

На правах рукописи

ВЕШКИН ЕВГЕНИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПОЛУФАБРИКАТОВ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Научная специальность

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и
КОМПОЗИТОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва-2025

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

Научный консультант: **Славин Андрей Вячеславович**, доктор технических наук, доцент, начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Официальные оппоненты: **Милейко Сергей Тихонович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук
Трофимов Александр Николаевич, доктор технических наук, генеральный директор Акционерного общества «Научно-производственное объединение Стеклопластик им. Н.Н. Трофимова»
Воротынцев Илья Владимирович, доктор химических наук, профессор, преподаватель кафедры «Физической химии» федерального государственного бюджетного высшего учебного заведения Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится «22» декабря 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.002.01 при НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д.17. Тел. 8 (499) 267-86-77, e-mail: admin@viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и на сайте www.viam.ru

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 1005005, г. Москва, ул. Радио, д.17, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, учёному секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук,

М.А. Горбовец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Тенденция по замене металлов на полимерные композиционные материалы (ПКМ) в элементах конструкции современных летательных аппаратов (ЛА), берущая начало с середины прошлого века, требует комплексной оценки поведения материалов в конструкции для подтверждения их заданного ресурса. Ресурс конструкции зависит от многих факторов, и несмотря на то, что разработчиками и производителями зарубежной и отечественной авиационной техники накоплен большой опыт применения композиционных материалов в ЛА, в различных узлах и агрегатах, вопрос ресурса определяется в основном в процессе эксплуатации.

В тоже время создание ПКМ нового поколения, а также растущий объём производства деталей и конструкций из ПКМ, объединяющий многочисленные технологические процессы (изготовление полимерных связующих и препрегов, а также формование и механическая обработка деталей) и обширную кооперацию, требует особого подхода, так как процесс их создания сочетает три направления деятельности: материаловедческую, технологическую и конструкторскую.

Материаловедческое направление отвечает за создание новых материалов, совершенствование разработанных, и как показало последнее десятилетие, связанное с санкционными ограничениями – создание отечественных аналогов материалов. Одновременно оно отвечает за всесторонние испытания создаваемых материалов и оценку деградации их свойств. С учётом вышеизложенного расширяется и ассортимент применяемых ПКМ: на смену растворным связующим приходят расплавные (полиматричные) на основе которых создаются ПКМ нового поколения. Однако требования к таким материалам ужесточаются, соответственно ужесточаются и требования к их изготовлению. Необходимость выбора оптимальных технологических режимов и возможность их корректировки при изменении свойств полуфабрикатов (связующих, препрегов, металлических слоёв и др.) при формовании изделий из ПКМ требуют использования универсальных методов исследования процессов отверждения.

Технологическое направление нацелено на совершенствование оборудования и оптимизацию процессов получения препрегов, их раскроя в технологические карты и их выкладки в пакет-заготовку, подготовки технологического пакета (включающего вспомогательные слои), режимов отверждения, контурной обработки изделий по габаритным размерам, сборки-склейки отдельных частей конструкций. Одновременно направлено на оптимизации технологических воздействий (нагревание, термоциклирование и др.), которым подвергается материал на различных стадиях его создания, начиная с подготовки компонентов ПКМ, изготовления полуфабриката и конструкции, а также ее эксплуатации и ремонта, с целью продления ресурса.

Конструкторское направление требует совершенствования в области выбора оптимальных структур и схем армирования изготавливаемых конструкций из КМ на стадии их опытного производства и стендовых испытаний, учитывающих специфику их свойств и технологии переработки, а также воздействия на них эксплуатационных и климатических факторов. Одновременно требуется развитие диагностических методов проверки остаточных упруго-прочностных свойств КМ в составе конструктивных элементов.

Из вышеизложенного можно заключить, что требуется системный подход к созданию процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из ПКМ нового поколения, который можно описать формулой «материал-технология-конструкция».

Таким образом, разработка научно-технологических основ для создания взаимосвязанных высокоэффективных технологических процессов изготовления связующих, полуфабрикатов и авиационных конструкций из ПКМ нового поколения, учитывающих влияние технологических факторов на различных стадиях их создания и серийных процессов изготовления в целом и одновременно обеспечивающих снижение производственных за-

трат, повышение эффективности производства за счёт выбора наиболее оптимальных способов и режимов изготовления ПКМ, является актуальным научным направлением, соответствующим текущим интересам и проблематике современного авиастроения.

Работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки технологий и техники в Российской Федерации «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». В основу диссертации положены результаты исследований по следующим научно-исследовательским программам и проектам: Программы развития гражданской авиационной техники РФ (шифры контрактов: «Полёт», «Композит», «Освоение», «Скорость», «Икар», «Эффективность», «Концепт», «Гелиос»); Программа деятельности НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ; Гранты из федерального бюджета в форме субсидий на финансовое обеспечение затрат комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства»; Грант Российского научного фонда № 24-19-00009, <https://rscf.ru/project/24-19-00009>.

Объектами исследования являются процессы изготовления и свойства полуфабрикатов ПКМ, а также угле-, стекло-, органопластиков и конструкции из них.

Предметом исследования является установление закономерностей в системе: свойства исходных компонентов/ технологии изготовления полуфабрикатов/ технологии совмещения и формования/ свойства угле-, стекло-, органопластиков/ конструкции из ПКМ.

Цель работы – разработка научно-технологических основ для создания высокоэффективных технологий изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения, учитывающих технологические параметры полимерных связующих, полуфабрикатов на их основе, а также параметры процессов формообразования и отверждения деталей из ПКМ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработка критериев оценки конструктивно-технологических и эксплуатационных характеристик конструкций из ПКМ с целью выбора технологии формообразования и отверждения, для формирования требований к свойствам ПКМ (прочностным, эксплуатационным), а также технологических требований к полимерному связующему и наполнителю;

- исследование особенностей приготовления расплавных модифицированных полимерных связующих с оценкой влияния свойств исходных компонентов на их прочностные свойства;

- разработка требований к оборудованию и серийных технологий для изготовления полуфабрикатов (препрегов, плёночных клеев и плёнок связующего) на основе расплавных полимерных связующих нового поколения и наполнителей различной природы на офлайн линии с оценкой их свойств;

- разработка технологий трансферного совмещения для изготовления полуфабрикатов на основе полимерных связующих нового поколения и наполнителей различной природы с моделированием процессов пропитки технологических пакетов;

- разработка материалов и технологий для изготовления полимерных формообразующих оснасток, в том числе с интегрированным нагревателем;

- исследование влияния температурно-временных и манометрических условий отверждения полимерных связующих, в том числе в присутствии наполнителей, на свойства полимерной матрицы методами микротвердомерии, склерометрии и акустической эмиссии;

- разработка способа выбора температурно-временных и манометрических параметров процесса отверждения ПКМ;

- разработка вакуум-автоклавных технологий изготовления монолитных и многослойных сотовых конструкций из ПКМ с применением препреговых и трансферных методов формообразования;

- разработка технологий прессового формования монолитных и многослойных сотовых конструкций из ПКМ с применением препреговых и трансферных методов формования;

- разработка технологий вакуум-печного формования монолитных и многослойных конструкций из ПКМ с применением препреговых и трансферных методов формования.

Практическая значимость работы:

Отработаны серийные технологии изготовления расплавных полимерных связующих марок ВСК-14-1, ВСК-14-2, ВСК-14-2м, ВСК-14-4, ВСК-14-4м, ВСК-14-4к, ВСЭ-1212, ВСЭ-36.

Разработаны технологии изготовления стабильных по толщине $\pm 0,5$ % (масс.) плёночных клеев марок ВК-36, ВК-36Р, ВК-36РТ.

Разработаны технологии изготовления препрегов на основе полимерных связующих и стеклянных, углеродных и органических наполнителей на офлайн линии по двухстадийной схеме, в том числе с автоматизированным контролем параметров и управлением процессом изготовления плёнки полимерного связующего, обеспечивающим разброс содержания связующего в препреге ± 2 %: ВПС-53/Т-10, ВПС-53/Т-64(ВМП), ВКУ-25, ВКУ-29/ВТкУ-3, ВКУ-39/ВТкУ-2.200, ВПС-31/Т-25(ВМП), ВКУ-46/ВТкУ-2.280, ВКУ-30К.УМТ49, ВПС-68/Т-64, ВПС-68/РВМПН10-1200-14.

Разработаны материалы, технологии изготовления препрега и семипрега марок ВПС-55 и ВПС-59, а также технологий изготовления полимерных формообразующих оснасток.

Разработана технология изготовления конструкций – монолитных и трёхслойных панелей интерьера, прессовым формованием («crush-core») из стеклопластика марок ВПС-42П, обеспечивающая сокращения энергозатрат на 50 %, использования вспомогательных материалов на 80 % и уменьшение цикла изготовления более чем в 10 раз.

Разработана технология изготовления листового органопластика марки Органит 11ТЛ, с совмещением под действием вакуума наполнителя ткани технической арт. 5381/1-89 и клеевой плёнки марки ВК-36РТ.140, обеспечивающая стабильность свойств и массо-во-габаритных характеристик в диапазоне ± 3 %.

