

Лишевич Игорь Валерьевич

**СОЗДАНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ
УГЛЕПЛАСТИКОВ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОДШИПНИКОВ
НАСОСОВ И ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение(машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт – Петербург
2015г.

Работа выполнена в **Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»**

Научный руководитель: Доктор технических наук,
профессор,
Бахарева Виктория Ефимовна

Официальные оппоненты:

Фадин Юрий Александрович Доктор технических наук,
профессор,
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения
РАН, заведующий лабораторией.

Гофман Иосиф Владимирович Кандидат химических наук.
Государственное бюджетное
учреждение науки Институт
Высокомолекулярных соединений
РАН, старший научный сотрудник.

Ведущая организация Институт синтетических
полимерных материалов им. Н.С.
Ениколопова РАН (г. Москва)

Защита состоится «18» ноября 2015 г. в 11 ч 00 мин.. на заседании диссертационного совета Д 411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центрально научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП ЦНИИ «КМ «Прометей» и на сайте: dissovet.crism-prometey.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 411.006.01
Заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор

Мальшевский В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Первые антифрикционные высокопрочные углепластики были созданы в ЦНИИ КМ «Прометей» в 80е годы. Было доказано, что новые антифрикционные углепластики по прочности, размерной стабильности, износостойкости практически не уступают металлам, но в отличие от металлов не требуют масляной смазки, могут успешно эксплуатироваться со смазкой водой и агрессивными жидкостями, а в ряде случаев без смазки. За прошедшие 35 лет в несколько раз повысились эксплуатационные требования к подшипникам из углепластиков.

Существует необходимость в трибопарах, которые должны устойчиво работать при повышенных температурах до 200°С. Например, трибопары питательных и конденсатных насосов, насосов теплоцентралей и трубопроводов контуров охлаждения на атомных станциях, паровых турбин.

В настоящее время для изготовления деталей трения «горячих» насосов применяются металлы, резины и керамики. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Металлические детали работают только при смазке маслом, что неизбежно ведет к усложнению конструкции насоса. Резины во многих случаях не удовлетворяют требованиям по прочностным характеристикам, стабильности размеров и допускаемым температурам эксплуатации. Подшипники из керамики и графитовых материалов обладают высокой хрупкостью. Для обеспечения возросших требований к подшипникам скольжения насосов необходимо применять новые антифрикционные материалы с повышенными характеристиками.

На территории РФ более 60-80% (в зависимости от региона) вырабатываемой электрической и тепловой энергии, приходится на станции, использующие в своем цикле паровые турбины и насосы. К ним относятся АЭС, ТЭЦ, ТЭС, ГРЭС. Общее количество действующих паровых турбин тысячи, а насосов десятки тысяч. Каждая турбина имеет минимум 2 опорных и 1 упорный подшипник.

До настоящего времени в узлах трения мощных паровых турбин использовался баббит при смазке маслом. Использование баббита в таких узлах трения накладывает ряд ограничений на работу паровой турбины. Так, допустимая температура смазки не должна превышать 95°С. Повышение температуры свыше этой величины приводит к выплавлению баббита и, следовательно, к отказу турбины. Применять другие материалы, такие как бронза, стали, керамика нельзя, т.к. при пуске или остановке вала турбины возможно снижение подачи масла и как следствие - перегрев шейки вала и возникновения аварийной ситуации.

Для решения этой проблемы необходимо разработать новые высокопрочные теплостойкие антифрикционные полимерные материалы на основе углеродных армирующих материалов и современных термопластичных матриц.

Для теплостойких ПКМ целесообразно применение нового класса термостойких термопластов – полиариленов. По химической структуре эти полимеры содержат в основной цепи жесткие термостойкие фрагменты наряду с простыми эфирными, сульфидными группами, амидными, имидными, сложноэфирными группами. Простые эфирные и сульфидные группы играют роль шарниров и обеспечивают гибкость цепи без снижения термостойкости. Для полимеров этой группы характерно сильное межмолекулярное взаимодействие. Именно этот фактор в сочетании с наличием «шарниров» цепи обеспечивает одновременно высокий модуль упругости при

значительном относительном удлинении при разрыве и, как следствие, высокую устойчивость к ударным нагрузкам. Благодаря этому обстоятельству ПКМ на основе термопластичных связующих по ударно-прочностным характеристикам превосходят аналогичные ПКМ на основе терморезистивных связующих.

Термопласты, входящие в группу полигетероариленов, имеют модуль упругости на уровне 2,5–4 ГПа, разрывную прочность 70–130 МПа. Большинство из них сохраняют хорошие физико-механические свойства в широком диапазоне температур (от –196 до 200°C). Кроме того, они обладают набором полезных свойств: исключительной устойчивостью к воздействию радиационного и УФ-облучения, химических агентов, могут быть использованы для вторичной переработки без существенной потери свойств и т. д. Крайне ценным свойством этих полимеров является негорючесть. Большинство из них в отличие от других типов термопластов не требуют введения антипиренов и выделяют мало токсичных продуктов в условиях пожара.

По модулю упругости и пределу текучести термопласты примерно соответствуют эпоксидным связующим, традиционно используемым для получения армированных пластиков. В то же время предельные деформации термопластов весьма велики и достигают 30–100%. Это обуславливает высокое сопротивление термостойких термопластичных полимеров развитию трещин (удельная энергия расслоения примерно на порядок выше, чем у полиэпоксидов) и хорошие эксплуатационные характеристики материалов.

В связи с изложенным были поставлены следующие цели диссертационной работы:

Цели работы:

Создание нового теплостойкого углепластика, с целью замены импортных материалов или устаревших отечественных в узлах трения насосов энергетических установок, паровых турбин, обеспечивающего:

- скорости скольжения до 50 м/с;
- контактные давления до 5 МПа;
- коэффициент трения до 0,2
- рабочая температура перекачиваемой жидкости до 200°C;
- кратковременная работа в условиях сухого трения.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ современного состояния производства теплостойких полимерных связующих и рынка армирующих материалов. Выбор оптимального связующего с учетом допустимых температур эксплуатации, особенностей переработки и сфер применения ПКМ на основе теплостойких связующих. Выбор армирующего материала с учетом прочностных свойств и триботехнических характеристик и структуры;
2. Выбор методик и исследование теплостойкого связующего с целью определения технологических параметров изготовления углепластика на его основе;
3. Проведение лабораторных триботехнических, физико-механических испытаний и исследования микроструктуры поверхности трения теплостойкого углепластика.

4. Разработка технологии изготовления теплостойкого углепластика и изделий на его основе. Организация полного цикла по изготовлению подшипников скольжения из нового теплостойкого углепластика;
5. Проведение стендовых и натуральных испытаний высокоскоростных подшипников скольжения насосов энергетических установок, паровых турбин, выпуск технической документации;

Научная новизна работы

1. Впервые создан высокопрочный теплостойкий антифрикционный углепластик на основе частично кристаллической термопластичной матрицы (полифениленсульфид) и низкомолекулярных углеродных волокон (с высокоразвитой наноструктурой), для высокоскоростных подшипников скольжения насосов энергетических установок, паровых турбин, работающих в перегретой воде и паре при температуре 100-200°C;
2. Сформулированы, научно обоснованы и экспериментально подтверждены критерии выбора теплостойкой полимерной матрицы и армирующей углеродной ткани, обеспечивающие высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики:
 - молекулярная и надмолекулярная структуры частично кристаллической термопластичной матрицы должны обуславливать при повышенных температурах образование слоя переноса полимера на поверхности контакта;
 - для обеспечения необходимых физико-механических и триботехнических характеристик термопласт должен обладать необходимой длиной цепи, которая определяется его молекулярной массой;
 - с целью обеспечения максимальной термостойкости полимерной матрицы необходимо применение полимеров, состоящих из жестких ароматических колец, кроме того, для гибкости цепи без снижения ее термостойкости полимер должен содержать «шарнирные узлы» («спейсеры»), которые допускают ограниченное «вращение» цепи. При этом матрица не должна гидролизироваться (взаимодействовать с водой) и способствовать водопоглощению;
 - углеродные волокна, для облегчения структурирования в процессе фрикционного взаимодействия, должны иметь удельную пористость более 100-150 м²/г, предельный объем сорбционного пространства W_s (по парам воды) более 0,2 см³/г, средний радиус микропор (коэффициент Породы I_p) не менее 0,5-2,0 нм.
3. Исследованы зависимости физико-механических свойств и триботехнических характеристик антифрикционного углепластика от температуры. Выявлено, что при температуре 210°C прочность при сжатии равна 140 МПа, что составляет 40% от исходной. Данное значение прочности удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к «горячим» подшипникам насосов.
4. Исследованы механизмы изнашивания и структура поверхности трения углепластика при совместном использовании методов растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального анализа. Показано, что в условиях сухого трения на поверхности трибоконтакта образуется слой переноса полимера, что приводит к снижению коэффициента трения в 2 раза.

