости.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что для определения закономерностей распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя производится последовательное снятие слоёв толщиной до 50 мкм на величину предполагаемого предельного износа и определяется коэффициент обобщенной структурной

неоднородности (K_n) исследуемого материала по формуле: $K_n = \frac{H_{\text{max}}}{H_{\text{min}}}$, где H_{max} – максимальное значение микротвердости; H_{min} – минимальное значение микротвердости.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2742669

ШАРНИРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный
технический университет" (RU)**

Авторы: **Капустин Владимир Васильевич (RU),
Памфилов Евгений Анатольевич (RU)**

Заявка № 2020122062

Приоритет изобретения 29 июня 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 09 февраля 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 июня 2040 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Илларионов Г.П. Илларионов

Актив
Чтобы ав

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 742 669** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК

B25J 17/00 (2006.01)*F16C 11/04* (2006.01)

(52) СПК

B25J 17/00 (2020.08)*F16C 11/04* (2020.08)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

Статус: действует (последнее изменение статуса: 02.07.2021)

Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 30.06.2021 по 29.06.2022. При
уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 30.06.2022 по 29.12.2022
размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: [2020122062](#), 29.06.2020(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.06.2020Дата регистрации:
09.02.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.06.2020

(45) Опубликовано: [09.02.2021](#) Бюл. № 4(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2176591 C1, 10.12.2001. RU
2284896 C1, 10.10.2006. RU 2242644 C1,
20.12.2004. JP 2012115927 A, 21.06.2012.

Адрес для переписки:

241035, г.Брянск, б-р 50-летия Октября, 7,
ФГБОУ ВО "Брянский государственный
технический университет", патентная
группа

(72) Автор(ы):

Капустин Владимир Васильевич (RU),
Памфилов Евгений Анатольевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВА-
НИЯ "Брянский государственный техни-
ческий университет" (RU)**

(54) **ШАРНИРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ**

Формула изобретения

1. Шарнирное соединение элементов манипулятора, содержащее запрессованные в один из неподвижных элементов манипулятора подшипники скольжения и зафиксированную относительно другого элемента манипулятора цилиндрическую ось, в теле которой выполнен канал для подводки смазки к подшипникам скольжения, отличающееся тем, что фиксация оси в проушинах одного из звеньев манипулятора осуществляется через промежуточные вкладыши, обладающие повышенной радиальной упругой податливостью, при этом неподвижность соединения оси с вкладышем достигается за счет использования конической резьбовой посадки между вкладышем и осью, при заворачивании которой за счет деформации вкладыша увеличивается прочность посадки неподвижного соединения вкладыша с металлоконструкцией смежного звена.

2. Шарнирное соединение по п. 1, отличающееся тем, что вкладыши неподвижной опоры устанавливаются в соответствующее отверстие неподвижного звена по переходной посадке, обеспечивающей формирование среднего натяга, равного 5-20 мкм, а для увеличения радиальной податливости во вкладышах выполнены пазы по внутреннему и наружному диаметру на глубину, составляющую 2/3 толщины вкладыша, а ширина пазов задается равной 0,2-0,3 мм.

3. Шарнирное соединение по п. 1, отличающееся тем, что на внутренних и наружных диаметрах вкладышей подвижного соединения формируется аморфное виброгасящее покрытие толщиной 10-40 мкм.

4. Шарнирное соединение по п. 1, отличающееся тем, что вкладыши подвижных соединений по наружному диаметру фиксируются от взаимного поворота специальными штифтами, а для увеличения износостойкости подвижного соединения на внутренних функциональных поверхностях вкладыша формируется благоприятный регулярный микрорельеф, в углублениях которого размещается твердосмазочный материал.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 203779

Шарнирное соединение

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Памфилов Евгений Анатольевич (RU), Капустин Владимир Васильевич (RU), Пилюшина Галина Анатольевна (RU), Ибади Мохаммад Хади (RU)*