Разработаны материалы и технологии изготовления конструкций из ПКМ, освоены серийные производства изготовления заготовок трубопроводов системы кондиционирования воздуха (СКВ) – гибких элементов и жёстких сложнопрофильных, замкнутых патрубков, обеспечивающих снижение массы СКВ самолёта не менее чем на 20 %.

Разработаны технологии изготовления трёхслойных сотовых панелей, освоено серийное производство заготовок панелей пола для салонов пассажирских самолётов, обеспечивающих стабильность упруго-прочностных и массово-габаритных характеристик в диапазоне ± 5 %.

Разработана технология изготовления радиопрозрачного обтекателя переменного сечения с применением сотового заполнителя ССП-1-3,5 и препрегов марок КМКС-4.175.Т10.37, КМКС-4.175.Т10.55, обеспечивающая стабильные массово-габаритные характеристики.

Разработаны технологии изготовления и соединения типового конструктивного элемента - монолитной и трёхслойной конструкции из ПКМ на основе связующего ВСЭ-1212, снижающие трудоёмкость изготовления на 10 %.

Разработаны состав ПКМ, технология изготовления конструкции методом пропитки под действием вакуума из огнестойкого углетекстолита марки ВКУ-48 (обеспечивающего огнестойкость при 1100 °С не менее 15 мин), для изготовления капотов вертолётной техники, снижающая энергозатраты на 20 %.

Разработана технология изготовления конструкции пылезащитного устройства из углетекстолита с антиэрозионным слоем из органотекстолита, обеспечивающая стабиль-

ность массово-габаритных характеристик в диапазоне $\pm 2\%$ и стойкую антиэрозионную защиту.

Разработана технология изготовления профилированного настила для изготовления автомобильного мостового перехода.

Разработана безавтоклавная технология изготовления стекателя и разделителя потока.

Положения, выносимые на защиту:

Результаты комплексных исследований создания научно-технологических основ для разработки технологических процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов, с учётом их конструктивно-технологических особенностей для выбора технологий переработки, включающих требования к технологическим и эксплуатационным параметрам полимерного связующего, наполнителя, их способа совмещения, формообразования заготовки детали из ПКМ и способов её формования.

Уравнение многофакторной (множественной) регрессии, характеризующее влияние исходных компонентов полимерных расплавных связующих на их прочностные свойства.

Уравнение многофакторной (множественной) регрессии, характеризующее влияние технологических параметров на объёмно-массовые свойства плёнок полимерных связующих.

Исследование свойств полимерной матрицы, в том числе в ПКМ методами микротвердомерии, склерометрии и акустической эмиссии.

Подход к выбору температурно-временных и манометрических параметров режима формования ПКМ.

Личный вклад автора состоит в определении направлений исследований, постановке задач, обобщении и систематизации результатов экспериментальных исследований, разработке научно-технологических основ создания технологических процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из ПКМ на их основе, создании конструктивно-технологического подхода с целью выбора технологий переработки, а также в разработке подходов к выбору температурно-временных и манометрических параметров формования ПКМ и в непосредственном участии во внедрении разработанных технологий при освоении их производства. Интерпретации полученных результатов, формулировке выводов, написании публикаций.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных различными независимыми методами, привлечением современных, преимущественно стандартизованных и взаимно дополняющих друг друга экспериментально-аналитических методов и испытаний, применением сертифицированных приборов и оборудования.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Ялта, 2010), Международной молодёжной научной конференции «XXXVI Гагаринские чтения» МАТИ (Москва, 2010), XI Всероссийской научно-технической конференции и школе молодых учёных, аспирантов и студентов (Воронеж, 2010), XIX Международной научно-технической конференции Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов (Обнинск, 2010), IX международной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012» (Москва, 2012), IV международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (Ульяновск, 2014), Конференции «Безавтоклавные технологии переработки полимерных композиционных материалов нового поколения» (Москва, 2015), V международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (Ульяновск, 2016),

Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2016), XXI международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (Обнинск, 2016), II Всероссийской научно-технической конференции ««Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (ВИАМ, 2017), Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы нового поколения «Трансфер инноваций из авиации в приоритетные сектора экономики России» (Ульяновск, 2018), III Всероссийская научно-техническая конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения (Москва, 2018), V Всероссийской научно-технической конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года (Москва, 2019), Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности», (Москва, 2020), V Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (Москва, 2021), Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы нового поколения и технологии их переработки» (Москва, 2021), VI Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (Москва, 2022), VIII Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (Москва, 2023), VII Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения» (Ульяновск, 2024), IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (Казань, 2024)

Публикации

По теме диссертации опубликовано 66 публикаций, из них 37 - в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России и 29 в переводных журналах входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, и получено 7 патентов РФ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав и выводов, изложена на 359 страницах, включая 147 рисунков, 67 таблиц и список литературы из 262 наименований.

При выполнении работы использовались научные идеи, содержащиеся в трудах учёных: д.т.н. Гуняева Г.М., к.т.н. Чурсовой Л.В., к.т.н. Раскутина А.Е., д.т.н. Петровой А.П., д.т.н. Постнова В.И., к.т.н. Душина М.И. Автор выражает глубокую благодарность своему научному консультанту д.т.н., доценту Славину А.В., а также д.т.н., доценту Постнову В.И. к.т.н. Семенычеву В.В. и генеральному директору НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ Яковлеву С.В., сподвигнувшим на написание данной работы. Одновременно признателен коллективам УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт», особенно Баранникову А.А., к.т.н. Салаховой Р.К., Судьину Ю.И., Панарину А.В., Макрушину К.В., Крашенинниковой Е.В., Савицкому Р.С. и научно-исследовательского отделения «ПКМ и технологии их переработки», особенно к.т.н. Курносову А.О. и к.т.н. Гуняевой А.Г., и всем коллегам за помощь в проведённых исследованиях, анализе полученных результатов и консультациях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе даётся обзор научно-технической литературы, посвящённой изучению современного состояния материаловедения в области ПКМ и технологических разработок в современном авиационном производстве полуфабрикатов и конструкций из ПКМ нового поколения.

Определены наиболее перспективные и проблемные направления исследований в области приготовления полимерных связующих, их совмещения с армирующими наполнителями, способов формообразования заготовок деталей из полуфабрикатов и технологических параметров отверждения пластиков на их основе. Представлена структурная схема научно-технологических основ создания высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов конструкций из ПКМ нового поколения, которую можно описать формулой «материал-технология-конструкция» (рисунок 1).

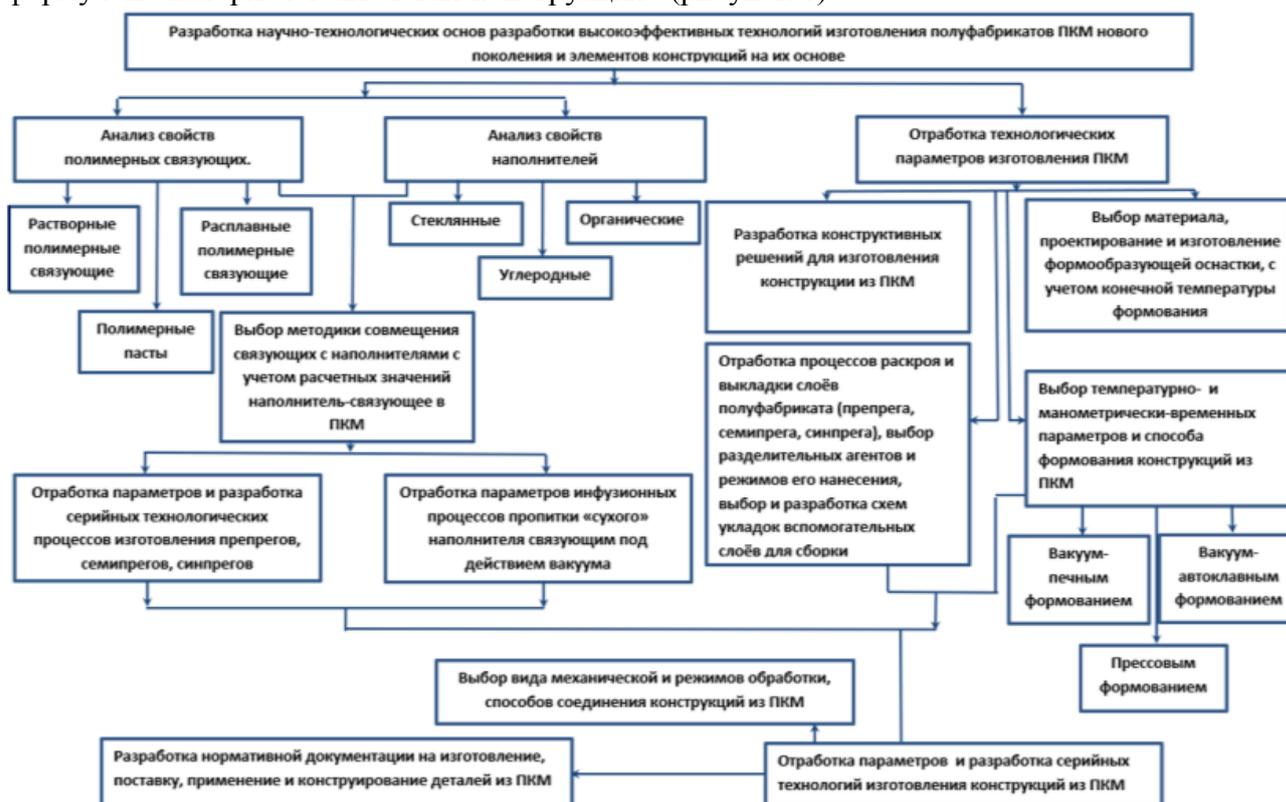


Рисунок 1 – Структурная схема научно-технологических основ создания высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из ПКМ нового поколения