5. Выявлены особенности влияния сорбции воды теплостойкого антифрикционного углепластика на основе полифениленсульфида в условиях работы при повышенных температурах на размерную стабильность углепластика. Показано, что углепластик УПФС сохраняет высокую размерную стабильность, соответствующую эксплуатационным требованиям. Это обеспечивается за счет высокой водостойкости полимерной матрицы (менее 0,02%), углеродной ткани и метода изготовления углепластика;
6. Разработана технология изготовления теплостойкого антифрикционного углепластика, обеспечивающая высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики, за счет выбора оптимального содержания полимерной матрицы - 40% масс и повышения ее степени кристалличности до 50%.

Достоверность основных результатов, положений и выводов диссертации подтверждена:

– использованием в процессе выполнения работы современных апробированных методов исследования свойств полимерной термопластичной матрицы на основе полигетероарилена, армирующих углеродных волокон и триботехнических характеристик, микроструктуры поверхности трения углепластиков - растровой электронной микроскопии; дифференциальной сканирующей калориметрии, динамомеханического анализа, термогравиметрического анализа, большим экспериментальным материалом лабораторных, стендовых и натуральных испытаний теплостойких углепластиков образцов и изделий;

– положительными результатами оценки работоспособности подшипников скольжения по итогам стендовых и натуральных испытаний опор скольжения из созданного теплостойкого углепластика ОАО «НПО ЦКТИ», ОАО «ЦКБМ»;

– успешным применением теплостойкого углепластика в турбостроении, в насосах энергетических установок и ТЭК.

Практическая значимость результатов работы:

1. Разработан состав антифрикционного теплостойкого углепластика работоспособного при контактных давлениях до 5 МПа и скоростях скольжения до 50 м/с в перегретой воде и пара при температуре до 100-200°C;
2. Разработана технология, а также необходимая техническая и технологическая документация. Организован полный цикл производства подшипников скольжения из теплостойкого антифрикционного углепластика;
3. На основе результатов материаловедческих исследований разработаны новые технические решения для конструкций подшипников скольжения насосов и опор скольжения паровых турбин. Для подшипников скольжения насосов разработана конструкция обратной пары трения, которая за счет снижения толщины слоя углепластика позволяет надежно крепить подшипник на валу насоса, а также повысить теплоотвод;
4. На основании длительных стендовых испытаний определены эксплуатационные характеристики подшипников скольжения насосов энергетических установок и опор скольжения паровых турбин из разработанного теплостойкого антифрикционного углепластика;
5. Осуществлена практическая реализация разработок и внедрение подшипников скольжения из антифрикционного теплостойкого углепластика в питательных

насосах Нижневартговской ГРЭС, Березовской ГРЭС, в конденсатных насосах Нововоронежской АЭС-2, Ленинградской АЭС-2 и опорного подшипника для задней опоры генератора турбины AP-6 производства ОАО «КТЗ», на ТЭЦ ОАО «НПО ЦКТИ»;

6. Состав нового материала, технология его производства и конструкции подшипников и опор скольжения защищены 3 патентами РФ.

Личный вклад автора.

Теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве со своими коллегами.

Автору совместно с научным руководителем принадлежат: постановка проблемы в целом и задач аналитических и экспериментальных исследований, формулировка цели и основных научных положений при создании антифрикционного углепластика.

При этом автор принимал непосредственное участие в экспериментах, включая обработку результатов и их интерпретацию, разработке технологии и разработке новых технических решений для конструкций подшипников скольжения, технологической документации, написание большинства статей и выводов по ним, тезисов докладов и отчетов.

Лично автором разработаны и внедрены подшипники скольжения из антифрикционных теплостойких углепластиков для подшипников скольжения насосов и опор скольжения паровых турбин.

Совместными являются результаты, полученные при выполнении бюджетных и договорных НИР, НИОКР и ОКР, в которых автор являлся руководителем и ответственным исполнителем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Состав разработанного высокопрочного теплостойкого антифрикционного углепластика;
2. Критерии выбора исходных компонентов и технологических параметров их переработки, обеспечивающих высокие механические и эксплуатационные характеристики;
3. Зависимости физико-механических свойств и триботехнических характеристик от температуры эксплуатации. Результаты исследования температур релаксационных переходов полимерной матрицы, исследования механизма изнашивания, структуры антифрикционного углепластика при совместном использовании методов РЭМ и рентгеноспектрального анализа;
4. Технологические параметры и процесс изготовления теплостойкого углепластика, обеспечивающие высокие механические и эксплуатационные характеристики;

Апробация работы

Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на различных всероссийских и международных научных конференциях, семинарах, в том числе на:

- ежегодной научной конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» в 2008, 2009, 2011 и в 2013г;
- 7-ой молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее-2009»;
- 4-ой и 5-ой международной научно-технической конференции «Полимерные

- композиты в триботехнике. Проблемы создания и применения. Опыт эксплуатации»;
- 5-ом международном симпозиуме по транспортной триботехнике («Транстрибо 2013»).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 22 печатные работы в ведущих российских рецензируемых научно-технических изданиях, включённых в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), из них 16 работ опубликованы в рецензируемых журналах перечня ВАК. Получены 3 патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав и приложения. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка, 32 таблицы. Библиография включает 70 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении рассказано о развитии трибоматериаловедения как части триботехники, о ведущих советских и российских научных школах по триботехнике и об авторах заложивших основы данного направления.

В первой главе обоснована актуальность работы, необходимость разработки нового теплостойкого антифрикционного углепластика для высокоскоростных подшипников насосов и паровых турбин. Перечислены цели диссертационной работы и решаемые задачи. Приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена научная новизна полученных результатов, их достоверность, дан обзор существующих современных антифрикционных полимерных и армирующих материалов, приведена технология получения композитов и переработки термопластов.

Отмечается, что применение современных теплостойких связующих позволит повысить теплостойкость и прочность углепластика, а также позволит решить проблему энергоэффективности паровых турбин и насосов энергетических установок.

Повышение теплостойкости композиционного материала на основе новых теплостойких термопластов обусловлено структурой полимерного связующего. В качестве структурирующихся систем на основе термопластичных связующих особый интерес представляет частично-кристаллический полифениленсульфид. При этом повышение теплостойкости композита достигается за счет формирования кристаллической фазы в объеме композита.

Вторая глава посвящена методам исследования теплостойких термопластичных матриц и полимерных композиционных материалов на их основе.

С помощью методов термогравиметрического анализа и дифференциально-сканирующей калориметрии были определены: температура деструкции, плавления, стеклования и кристаллизации полимерной матрицы – важные температурные значения для определения технологических параметров изготовления углепластика. Динамомеханическим методом определялись вязкоупругие свойства термопластичной матрицы в зависимости от температуры переработки.

В процессе исследований определялись физико-механические свойства и триботехнические характеристики углепластика. Изучалась микроструктура поверхности трения углепластика методами растровой электронной микроскопии.

