

На правах рукописи

КОЛПАЧКОВ ЕГОР ДМИТРИЕВИЧ

**ГИБРИДНЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ
ДЛЯ ЛОПАСТЕЙ ТУРБОВИНТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»)

Научный руководитель: **Петрова Алефтина Петровна**
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
лаборатории 614 ФГУП «ВИАМ»

Официальные оппоненты: **Шибряева Людмила Сергеевна**
доктор химических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории
ФГБУН «Институт биохимической физики
им. Н.М. Эмануэля Российской академии
наук»
Кривонос Валерий Васильевич
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, преподаватель кафедры
104 ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)»

Ведущая организация АО «Центральный научно-
исследовательский институт специального
машиностроения»

Защита состоится «хх» декабря 2021 г. в хх часов на заседании диссертационного совета Д 403.001.01 при ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17. Тел 8 (499) 267-86-09, e-mail: admin@viam.ru, internet: www.viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «ВИАМ» и на сайте www.viam.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, ФГУП «ВИАМ», ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Славин А.В.

© ФГУП «ВИАМ», 2021

© Колпачков Е.Д., 2021

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В авиационной отрасли для изготовления легких и прочных конструкций широко применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ), в том числе совместно с сотовыми заполнителями или заполнителями на основе пенопласта. Такие комбинации позволяют создавать конструкции с необходимыми массогабаритными параметрами, благодаря чему они нашли своё применение в широком перечне изделий авиационной техники, в том числе в лопастях воздушных винтов.

Повышение энергоэффективности процессов изготовления конструкций авиационной техники, в том числе лопастей турбовинтовых двигателей, является одной из приоритетных задач авиационной промышленности. По своей конструкции лопасти представляют собой комбинацию из полого лонжерона и внешних оболочек на основе ПКМ и пенопласта, заполняющего внутренние полости. Наиболее широко при изготовлении лопастей турбовинтовых двигателей применяются ПКМ, перерабатываемые по технологии пропитки под давлением с использованием связующего, имеющего температуру отверждения 180 °С, в то время как максимальная рабочая температура широко используемых пенопластов не превышает 150 °С, что при совместном формовании заполнителя и оболочек с лонжероном может вызывать перегрев пенопласта и приводить к образованию дефектов. В связи с этим необходимо проведение исследований, направленных на разработку нового термореактивного связующего с уровнем реологических характеристик, позволяющим перерабатывать его методом пропитки под давлением и температурой отверждения в составе ПКМ не более 150 °С, не превышающей максимальную рабочую температуру наиболее широко используемых пенопластов, для применения в лопастях турбовинтовых двигателей.

Обеспечение требуемого уровня упруго-прочностных характеристик в условиях возрастающих скоростей и увеличения эксплуатационных нагрузок на конструкции авиационной техники достигается за счет применения ПКМ нового поколения на основе полимерных связующих и армирующих наполнителей с заданным комплексом характеристик и увеличения межфазного взаимодействия на границе волокно-матрица. В настоящее время существует несколько способов увеличения межфазного взаимодействия и упрочнения межфазного слоя. Одним из перспективных способов является модификация поверхности армирующего наполнителя методом низкотемпературной плазменной обработки, однако не так широко представлены примеры применения данной технологии применительно к образцам гибридных полимерных композиционных материалов (ГПКМ) на основе стеклянных и углеродных армирующих наполнителей. В связи с этим является актуальным исследование влияния ионно-плазменной обработки армирующих наполнителей на комплекс свойств ГПКМ, предназначенных для применения в конструкциях изделий авиационной техники.

Цель работы – разработка состава и технологии изготовления гибридного полимерного композиционного материала на основе связующего с температурой отверждения не более 150 °С и исследования влияния низкотемпературной плазменной обработки наполнителей на комплекс свойств ГПКМ, предназначенных для применения в лопастях турбовинтовых двигателей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Подбор композиций связующего с температурой отверждения не более 150 °С и исследование комплекса их свойств.
2. Разработка состава и технологии изготовления ГПКМ на основе связующего с температурой отверждения не более 150 °С.
3. Исследование влияния ионно-плазменной обработки на свойства стеклянных и углеродных армирующих наполнителей.
4. Исследование влияния армирующих наполнителей, подвергнутых ионно-плазменной обработке, на структуру и свойства ГПКМ, в том числе во влагонасыщенном состоянии.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что полученный в результате ионно-плазменной обработки в вакууме эффект увеличения смачиваемости волокна сохраняется в течение не менее 8 суток после обработки. При этом показано, что полученный уровень краевого угла смачивания и капиллярности армирующих наполнителей может быть достигнут при помощи ионно-плазменной обработки, как в вакууме, так и при атмосферном давлении.
2. Установлено, что скорость ионно-плазменной обработки поверхности армирующих наполнителей влияет на краевой угол смачивания и капиллярность волокон, при этом максимальные значения указанных параметров достигаются при скорости обработки поверхности 15 мм/с.
3. Установлено влияние ионно-плазменной обработки на размер частиц аппретирующего состава на поверхности стеклянных и углеродных волокон. Показано, что ионно-плазменная обработка приводит к увеличению среднего размера частиц аппрета на поверхности стеклянных волокон, что может быть связано с протеканием химической реакции в аппрете и образованием соединения с большим удельным объемом. Уменьшение среднего размера частиц на поверхности углеродных волокон, предположительно объясняется эрозией пленки аппретирующего состава.
4. Установлено, что ионно-плазменная обработка армирующих наполнителей приводит к повышению комплекса упруго-прочностных характеристик образцов ГПКМ в исходном состоянии. Впервые показано, что ионно-плазменная обработка способствует увеличению сорбции влаги образцами ГПКМ, однако обеспечивая более высокое сохранение прочности во влагонасыщенном состоянии, чем у образцов ГПКМ на основе необработанных наполнителей.

Практическая значимость работы:

1. Выбран оптимальный состав эпоксидного связующего марки ВСЭ-65 и оформлена следующая документация:
 - ТИ 1.595-12-1445-2020 «Изготовление эпоксидного связующего марки ВСЭ-65»;
 - ТУ 1-595-12-1931-2021 «Эпоксидное связующее марки ВСЭ-65».
2. Разработан состав и технология изготовления стеклоуглепластика марки ВКГ-6 и оформлена следующая документация:
 - ТР 1.2.2827-2021 «Изготовление стеклоуглепластика марки ВКГ-6».
3. Получен патент № 2749720 «Термореактивное связующее».
4. Оформлен паспорт № 2015 на стеклоуглепластик марки ВКГ-6.
5. Разработанный стеклоуглепластик марки ВКГ-6 рекомендован к испытанию в производственно-эксплуатационных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования комплекса свойств нового связующего и образцов ГПКМ на его основе.
2. Результаты исследования влияния ионно-плазменной обработки на свойства армирующих наполнителей и образцов ГПКМ на их основе.
3. Составы и технологии изготовления связующего марки ВСЭ-65 и стеклоуглепластика марки ВКГ-6.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием стандартизованных методов испытаний, метрологически аттестованного, поверенного современного оборудования, статистической обработкой значительного объема экспериментальных данных.

