

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ им. Н.С. ЕНИКОЛОПОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИСПМ РАН)

117393, Москва, ул. Профсоюзная, 70

Тел./факс: (495) 335-91-00

Факс: (495) 718-34-04

e-mail: dir@ispm.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

директор ФГБУН ИСПМ
им.Н.С.Ениколопова РАН
чл.-корр. А.Н.Озерин

«29» октября 2015г.



29.10.2015 № 12114 - 02.2115/273

на № _____

[] [] [] []

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Лишевича Игоря Валерьевича на тему: «Создание антифрикционных теплостойких углепластиков для высокоскоростных подшипников насосов и паровых турбин», представляемую на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 - материаловедение (машиностроение).

Диссертационная работа Лишевича Игоря Валерьевича посвящена разработке и исследованию свойств антифрикционного теплостойкого углепластика для высокоскоростных подшипников насосов и паровых турбин.

Актуальность тематики диссертационной работы несомненна. Она обусловлена высокими требованиями к новым антифрикционным полимерным материалам, предназначенным для работы в особых условиях. В частности, такие материалы должны обладать высокой теплостойкостью, высокими прочностными характеристиками, иметь высокую химическую стойкость, способность длительно работать при температуре до 200°C в контакте с перекачиваемой жидкостью (перегретой водой или турбинным маслом).

Разрабатываемый автором новый высокопрочный теплостойкий антифрикционный углепластик предназначен для замены импортных материалов или устаревших отечественных в узлах трения насосов и энергетических установок и паровых турбин, и должен удовлетворять следующим конкретным техническим требованиям:

- 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.

Представленная диссертационная работа развивает систематические исследования, проводимые во ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» в области создания теплостойких антифрикционных углепластиков и подшипников на их основе.

Для достижения поставленной цели диссертантом решались следующие задачи:

1. Анализ современного состояния производства теплостойких полимерных связующих и рынка армирующих материалов;

2. 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;

3. Исследование характеристик теплостойкого связующего с целью определения технологических параметров изготовления углепластика на его основе;

4. Проведение лабораторных триботехнических, физико-механических испытаний и исследования микроструктуры поверхности трения теплостойкого углепластика;

5. Разработка технологии изготовления теплостойкого углепластика и изделий на его основе. Организация полного цикла по изготовлению подшипников скольжения из нового теплостойкого углепластика;

6. Проведение стендовых и натурных испытаний высокоскоростных подшипников скольжения насосов энергетических установок, паровых турбин, выпуск технической документации.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений и состоит (в сокращенном варианте изложения) в следующем:

1. Сформулированы критерии выбора теплостойкой полимерной матрицы и армирующей углеродной ткани, обеспечивающие высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики. Для полимерной матрицы это: принадлежность к группе полигетероариленов, термопластичность, способность к переносу массы на контртело в процессе трения, наличие кристаллической фазы. Для волокна – принадлежность к типу низкомолекулярных волокон, пористость, характеризуемая удельной поверхностью порядка 100- 150 нм, объемом сорбционного пространства 0.2 см³/г, средним размером пор 2 нм.

2. На основании применения вышеуказанных критериев создан новый высокопрочный теплостойкий антифрикционный углепластик УПФС на основе частично кристаллической термопластичной матрицы -полифениленсульфида (ПФС) и низкомолекулярных углеродных волокон с высокоразвитой наноструктурой для высокоскоростных подшипников скольжения насосов энергетических установок, паровых турбин, работающих в перегретой воде и паре при давлении до 5 МПа и скоростях скольжения до 50 м/с при температуре до 100-200°С; осуществлен выбор оптимального содержания полимерной матрицы - 40%масс и степени кристалличности 50%.

3. Исследован механизм изнашивания при трении. Показано, что в условиях сухого трения на поверхности трибоконтакта образуется слой переноса полимера, что приводит к снижению коэффициента трения в 2 раза.

4. Прямыми экспериментами установлена уникально высокая размерная стабильность разработанного углепластика УПФС, связанная с и низким водопоглощением и высокой гидrolитической стабильностью ПФС.