Исследование физико-механических свойств (разрушающих напряжений при растяжении, сжатии, изгибе) при различных температурах производились по соответствующим Государственным стандартам на испытательной машине Shimadzu AG-50kNX. Для исследования микроструктуры поверхности трения углепластиков и контртелами использовались растровый электронный микроскоп FEI Quanta 200 3D FEG.

Для оценки водопоглощения проводились теплостатические испытания на стенде ОАО «ЦКБМ» в среде – дистиллированной, перегретой воды, с температурой 200°C, давлением 6-8 МПа. Длительность испытаний составляла 216 часов.

Лабораторные триботехнические испытания в данной работе проводились по экспресс методике, разработанной Институтом Машиностроения им. Благонравова РАН, а затем усовершенствованной в ИПМаш РАН Точильниковым Д.Г. и Гиндзбургом Б.М. на машине трения марки ИИ5018 Ивановского завода «Точприбор» по схеме вал – частичный вкладыш, имитирующей условия эксплуатации опорного подшипника. Конструкция машины позволяет проводить испытания при трении в воде, а так же в условии сухого трения при различных температурах и скоростях скольжения.

В третьей главе на основании анализа литературных данных и ранее проведенных экспериментальных исследований теплостойких связующих сформулированы критерии выбора теплостойкой матрицы и армирующего материала.

Для теплостойкого связующего с целью обеспечения максимальной термостойкости полимерной матрицы необходимо применение полимеров, состоящих из ароматических колец, т.е. он должен принадлежать к группе полигетероариленов. Кроме того, для гибкости цепи без снижения ее термостойкости полимер должен содержать «шарнирные узлы»-«спейсеры», например, сульфидные группы у ПФС, которые обеспечивают «вращение» цепи. При этом сульфидная группа не должна гидролизироваться (взаимодействовать с водой) и способствовать водопоглощению. Молекулярная и надмолекулярная структура частично-кристаллической термопластичной матрицы должны обуславливать стабильные триботехнические характеристики узла трения в интервале температур до 200°C.

Армирующий материал должен обладать антифрикционными свойствами и не должен изменять размеров при взаимодействии с водой. Структура ткани должна иметь развитую пористую наноструктуру, которая обеспечивает «напитывание» углепластика смазывающей средой при первичном контакте, что позволяет ему работать в условиях кратковременного сухого и граничного трения. Наилучшим образом, данным условиям удовлетворяет низкомолекулярные углеродные волокна, в которой поры диаметром 2-4 нм соединены между собой ультрамикropорами (диаметр не более 0,4 нм). При этом удельная пористость таких волокон более 100-150 м²/г, предельный объем сорбционного пространства W_s (по парам воды) более 0,2 см³/г, средний радиус микropор 0,5-2,0 нм.

Четвертая глава посвящена выбору теплостойкой матрицы, приведены результаты экспериментальных исследований выбранного термопластичного полимера и углепластика на его основе.

На основе анализа литературных данных и по совокупности технологических свойств в качестве теплостойкой термопластичной матрицы был выбран полифениленсульфид.

Полифениленсульфид принадлежит к классу полигетероариленов – теплостойких термопластов. Наряду с высокой теплостойкостью, прочностью, гидролизо-химической

стойкостью и хорошими диэлектрическими и антифрикционными свойствами он имеет неудовлетворительные технологические свойства. Он практически не растворяется в общедоступных растворителях, что делает невозможным изготовление препрегов по традиционной растворной технологии. Теплостойкие термопласты имеют высокую вязкость расплава (на 2-3 порядка выше эпоксидных и фенольных связующих) и перерабатываются при температурах 300-400°C.

Полифениленсульфид выпускается многими крупными иностранными фирмами, такими как China Lumena New Materials, Solvay(прежде Chevron Philips), Chengdu Letian, DIC Corporation, Kureha, Fortron (совместное производство Kureha and Ticona), Toray Industries, and Tosoh и доступен на российском рынке.

В работе были использованы линейные частично кристаллический полифениленсульфид (Fortron) производства фирмы Ticona марок 0214B1, 0205B4 и 0320B0, различающиеся молекулярной массой. Значения молекулярной массы полифениленсульфида различных марок составляли 50000, 30000 и 90000 соответственно. Вязкость расплава варьировалась в диапазоне от 10 до 400 Па·с.

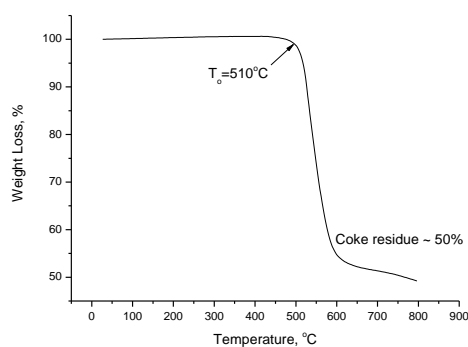


Рисунок 1. Температурная зависимость потери массы образца исходного порошка ПФС-4.

По результатам ТГА (рисунок 1), можно сделать вывод, что для ПФС температура начала термодеструкции T_0 510°C достаточно высока для того, чтобы можно было проводить переработку порошка через расплав при температурах 300-350°C в блочные образцы или в углепластик, не опасаясь его термодеструкции.

Определение прочностных характеристик проводились в режиме одноосного растяжения блочных образцов полифениленсульфида различных марок в аморфном и закристаллизованном состоянии. По результатам испытаний были получены значения модуля упругости E , предела пластичности σ_n , напряжения и деформации при разрушении образца σ_p и ϵ_p , соответственно. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики полифениленсульфида различных марок.

Тип материала	Свойства материала			
	E , ГПа	σ_n , МПа	σ_p , МПа	ϵ_p , %
ПФС №1 аморфный	2.21 ± 0.02	-	22 ± 2	1.1 ± 0.2
ПФС №2 аморфный	1.98	-	29	2.1
ПФС №2 кристаллизованный	2.26 ± 0.02	-	30 ± 2	1.5 ± 0.2
ПФС №3 аморфный	2.10 ± 0.03	77 ± 1	45-55 *	14 ± 1
ПФС №3 кристаллизованный	2.12 ± 0.01	80	79 ± 1	8 ± 1
ПФС №4 аморфный	1.71 ± 0.03	60	30-50 *	18 ± 3
ПФС №4 кристаллизованный	2.01 ± 0.01	77 ± 1	40-55 *	18 ± 1

Условия получения блочных образцов

T_n – температура литьевой формы, $T_{пр-ф}$ – температура пресс-формы.

ПФС-1(Fortron 0214B1): T_n 295°C, $T_{пр-ф}$ 80°C. Образцы черно-коричневые, непрозрачные. Кристаллизация уже готовых образцов, $T_{кр}$ 120°C, кристаллизацию проводили непосредственно в пресс-форме, в течение 10мин.

ПФС-2(Fortron 0214B1): T_n 295°C, $T_{пр-ф}$ 80°C. Образцы черно-коричневые, непрозрачные. Кристаллизация уже готовых образцов, $T_{кр}$ 135°C, кристаллизацию проводили непосредственно в пресс-форме, в течение 10мин.

ПФС-3(Fortron 0205B4): T_n 295°C, $T_{пр-ф}$ 80°C. Образцы светло-коричневые, непрозрачные. Кристаллизация уже готовых образцов, $T_{кр}$ 120°C, кристаллизацию проводили непосредственно в пресс-форме, в течение 10мин.

Для образцов ПФС-3 замечено, что еще в процессе их получения цвет образцов меняется на более светлый и приобретает молочный оттенок, как после кристаллизации.

ПФС-4(Fortron 0320B0): T_n 295°C, $T_{пр-ф}$ 80°C. Образцы светло-коричневые, прозрачные. Кристаллизация уже готовых образцов, $T_{кр}$ 135°C, кристаллизацию проводили непосредственно в пресс-форме, в течение 10мин.

ПФС-4(Fortron 0320B0): T_n 350°C, $T_{пр-ф}$ 80°C. Образцы светло-коричневые, прозрачные. Кристаллизация уже готовых образцов, $T_{кр}$ 135°C, кристаллизацию проводили непосредственно в пресс-форме, в течение 10мин.