Личный вклад автора состоит в методической постановке работы, исследовании композиций связующего в составе экспериментальных образцов ГПКМ, разработке состава и отработке технологических режимов изготовления ГПКМ, разработке режимов ионно-плазменной обработки и проведения комплекса исследований обработанных армирующих наполнителей и образцов ГПКМ на их основе, обработке экспериментальных данных и составлении выводов.

Внедрение результатов работы. По результатам проведения общей квалификации разработанного стеклоуглепластика марки ВКГ-6, выдана рекомендация к испытанию в производственно-эксплуатационных условиях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на конференциях: XLV Королевские академические чтения по космонавтике, Москва, 2021; V Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники», Москва, 2021 г.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 5 работ в печатных изданиях, в том числе 4 в изданиях, включенных в перечень ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по диссертации, списка литературы из 112 наименований, содержит рисунков – 48, таблиц – 22. Общий объём диссертации 112 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, отражены основные достигнутые результаты, которые выносятся на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором рассмотрена литература, посвященная истории развития ПКМ и их классификации, потреблению в различных отраслях промышленности и примерам применения в конструкциях авиационных изделий.

Проведен анализ научно-технической литературы в области ГПКМ и представлена их классификация. Рассмотрены отличительные особенности гибридных полимерных материалов, выделены преимущества и недостатки. Показано, что разработка ГПКМ является перспективным направлением для устранения недостатков, свойственных мономатериалам – ПКМ на основе одного типа наполнителя.

Особое внимание уделено проблематике применения связующего ВС-2561С в конструкциях лопастей турбовинтовых двигателей. Обоснована необходимость разработки нового термореактивного связующего с пониженной температурой отверждения. Показано, что для обеспечения производства лопастей современными и легкодоступными на отечественном рынке компонентами необходимо проведение замены углеродной ленты УОЛ-300-1А на альтернативный углеродный наполнитель в составе разрабатываемого стеклоуглепластика.

Рассмотрены ионно-плазменные технологии обработки материалов – классификация, механизмы образования плазмы, используемое оборудование. По результатам анализа отечественной и зарубежной научно-технической литературы показаны положительные примеры применения плазменных технологий для увеличения адгезионного взаимодействия на границе раздела волокно-матрица и уровня прочностных характеристик образцов ПКМ на основе различных типов наполнителей.

Литературный обзор составлен на основании анализа 102 опубликованных источников.

Вторая глава посвящена описанию объектов исследований, и используемым методам испытаний.

В качестве объекта исследований для разработки связующего с пониженной температурой отверждения выбрано и исследовано 5 вариантов экспери-

ментальных композиций с различным соотношением компонентов: эпоксиаминой и эпоксидиановой смол, катализатора реакции отверждения - третичного амина, отвердителя – изометилтетрагидрофталиевого ангидрида, модификатора – двухосновного фенола.

Для получения образцов стеклоуглепластиков использовались эпоксидные связующие марок ВС-2561С и разработанное связующее с пониженной температурой отверждения ВСЭ-65. В рамках проведения замены углеродной ленты марки УОЛ-300-1А в составе образцов ГПКМ использовались однонаправленные углеродные ткани марок ВТкУ-3 и ВТкУ-3.290. В качестве стеклянного наполнителя использовалась ткань Т-25(ВМП).

Обработку поверхности армирующих наполнителей проводили низкотемпературной плазмой атмосферного давления в экспериментальной установке на основе НЧ-плазмотрона атмосферного давления. Ионно-плазменная обработка в вакууме стеклянных и углеродных тканей проводилась на установке УНИП-900.

Определение краевого угла смачивания стеклянных и углеродных нитей проводилось оптическим методом на установке ОСА-15. Определение капиллярности волокон проводилось по ГОСТ 29104.11-91.

Определение температуры стеклования и энергии активации механического разрушения образцов ГПКМ проводилось по ГОСТ Р 57739-2017. Определение общего теплового эффекта реакции отверждения связующего проводилось по методу Озава-Флинн-Уолла на приборе фирмы «Mettler Toledo» DSC-1.

Определение физико-механических характеристик образцов ПКМ проводили на испытательных машинах Tiratest-2300, LFM-100, LFM-250. Определение плотности и содержания связующего проводилось по ГОСТ Р 56682-2015.

Исследование микроструктуры армирующих наполнителей и образцов ГПКМ проводилось на сканирующем электронном микроскопе фирмы Tescan по ММ 1.595-12-243-2007.

Третья глава посвящена разработке состава и технологии изготовления гибридного композиционного материала с пониженной температурой отверждения. Для этого были выбраны основные компоненты связующего, обеспечивающие температуру отверждения до 150 °С, и на их основе было изготовлено 5 экспериментальных композиций.

Для установления возможности изготовления лопастей турбовинтовых двигателей методом пропитки под давлением (RTM) на основе полученных композиций, была исследована их вязкость в начальный момент времени при температуре переработки и через 4 часа после выдержки при температуре переработки. Помимо этого, для установления возможности эксплуатации разрабатываемого связующего с температурой отверждения до 150 °С в температурном диапазоне до 100 °С, экспериментальные композиции были отверждены при температуре 150 °С и определена температура стеклования методом ДМА (таблица 1).

Таблица 1 – Свойства исследуемых композиций связующего

Наименование характеристики	Наименование композиции связующего				
	1	2	3	4	5
Вязкость при 25 °С, исходная, Па·с	0,61	0,53	0,52	0,45	0,45
Вязкость при 25 °С, через 4 часа изотермического нагревания при 25 °С, Па·с	1,12	0,82	0,63	0,76	0,58
Температура стеклования, отвержденного при температуре 150 °С образца, °С	181	178	172	174	171

По результатам исследования было установлено, что композиции №2-5 удовлетворяли предъявляемым технологическим требованиям, а именно обладали начальной вязкостью и вязкостью через 4 часа изотермического нагревания менее 1 Па·с. Результаты исследования температуры стеклования, отвержденных при 150 °С композиций связующего показали, что они способны обеспечивать эксплуатацию до 100 °С.

С целью оценки свойств композиций связующего в составе образцов ГПКМ на основе стеклянной ткани марки Т-25(ВМП) и углеродной ткани ВТкУ-3.290, выбранной взамен ленты УОЛ-300-1А по результатам анализа нормативно-технической документации, были изготовлены образцы стеклоуглепластиков и исследованы их свойства (таблица 2).

Для выбора наиболее оптимальной композиции связующего было принято, что комплекс свойств стеклоуглепластика на основе экспериментального состава связующего должен быть на уровне или превышать аналогичные показатели ранее разработанного материала марки ГКМ-3.

Таблица 2 – Свойства образцов стеклоуглепластика на основе различных композиций связующего

Наименование характеристики	ГКМ-3 (паспортные данные)	Наименование композиции связующего				
		1	2	3	4	5
Плотность, г/см ³	1,70-1,72	1,76	1,71	1,77	1,75	1,76
Содержание связующего, % масс.	35,0	30,0 – 33,0				
Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	804	1243	1003	1160	1096	1103
Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С, среднее знач., ГПа	76	82	79	79	75	75
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	774	563	638	662	762	660

По результатам определения физико-механических характеристик образцов стеклоуглепластиков на основе экспериментальных композиций связующего установлено, что образцы ГПКМ на основе композиции связующего №4 выполняют необходимое условие по обеспечению заданного уровня упруго-прочностных свойств, а именно имеют предел прочности при растяжении на 36 % выше, чем аналогичный показатель материала марки ГKM-3 при сохранении предела прочности при сжатии на уровне ранее разработанного материала.