Во второй главе описаны объекты и методы исследований, использованные в работе. Терморезистивные связующие марок УП-222Н, ЭДТ-69Н, РС-Н, ВСФ-16М, ВСК-14-1, ВСК-14-2м, ВСК-14-4, ВСК-14-4м, ВСК-14-4к, ВСЭ-1212, ВСТ-1210, ВСЭ-34. Стеклоткани марок Т-15(П)П-76(92), Т-10П-14(92), Т-64(ВМП)-78, Т-60/2(ВМП)-14, кварцевая ткань марки ТС 8/3-К-ТО. Углеродные ткани марок ВТкУ-2.200, ВТкУ-3, ВТкУ-5. Ткань техническая арт. 5381/1-89. Физико-химические параметры исходных компонентов определяли по ГОСТ 12497-78, ГОСТ 22456-77, ГОСТ 22457-90, ТУ 6-06-46-90, ГОСТ Р 55135, ГОСТ 14870-77, ГОСТ 17444-2016, ТУ 2294-102-00151963-2006. Физико-механические характеристики монолитных пластиков и трёхслойных сотовых панелей определяли по ГОСТ Р 56812-2015, ГОСТ Р 56810-2015, ГОСТ 14759-69, ГОСТ Р 56791-2015, ГОСТ Р 56798-2015, ГОСТ Р 57745-2017. Динамический модуль упругости определяли по ГОСТ Р 57862-2017. Оценку огнестойкости и огнестойкости ПКМ проводили по СТО 1-595-20-532. Определение температуры стеклования проводили по ГОСТ Р 567553-2015. Кинетику протекания реакций отверждения и релаксационные переходы в отверждённых образцах при динамическом режиме нагрева исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Поверхностное натяжение растворных связующих изме-

ряли методом пластины Вильгельме с использованием процессорного тензиометра. Динамическую вязкость связующих измеряли с использованием вискозиметров. Свободная энергия поверхности (СЭП) стекло- и углеволокна рассчитывалась на основе краевого угла смачивания в двух тестовых жидкостях: полярной (дистиллированная вода) и неполярной (н-гексан) методом Оунса, Вендта, Рабеля и Къельбле (ОВРК). Работу адгезии (WA) наполнителя к связующему рассчитывали на базе СЭП волокна и характеристик связующих (поверхностное натяжение, полярность). Измерение величины микротвердости образцов с различными режимами отверждения проводили с помощью микротвердомера ПМТ-3М (ГОСТ 9450-76), в зонах представленных на рисунке 2.



Рисунок 2 – Координатная схема расположения зон в образце:
 S – толщина образца; 1 – подповерхностная зона

Оценку образцов склерометрическим методом проводили с использованием скретч-тестера (рисунок 3)

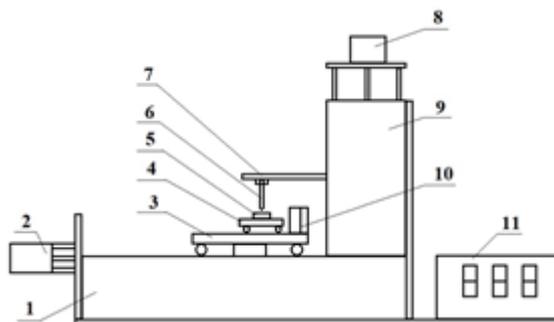


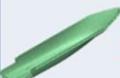
Рисунок 3 – Принципиальная схема скретч-тестера СТ-01:
 1 - неподвижная платформа; 2 - двигатель привода подвижной платформы; 3 - подвижная платформа; 4 - тележка установки образца; 5 - образец; 6 - алмазный индентор; 7 - тензодатчик нагрузки индентора; 8 - двигатель привода индентора; 9 - привод индентора; 10 - тензодатчик силы сопротивления; 11 - блок управления

Для построения прогностических моделей применялся комплекс методов статистического анализа и машинного обучения в программах Pyhton 3.12, PyCharm.

В третьей главе показано как в соответствии с разработанными научно-технологическими подходами первоначально осуществляется выбор сервисных и технологических характеристик ПКМ с учётом требований к конструкции: габаритные размеры, пространственная форма, сервисные требования (прочность, жёсткость, рабочие температуры эксплуатации, пожаробезопасность, радиопрозрачность и др.), серийность. Исходя из выбранных характеристик определяются природа полимерного связующего и армирующего наполнителя, их технологические свойства и способ совмещения и формования (диапазоны конечных температур отверждения и удельного давления), определяется экономическая составляющая по применяемым основным и вспомогательным материалам, оснащению и используемому оборудованию (таблица 1).

Исходя из представленной таблицы формируются требования к технологическим свойствам полимерного связующего и армирующего наполнителя для осуществления их совмещения.

Таблица 1 – Критерии выбора технологии изготовления конструкций из ПКМ

габариты деталей, до ... м	способ совмещения	природа связующих	способ формования	Удельное давление формования, МПа	Температура формования, °С	стоимость вспомогательных материалов	стоимость оснастки	стоимость оборудования	серийность
 до 1	препрег	фенольная, эпоксидная, кремнийорганическая, полиимидная, бисмалеимидная, полициануратная	термокомпрессия	до 2,0	до 200	низкая	высокая	низкая	высокая
 до 3,5	препрег, пресс композиции (SMC)	фенольная, эпоксидная, кремнийорганическая, полиимидная, БМИ	прессовое формование	до 6,0	до 200	низкая	высокая	средняя	высокая
 до 8	Мокрая намотка	винилэфирная, полиэфирная, эпоксидная	намотка	до 0,3	20-80	низкая	высокая	низкая	высокая
	препрег	винилэфирная, полиэфирная, эпоксидная	намотка	до 0,3	до 200	низкая	высокая	низкая	высокая
 до 24	препрег	фенольная, эпоксидная, кремнийорганическая, полиимидная, бисмалеимидная, полициануратная	вакуум-автоклавное	до 1,0	до 200	средняя	средняя	высокая	низкая
	препрег	фенольная, эпоксидная	вакуум-печное	0,095	до 200	средняя	средняя	низкая	низкая
 до 30	инфузия	Эпоксидная, полиимидная, цианатэфирная.	вакуум-печное	0,095	до 200	высокая	средняя	низкая	низкая
 до 100	контактное формование	винилэфирная, полиэфирная, эпоксидная	контактное формование	На воздухе	20-80	низкая	низкая	низкая	высокая
	инфузия	винилэфирная, полиэфирная, эпоксидная	В помещении	На воздухе	20-80	средняя	средняя	низкая	низкая
 ∞ м	Непрерывный Процесс	винилэфирная, полиэфирная, эпоксидная	пултрузия ролтрузия	до 1	80-160	низкая	средняя	средняя	высокая

В главе 1 говорится о том, что самыми распространёнными способами совмещения полимерных связующих и наполнителей в авиастроении на сегодняшний день являются препреговые и инфузионные (трансферные) технологии. Основными технологическими параметрами полимерных связующих для совмещения с армирующим наполнителем являются кажущаяся вязкость и время их жизнеспособности на этапах совмещения армирующего наполнителя и отверждения ПКМ.

На рисунке 4 приведены параметры кажущейся вязкости полимерных связующих, в процессе нагрева.

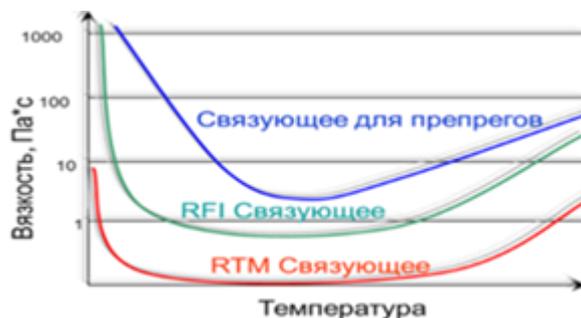


Рисунок 4 – Кажущаяся вязкость полимерных связующих при изотермической выдержке

Из диаграммы рисунка 4 можно увидеть, что их реология для разных процессов совмещения должна быть различна и на этапе пропитки, связующее должно обладать низкой кажущейся вязкостью для снижения поверхностного натяжения и лучшей смачиваемости поверхности наполнителя.

Кривые иллюстрируют три ключевых этапа:

1. Снижение вязкости при нагреве – обусловлено терморазмягчением материала без химических превращений.
2. Температурно-временное плато – область стабильной вязкости, критически важная для технологических процессов. Длительность и положение плато определяются исходными компонентами связующего: типом олигомеров, реакционной способностью функциональных групп и наличием модификаторов.