Практическая значимость результатов работы очевидна и хорошо прослеживается при чтении диссертации, и заключается в следующем:

1. Разработана технология, а также необходимая техническая и технологическая документация. Организован полный цикл производства подшипников скольжения из теплостойкого антифрикционного углепластика УПФС;

2. 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;

3. На основании длительных стендовых испытаний определены эксплуатационные характеристики подшипников скольжения насосов энергетических установок и опор скольжения паровых турбин из разработанного теплостойкого антифрикционного углепластика;

4. Осуществлена практическая реализация разработок и внедрение подшипников скольжения из углепластика УПФС 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»;

Общая характеристика работы. Диссертационная работа Лишевича И.В. логично структурирована и изложена в соответствии с действующими стандартами. Работа изложена на 157 страницах печатного текста, иллюстрирована 34 рисунками, 32 таблицами, состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы. Список цитируемой литературы показывает качественную проработку исследуемой проблемы и включает 70 наименований.

Введение содержит исторический экскурс в области трибоматериаловедения как части триботехники, содержит информацию 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.

Вторая глава посвящена описанию использованных методов 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 данные для определения необходимых технологических параметров изготовления углепластика. Методом динамического механического анализа определяли вязкоупругие свойства термопластичной матрицы и их зависимость от температуры переработки.

В процессе исследований определяли физико-механические свойства и триботехнические характеристики углепластика. Изучали микроструктуру поверхности трения углепластика методами растровой электронной микроскопии.

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

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

Лабораторные триботехнические испытания в данной работе проводили 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. Испытания при трении в воде, а также в условиях 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, обеспечивающие высокие механические свойства, триботехнические и эксплуатационные характеристики в заданных условиях.

Согласно заключению автора, полимерная матрица должна быть термопластичной и принадлежать к группе полигетероариленов – для обеспечения высокой термо – и теплостойкости и химической стойкости. Матрица должна быть по возможности кристаллической – для дополнительного выигрыша в теплостойкости. Матрица должна быть гидролитически устойчивой и не набухать в воде – для обеспечения размерной стойкости при контакте с перегретой водой и водяным паром. Матрица должна проявлять свойство переноса массы на контртело в процессе трения при повышенной температуре. Матрица должна быть по возможности доступной и недорогой.

Армирующий волокнистый 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 удовлетворяют низкомолекулярные углеродные волокна, в которой поры диаметром 2-4 нм соединены между собой нанопорами (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 микропор 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 из имеющегося на сегодня сравнительно большого набора термостойких термопластов в качестве базового полимера автором выбран полифенилсульфид (ПФС), как в наибольшей степени отвечающий сформулированным автором критериям.

Полифениленсульфид практически не растворяется в органических растворителях. Это делает невозможным изготовление препрегов по традиционной растворной технологии, но зато позволяет эксплуатировать материал для перекачки любых жидкостей, что является ценнейшим свойством, отсутствующим у других термостойких термопластов. Хотя ПФС в настоящее время не выпускается в России, он доступен на российском рынке и выпускается многими крупными зарубежными 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.

В диссертационной работе Лишевича И.В. использован линейный частично кристаллический полифениленсульфид (Fortron) производства фирмы Ticona марок 0214B1, 0205B4 и 0320B0.

Автором методами ТГА, ДСК проведены исследования термических свойств образцов ПФС указанных марок, на основании полученных данных определены технологические параметры изготовления теплостойкого углепластика, обеспечивающие его высокие характеристики.

Для оценки водопоглощения были проведены испытания на стенде ОАО «ЦКБМ» в среде перегретой дистиллированной воды с температурой 200°C при давлении 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 ПФС проявляет исключительно высокую размерную стабильность в данных условиях на уровне не более десятых долей процента, что связано с высокой химической стойкостью ПФС.

В рамках диссертационной работы проведен большой 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.