На основе полученных результатов, состав композиция 4 был использована для разработки эпоксидного связующего марки BCЭ-65. В таблице 3 представлены свойства разработанного связующего BCЭ-65 в сравнении с ранее разработанным – BC-2561C.

Таблица 3 – Свойства связующих

Характеристика	Новое связующее BCЭ-65	Применяемое связующее BC-2561C
Вязкость при температуре пропитки, Па·с	0,35 при 30 °С	0,25 при 50 °С
Жизнеспособность при температуре пропитки (характеризуется двукратным увеличением начальной вязкости), ч	> 4 при 30 °С	> 4 при 50 °С
Время гелеобразования при температуре 90°С, мин	28	90
Температура отверждения, °С	150	180
Температура стеклования, °С	173	185

Связующее марки BCЭ-65 имеет более низкую температуру отверждения 150 °С, чем ранее разработанное BC-2561C - 180 °С, при этом обеспечивается тот же температурный диапазон эксплуатации – температура стеклования 173 °С. Помимо этого связующее BCЭ-65 способно перерабатываться при более низкой температуре – 30 °С, вместо 50 °С для связующего BC-2561C.

Для выбора углеродной ткани в качестве замены ленты – УОЛ-300-1А по результатам анализа нормативно-технической документации, были изготовлены и исследованы образцы углепластиков на основе разработанного связующего марки BCЭ-65 и углеродных наполнителей - ленты УОЛ-300-1А и тканей ВТкУ-3 и ВТкУ-3.290.

Таблица 4 - Свойства углепластиков на основе связующего марки BCЭ-65 и различных углеродных наполнителей

Наименование показателей	Значение показателей		
	УОЛ-300-1А	ВТкУ-3	ВТкУ-3.290
Плотность, г/см ³	1,53	1,55	1,53
Содержание связующего, % масс.	37,7	36,6	35,4
Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	1170	1740	1570

Модуль упругости при температуре 20 °С, среднее знач., ГПа	131	126	131
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	660	550	620

Анализ полученных результатов исследования комплекса физико-механических свойств углепластиков показал, что ткань углеродная марки ВТкУ-3.290 позволяет реализовать наиболее оптимальный уровень свойств. В составе углепластика она обеспечивает предел прочности при растяжении на 34 % выше, чем у ПКМ на основе УОЛ-300-1А и при этом имеет аналогичный модуль упругости при растяжении и предел прочности при сжатии. Углепластик на основе ткани ВТкУ-3 по результатам исследования комплекса физико-механических характеристик продемонстрировал предел прочности при растяжении на 49 % выше, чем у ПКМ на основе УОЛ-300-1А, но при этом обладал меньшим модулем упругости - на 4 % и меньшим пределом прочности при сжатии - на 20 %. На основании полученных данных, была обоснована правильность выбора углеродной ткани марки ВТкУ-3.290 взамен ленты УОЛ-300-1А в составе разрабатываемого ГПКМ.

Для разработки режима изготовления стеклоуглепластика на основе связующего ВСЭ-65 первоначально был определен общий тепловой эффект реакции отверждения связующего марки ВСЭ-65. По результатам проведения дифференциальной сканирующей калориметрии установлено, что тепловой эффект реакции отверждения связующего ВСЭ-65 составляет 321,55 Дж/г.

Для предварительной оценки возможности отверждения связующего ВСЭ-65 при различных температурах были спрогнозированы значения степени конверсии для разных температур отверждения, которые представлены на рис. 1.

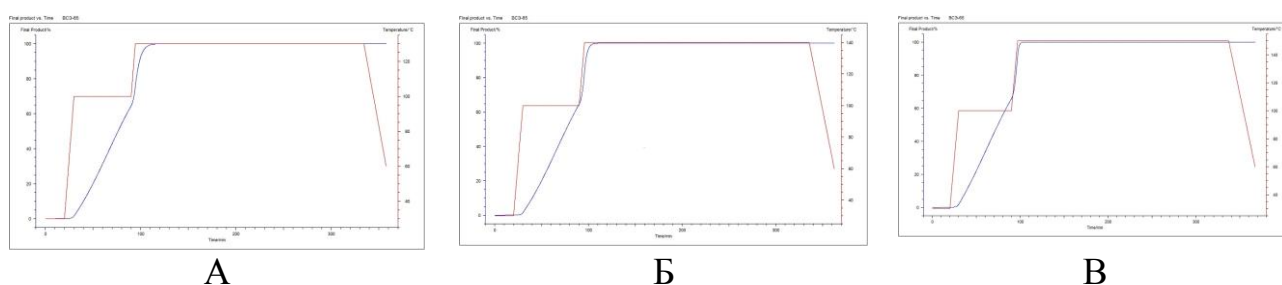


Рисунок 1 – Кинетические кривые «время-конверсия» реакции отверждения связующего марки ВСЭ-65 при различных конечных температурах: А – 130 °С, Б – 140 °С, В – 150 °С.

Представленные смоделированные кривые свидетельствуют, что связующее марки ВСЭ-65 способно достигать 100 % конверсии при конечных температурах отверждения - 130, 140 и 150 °С. Для проверки теоретически полученных данных, были изготовлены и отверждены отливки связующего марки ВСЭ-65 при указанных температурах. Полученные образцы полимерной мат-

рицы были исследованы с целью определения температуры стеклования и остаточного теплового эффекта.

Таблица 5 - Свойства образцов связующего марки ВСЭ-65, отвержденных при различных температурах

Температура отверждения, °С	Температура стеклования, °С	Остаточный тепловой эффект, кДж/г	Степень конверсии, %
130	158	21,7	93,2
140	164	17	94,7
150	173	3,9	98,8

При снижении конечной температуры отверждения связующего увеличивается остаточный тепловой эффект и, в свою очередь, происходит снижение конверсии эпоксидных групп. При снижении конечной температуры отверждения наблюдается понижение температуры стеклования. Принимая во внимание снижение значений конверсии реакции отверждения связующего в диапазоне температур 150-140-130 °С, по результатам определения температуры стеклования можно сделать предположение о возможности использования данных температурных режимов для получения образцов стеклоуглепластика, работоспособных при температурах вплоть до 100 °С.

Для отработки технологических режимов изготовления стеклоуглепластика на основе связующего марки ВСЭ-65 и наполнителей – стеклянной ткани Т-25(ВМП) и углеродной ткани марки ВТкУ-3.290 методом вакуумной инфузии были изготовлены плиты гибридного композиционного материала, отличающиеся конечными температурами отверждения - 130, 140, 150 °С. Свойства образцов стеклоуглепластика, отвержденных при различных температурах, приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Свойства образцов стеклоуглепластика, отвержденных при различных температурах

Наименование характеристики	Стеклоуглепластик марки ГKM-3	Свойства образцов разрабатываемого стеклоуглепластика, отвержденных при различных температурах		
Конечная температура отверждения, °С	180	150	140	130
Содержание связующего, %	35	32,0	33,0	33,0
Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	804	1360	1182	1272

продолжение таблицы 7

Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С, среднее знач., ГПа	76	71,0	71,6	70,4
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	774	727	641	643
Температура стеклования, °С	-	173	170	168
Тепловой эффект доотверждения, Дж/г	-	6,08	7,09	13,05
Степень конверсии, %	-	95	93	87

По результатам исследований образцов стеклоуглепластиков показано, что при снижении конечной температуры отверждения в диапазоне 150 – 140 – 130 °С снижается степень конверсии и уровень физико-механических характеристик – пределов прочности при растяжении и сжатии. Значения температур стеклования и модулей упругости при растяжении для указанного ряда конечных температур отверждения остаются на одном уровне.