3. Рост вязкости – связан с началом трёхмерной полимеризации (отверждения), что приводит к гелеобразованию.

Представленные данные подчёркивают важность точного подбора состава связующего для управления реологией реактопластов (регулируемая вязкость), с целью обеспечения смачиваемости волокон на этапе пропитки и исключения избыточного вытекания из заготовки детали ПКМ на этапе отверждения, что достигается введением термопластичных добавок в их состав. Одновременно оптимизация плато, как за счёт подбора необходимых характеристик исходных материалов, так и за счёт технологии переработки, способствует минимизации появления возможных дефектов при изготовлении полуфабрикатов.

Полимерные связующие, изготавливаемые с применением растворных технологий, а также изготовленные с применением разбавителей и низковязких систем обладают высокой смачивающей способностью, их приготовление ввиду низкой вязкости довольно простое и ведётся обычно в реакторах с якорной мешалкой, что обеспечивает хорошую гомогенизацию составов.

В отличие от них расплавные полимерные связующие за счёт модификации термопластичными добавками, имеют повышенную вязкость при нормальных и повышенных температурах. Именно по этой причине их изготовление не представляется возможным в реакторах с якорными мешалками и их приготовление потребовало применения специального оборудования и технологических подходов.

Показано, что в серийных высокоэффективных процессах приготовления расплавных полимерных терморективных связующих, исключающих применение токсичных растворителей, применяют планетарные смесители, т.к. они обеспечивают массоперенос по всему объёму ёмкости смешения за счёт механического воздействия лопастей на перемешиваемую смесь по всему объёму и приложение значительных сдвиговых нагрузок к перемешиваемой композиции. Это позволяет эффективнее, по сравнению с традиционными реакторами, воздействовать на вязкие смеси и смеси с порошкообразными наполнителями.

Показано, что расплавные связующие, особенно модифицированные термопластичными добавками, в отличие от растворных, синтезируют при повышенных температурах, достигающих значений 130 °С. Это необходимо для обеспечения растворения в них пластифицирующих добавок. Одновременно с этим в указанные связующие необходимо ввести мелкодисперсные отвердители и осуществить гомогенизацию, не допуская перегрева, который может привести к возникновению экзотермии смеси и возгоранию связующего.

Представлены температурные диапазоны растворения термопластичных добавок в эпоксидных смолах. Реологическое поведение смеси олигомера ЭД-20 с нерастворённым полиарилсульфоном ПСФФ-30 характеризуется s-образным видом зависимости вязкости от температуры при нагреве смеси с постоянной скоростью (рисунок 5 а).

Показано, что вязкость смесей ЭД-20 и ПСФФ-30 выше вязкости исходной смолы, во всем диапазоне температур, при этом в том же диапазоне температур величина вязкости смеси тем выше, чем выше доля термопластичной добавки. Одновременно вязкость при повышении температуры снижается в соответствии с уравнением Аррениуса (рисунок 5 а). После достижения температуры около 70 °С динамическая вязкость системы начинает возрастать, что связано с процессом растворения ПССФ-30 в эпоксидном олигомере (ЭО). Изменение вязкости дисперсной системы ЭО-полиарилсульфон связано с несколькими параллельными процессами: происходит взаимодиффузия эпоксидного олигомера и полиарилсульфона, при этом вокруг частиц образуются концентрационные градиенты (рисунок 5 б), протяжённость которых определяется размером частиц и продолжительностью процесса. Указанные процессы приводят к изменениям вязкости системы до момента образования гомогенного раствора. После полного растворения полиарилсульфона вязкость раствора уменьшается при повышении температуры.

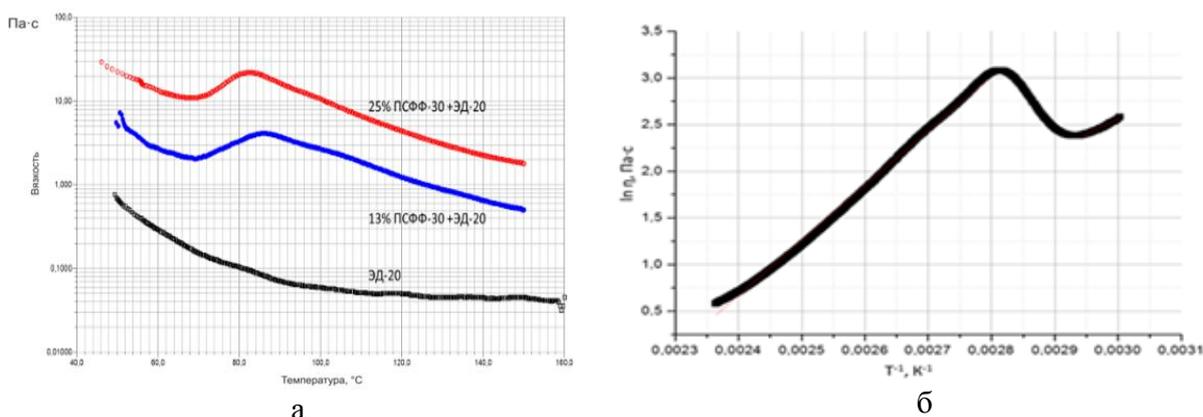


Рисунок 5 – Зависимость динамической вязкости смолы ЭД-20, и её смеси с ПСФФ-30 (13 % и 25 %) от температуры при нагревании со скоростью 2 °С/мин (а), Зависимость вязкости смеси ЭД-20 и ПСФФ-30 (25 % масс.) от температуры при нагревании со скоростью 2 °С/мин (б)

Одновременно показаны результаты исследований растворения и влияния на свойства смесей на основе эпоксидных олигомеров и полиарилсульфонов марок ПСК-1, ПССФ-60 и ПССФ-90.

Рассмотрена проблематика введения дисперсных отвердителей в полимерное связующее. Определён приемлемый диапазон дисперсности частиц различных порошковых систем отверждения для стабилизации теплофизических характеристик полимерного связующего, который достигается измельчением способом дробления дисперсных отвердителей в мельнице до порошкообразного состояния и их смешение со смоляной частью (премикс) на трёхвалковых мельницах в несколько этапов.

Показано исследование влияние свойств исходных компонентов на клеевой сдвиг серийно изготавливаемого расплавного полимерного связующего марки ВСК-14-2м (рисунок 6).

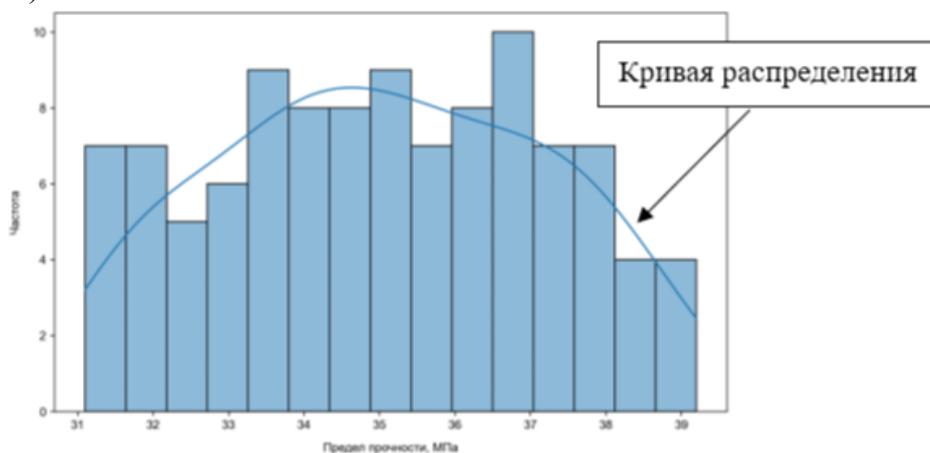


Рисунок 6 – Гистограмма и кривая распределения предела прочности при клеевом сдвиге для исследуемого полимерного связующего

По результатам исследований составлено уравнение многофакторной (множественной) линейной регрессии, которое имеет вид:

$$Y = 35,097 - 0,321X_1 - 0,095X_2 + 0,377X_3 + 0,455X_4 + 0,336X_5 + 0,63X_6 - 0,034X_7 + 0,666X_8,$$

где Y – целевая переменная, предел прочности при клеевом сдвиге полимерного связующего, X_1 – массовая доля летучих веществ связующего, X_2 – вязкость связующего, X_3 – массовая доля эпоксидных групп для ЭД-20, X_4 – массовая доля эпоксидных групп для ЭХД, X_5 – рН водной вытяжки термопласта, X_6 – число вязкости для термопласта, X_7 – влажность термопласта, X_8 – температура стеклования термопласта.

На рисунке 7 а и б показаны степень влияния характеристик исходных компонентов на значение клеевого сдвига исследуемого связующего и график корреляции фактических и рассчитанных по уравнению регрессии значений клеевого сдвига исследуемого связующего (соответственно).