На процесс разрушения ПФС значительное влияние оказывают молекулярная масса исходного полимера и степень кристалличности образцов. Низкомолекулярные ПФС (ПФС-1 и ПФС-2) становятся хрупкими уже при низких деформациях независимо от степени кристалличности. Образцы ПФС №2 проявили тенденцию к растрескиванию уже при их закреплении в зажимы. Образцы ПФС-3 становятся хрупкими только в закристаллизованном состоянии.

Процесс разрушения образцов аморфного ПФС-3 и ПФС-4 с любой степенью кристалличности носит пластический характер. В связи с этим, определение конкретных значений прочности материала σ_p не представляется возможным (см. рисунок 2).

Испытаны образцы ПФС №4, полученные из расплава с температурой 350°C. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2 - Характеристики образцов полифениленсульфида №4.

Тип материала	Свойства материала			
	E, ГПа	σ_n , МПа	σ_p , МПа	ε_p , %
ПФС №4 аморфный, $T_{обр}=350^0$	1.62 ± 0.06	62 ± 1	33-48	186-276
ПФС №4 крист., $T_{обр}=350^0$	1.93 ± 0.03	79	49-50	27-76

Как видно из полученных результатов, образцы ПФС №4 практически не отличаются от испытанных ранее, отлитых из расплава с температурой 295°C, по величинам модуля упругости и предела пластичности, но значительно превосходят их по деформируемости. Кристаллические образцы разрушались в процессе распространения «шейки».

Кристаллические участки нельзя рассматривать просто как твердые частицы инертного наполнителя. Будучи связаны с аморфными частями множеством «проходных» молекул, они приобретают роль «зажимов», скрепляющих подвижные цепи и в той или иной мере структурируют полимер в целом. Поэтому деформационные свойства аморфно-кристаллических полимеров существенно зависят от степени кристалличности.

Данные результаты получены впервые и требуют углубленного изучения.

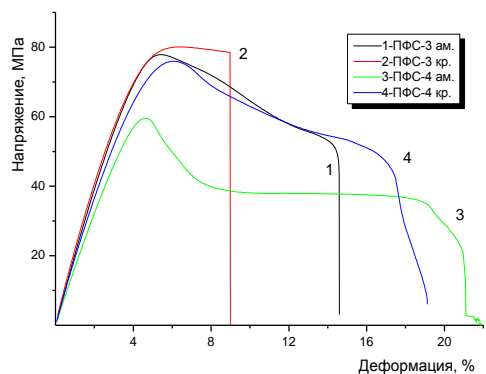


Рисунок 2. Деформационные кривые блочных образцов ПФС-3 и ПФС-4, полученных при температуре расплава 295°C.

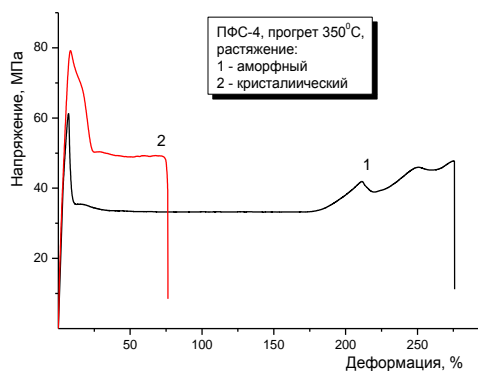


Рисунок 3. Деформационные кривые блочных образцов ПФС №4, полученных при температуре расплава 350°C.

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии были получены кривые ДСК для образца ПФС-4 – ненаполненного полифениленсульфида фирмы Ticona марки Fortron 0320V0, поставляемого в виде порошка (рисунок 4 и рисунок 5).

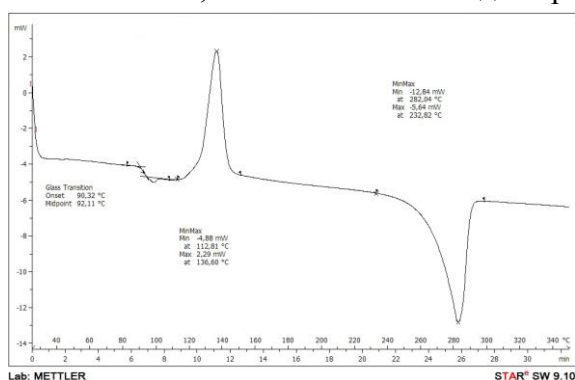


Рисунок 4. ДСК кривая образца ПФС-4 в исходном состоянии.

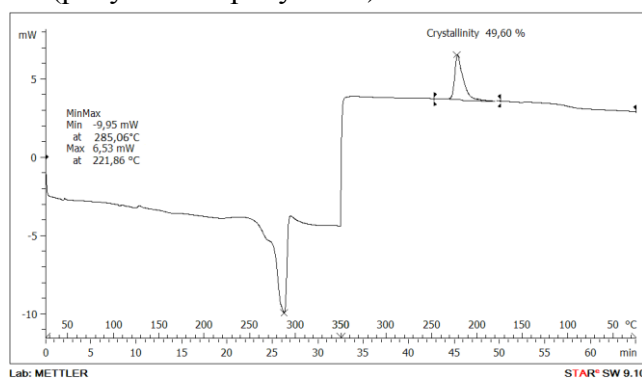


Рисунок 5. ДСК кривая образца ПФС-4.

При нагревании образца четко видны температура стеклования ($T_g=93^\circ\text{C}$), температура «холодной» кристаллизации ($T_{кр}=135^\circ\text{C}$) и температура плавления ($T_{пл}=282^\circ\text{C}$). При повышении температуры выше T_g , подвижность молекул растет очень быстро. Это позволяет молекулам взаимно ориентироваться, что приводит к «холодной» кристаллизации. Этот процесс проявляется как экзотермический пик с максимумом при 135°C во время первого нагревания. Появление этого пика объясняется тем, что при медленном нагревании полимера фрагменты цепи стремятся принять термодинамически наиболее выгодное положение (регулярную упорядоченную форму).

Отчетливое проявление температур релаксационных переходов свидетельствует о том, что изначально образец имел очень малую степень кристалличности. При повторном нагреве пики, соответствующие температуре стеклования и кристаллизации, отсутствуют, это свидетельствует о высокой степени кристалличности образца. Немаловажным является присутствие пика кристаллизации из расплава при температуре 221°C . Программный комплекс прибора позволяет вычислить степень кристалличности образца при данной скорости охлаждения, которая составляет $\sim 50\%$.

Полученные температуры релаксационных переходов позволяют правильно подобрать технологические параметры изготовления теплостойкого углепластика, обеспечивающие высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики.

Исследование влияния температуры и водопоглощения на физико-механические характеристики теплостойкого углепластика на основе ранее выбранного термопластичного связующего(полифениленсульфида) и низкомолекулярной углеродной ткани(УПФС) проводили на образцах в виде пластин и брусков размерами 30x10x10мм, 120x15x5мм, 10x10x10мм. Результаты испытаний представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Физико-механические характеристики антифрикционного углепластика УПФС

Наименование параметра	Значения показателей					
	До выдержки в теплостате			После выдержки в теплостате		
	20°С	110°С	210°С	20°С	110°С	210°С
Плотность, кг/м ³ при 20°С	1430	-	-	-	-	-
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	372	280	138	291	214	125
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	408	-	-	341	292	177
Модуль при сжатии, МПа	3,29	3,20	3,04	3,24	3,17	3,16
Модуль при изгибе, МПа	15,02	-	-	12,92	11,86	9,71

Термопластичный углепластик УПФС относится к частично кристаллическим полимерам, содержит 60% кристаллической фазы и 40% аморфной фазы. Как было установлено выше, температура стеклования аморфной фазы 130-135°С, температура плавления 290-320°С. При температуре стеклования аморфной фазы прочность ПФС снижается на 45-50%, но кристаллы и армирующая ткань выполняют функцию «арматуры» и обеспечивают достаточно высокие прочностные показатели до 200°С (включительно).