В результате отработки технологических режимов изготовления стеклоуглепластика на основе связующего ВСЭ-65 установлено, что конечная температура отверждения 150 °С является минимально необходимой для получения ГПКМ с комплексом свойств, соответствующих уровню свойств стеклоуглепластика марки ГKM-3.

С целью установления возможности переработки связующего марки ВСЭ-65 по различным технологиям были изготовлены и исследованы образцы стеклоуглепластика методом вакуумной инфузии и пропиткой под давлением (таблица 7).

Таблица 7 - Свойства образцов стеклоуглепластика, изготовленных по технологиям VaRTM и RTM.

Наименование характеристики	Свойства стеклоуглепластика марки ГKM-3	ГПКМ, изготовленный методом RTM	ГПКМ, изготовленный методом VaRTM
Температура отверждения, °С	180	150	150
Содержание связующего, %	-	33,5	32,0
Плотность, г/см ³	1,70-1,72	1,69	1,66

Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	804	1106	1360
Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С, среднее знач., ГПа	76	70,2	71,0
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, среднее знач., МПа	774	726	727

Анализ результатов исследования образцов стеклоуглепластика, изготовленного по технологии VaRTM и RTM показал, что данные технологии позволяет реализовать комплекс физико-механических свойств на уровне материала аналога – стеклоуглепластика марки ГKM-3. Также установлено, что комплекс физико-механических свойств гибридных полимерных композиционных материалов на основе связующего марки BCЭ-65 и наполнителей – стеклянной ткани марки Т-25(ВМП) и углеродной ткани марки ВТкУ-3.290, изготовленных по технологиям пропитки под давлением и вакуумной инфузии, находится на близком уровне, что позволяет изготавливать широкий спектр изделий, выбирая при этом наиболее подходящую технологию переработки. С учетом результатов данной работы были разработаны состав и технология изготовления стеклоуглепластика, которому присвоена марка ВКГ-6.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния ионно-плазменной обработки на свойства армирующих наполнителей и ГПКМ на их основе. Предварительно были оценены показатели смачиваемости – краевого угла смачивания и капиллярность исследуемых наполнителей – основных нитей ВМПС-10 84x4 стеклянной ткани Т-25(ВМП) и основных жгутов SYT-49S 12K углеродной ткани ВТкУ-3.290 в исходном состоянии (таблица 8).

Таблица 8 - Исходные свойства стеклянных и углеродных нитей

SYT-49S 12K		ВМПС-10 84x4	
Краевой угол смачивания, °	Капиллярность, см	Краевой угол смачивания, °	Капиллярность, см
47,7	11	51,2	10,1

Затем была проведена ионно-плазменной обработка наполнителей в вакууме и были исследованы показатели смачиваемости, которые представлены на рис. 2 и 3.

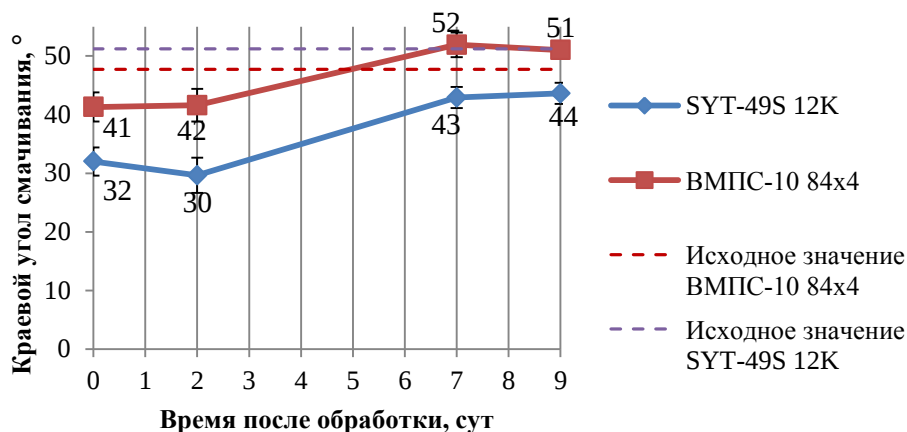


Рисунок 2 – Изменение краевого угла смачивания стеклянных и углеродных нитей после ионно-плазменной обработки в вакууме

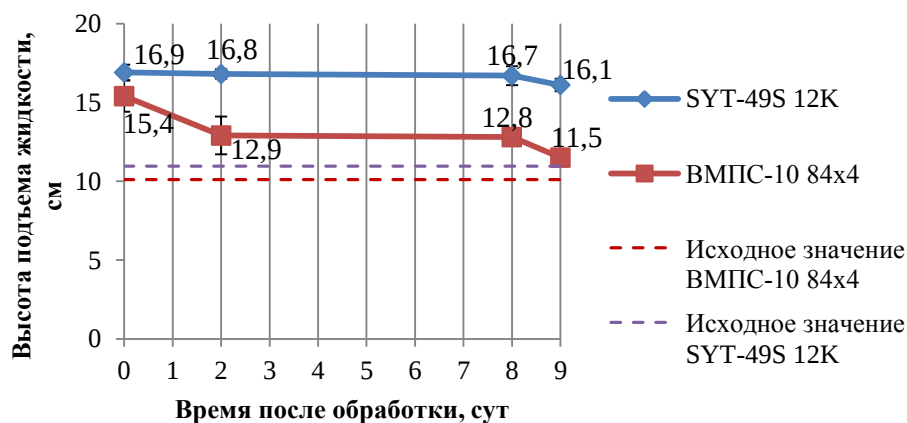


Рисунок 3 – Изменение капиллярности стеклянных и углеродных нитей после ионно-плазменной обработки в вакууме

Показано, что ионно-плазменная обработка повышает смачиваемость стеклянных и углеродных волокон за счет снижения краевого угла смачивания и увеличения капиллярности волокон.

Снижение краевого угла смачивания обусловлено образованием на поверхности волокон ионов в процессе обработки, которые, взаимодействуя с диполями воды, обеспечивают лучшее растекание жидкости по поверхности. Увеличение краевого угла смачивания в течение 8 суток после обработки объясняется гидрофобным восстановлением. Увеличение капиллярности армирующих наполнителей также обусловлено наличием ионов на их поверхности, однако для углеродных наполнителей наблюдается необратимое увеличение данного показателя, в то время как для стеклянных волокон капиллярность возвращается к уровню исходных значений в течение 8 суток. Такое поведение может объясняться особенностями углеродного жгута, состоящего из 12000 элементарных волокон, которые удерживаются между собой нанесенным на поверхность аппретирующим составом. В процессе ионно-плазменной обработки часть аппрата удаляется с поверхности наполнителя и это может приводить к разъединению элементарных волокон и образованию большего межволоконного про-

странства, что в свою очередь способствует необратимому увеличению капиллярности.