Было установлено, что механизм трения углепластика УПФС условно можно разделить на 2 режима: трения углепластика по металлу и трение углепластика по слою переноса полимера на металле. Это наблюдение подтвердило, что важнейшую роль в процессах трения этого материала по стали в жестких температурных режимах играет эффект массопереноса полимера на контртело. Действительно, как показано автором, в области температур 150°C и выше с условиях сухого трения, характерно существенное снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения при переходе от первого ко второму режиму трения – от трения полимера по металлу к трению его по слою переноса полимера на металле.

Представляют большой интерес проведенные автором сравнительные триботехнические испытания углепластика УПФС и импортных аналогов на основе ПФС и высокомодульной ткани по стали марки 14X17H2. Согласно результатам испытаний, 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.

Пятая глава посвящена разработке технологии изготовления теплостойкого антифрикционного углепластика УПФС, состоящей из трех этапов:

- Изготовление препрега по расплавной технологии;
- Горячее прессование;
- Ультразвуковой контроль заготовок и механическая обработка.

Получение препрега производили по расплавной технологии на пропиточной машине марки ТМА-600-1 фирмы «MIKROSAM» (Македония). Автором установлено наилучшее соотношение связующего и армирующего материала для антифрикционного применения, равное 40% масс к 60% масс. Найден следующий оптимальный режим получения углепластика: нагрев до 320°C и выдержка 60 мин; охлаждение на воздухе до 220°C,

выдержка 30 мин; естественное охлаждение.

При непосредственном участии диссертанта с использованием электронной микроскопии была подтверждена необходимость этапа прессования после намотки втулки. В углепластике после прессования исчезли зоны, где связующее отсутствует.

Ультразвуковой контроль заготовок является логичным заключительным этапом производства изделий из углепластика УГЭТ и обеспечивает обратную связь между качеством изделия и условиями его получения.

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

При участии автора проведены стендовые триботехнические испытания термопластичного углепластика марки УПФС в паре со сталью 20Х13. Они проводились в 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°C) 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°C) 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°C. При этом расход смазки был снижен в 3–4 раза относительно расхода смазки в условиях станции.

В ходе стендовых испытаний подшипников скольжения из разработанного углепластика УПФС были оценены его эксплуатационные свойства – работоспособность, ресурс, допустимые константные давления и скорости скольжения. Во всех случаях была подтверждена правильность выбранных конструктивных решений.

Седьмая глава является логическим завершением диссертационной работы и посвящена результатам внедрения разработанного теплостойкого углепластика УПФС в конструкцию насосов и паровых турбин.

Совместно с ОАО "Пролетарский завод" при непосредственном участии диссертанта 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 питательном насосе ПН-1500-350-4М1 производства ОАО «Пролетарский Завод» на

Березовской и Нижневартонской ГРЭС успешно работают подшипники из углепластика УПФС. 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.

Конденсатные насосы марок КЭНА 2000-100-1 и КЭНА2245-220-1, в которых в рубашках использован материал УПФС, переданы для эксплуатации на Новоронежскую АЭС-2 и Ленинградскую АЭС-2.

Совместно с ОАО "НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова" при участии автора 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.

Успехи, достигнутые автором и изложенные в главе 7, могут быть оценены как выдающиеся.

Выводы по диссертационной работе Лишевича И.В. вполне обоснованы, достоверны и отражают суть выполненной работы, соответствуют современным научным представлениям и не противоречат литературным данным.

Достоверность результатов диссертационного исследования и сделанных на его основе выводов базируется на глубоком анализе большого объема литературных данных и подтверждается согласующимися между собой данными, полученными различными и независимыми между собой современными методами исследований.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 22 печатных работах, 16 из них статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки РФ. Отдельные разделы работы докладывались на 8 различных всероссийских и международных научных конференциях. Новизна разработанного углепластика подтверждена 3 патентами РФ.

Автореферат полностью и правильно отражает основное содержание диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.