Основной целью данной работы является создание антифрикционного материала, способного длительно работать в условиях повышенных температур, при этом обеспечивая размерную стабильность подшипника скольжения. Особенно важным это становится при работе с перегретыми жидкостями. Для оценки водопоглощения были проведены теплостатические испытания на стенде ОАО «ЦКБМ» в среде – дистиллированной, перегретой воды, с температурой 200°С, давлением 6-8 МПа. Испытания проводились на специальных образцах из углепластика марки УПФС в виде колец, пластин и брусков. Длительность испытаний составляла 216 часов.

В результате испытаний было установлено, что на образцах в виде колец максимальное относительное изменение внешнего и внутреннего диаметра кольца после выдержки в теплостате составляет 0,09% и -0,1% соответственно, для пластины выдержка в теплостате приводит к уменьшению длины образца на 0,23% и увеличению ширины и толщины на 0,15% и 0,64% соответственно. После выдержки в теплостате длина бруска увеличивается на 0,11%, а ширина и толщина на 0,15% и 0,34% соответственно. Полученные зависимости изменения линейных размеров от температуры воды образцов УПФС в результате водопоглощения согласуются с общими закономерностями поведения полимерных материалов при диффузии воды, согласно которым, скорость диффузионных процессов повышается с температурой воды.

В рамках данной работы был проведен целый ряд лабораторных триботехнических испытаний, который показал преимущество теплостойкого антифрикционного углепластика УПФС перед базовыми эпоксидным(УГЭТ) и фенольным(ФУТ) в условиях сухого трения и со смазкой водой.

Механизм трения углепластика УПФС условно можно разделить на 2 режима: трения углепластика по металлу и трение углепластика по слою переноса полимера на металле. При испытаниях с водяной смазкой (рисунок 6 и рисунок 7) интенсивность изнашивания УПФС по сравнению с базовыми углепластиковыми ФУТ и УГЭТ в 1,5 и 3 раза

ниже соответственно. Это объясняется тем, что в данном случае трение углепластика УПФС происходит по первому режиму, и наименьшая интенсивность изнашивания достигается за счет большей теплостойкости матрицы. Несмотря на такую низкую интенсивность изнашивания применение теплостойкого углепластика для работы в холодной воде нецелесообразно в силу его стоимости.

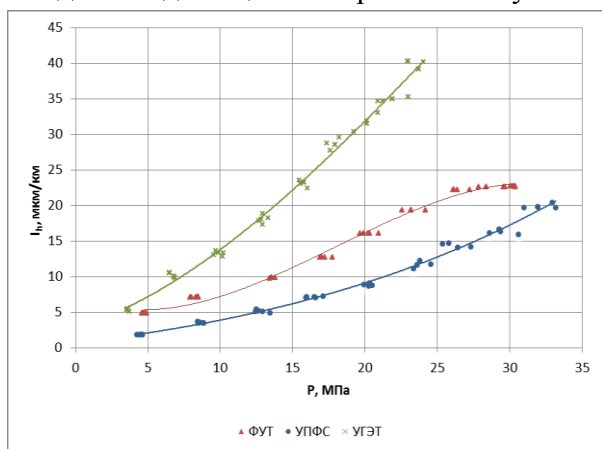


Рисунок 6. Зависимость линейной интенсивности изнашивания (I_n мкм/км) от контактного давления (P МПа), в условиях смазки проточной водой по стали 14X17H2, скорость скольжения 1 м/с.

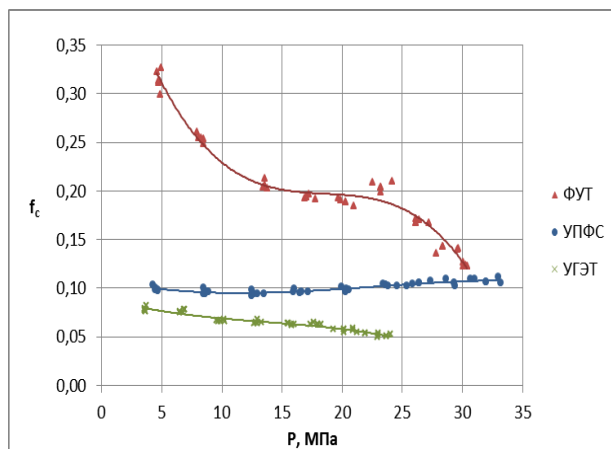


Рисунок 7. Зависимость коэффициента трения (f_c) от контактного давления (P МПа), в условиях смазки проточной водой по стали 14X17H2, скорость скольжения 1 м/с.

Анализ триботехнического поведения исследованного теплостойкого углепластика УПФС в условиях сухого трения при повышенных температурах подтвердил, что важнейшую роль в процессах трения этого материала по стали в жестких температурных режимах играет эффект массопереноса полимерного связующего на контртело.

В области температур 150°C и выше с условиях сухого трения, характерно существенное снижение интенсивности изнашивания (рисунок 8) и коэффициента трения (рисунок 9) при переходе от первого ко второму режиму трения – от трения полимера по металлу к трению его по слою переноса полимера на металле.

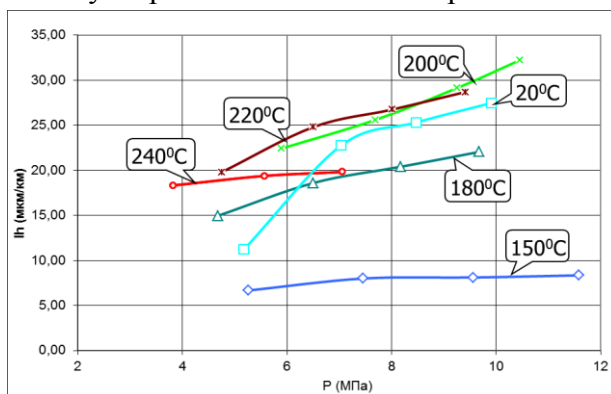


Рисунок 8. Зависимость линейной интенсивности изнашивания (I_n мкм/км) от контактного давления (P МПа), в условиях сухого трения углепластика УПФС по стали 14X17H2, скорость скольжения 1 м/с, при различных температурах.

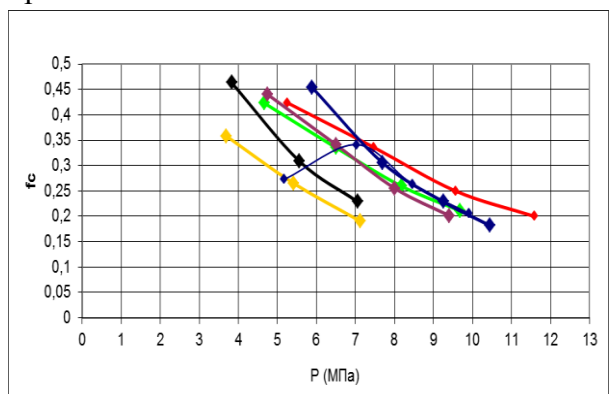


Рисунок 9. Зависимость коэффициента трения (f_c) от контактного давления (P МПа), в условиях сухого трения по стали 14X17H2, скорость скольжения 1 м/с при различных температурах.

После окончания триботехнических испытаний на поверхности стального контртела визуально наблюдается четкий след трения в виде тонкого слоя полимерного материала. Этот слой характеризуется высокой адгезией к поверхности металла. За счет образования этого устойчивого слоя переноса происходит глубокое изменение

качественного характера процесса трения, а следовательно, и количественных характеристик этого процесса.

Наименьшая интенсивность изнашивания при температуре 150°C объясняется тем, что трение уже происходит по второму режиму, но углепластик при данной температуре еще незначительно потерял свои прочностные характеристики.

Дополнительно были проведены сравнительные триботехнические испытания углепластика УПФС с импортными аналогами антифрикционных материалов на основе полифениленсульфида и высокомодульной ткани по стали марки 14X17H2, которые показали, что во всем диапазоне нагрузок углепластик УПФС на основе низкомодульной углеродной ткани показывает интенсивность изнашивания и коэффициент трения значительно ниже, чем у углепластиков на основе высокомодульной ткани.