С целью установления наиболее оптимального типа обработки была проведена модификация поверхности наполнителей методами ионно-плазменной обработки атмосферного давления и в вакууме, после чего были определены показатели смачиваемости (рис. 4).

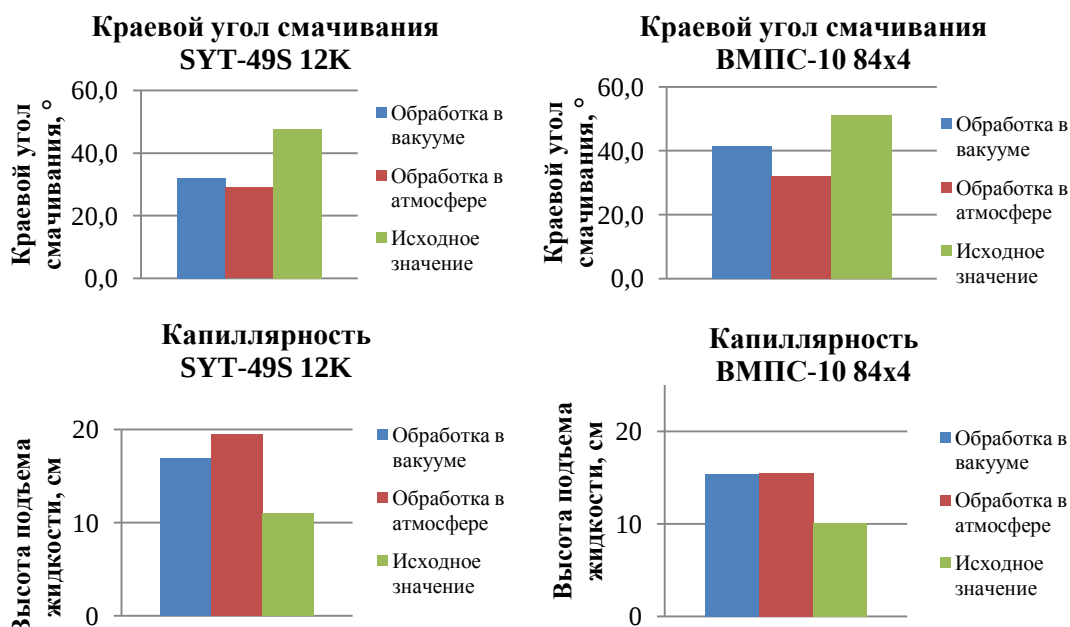


Рисунок 4 – Значения краевого угла смачивания и капиллярности стеклянных и углеродных наполнителей в исходном состоянии и после ионно-плазменной обработки атмосферного давления и в вакууме

Сравнительный анализ результатов ионно-плазменной обработки атмосферного давления и в вакууме показал, что у двух типов обработки отсутствуют существенные преимущества с точки зрения достижения показателей смачиваемости. Однако, наиболее целесообразно в дальнейшем использовать ионно-плазменную обработку при атмосферном давлении, так как данный метод обусловлен применением более простого и доступного оборудования и требует меньших энергетических затрат.

Для определения наиболее оптимального режима обработки наполнителей и с целью получения наилучшей смачиваемости при меньшей продолжительности обработки, проведено исследование влияния трех различных режимов ионно-плазменной обработки при атмосферном давлении. Параметром, определяющим различия в трех режимах, являлась скорость обработки поверхности – скорость перемещения плазмотрона: чем медленнее скорость перемещения, тем дольше воздействие ионизированного газа на определенную область и «сильнее» режим. Принято три режима обработки: минимальный режим самая большая скорость обработки, средний режим - средняя скорость и максимальный режим, где воздействие на область в процессе обработки было самым продолжительным. Результаты исследований приведены на рис. 5.

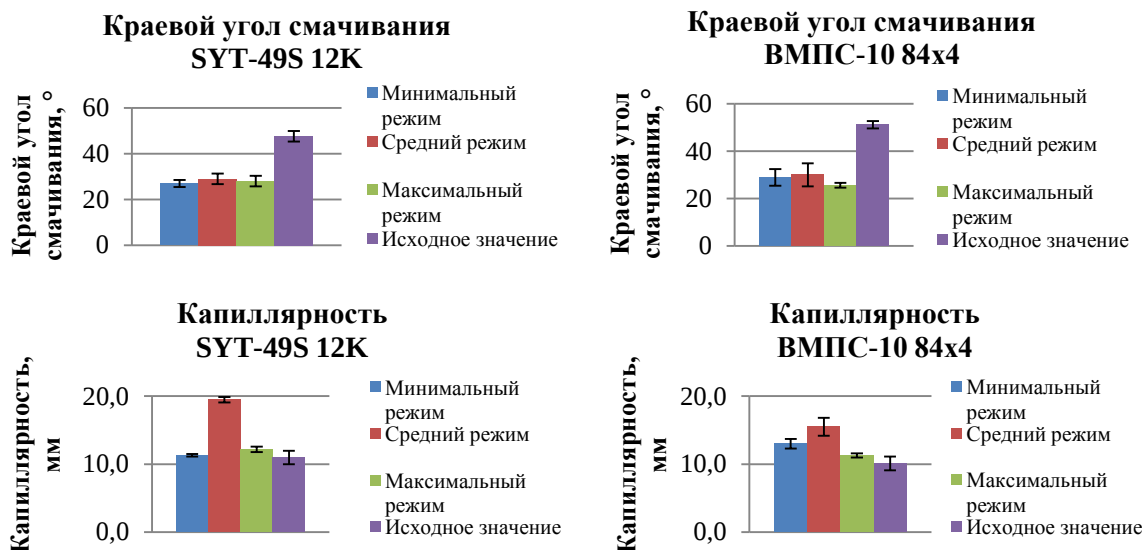


Рисунок 5 – Значения краевого угла смачивания и капиллярности стеклянных и углеродных наполнителей в исходном состоянии и после ионно-плазменной обработки атмосферного давления по 3 режимам

Результаты исследования влияния режимов ионно-плазменной обработки на капиллярность армирующих наполнителей показывают, что средний режим является наиболее оптимальным с точки зрения достижения наибольшей смачиваемости стеклянных и углеродных волокон.

Проведены микроструктурные исследования поверхностей армирующих наполнителей до и после обработки по различным режимам. Результаты показаны на рис. 6.