Результаты работы уже нашли применение в деталях узлов трения ОАО «Пролетарский Завод» на Березовской и Нижневартонской ГРЭС, на Воронежской и Ленинградской АЭС, ТЭЦ ОАО «НПО ЦКТИ. Безусловно, область применения результатов работы будет расширяться за счет включения в список потребителей организаций, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией насосов и паровых турбин на предприятиях энергетической, атомной, химической промышленности, в судостроении (НИИ Крылова). Внедрение разработанной технологии способствует повышению эффективности, надежности, экологичности, простоты эксплуатации и снижению веса себестоимости изготовления оборудования.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1) В выводе по работе, посвященном критериям выбора связующего, указывается, что полимер должен быть термопластом, чтобы обеспечивать частичный перенос массы на контртело. Это неточное утверждение. Явление переноса не обязательно присуще именно

термопластам; перенесенный слой может образовываться из продуктов механо- и термодеструкции полимеров разных типов. Выбор термопластичного полимера в виде матрицы диктуется, главным образом, другими требованиями (переработка без использования растворителя, экологичность).

2) В выводах по работе следовало бы более конкретно зафиксировать параметры входного контроля, по которым можно сделать вывод о пригодности партии ПФС для приготовления углепластика (молекулярная масса, степень кристалличности, сохранение вязкости расплава после нагревания).

3) Для армирующих волокон, наоборот, в выводах дан излишне большой набор количественных характеристик (удельная поверхность, размер пор, и тд). Так как набор количественных характеристик может изменяться от партии к партии, то в случае отклонения одного из параметров трудно будет принять решение о пригодности той или иной партии волокна. Достаточно было бы ограничиться указанием типа волокна (низкомодульное, неграфитизированное, получено пиролизом вискозы) и одним ключевым параметром, например, удельной поверхностью.

4) В литературном обзоре следовало бы указать конкретные марки антифрикционных материалов на ПФС.

5) В части диссертации и автореферата, относящейся к характеристике связующего, имеются терминологические неточности. Так температура плавления ошибочно отнесена к релаксационным переходам, тогда как на самом деле это фазовый переход.

6) В качестве пожелания отметим, что так как не только молекулярная масса, но и молекулярно-массовое распределение могут влиять на процесс трения, хорошо бы исследовать этот вопрос в дальнейшем, хотя бы на примере искусственно приготовленных смесей высоко- и низкомолекулярного ПФС.

Указанные в отзыве недостатки не снижают значимости и общей очень высокой оценки выполненной соискателем работы.

Заключение

В целом, диссертация Лишевича Игоря Валерьевича «Создание антифрикционных теплостойких углепластиков для высокоскоростных подшипников насосов и паровых турбин» является целостной и законченной научно-квалификационной работой, выполненный на высоком научном уровне, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи- создания нового теплостойкого антифрикционного углепластика с целью повышения технологических и эксплуатационных свойств узлов трения.

По критериям актуальности темы, научной новизны, практической значимости полученных результатов диссертационная работа полностью соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Лишевич Игорь Валерьевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 - материаловедение (машиностроение).

Отзыв ведущей организации составлен доктором химических наук по специальности 02.00.06 высокомолекулярные соединения, заведующим лабораторией твердофазных химических реакций, профессором Александром Николаевичем Зеленецким.

Диссертационная работа и автореферат рассмотрены на расширенном коллоквиуме лаборатории № 3 ИСПМ РАН «26» октября 2015 г., протокол № 4. Отзыв в основных своих положениях одобрен коллоквиумом, окончательный текст отзыва дополнен сделанными на коллоквиуме замечаниями.

Заведующий лабораторией
ФГБУН Института синтетических
полимерных материалов им. Н.С.Ениколопова
Российской Академии Наук
доктор химических наук, профессор

Александр Николаевич Зеленецкий

Подпись заведующего лабораторией
ФГБУН Института синтетических
полимерных материалов им. Н.С.Ениколопова РАН
подтверждаю:
Ученый секретарь института
к.х.н.



Т.В. Попова

Почтовый адрес института:
117393, Россия, г. Москва
ул. Профсоюзная, дом 70
ИСПМ им. Н.С.Ениколопова РАН
E-mail: dir@ispm.ru
Тел. +7(495)335-9100
Факс+7(495)718-3404