Утверждение о механизме изнашивания подтверждается снимками поверхности трения, полученными с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для сравнения на рисунке 10 приведены фотографии поверхности фенольного углепластика ФУТ. Видно, что поверхность трения углепластика УПФС – сглаженная, а на поверхности трения ФУТ видны куски ломаных волокон и связующего.

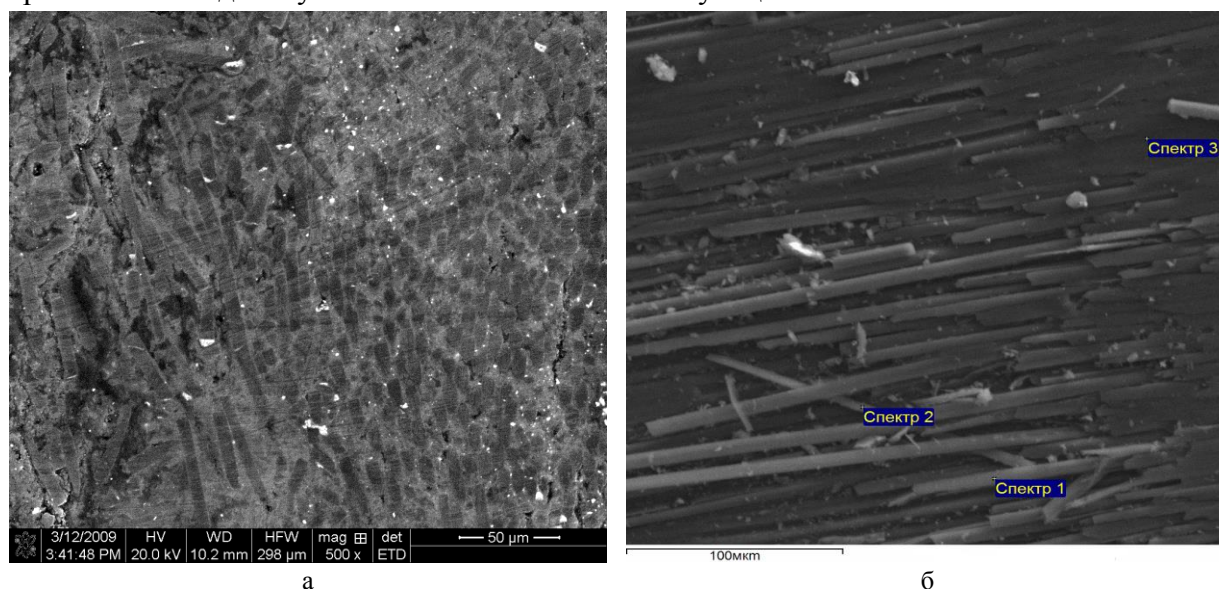


Рисунок 10. Поверхность трения УПФС(а) и ФУТ(б) полученные с помощью РЭМ.

Пятая глава посвящена разработке технологии изготовления теплостойкого антифрикционного углепластика обеспечивающая высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики.

Технологию изготовления подшипников из углепластика УПФС условно можно разделить на 3 этапа:

- Первый этап заключается в изготовлении препрега по расплавной технологии;
- Второй этап - горячее прессование;
- Третий этап - ультразвуковой контроль заготовок и механическая обработка.

Технологический процесс получения препрега производится по расплавной технологии на пропиточной машине марки ТМА-600-1 фирмы «MIKROSAM» (Македония). Необходимо отметить, что данная технология позволяет получить содержание связующего до 60% масс. Экспериментальным путем было установлено, что наилучшее соотношение связующего и армирующего материала для антифрикционного применения соответствует 40% масс к 60% масс.

Температура и режим прессования выбирались исходя из температурных значений, полученных методами ДСК, ТГА. Было установлено, что для обеспечения высоких механических свойств, триботехнических и эксплуатационных характеристик необходимо прессование проводить по следующему режиму: нагрев до 320°C и выдержка 60 мин; охлаждение на воздухе до 220°C, выдержка 30 мин; естественное охлаждение.

Были проведены исследования необходимости этапа прессования после намотки втулки. По снимкам поверхности (Рисунок 11) видно, что в композите, полученном намоткой, в середине нитей видны зоны, где отсутствует связующее, что в дальнейшем скажется на прочностных характеристиках углепластика при увеличении температуры рабочей среды. В углепластике после этапа прессования такие зоны отсутствуют.

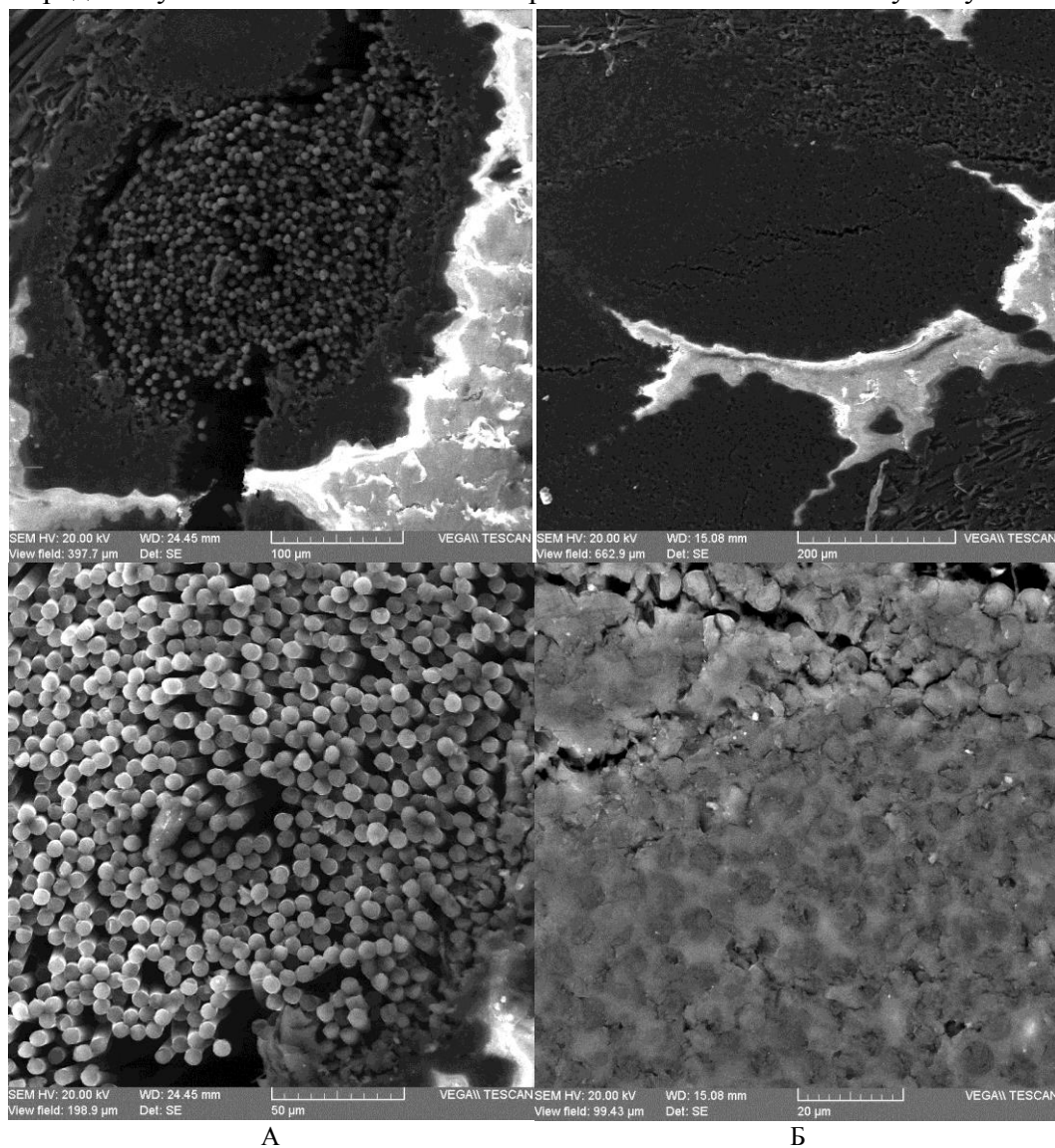


Рисунок 11. Микроструктура Структура углепластика УПФС после намотки (А) и после прессования(Б).