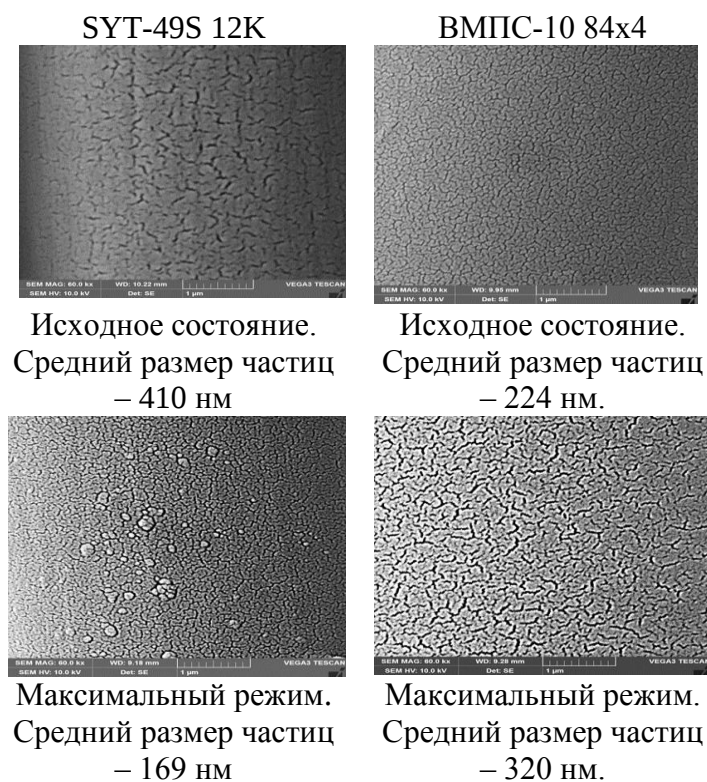


Рисунок 6 - Результаты исследования микроструктуры стеклянных и углеродных волокон

Результаты микроструктурных исследований показали, что поверхность армирующих наполнителей в исходном состоянии и после обработки покрыта пленкой аппрета микродисперсного строения. Установлено также, что ионно-плазменная обработка атмосферного давления способствует увеличению среднего размера частиц кремнийорганического аппрета на стеклянных волокнах и уменьшению размера частиц эпоксидного аппрета на углеродных.

С целью определения причин изменения структуры пленки аппретов на поверхностях волокон армирующих наполнителей проведены исследования волокон методами ДСК и ТГА. Результаты приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты исследования стеклянных и углеродных волокон методами ДСК и ТГА

Углеродные жгуты марки SYT-49S 12K				Стеклянные волокна марки ВМПС-10 84х4		
Потеря массы, %	Тепловой эффект, Дж/г	Пик, °С	Состояния волокон	Пик, °С	Тепловой эффект, Дж/г	Потеря массы, %
0,50	0,49	249	Исходное состояние	214	6,12	2,61
0,48	0,32	250	Минимальный режим	241	5,95	1,22
0,48	0,09	250	Средний режим	239	5,09	1,08
0,24	-	-	Максимальный режим	233	4,28	0,66

Результаты исследования стеклянных волокон марки ВМПС-10 84х4 показали, что после обработки происходит смещения пика теплового эффекта в область более высоких температур - от 214 °С для исходного образца до 233 °С для образца, обработанного по максимальному режиму. Это может быть связано с тем, что в процессе ионно-плазменной обработки происходит образование нового соединения, имеющего тепловые эффекты в области более высоких температур. Соответственно, увеличения размера частиц аппрета на стеклянных волокнах, вероятно вызвано образованием нового соединения, имеющего больший удельный объем. Помимо этого, наблюдается уменьшение общего теплового эффекта реакции деструкции и уменьшения потери массы, что свидетельствует об уносе аппрета с поверхности волокон в процессе ионно-плазменной обработки.

Для углеродных волокон марки SYT-49S 12K наблюдается снижение теплового эффекта и уменьшение потери массы, что говорит об уносе аппрета в процессе ионно-плазменной обработки.

С целью исследования влияния ионно-плазменной обработки армирующих наполнителей на свойства ГПКМ полотна тканей Т-25(ВМП) и ВТкУ-3.290 были обработаны в экспериментальной установке на основе НЧ-плазмотрона атмосферного давления по трем различным режимам. На основе полученных полотен армирующих наполнителей при использовании связующих ВСЭ-65 и ВС-2561С были получены образцы стеклоуглепластиков и исследован комплекс их физико-механических свойств (рис. 7).

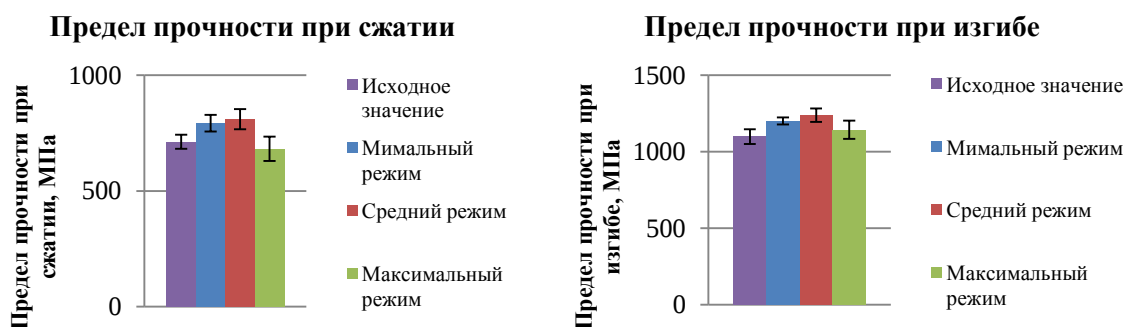


Рисунок 7 - Результаты исследования влияния режимов ионно-плазменной обработки на пределы прочности при сжатии и изгибе стеклоуглепластика на основе связующего ВСЭ-65

Результаты исследования предела прочности при сжатии показывают, что наиболее высокие показатели наблюдаются для минимального и среднего режимов, однако для последнего данный показатель имеет большее увеличение – до 14 % относительно исходного, в то время как для минимального - 11 %. По результатам исследования предела прочности при изгибе установлено, что наибольший показатель изменения предела прочности наблюдается для среднего режима – 13 % относительно образцов ГПКМ на основе не обработанных наполнителей.



Рисунок 8 - Совокупное изменение комплекса физико-механических свойств стеклоуглепластика на основе связующего марки ВСЭ-65 и наполнителей, подвергнутых ионно-плазменной обработке по различным режимам

Анализ изменения прочностных характеристик образцов стеклоуглепластиков, изготовленных с применением стеклянных и углеродных армирующих наполнителей, модифицированных методом ионно-плазменной обработки по трем режимам в условиях воздушной атмосферы, позволяет сделать вывод о повышении совокупного уровня механических свойств материала. Данный эффект достигается за счет повышения смачивания армирующих наполнителей связующим после обработки, в связи с чем в процессе получения ГПКМ происходит образование более прочного межфазного слоя, что в свою очередь позволяет более равномерно распределять воздействующую нагрузку в объеме ПКМ на армирующие наполнители. Тем не менее для образцов ГПКМ на основе наполнителей, обработанных по максимальному режиму, наблюдается не такой значительный рост прочностных характеристик, что может быть объяснено избыточным развитием поверхности волокон, а также нежелательными процессами окисления аппретирующих веществ.

Для проведения сравнительной оценки уровня прочностных свойств, достигнутых при использовании связующего ВСЭ-65 были изготовлены образцы стеклоуглепластиков на основе связующего ВС-2561С и армирующих наполни-

телей в исходном состоянии и после ионно-плазменной обработки по 3 режимам.