Заявка № 2021103326

Приоритет полезной модели 10 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 21 апреля 2021 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 10 февраля 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Изrael



АКТИВ
Чтобы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 02.07.2021)
Пошлина: Подлежит уплате 1 год действия патента в срок с 29.03.2021 по 29.05.2022 по п. 9 Положения о пошлинах

(19) RU⁽¹¹⁾ **203 779**⁽¹³⁾ U1

(51) МПК

B25J 17/00 (2006.01)

F16C 11/04 (2006.01)

(52) СПК

B25J 17/00 (2021.02)

F16C 11/04 (2021.02)

(21)(22) Заявка: [2021103326](#), 10.02.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:

10.02.2021

Дата регистрации:

21.04.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.02.2021

(45) Опубликовано: [21.04.2021](#) Бюл. № 12

(56) Список документов, цитированных в отчете о

поиске: RU 2742669 C1, 09.02.2021. RU

2242644 C1, 20.12.2004. RU 2176591 C1,

10.12.2001. JP 2012115927 A, 21.06.2012.

Адрес для переписки:

241035, г. Брянск, б-р 50-летия Октября, 7,

ФГБОУ ВО "Брянский государственный

технический университет", патентная

группа

(72) Автор(ы):

Памфилов Евгений Анатольевич (RU),

Капустин Владимир Васильевич (RU),

Пилюшина Галина Анатольевна (RU),

Ибади Мохаммад Хади (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования "Брянский государственный
технический университет" (RU)

(54) Шарнирное соединение

Формула полезной модели

1. Шарнирное соединение, содержащее запрессованные в один из неподвижных элементов манипулятора подшипники скольжения и зафиксированную относительно другого элемента манипулятора цилиндрическую ось, причем фиксация оси в неподвижном звене манипулятора осуществляется через промежуточный вкладыш, а неподвижность соединения оси в нем достигается за счет использования конической резьбовой неподвижной посадки между вкладышем и осью, отличающееся тем, что конструкция второй проушины представляет собой узел, состоящий из стакана, промежуточной втулки и позиционирующих элементов, а окончательное осевое позиционирование и неподвижность оси во вкладыше второй проушины достигается за счет сжатия разжимных плавающих в осевом направлении позиционирующих элементов, при увеличении диаметра которых происходит фиксация оси во вкладыше неподвижного звена.

2. Шарнирное соединение по п. 1, отличающееся тем, что неподвижность соединения достигается за счет разжима промежуточной втулки вкладыша вследствие воздействия деформируемых в осевом и радиальном направлениях позиционирующих элементов при осевом сжатии их блока в результате затягивания гайки.

3. Шарнирное соединение по п. 1, отличающееся тем, что промежуточная втулка имеет повышенную податливость, достигаемую за счет наличия прорезей в ее теле, и изготавливается из фрикционного материала, обладающего коэффициентом трения, составляющим 0,15-0,25.

4. Шарнирное соединение по п. 1, отличающееся тем, что коническое и цилиндрическое резьбовое соединения шарнирного пальца имеют различные направления нарезки резьбы.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 207172

Шарнирное соединение

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Памфилов Евгений Анатольевич (RU), Капустин Владимир Васильевич (RU)*

Заявка № 2021117802

Приоритет полезной модели 16 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 15 октября 2021 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 16 июня 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Налиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

Статус: может прекратить свое действие (последнее изменение статуса: 07.11.2021)
Пошлина: Подлежит уплате 1 год действия патента в срок с 06.09.2021 по 06.11.2022 по п. 9 Положения о пошлинах

(21)(22) Заявка: [2021117802](#), 16.06.2021(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.06.2021Дата регистрации:
15.10.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.06.2021

(45) Опубликовано: [15.10.2021](#) Бюл. № 29

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2742669 C1, 09.02.2021. RU 2242644 C1, 20.12.2004. RU 2176591 C1, 10.12.2001. JP 2012115927 A, 21.06.2012.