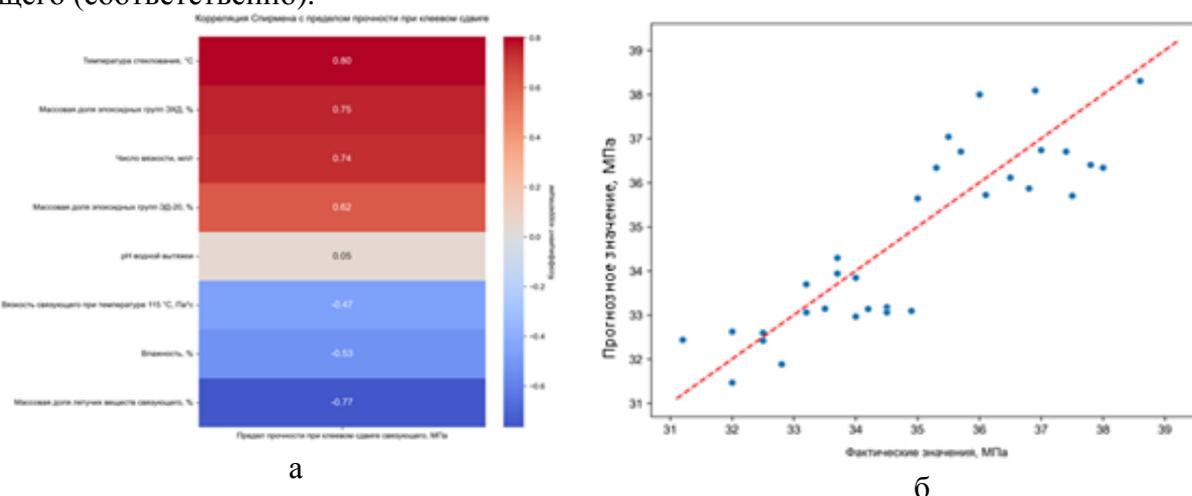


Рисунок 7 – Степень влияния характеристик исходных компонентов на клеевой сдвиг исследуемого связующего (а) и график корреляции фактических и рассчитанных по уравнению регрессии значений клеевого сдвига исследуемого связующего (б)

Показано, что отрицательные корреляции выявлены для следующих параметров: массовая доля летучих веществ ($r_s = -0.77$, $p < 0.01$), влажность ($r_s = -0.53$, $p < 0.01$), вязкость при 115 °C ($r_s = -0.47$, $p < 0.01$). С учётом вышеизложенного были внесены корректировки при отработке процессов изготовления полимерных связующих марок ВСК-14-1, ВЭС-1212, ВСК-14-4, ВСК-14-4к, ВСК-14-2, ВСК-14-2м и ВСК-14-4м: введена операция дегазации исходных смол, ужесточены требования к помещениям, где ведутся процессы изготовления расплавных связующих, что повысило стабильность их технологических и прочностных свойств. Кроме того, полученные результаты исследований учитываются при создании технологических процессов изготовления новых полимерных связующих.

В тоже время при анализе свойств армирующих наполнителей учитываются: морфология поверхности волокон, удельная поверхность, физико-химические и теплофизические свойства, механические свойства, поверхностно-энергетические и адсорбционные характеристики. При этом одним из основных параметров стабильности при формовании пластиков является показатель монослоя, на который влияет поверхностная плотность применяемого армирующего наполнителя и его уплотнение под избыточным давлением. В этой связи проведена оценка указанных показателей, широко применяемых в серийных процессах. На основании полученных результатов по формуле:

$$C_{св} = \frac{(V_{пкм} - \frac{m_{нап}}{\rho_{нап}}) \times \rho_{св}}{(V_{пкм} - \frac{m_{нап}}{\rho_{нап}}) \times \rho_{св} + T_{нап}} \times 100, \text{ где} \quad (1)$$

$V_{пкм}$ – объём беспористого пластика, $см^3$;

$m_{нап}$ – поверхностная масса $1 м^2$;

$\rho_{нап}$ – плотность угольных нитей, $г/см^3$;

$\rho_{св}$ – плотность отверждённого связующего

определены диапазоны требуемого содержания полимерного связующего при изготовлении препрега.

Представлены зависимости расчётных диапазонов поверхностных плотностей плёнок полимерных связующих в зависимости от величины слоя используемого армирующего наполнителя в зависимости от варьирования удельного давления формования ПКМ для изготовления препрегов (рисунок 8).

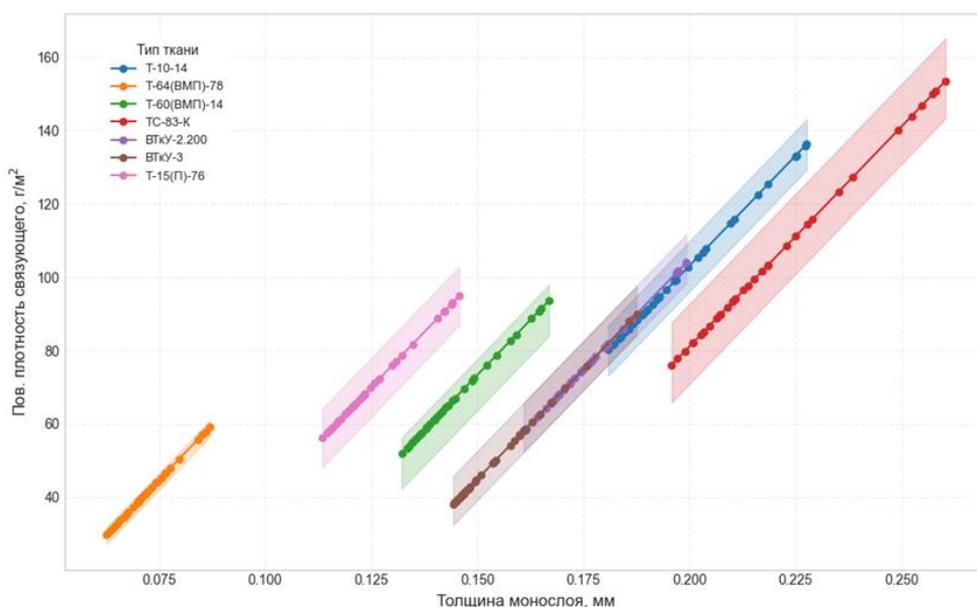


Рисунок 8 – Зависимость поверхностной плотности плёнки связующего от величины слоя армирующего наполнителя при различных усилиях сжатия.

Из рисунка 8 можно увидеть, что в зависимости от прикладываемого давления формирования содержание связующего в полуфабрикате должно варьироваться для обеспечения заданного монослоя в отверждённом ПКМ.

Одновременно представлены исследования смачиваемости поверхности волокон армирующих наполнителей с использованием процессорного тензиометра. В таблице 2 приведены результаты измерений.

Таблица 2 – Измерение краевого угла смачивания и СЭП различных наполнителей различных марок

№ п/п	Наименование наполнителя	КУС, θ		СЭП, мН/м
		в воде	в гексане	дисперсная/полярная
1	Ткань Т-10-80	75,34±1,68	12,62±2,53	31,54±1,21 17,96±0,18/13,58±1,03
2	Ткань Т-10-80 после удаления аппрета	74,13±2,72	33,97±3,43	31,47±2,39 16,15±0,59/15,32±1,80
3	Ткань Т-10-14	79,58±2,14	16,59±0,32	29,33±1,22 18,50±0,03/10,83±1,19
4	Ткань Т-10-14 после удаления аппрета	79,73±1,22	39,46±3,31	27,53±1,43 15,15±0,63/12,38±0,80
5	UMT49S-12K	70,86±8,79	32,21±6,80	33,76±7,12 16,44±1,13/17,32±6,00
6	UMT49S-12K после удаления аппрета	86,94±1,29	25,11±2,75	24,97±1,00 17,52±0,37/7,45±0,62
7	УВ49S-12K	76,0±1,36	22,88±0,32	31,06±1,06 17,81±0,22/13,25±0,83
8	УВ49S-12K после удаления аппрета	80,35±3,63	34,07±3,88	27,65±2,79 16,13±0,67/11,52±2,12

Показано, что после удаления аппрета контактный угол смачивания стекловолокна в воде – практически не изменился, а в гексане – заметно увеличился (КУС повысился в 2-2,5 раза), соответственно уменьшилась СЭП стекловолокна и предполагаемая работа адгезии, определяемая в первую очередь значением дисперсной части СЭП волокна и поверхностным натяжением самого связующего. Для углеволокон наблюдается такая же закономерность, как и для стекловолокна, т.е. с удалением аппрета поверхностные энергетические характеристики, в частности СЭП, как и следовало ожидать, снижается. Однако, уменьшение СЭП может объясняться разными причинами: для УВ49S-12K оно связано с общим увеличением КУС как для воды, так и для гексана, в случае же UMT49S-12K с увеличением КУС в воде и уменьшением в гексане. Вероятно, это связано с различной при-

родой используемого аппрета. Можно предположить, что аппрет, нанесённый на UMT49S-12K, прививал поверхности большее количество полярных групп, нежели аппрет на UB49S-12K, ввиду чего после удаления аппрета поверхность стала более чувствительной к дисперсионной фазе и стала менее полярной. Обнаруженные взаимосвязи подчёркивают важность создания универсальной методики изучения ключевых характеристик композитных материалов и углублённого изучения свойств базовых материалов, используемых при разработке ПКМ.