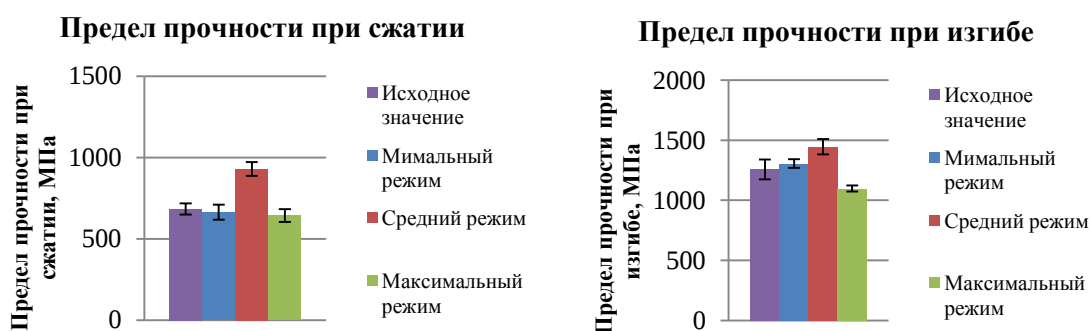


Рисунок 9 - Результаты исследования влияния режимов ионно-плазменной обработки на пределы прочности при сжатии и изгибе стеклоуглепластика на основе связующего ВС-2561С

Результаты исследования физико-механических характеристик ГПКМ на основе связующего ВС-2561С показали прирост предела прочности при сжатии на 35 %, при изгибе – на 15 % для образцов стеклоуглепластика, на основе волокон, обработанных по среднему режиму.



Рисунок 10 - Совокупное изменение комплекса физико-механических свойств стеклоуглепластика на основе связующего марки ВС-2561С и наполнителей, модифицированных ионно-плазменной обработкой по различным режимам

Анализ общего изменения комплекса прочностных характеристик стеклоуглепластика на основе связующего марки ВС-2561с и наполнителей – стеклянной ткани Т-25(ВМП) и углеродной ткани ВТкУ-3.290, обработанных по 3 режимам показал, что именно средний режим оказывает значительное положительное влияние на прочностные свойства образцов ГПКМ. Тем не менее для образцов стеклоуглепластика на основе связующего ВС-2561С и наполнителей, подвергнутых обработке по максимальному режиму, наблюдается снижение уровня прочностных свойств относительно исходных значений, что может быть объяснено избыточным развитием поверхности волокон и протеканием процесса окисления замасливателя, приводящим к уменьшению прочности межфазных связей на границе волокно-матрица.

С целью анализа структуры полученных стеклоуглепластиков были проведены микроструктурные исследования образцов. Результаты исследования микроструктуры образцов ГПКМ показали активное взаимодействие между связующими марок ВС-2561С и ВСЭ-65 со стеклянными и углеродными волокнами в исходном состоянии и после ионно-плазменной обработки.

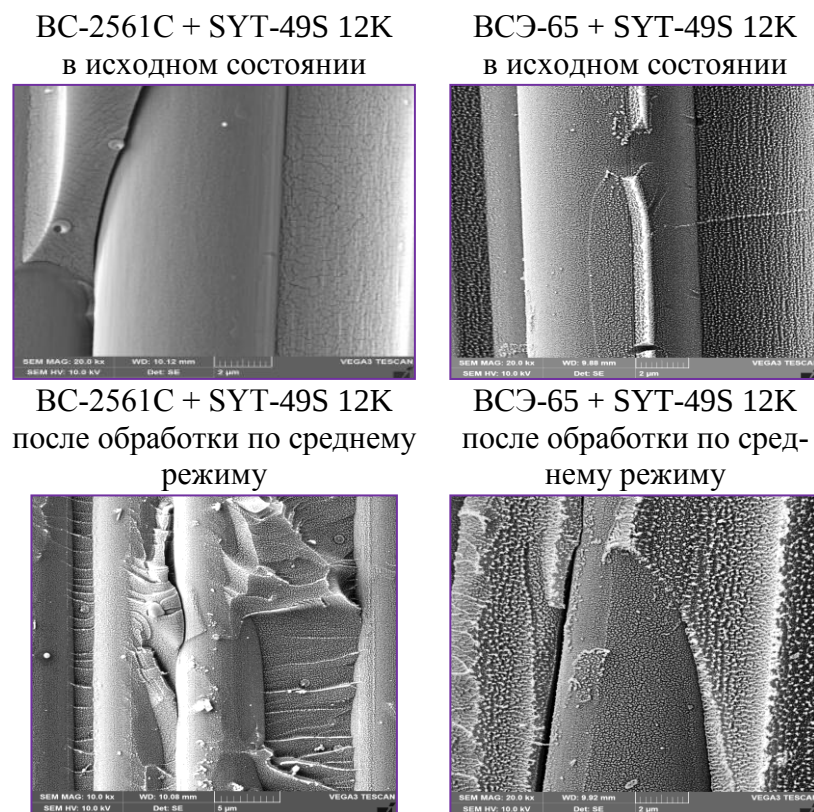


Рисунок 11 - Результаты исследования микроструктуры стеклоуглепластиков в месте контакта углеродных волокон марки SYT-49S 12K и связующих марок BCЭ-65 и BC-2561C

Однако наиболее значительные различия наблюдаются для углеродных волокон в исходном состоянии и после ионно-плазменной обработки, которые проявляются в более полном покрытии волокон связующим и образованием большого количества гребней пластической деформации.

С целью исследования влияния ионно-плазменной обработки армирующих наполнителей на стойкость образцов ГПКМ на их основе к воздействию повышенной температуры и влажности была проведена экспозиция образцов стеклоуглепластиков в климатической камере при 60 °C и влажности 85 % в течение 3 месяцев. После экспозиции образцы ГПКМ были исследованы с целью определения максимального влагонасыщения и сохранения предела прочности при изгибе при 20.

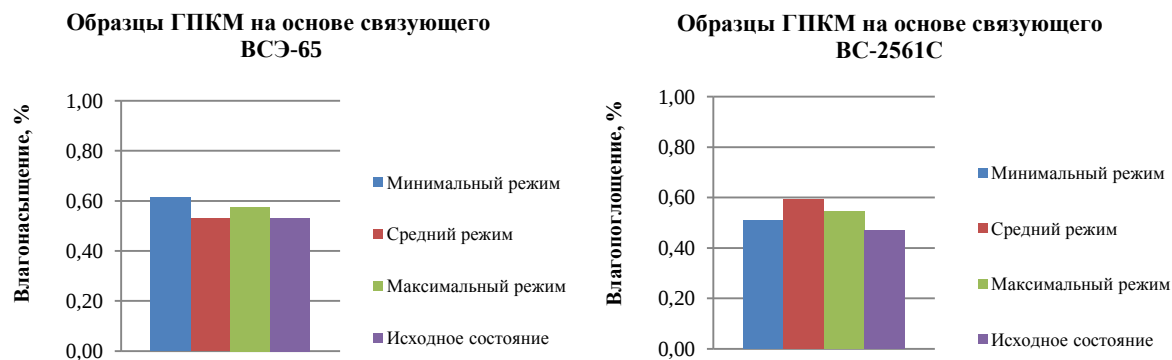


Рисунок 12 - Результаты определения содержания влаги в образцах стеклоуглепластиков на основе связующих марок BCЭ-65 и BC-2561C

Показано, что образцы стеклоуглепластиков на основе армирующих наполнителей, подвергнутых ионно-плазменной обработке, склонны к более интенсивному влагопоглощению.