Заключительным этапом производства изделий из теплостойкого антифрикционного углепластика является ультразвуковой контроль заготовок и механическая обработка.

В шестой главе исследованы эксплуатационные свойства подшипников скольжения из разработанного теплостойкого углепластика УПФС и приведены результаты стендовых испытаний.

Стендовые триботехнические испытания термопластичного углепластика марки

УПФС в паре со сталью 20Х13 проводились ОАО «ЦКБМ» на стенде марки 521Л, имитирующем работу упорного подшипника центробежного насоса.

В результате испытаний было установлено, что углепластик марки УПФС в паре со сталью 20Х13 работоспособен при максимально допустимой рабочей температуре воды на стенде (200°С) и удельной мощности трения $PV_{ср} = 9,6$ МПа м/с, что соответствует требованиям предъявляемым к упорным подшипникам центробежного насоса.

Перед установкой подшипника из антифрикционного углепластика УПФС в узлы трения паровых турбин были проведены длительные стендовые испытания. Испытания проводились в ОАО «НПО ЦКТИ», на стенде, имитирующем работу опорного подшипника паровой турбины. Для сравнения были проведены испытания углепластика на основе фенолформальдегидного связующего ФУТ-Б.

В результате стендовых испытаний опорных подшипников паровых турбин доказаны высокая работоспособность углепластика УПФС, повышенная несущая способность (до 4 МПа) при минимальной температуре на поверхности подшипника (до 55°С) и возможность применения взамен традиционных баббитовых.

Испытания подшипника из углепластика УПФС при «скудной» смазке (~60 л/мин) показали, что при нагрузке 2,5 МПа и постепенном снижении частоты вращения с 3000 до 500 мин⁻¹ температура поверхности вставки не превысила 58°С. При этом расход смазки был снижен в 3–4 раза относительно расхода смазки в условиях станции.

Стендовые испытания подшипников скольжения из разработанного теплостойкого углепластика УПФС позволили оценить его эксплуатационные свойства – работоспособность, ресурс, допустимые константные давления и скорости скольжения, а так же правильность технических решений по конструктивному исполнению.

Седьмая глава посвящена результатам внедрения разработанного теплостойкого углепластика УПФС в конструкцию насосов и паровых турбин.

Совместно с ОАО "Пролетарский завод" была разработана конструкция узла трения так называемая «обратная пара» и отработана технология изготовления подшипника насоса с нанесением материала УПФС на металлическую оправку. Применение обратной пары позволяет надежно закрепить подшипник на валу насоса, а так же повысить теплоотвод и существенно удешевить сам подшипник. На данную разработку в 2011 году получен патент(№ 110150).

В настоящее время подшипники из углепластика УПФС успешно эксплуатируются в питательном насосе ПН-1500-350-4М1 производства ОАО «Пролетарский Завод» на Березовской и Нижневартонской ГРЭС. Нарботка подшипников на данный момент составила 16500 часов. Питательные насосы предназначены для подачи питательной воды в котлы тепловой электростанции с энергетическими блоками мощностью от 250 МВт до 1200 МВт. Питательные насосы входят в состав турбонасосных и электронасосных агрегатов и устанавливаются в машинном зале электростанции.

В 2014 году рубашки из углепластика УПФС поставлены в составе конденсатных насосов КЭНА 2000-100-1 и КЭНА2245-220-1 на Новоронежскую АЭС-2 и Ленинградскую АЭС-2 и ждут запуска в эксплуатацию.

Совместно с ОАО "НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова" была разработана конструкция опоры скольжения из углепластика УПФС для турбогенераторов с диаметром шейки вала 300 и 600 мм.

Данные разработки защищены патентами «Разъемный вкладыш опорного

подшипника», патент №1333573, «Вкладыш опорного подшипника», патент №146101) и внедрены в конструкцию турбогенератора АР-6 производства ОАО «КТЗ», на ТЭЦ ОАО «НПО ЦКТИ», который уже успешно отработал в течении 3400 часов и после замеров будет передан для дальнейшей эксплуатации.

Выводы:

1. Решена актуальная научная проблема – создан и внедрен в турбостроении, насосостроении теплостойкий, высокопрочный антифрикционный углепластик на основе частично-кристаллической матрицы (полифениленсульфид) и низкомолекулярных углеродных волокон с высокоразвитой наноструктурой;
2. Сформулированы, научно обоснованы и экспериментально проверены критерии выбора теплостойкой полимерной матрицы и армирующей углеродной ткани, обеспечивающие высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики:
 - молекулярная и надмолекулярная структура частично-кристаллической термопластичной матрицы должны обуславливать стабильные триботехнические характеристики узла трения в интервале температур до 200°C;
 - углеродные волокна, для облегчения реверсивного перехода перекачиваемой (смазывающей) жидкости (перегретая вода, масло и др.) в процессе фрикционного взаимодействия, должны иметь удельную пористость более 100-150 м²/г, предельный объем сорбционного пространства W_s (по парам воды) более 0,2 см³/г, средний радиус микропор (коэффициент Породу l_p) 0,5-2,0 нм;
3. Исследованы зависимости физико-механических свойств и триботехнических характеристик антифрикционного углепластика от температуры. Выявлено, что при температуре 210°C прочность при сжатии 140 МПа, что составляет 40% от исходной. Данное значение прочности удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к «горячим» подшипникам насосов;
4. Исследованы механизм изнашивания, структура поверхности трения углепластика методами растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального анализа. Показано, что в условиях сухого трения на поверхности трибоконтакта образуется слой массопереноса полимера, что приводит к снижению коэффициента трения в 2 раза.
5. Выявлены особенности влияния сорбции воды на размерную стабильность теплостойкого антифрикционного углепластика на основе полифениленсульфида в условиях работы при повышенных температурах. Установлено, что углепластик УПФС сохраняет высокую размерную стабильность, соответствующую эксплуатационным требованиям, за счет высокой водостойкости полимерной матрицы (менее 0,02%), углеродной ткани и технологии изготовления углепластика;
6. Разработана технология изготовления теплостойкого антифрикционного углепластика обеспечивающая высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики, за счет выбора оптимального содержания полимерной матрицы - 40% и повышения ее степени кристалличности до 50%. Прессование углепластика УПФС необходимо проводить по режиму: нагрев до

320°C и выдержка 60 мин, охлаждение на воздухе до 220°C, выдержка 30 мин, естественное охлаждение.

7. На основе результатов материаловедческих исследований разработаны новые технические решения для конструкций подшипников скольжения насосов и опор скольжения паровых турбин. Для подшипников скольжения насосов разработана конструкция обратной пары трения, которая за счет снижения толщины слоя углепластика позволяет надежно крепить подшипник на валу насоса и повысить теплоотвод;
8. На основании длительных стендовых испытаний упорного подшипника центробежного насоса (по методике ОАО «ЦКБМ»), доказана работоспособность углепластика марки УПФС в паре со сталью 20Х13 при максимально допустимой рабочей температуре воды на стенде (200°C) и удельной мощности трения $PV_{cp} = 9,6$ МПа м/с;
9. В результате стендовых испытаний опорных подшипников паровых турбин в ОАО «НПО ЦКТИ» доказаны работоспособность углепластика УПФС, повышенная несущая способность (до 4 МПа) при минимальном температуре на поверхности подшипника (до 55°C) и возможность применения взамен традиционных баббитовых;
10. Осуществлена практическая реализация разработок и внедрение подшипников скольжения из антифрикционных теплостойких углепластиков в питательных насосах Нижневартовской ГРЭС, Березовской ГРЭС, в конденсатных насосах Нововоронежской АЭС-2, Ленинградской АЭС-2 и опорного подшипника для задней опоры генератора турбины АР-6 производства ОАО «КТЗ», на ТЭЦ ОАО «НПО ЦКТИ»;
11. Под руководством и при непосредственном участии автора разработана техническая документация (ТУ2256-062-07516250-2011, ТУ5.966-11988-2010), включающая технические условия на созданный материал и различные типы изделий;
12. Результаты проведенной работы отражены в одном справочнике и 22 публикации в научно-технических журналах. Отдельные разделы работы докладывались на 8 различных всероссийских и международных научных конференциях и семинарах. Новизна разработанного углепластика подтверждена 3 патентами РФ.

Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих научных трудах:

1. **Лишевич И.В.**, Кузнецов А.А., Семенова Г.К., Бахарева В.Е., Савелов А.С., Карлова Е.П. Модификация антифрикционных эпоксидных углепластиков дисульфидом молибдена.//**Вопросы материаловедения.**-2009.-№1(57).- С.52-56.
2. **Лишевич И.В.**, Неганов В.А., Макаров И.А., Блышко И.В., Савелов А.С., Саргсян А.С. Углеродные наномодификаторы.//**Вопросы материаловедения.**-2009.-№1(57).- С.57-65.
3. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Саргсян А.С., Скобелева Е.Л. Теплостойкий антифрикционный углепластик на основе полифениленсульфида.//**Вопросы материаловедения.**-2009.-№1(57).- С.111-115.

4. **Лишевич И.В.**, Юдин В.Е., Светличный В.М., Кудрявцев В.В., Бахарева В.Е., Саргсян А.С., Попова Е.Н. Сравнительные исследования вязкоупругих и трибологических характеристик углепластиков на основе теплостойких полимерных связующих.//**Вопросы материаловедения.**-2009.-№1(57).- С.132-140.
5. **Лишевич И.В.**, Поздняков О.Ф., Баскин А.В., Седлецкий Р.В., Гинзбург Б.М., Поздняков А.О. Масс-спектрометрическое исследование механической и термической стабильности полимерных композитов.//**Вопросы материаловедения.**-2009.-№1(57).- С.146-153.
6. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Анисимов А.В., Антифрикционные углепластики в узлах трения центробежных насосов.//**Насосы.Турбины.Системы.**-2011.-№1(1). - С.47-52.
7. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Анисимов А.В., Савелов А.С. Макромодифицированные углепластики для подшипников скольжения гидротурбин.//**Насосы.Турбины.Системы.**-2012.-№1(2). - С.43-51.
8. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Ковалев И.А., Моногаров Ю.И., Саргсян А.С., Эсперов Д.Г., Энрольд С.С. Перспективы применения антифрикционных углепластиков ФУТ-Б и УПФС для подшипников паровых турбин.//**Насосы.Турбины.Системы.**-2012.-№3(4). - С.26-37.
9. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Анисимов А.В., Антифрикционные фенольные углепластики для подшипников центробежных насосов.// **Вопросы материаловедения.**-2012.-№4(72).- С.46-53.
10. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Саргсян А.С. Новый теплостойкий антифрикционный углепластик на основе полифениленсульфида для узлов трения, работающих без смазки и со смазкой перегретой водой.// **Вопросы материаловедения.**-2012.-№4(72).- С.160-170.
11. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Ковалев И.А., Моногаров Ю.И., Саргсян А.С., Эсперов Д.Г., Энрольд С.С. Применение антифрикционных теплостойких углепластиков для подшипников паровых турбин.// **Вопросы материаловедения.**-2012.-№4(72).- С.171-180.
12. **Лишевич И.В.**, Саргсян А.С., Блышко И.В. Антифрикционные теплостойкие композиты на основе полициануратов.// **Вопросы материаловедения.**-2012.-№4(72).- С.181-184.
13. **Лишевич И.В.**, Саргсян А.С., Блышко И.В.,Савелов А.С. Разработка и исследование трибологических характеристик антифрикционных диэлектриков.// **Вопросы материаловедения.**-2012.-№4(72).- С.203-209.
14. **Лишевич И.В.**, Поздняков А.О., Гинзбург Б.М., Попов Е.О., Поздняков О.Ф. Масс-спектрометрические исследования полимеров.// **Вопросы материаловедения.**-2012.-№4(72).- С.265-274.
15. **Лишевич И.В.**, Соснов Е.А., Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Барахтин Б.К., Малыгин А.А., Саргсян А.С. Влияние природы модификатора на механизм изнашивания антифрикционного углепластика в режиме торцевого трения.// **Вопросы материаловедения.**-2012.-№4(72).- С.275-281.
16. **Лишевич И. В.**, Мезрин А.М., Морозов А.В., Сачек Б.Я., Горячева И.Г., Кирюхин Д.П., Бирюкова М.И., Бузник В.М., Анисимов А.В., Бахарева В.Е. Трибологические характеристики эпоксидных углепластиков, модифицированных раствором теломеров тетрафторэтилена.//**Трение и износ.**-2013. Том. 34, №5.-стр.483-489.

17. **Лишевич И.В.**, Горынин И.В., Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Никитина И.В. Теплостойкие антифрикционные углепластики с полимерной матрицей из супертермопластов.// **Вопросы материаловедения.**-2014.-№2(78).- С.85-95.
18. **Лишевич И.В.**, Бахарева В.Е., Маланюк А.И. Подшипники из антифрикционных углепластиков для арматуры транспортных систем.//**Насосы.Турбины.Системы.**-2014.-№1(10). - С.46-52.
19. **Лишевич И.В.**, Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Карпинский Г.С., Никитина И.В. Перспективы применения суперконструкционных термопластов для подшипников скольжения центробежных насосов. //Насосы.Турбины.Системы.-2014.-№3(12). -С.3-14.
20. **Лишевич И.В.**, Орыщенко А.С., Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Антифрикционные углепластики для подшипников скольжения центробежных насосов. Часть 1.//**Химическое и нефтегазовое машиностроение.**-2014.-№5.-стр.34-39.
21. **Лишевич И.В.**, Орыщенко А.С., Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Антифрикционные углепластики для подшипников скольжения центробежных насосов. Часть 2.//**Химическое и нефтегазовое машиностроение.**-2014.-№5.- С.22-26.
22. **Лишевич И.В.**, Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Никитина И.В. Опыт отечественной школы по созданию подшипников из антифрикционных углепластиков для насосов, турбин, арматуры. Проблемы импортозамещения//Насосы.Турбины.Системы.-2015.-№1(14). -С.3-15.
23. **Патент № 110150.** Втулка подшипника скольжения // Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Блышко И.В., Богун В.С., **Лишевич И.В.**, Лобынцева И.В., Маланюк А.И., Саргсян А.С., Бюллетень изобретений №31от 10.11.2011.
24. **Патент №133573.** Разъемный вкладыш опорного подшипника // Николаев Г.И., Бахарева В.Е., **Лишевич И.В.**, Саргсян А.С., Блышко И.В., Ковалев И.А., Моногаров Ю.И., Томашевский А.В., Эсперов Д.Г., Энрольд С.С., Бюллетень изобретений №29 от 20.10.2013.
25. **Патент №146101.** Разъемный вкладыш опорного подшипника // Орыщенко А.С., Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Маланюк А.И., **Лишевич И.В.**, Моногаров Ю.И., Эсперов Д.Г., Бюллетень изобретений №27от 27.09.2014.

Подписано в печать 10.09.2015г. Формат 60x48 1/16
Печать – офсетная. Усл.п.л.1,4.Уч.-изд.л.1.05
Тираж 90 экз. Заказ № 2/111
Отпечатано в типографии ФГУП ЦНИИ «КМ «Прометей»
191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49.
Лицензия на полиграфическую деятельность
Лр №020644 от 13 октября 1997