В четвертой главе рассматриваются вопросы создания высокоэффективных процессов совмещения армирующих наполнителей и связующих, повышающих производительность и качество продукции в сравнении с традиционными технологиями пропитки.

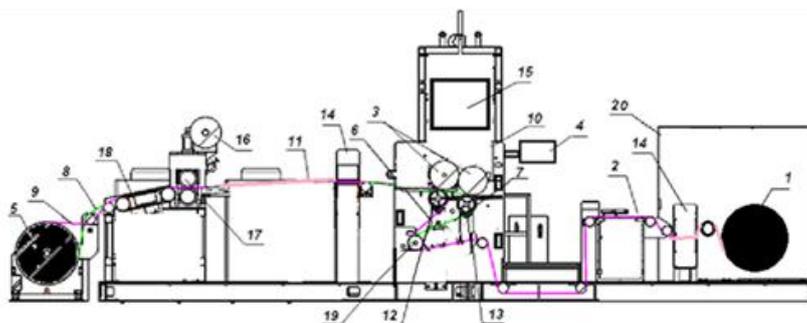
На стадии пропитки необходимо добиваться полного смачивания связующим не только поверхности нитей, но и каждого моноволокна в нити не зависимо от используемого способа совмещения - препрегового или прямых (трансферных) процессов. И в том, и в другом случае необходима точная дозировка полимерного связующего для достижения заданной величины монослоя в отверждённом ПКМ, при этом величина монослоя в ПКМ зависит от поверхностной плотности армирующего наполнителя, содержания связующего и прилагаемого усилия при формовании ПКМ.

Наиболее высокоэффективным способом, обеспечивающей высокую производительность препрега до 8 м/мин и высокую точность распределения полимерного связующего, является дублирование плёнок полимерных связующих с армирующими наполнителями. При этом изготовление плёнок полимерных связующих и их совмещение (дублирование) может вестись по одностадийному технологическому процессу (онлайн) или по двухстадийному: изготовление плёнки связующего или клея на отдельно стоящем коутере; совмещение на отдельно стоящей линии (офлайн).

Офлайн комплекс для изготовления препрегов – это высокотехнологичный продукт интеграции механических и электрических компонентов, состоящий из коутера (рисунок 9), используемого для изготовления плёнок связующего или клея, а также из двух линий совмещения: универсальной (способной изготавливать препреги как из однонаправленных жгутов, так и из тканых наполнителей) и тканой (способной изготавливать препреги из тканых наполнителей) (рисунок 10).

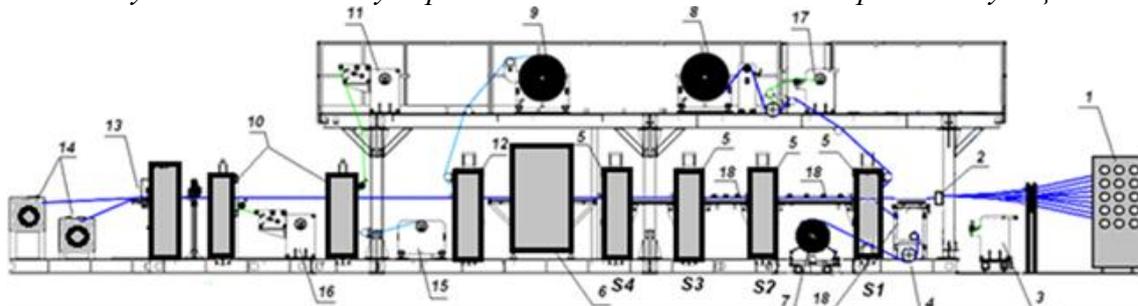
Такое разделение обосновывается тем, что оптимальные скорости изготовления плёнок связующего и его совмещения с наполнителем разнятся, и как показывает опыт, оборудование онлайн более сложное в управлении, т.к. управление параметрами пропитки необходимо осуществлять на двух узлах нанесения плёнок связующего и каландрах совмещения, что требует привлечения дополнительного высококвалифицированного персонала. Кроме того, коутер оснащён системой радиометрических сканеров, обеспечивающих точную подстройку технологических параметров непосредственно во время процесса изготовления плёнки связующего за счёт увязки показаний сканирующего устройства и наносящего узла.

Описан принцип работы коутера. Поверхностная плотность плёнки для изготовления препрегов определяется для конкретной марки связующего исходя из определения поверхностной плотности используемой марки армирующего наполнителя и расчётных показателей, представленных на рисунке 8. Основными регулируемыми факторами в процессе изготовления плёнки связующего на коутере являются: зазор между валами; скорость вращения наносящего вала; скорость протяжки подложки.



1 – размотчик бумаги; 2 – стол для склейки бумаги; 3 – кроющие валы; 4 – поворотный пульт управления; 5 – устройство для намотки; 6 – заправка бумаги для «прямого» покрытия; 7 – заправка бумаги для «обратного» покрытия; 8 – заправка бумаги для намотки без полиэтиленовой плёнки; 9 – заправка бумаги для намотки с полиэтиленовой плёнкой; 10 – ограничительные щёчки; 11 – охлаждаемый стол; 12 – обрезиненный вал; 13 – мерный вал; 14 – сканеры; 15 – узел предварительного плавления связующего; 16 – размотчик полиэтиленовой плёнки; 17 – валы совмещения с полиэтиленовой плёнкой; 18 – вакуумный стол; 19 – ламинирующий вал; 20 – силовой электрический щит.

Рисунок 9 – Схема коутера по нанесению плёнок полимерных связующих.



1 – шпулярник; 2 – нагревательные плиты; 3 – размотчики ткани; 4 – вал; 5 – каландры с нагревом; 6 – охлаждаемый стол; 7 – нижний размотчик плёнки связующего; 8 – верхний размотчик плёнки связующего; 9 – верхний намотчик силиконизированной бумаги; 10 – ламинаторы (№ 2, № 3); 11 – размотчик полиэтиленовой плёнки; 12 – тянущий вал; 13 – устройство правки кромки и отрезки; 14 – намотчики готового препрега; 15 – нижний намотчик силиконизированной бумаги; 16 – нижний размотчик полиэтиленовой плёнки; 17 – верхний намотчик полиэтиленовой плёнки.

Рисунок 10 – Схема линии совмещения плёнок связующих с армирующими наполнителями

По результатам проведённых экспериментальных исследований составлено математическое уравнение многофакторной (множественной) линейной регрессии, описывающее влияние зазора между валами (X_1), коэффициента вращения вала относительно скорости протяжки подложки (X_2) и скорости протяжки подложки (X_3) на поверхностную плотность изготавливаемой плёнки связующего (Y):

$$Y = 55,737 + 6,363X_1 + 6,959X_2 + 7,418X_3$$

На рисунке 11 а и б показаны степень влияния параметров технологического процесса на поверхностную плотность плёнки связующего и график корреляции фактических и рассчитанных по уравнению регрессии значений поверхностной плотности плёнки связующего соответственно.

По результатам исследований разработаны высокопроизводительные технологические процессы (до 12 м/мин) изготовления высокоточных по поверхностной плотности ($\pm 0,5\%$) плёнок полимерного связующего для последующего изготовления препрегов, а также плёночных клеев ВК-36РТ.140, ВК-36РТ.170, ВК-36РТ.260. Оформлена соответствующая НД на их изготовление.

Проведённые исследования характеристик указанных материалов и их стабильность по ширине и длине рулонов подтвердили правильность выбора параметров процесса разработанных технологий. В УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» освоено серийное производство указанных марок материалов.

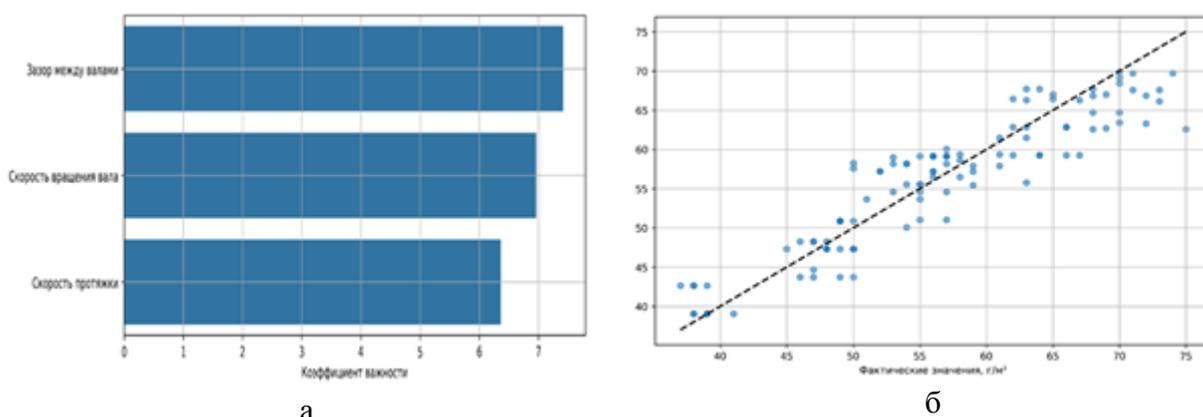


Рисунок 11 - Степень влияния параметров технологического процесса на поверхностную плотность плёнки связующего (а) и график корреляции фактических и рассчитанных по уравнению регрессии значений поверхностной плотности плёнки связующего (б)

Показаны результаты исследований влияния параметров технологического режима (скорость протяжки ткани, зазор между валами, температура валов и др.) на линии совмещения на характеристики изготавливаемого препрега. Совмещение плёнки связующего и жгутовых наполнителей проводилось с применением универсальной линии, показанной на рисунке 10. На примере отработки изготовления препрега марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200, определены параметры технологических режимов изготовления тканых препрегов - скорость протяжки плотна 3-6 м/мин и следующие параметры нагревательных устройств: - первая нагревательная плита от 90 °С; - вторая нагревательная плита от 90 °С; - третья нагревательная плита от 95 °С; - охлаждающая плита от (20 ± 5) °С; - каландр S1 от 90 °С; - каландр S2 от 110 °С; - каландр S3 от 110 °С; - каландр S4 от 115 °С. По результатам отработки разработана технология изготовления препрега.