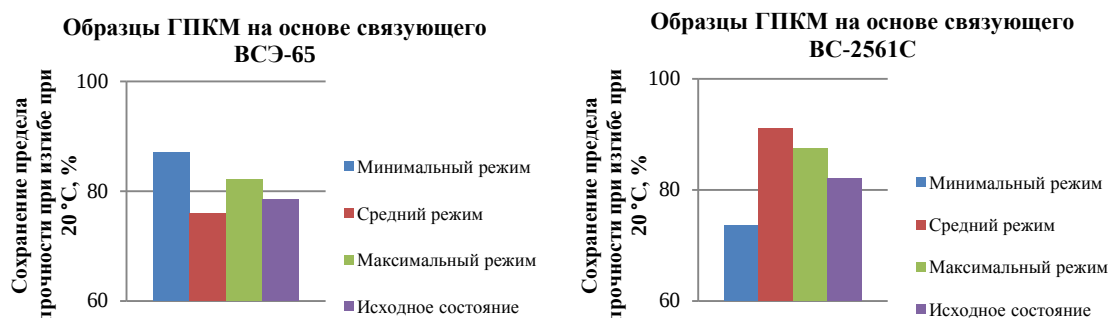


Рисунок 13 - Результаты определения сохранения предела прочности при изгибе после тепловлажностных испытаний в образцах стеклоуглепластиков на основе связующих марок ВСЭ-65 и ВС-2561С

По результатам исследования сохранения предела прочности при изгибе при 20 °С образцов стеклоуглепластиков на основе эпоксидных связующих установлено, что образцы изготовленные с использованием армирующих наполнителей, подвергнутых ионно-плазменной обработке, показывают большее сохранение предела прочности при изгибе во влагонасыщенном состоянии.

Пятая глава посвящена практической реализации полученных результатов. На разработанное термореактивное связующее марки ВСЭ-65 и стеклоуглепластик марки ВКГ-6 на его основе выпущена нормативно-техническая документация. На разработанный стеклоуглепластик марки ВКГ-6 выпущен паспорт №2015.

Основные выводы

1. Выбран состав эпоксидного связующего марки ВСЭ-65 и разработан стеклоуглепластик марки ВКГ-6 на его основе. Разработанные материалы обеспечивают температурно-временные параметры переработки, позволяющие проводить формование изделий при температуре не более 150 °С, по энергоэффективным безавтоклавным технологиям – вакуумной инфузии и пропитки под давлением.

2. Разработанный стеклоуглепластик марки ВКГ-6 обладает сопоставимым комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств по сравнению с применяемым в настоящее время материалом марки ГKM-3, но при этом обеспечивает более энергоэффективный процесс изготовления и не содержит дефицитные на отечественном рынке компоненты. По результатам проведения общей квалификации, стеклоуглепластик ВКГ-6 рекомендован к испытанию в производственно-эксплуатационных условиях в составе лопастей турбовинтовых двигателей.

3. Установлено, что ионно-плазменная обработка в вакууме стеклянных наполнителей на основе нитей ВМПС-10 84x4 и углеродных наполнителей на основе жгутов SYT-49S 12K способствует уменьшению краевого угла смачивания на 15 и 51 % и повышению капиллярности на 52 и 46 %, соответственно.

Показано, что отсутствуют существенные различия в достигаемых показателях смачиваемости стеклянных и углеродных наполнителей, обработанных методами ионно-плазменной обработки в вакууме и при атмосферном давлении, что позволяет использовать более доступное технологическое оборудование.

4. Установлено, что ионно-плазменная обработка атмосферного давления приводит к изменению размера частиц аппрета на поверхности углеродных и стеклянных армирующих наполнителей. Показано, что увеличение среднего размера частиц аппрета на поверхности стеклянных волокон может происходить предположительно, за счет протекания химической реакции в пленке аппрета, в то время как уменьшение среднего размера частиц аппрета на поверхности углеродных волокон связано с его эрозией в процессе ионно-плазменной обработки.

5. Показано, что ионно-плазменная обработка атмосферного давления армирующих наполнителей способствует увеличению комплекса упруго-прочностных свойств образцов ГПКМ. Так увеличение предела прочности при сжатии составило до 35 %, предела прочности при изгибе до 15 %. При этом установлено, что прирост физико-механических характеристик зависит от скорости обработки поверхности и достигает максимальных значений при скорости обработки 15 мм/с.

6. Установлено, что ионно-плазменная обработка армирующих наполнителей приводит к повышенной сорбции влаги образцами ГПКМ на 13 %, но при этом обеспечивает более высокое сохранение прочностных характеристик материала во влагонасыщенном состоянии до 91 % относительно исходных значений, по сравнению с образцами на основе необработанных наполнителей, уровень сохранения прочности которых не превышает 82 %.

Список основных трудов по теме диссертации, опубликованный в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Колпачков Е.Д., Мараховский П.С., Петрова А.П., Щур П.А., Лонский С.Л., Черняева И.Ю., Шведов А.В. Исследование влияния ионно-плазменной обработки на свойства армирующих наполнителей // Вопросы материаловедения. 2021. № 3. (107). С. 136-149.

2. Колпачков Е.Д., Курносов А.О., Мараховский П.С., Петрова А.П. Исследование влияния конечных температур отверждения на комплекс свойств стеклоуглепластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2021. № 6. Ст.7 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-66-73.

3. Колпачков Е.Д., Курносов А.О., Петрова А.П., Раскутин А.Е. Гибридные композиционные материалы для авиации на основе волокнистых наполнителей (обзор) // Вопросы материаловедения. 2020. №1. (101). С. 126-138.

4. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносов А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды

ВИАМ. 2019. №11 (83). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-formovaniya-izdeliy-aviatsionnogo-naznacheniya-iz-pkm-obzor> (дата обращения: 29.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.

**Список основных трудов по теме диссертации, опубликованный
в рецензируемых изданиях:**

5. Колпачков Е.Д., Гуревич Я.М., Курносов А.О., Мараховский П.С., Петрова А.П. Исследование характеристик стеклоуглепластиков на основе связующих с пониженной температурой отверждения // Колпачков Е.Д., Гуревич Я.М., Курносов А.О., Мараховский П.С., Петрова А.П. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 6. С. 41-45.

6. Каблов Е.Н., Ткачук А.И., Гуревич Я.М., Москвитина К.Н., Курносов А.О., Колпачков Е.Д. Термореактивное связующее // Патент РФ 2749720 от 16.06.2021 г.

Отпечатан экз.

Исп. Колпачков Е.Д.

Печ. Колпачков Е.Д.

Автореферат Колпачков Е.Д.

«Гибридный полимерный композиционный материал для лопастей турбо-винтовых двигателей»

Формат бумаги 60×90/16. Печ. л 1,00. Тираж экз.

Отпечатано в типографии ФГУП «ВИАМ»

105005, г. Москва, ул. Радио, 17