Адрес для переписки:

241035, г. Брянск, б-р 50-летия Октября, 7,
ФГБОУ ВО "Брянский государственный
технический университет", патентная
группа

(72) Автор(ы):

Памфилов Евгений Анатольевич (RU),
Капустин Владимир Васильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования "Брянский государственный
технический университет" (RU)

(54) Шарнирное соединение

Формула полезной модели

Шарнирное соединение, содержащее запрессованные в один из неподвижных элементов манипулятора подшипники скольжения и зафиксированный относительно другого элемента манипулятора шарнирный палец, при этом неподвижность соединения достигается посредством использования конических резьбовых посадок между пальцем и вкладышами, отличающееся тем, что в теле пальца выполняется внутренняя полость, заполняемая легкоплавким термоаккумулирующим материалом, соединенная с рабочей зоной формируемого подшипника скольжения теплоотводящими элементами, при этом теплоотводящие элементы имеют коническую форму с конусностью 0,5-1,5° и диаметром 2-4 мм и размещаются в конических радиальных отверстиях, выполненных в пустотелой зоне пальца методом запрессовки на глубину, равную радиусу пальца таким образом, чтобы на рабочей поверхности пальца оставалась выступающая часть высотой 0,4-0,6 мм, при этом теплоотводящие элементы располагают по винтовой линии с шагом 8-10 мм и расстоянием между соседними отверстиями окружности наружного диаметра пальца 15-20 мм, после чего наружную поверхность пальца подвергают поверхностной деформирующей обработке для переформирования структуры материала выступающих частей теплоотводящих элементов и образования над фрикционной поверхностью шарнирного пальца выступающих макронеровностей высотой 0,05-0,08 мм, с последующей приработкой пальца совместно с вкладышами подшипника скольжения для создания аморфного антифрикционного промежуточного слоя толщиной 5-10 мкм.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2760819

Подшипник скольжения

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Памфилов Евгений Анатольевич (RU), Шевелева Елена Викторовна (RU), Капустин Владимир Васильевич (RU), Оськин Виктор Алексеевич (RU)*

Заявка № 2021109702

Приоритет изобретения 08 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 30 ноября 2021 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 08 апреля 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Налиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА

ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(19) RU⁽¹¹⁾ **2 760 819**⁽¹³⁾ C1

(51) МПК

F16C 33/04 (2006.01)

F16C 33/24 (2006.01)

(52) СПК

F16C 33/04 (2021.08)

F16C 33/24 (2021.08)

Статус: действует (последнее изменение статуса: 10.12.2021)

Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 09.04.2022 по 08.04.2023. При
уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 09.04.2023 по 08.10.2023
размер пошлины увеличивается на 50%.

(21)(22) Заявка: [2021109702](#), 08.04.2021(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
08.04.2021Дата регистрации:
30.11.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 08.04.2021

(45) Опубликовано: [30.11.2021](#) Бюл. № 34(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 108519 U1, 07.04.2011. RU
2289732 C1, 20.12.2006. RU 177912
U1, 15.03.2018. US 1442445 A, 16.01.1923.

Адрес для переписки:

241035, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, 7,
ФГБОУ ВО "Брянский государственный
технический университет", патентная
группа

(72) Автор(ы):

Памфилов Евгений Анатольевич (RU),
Шевелева Елена Викторовна (RU),
Капустин Владимир Васильевич (RU),
Оськин Виктор Алексеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования «Брянский государственный
технический университет» (RU)

(54) Подшипник скольжения

Формула изобретения

1. Подшипник скольжения с вкладышем из антифрикционного композитного материала, состоящего из проклеенной древесины с теплоотводящим элементом в виде армирующей сетки, расположенной между слоями проклеенной древесины, отличающийся тем, что теплоотводящие элементы размещаются в сквозных отверстиях нечётных слоёв древесного шпона, изготовленного из модифицированной древесины, чередующихся со сплошными слоями древесного шпона, общее количество соединяемых слоёв, образующих вкладыш, задаётся нечётным, при этом теплоотводящие элементы размещаются в нечётных слоях, а конфигурация и размеры отверстий в нечётных слоях древесного шпона соответствуют конфигурации и размерам теплоотводящих элементов, в них размещаемых, при этом вкладыш подшипника располагается между опорной и внутренней антифрикционной втулкой с толщиной 3–8 мм, после чего внутреннюю втулку развальцовывают с формированием требуемых допусков посадочного размера его функциональной шероховатости.