В связи с тем, что стабильность показателей массовой доли связующего в препреге и его поверхностной плотности должна обеспечиваться плёнкой полимерного связующего, изготавливаемой на коутере с автоматизированной системой управления, то для подтверждения указанных показателей проведён анализ качества изготовленных серийных партий препрега марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Анализ проводился по данным протоколов испытаний. На рисунке 12 в графическом виде представлены характеристики партий углеродного наполнителя марки ВТкУ-2.200 и изготовленных партий препрегов углепластика ВКУ-39. В таблице 3 представлены результаты расчёта статистических характеристик препрега ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

По результатам исследований показана высокая сходимость результатов по параметрам – массовой доли связующего и поверхностной плотности препрега, что подтверждает правильность выбранных параметров технологического процесса. Установлено, что изготавливаемые препреги имеют разброс массовой доли содержания связующего в диапазоне не более 2 %, что говорит о высоком качестве и прецизионности их изготовления.

С использованием разработанных подходов созданы высокоэффективные технологические процессы (производительность до 6 м/мин) изготовления прецизионных препрегов по массовой доле содержания связующего (2 %) марок ВКУ-25, ВКУ-29/ВТкУ-3, ВКУ-39/ВТкУ-2.200, ВСП-3М/ВТкУ-2.280, ВСП-3М/РВМПН-10-400, ВСП-3М/Т-25(ВМП), ВПС-31, КМКУ-3м.150.УМТ49, препреги марок КМКС. Проведённые исследования характеристик указанных материалов и их стабильность по ширине и длине рулонов подтверждают правильность выбора параметров процесса разработанных технологий. Оформлена соответствующая НД на их изготовление. В УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» освоено серийное производство указанных марок материалов. Кроме того, полученные результаты исследований учитываются при создании технологических процессов изготовления новых марок препрегов.

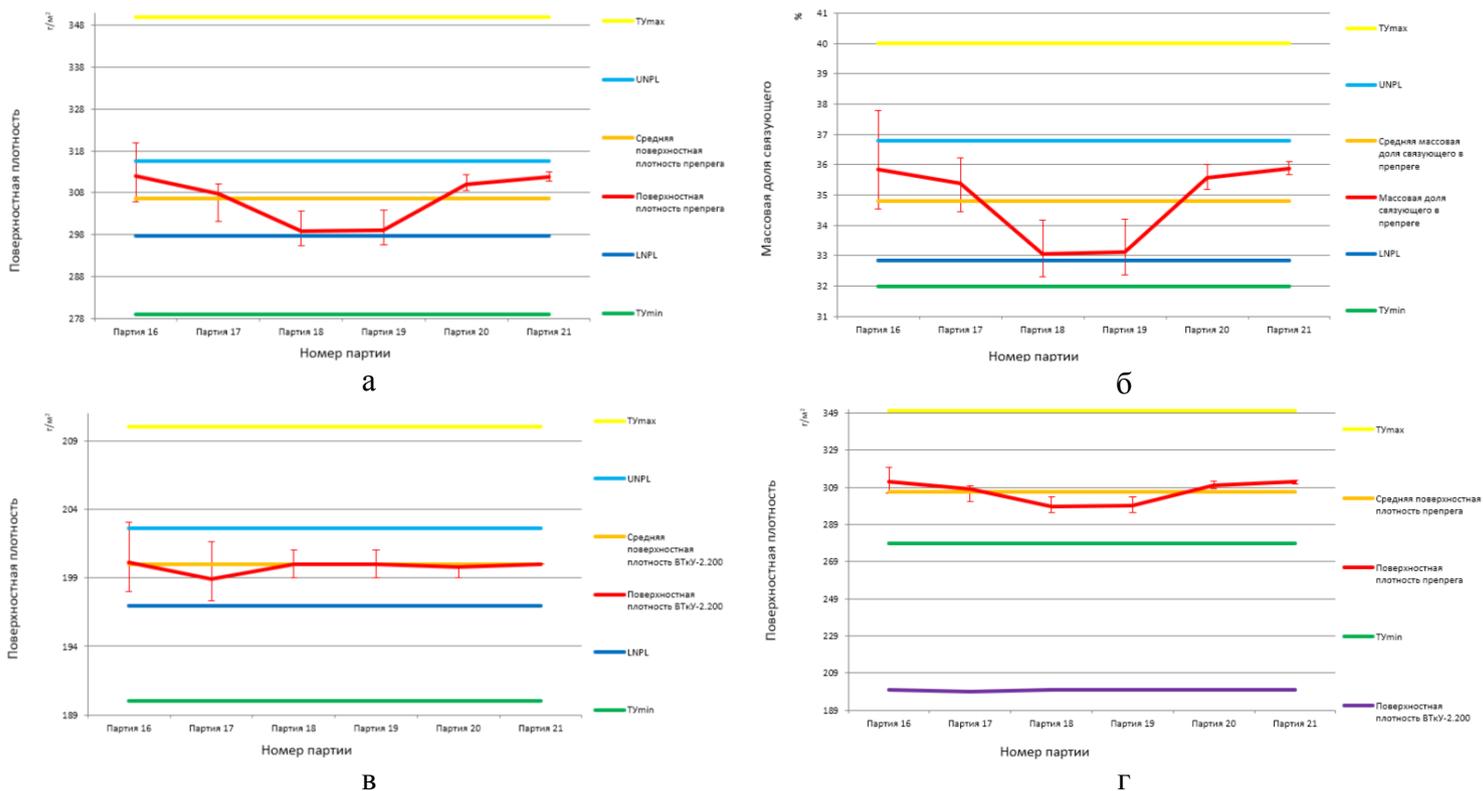


Рисунок 12 - Контрольная карта индивидуальных значений показателей поверхностной плотности препрега ВКУ-39/ВТкУ-2.200 (а), контрольная карта индивидуальных значений показателей массовой доли связующего в препреге ВКУ-39/ВТкУ-2.20 (б), контрольная карта индивидуальных значений показателей поверхностной плотности ткани ВТкУ-2.200 (в) и поверхностные плотности ВТкУ-2.200 и препрега ВКУ-39/ВТкУ-2.200 (г)

Таблица 3 – Результаты расчёта статистических характеристик препрега ВКУ-39/ВТкУ-2.200

Характеристика	Объём выборки	Данные нормативной документации		Число выпадов за значения в нормативной документации	Значение «среднее средних», $\bar{\bar{X}}$	Индекс воспроизводимости процесса C_p	Размах по партии R
		X_{min}	X_{max}				
Массовая доля связующего, %	6 партий	32	40	0	35	0,9	2
Поверхностная плотность препрега, г/м ²		279	350	0	307	35	8

Выбраны и обоснованы подходы для оценки сроков гарантийного хранения препрегов, проведено исследование и установлен уровень изменения физико-химических и механических свойств препрегов и ПКМ на их основе в процессе хранения препрегов.

Для осуществления прямых (трансферных) процессов совмещения полимерных связующих и армирующих наполнителей по методам light RTM (VARTM, RFI) и RTM определены технологические свойства полимерных связующих (кажущаяся вязкость и жизнеспособность), предложена схема расчёта содержания связующего в заготовке ($C_{св}$), с учётом технологических потерь $C_{св.п.}$ и статического разброса величин слоя армирующего наполнителя с учётом давления формования в пересчёте на поверхностную плотность плёнки связующего (рисунок 8).

$$C_{св.п.} = \frac{m_{\text{пакета}} \cdot C_{св.}}{100 - C_{св.}} \cdot K_{\text{ост}} \quad (2)$$

где $m_{\text{пакета}}$ - масса сухого пакета, кг;
 $K_{\text{ост}}$ – коэффициент запаса, определяющий массу оставшегося связующего в распределительной сетке и шлангах равный 1,2-1,4;
 $C_{св.}$ – рассчитанное по формуле (1) содержание связующего в ПКМ, %.