2. Подшипник по п. 1, отличающийся тем, что толщина теплоотводящих элементов задаётся равной толщине используемого древесного шпона и составляет 1–2 мм, а габаритные их размеры составляют 10–12 мм, при этом теплоотводящие элементы соединены между собой в единую армирующую сетку металлическими полосками шириной 3–5 мм и толщиной 0,1–0,2 мм.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2769691**Антифрикционный композиционный материал**

Патентообладатель: **ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский
государственный технический университет" (RU)**

Авторы: **Памфилов Евгений Анатольевич (RU), Капустин
Владимир Васильевич (RU), Пилюшина Галина
Анатольевна (RU), Букреев Олег Дмитриевич (RU)**

Заявка № 2021106960

Приоритет изобретения 16 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 05 апреля 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 16 марта 2041 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ

ФЕДЕРАЦИЯ (19)RU(11) [2 769 691](#) (13)C1

(51) МПК

[C08L 27/18 \(2006.01\)](#)[C08J 5/16 \(2006.01\)](#)[C08K 3/08 \(2006.01\)](#)[F16C 33/24 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

ФЕДЕРАЛЬНАЯ

СЛУЖБА

ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБ-
СТВЕННОСТИ[C08L 27/18 \(2022.01\)](#)[C08J 5/00 \(2022.01\)](#)[C08K 3/08 \(2022.01\)](#)[F16C 33/24 \(2022.01\)](#)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 05.04.2022)

(21)(22) Заявка: [2021106960](#), 16.03.2021(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.03.2021Дата регистрации:
05.04.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.03.2021

(45) Опубликовано: [05.04.2022](#) Бюл. № [10](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2525492 C2, 20.08.2014. RU
2432508 C2, 27.10.2011. RU 2286489 C1,
27.10.2006. RU 2307130 C1, 27.09.2007. CN
109909495 A, 21.06.2019. CN 105694309 B,
23.01.2018.Адрес для переписки:
241035, г. Брянск, б-р 50-летия Октября, 7,
ФГБОУ ВО "Брянский государственный
технический университет", патентная
группа

(72)

Автор(ы):

Памфилов Евгений Анатольевич (RU),
Капустин Владимир Васильевич (RU),
Пилюшина Галина Анатольевна (RU),
Букреев Олег Дмитриевич (RU)

(73)

Патентообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВА-
НИЯ "Брянский государственный техни-
ческий университет" (RU)

(54) Антифрикционный композиционный материал

Формула изобретения

1. Антифрикционный композиционный материал, состоящий из политетрафторэтилена, дисульфида молибдена и наполнителей, один из которых представляет собой ультрадисперсный порошок скрытокристаллического графита, отличающийся тем, что второй наполнитель представляет собой легкоплавкий материал, заключенный в тонкостенную оболочку в виде капсул, выбранный из меди или ее сплавов в форме цилиндра с коническими основаниями диаметром 5-6 мм и длиной 8-10 мм, при следующем объемном соотношении компонентов:

Политетрафторэтилен	73-75%
Дисульфид молибдена	1-3%
Скрытокристаллический графит	2-6%
Легкоплавкий материал, заключенный в тонкостенную оболочку	16-20%

2. Антифрикционный композиционный материал по п. 1, отличающийся тем, что капсулы с легкоплавким материалом располагаются преимущественно в поверхностном слое формируемого вкладыша подшипника скольжения, прилегающем к функциональной поверхности и составляющем 25-50% его общей толщины.