Показано имитационное компьютерное моделирование процесса инфузии при изготовлении профилированного настила с габаритными размерами 3000 x 1500 мм (для конструкции мостового сооружения в качестве порталной стенки и слоя, перераспределяющего нагрузку от дорожного полотна на арочные конструкции), учитывающее коэффициента проницаемости заготовки из слоёв армирующих наполнителей (рассчитанный по закону Дарси) (рисунок 13)

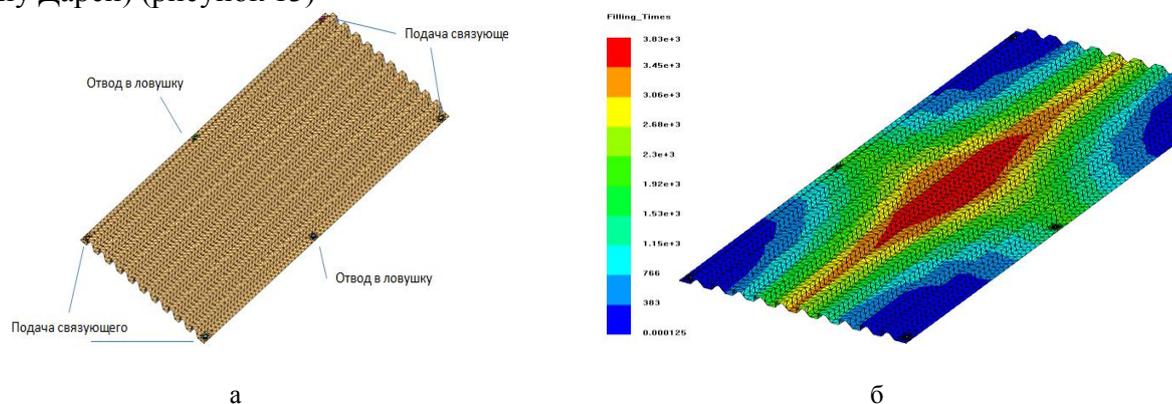


Рисунок 13 - Положение точек инжекции для пропитки

С учётом вышеизложенного разработана технология изготовления профилированного настила. Изготовленные по разработанной технологии настилы использованы при строительстве мостового сооружения в р.п. Языково Ульяновской области.

Показано, что выработанные подходы применены при разработке технологии изготовления углепластика ВКУ-48//ВТкУ-5 (паспорт № 1916). Приведена микроструктура разработанного углепластика, результат анализа которой показал, что в местах переплетения углеродных нитей присутствует полимерная матрица, межволоконное пространство заполнено полимерной матрицей, что характеризует хорошее проникновение связующего в межволоконное пространство, пор и непроклеев не обнаружено. Структура матрицы однофазная, что подтверждает правильность выбора параметров процесса разработанных технологий. По результатам испытаний разработанного углепластика на соответствие образцов АП-29 (при температуре 1100 °С продолжительности испытаний 5 и 15 мин) все изученные материалы классифицированы как огнестойкие и огнепроницаемые соответственно, сквозное прогорание материалов отсутствовало.

Приведены данные по разработке с использованием выбранных технологий изготовления Органит 11ТЛ и ВКО-19Л методом RFI. Разработанные материалы были испытаны в объёме паспорта и показали высокий уровень упруго-прочностных свойств, а также сохранение свойств после воздействия агрессивных сред и были рекомендованы к применению в промышленности.

Пятая глава в соответствии с разработанной схемой научно-технологических основ (рисунок 1) посвящена отработке отверждения ПКМ, а именно выбору температурно-и манометрически-временных параметров отверждения ПКМ. Исходя из предложенной в главе схемы на начальном этапе выбирается скорость нагрева заготовки ПКМ, затем определяются реокинетические параметры полимерного связующего, с определением температуры и времени минимальных значений вязкости, определяются величины температурных ступеней уплотнения технологического пакета, а также динамики и длительность его уплотнения, прогнозируются степень конверсии функциональных групп на конечных изотермических выдержках, прогнозируются температурно-временные режимы отверждения, с учётом варьирования промежуточных температурных ступенек, с целью оценки их влияния на изменение вязкости связующего и тепловых эффектов при нагреве.

Показано, что ещё одним важным аспектом при отверждении полимерных связующих и ПКМ на их основе является распределение температуры по их толщине. Представлена зависимость изменения температуры в образце связующего ЭДТ-69Н (толщиной 20 мм) от продолжительности отверждения на поверхности образца (1), в 5 мм от поверх-

ности (2) и в середине образца (3) смоделированное при помощи специального программного обеспечения (рисунок 14 а). Одновременно смоделирована зависимость степени конверсии по толщине того же образца ЭДТ-69Н при продолжительности отверждения на различных температурах (рисунок 14 б).

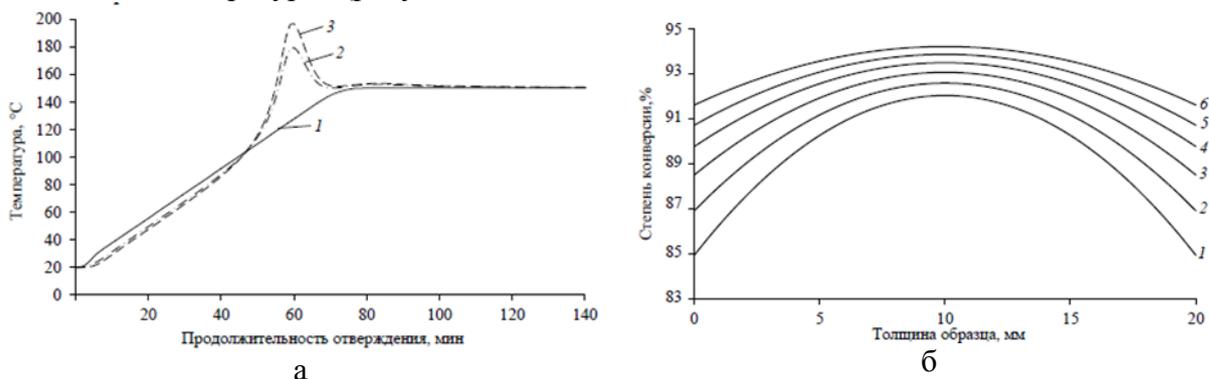


Рисунок 14 – а - Зависимость изменения температуры образца от продолжительности отверждения на поверхности образца (1), в 5 мм от поверхности (2) и в середине образца (3); б - Зависимость степени конверсии от расстояния от поверхности образца при продолжительности отверждения 95 (1), 100 (2), 105 (3), 110 (4), 115 (5) и 120 (6) мин.

Из рисунка 14 а установлено, что в процессе отверждения по заданному режиму на определённом этапе происходит интенсивное выделение тепла, которое из-за сравнительно малой теплопроводности полимерного связующего приводит к значительному перегреву внутренних областей образца. Вследствие выделения тепла в образце появляется значительный градиент температуры. Так, если на его поверхности температура равна температуре нагревателя, то в середине она составляет уже 197 °С, что превышает заданное значение на 67 °С и приведёт к возгоранию и деградации свойств.

Из рисунка 14 б можно увидеть, что полученные кривые свидетельствуют о том, что наибольшую степень конверсии наблюдают в середине образца, а минимальную – у его поверхности.

Представлены результаты исследования кинетических параметров отверждения и степени конверсии функциональных групп с использованием впервые предложенных методов склеро- и микротвердомерии, являющимися дифференциальными методами оценки свойств материала. Представлено изменение микротвердости по толщине образца из связующего марки ЭДТ-69Н, отверждённого при температурах 130 (1; в вакууме), 130 (2), 140 (3), 150 (4), 160 (5) и 170 (6) °С на рисунке 15.

Полученные зависимости отверждения образца связующего ЭДТ-69Н по степени конверсии и его микротвердости. в сечении по толщине образца имеют параболический вид. При увеличении продолжительности полимеризации кривые приобретают более пологий вид и в конечном итоге становятся неотличимыми от прямой линии.

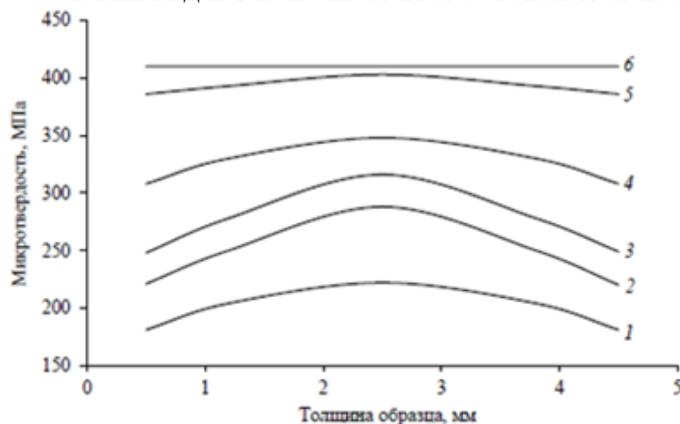


Рисунок 15 – Изменение микротвердости по толщине образца из связующего марки ЭДТ-69Н, отверждённого при изотермических выдержках 130 (1; в вакууме), 130 (2), 140 (3), 150 (4), 160 (5) и 170 (6) °С

Приведены результаты измерения микротвердости по толщине образцов полимерных связующих различной природы и толщин (рисунок 16)

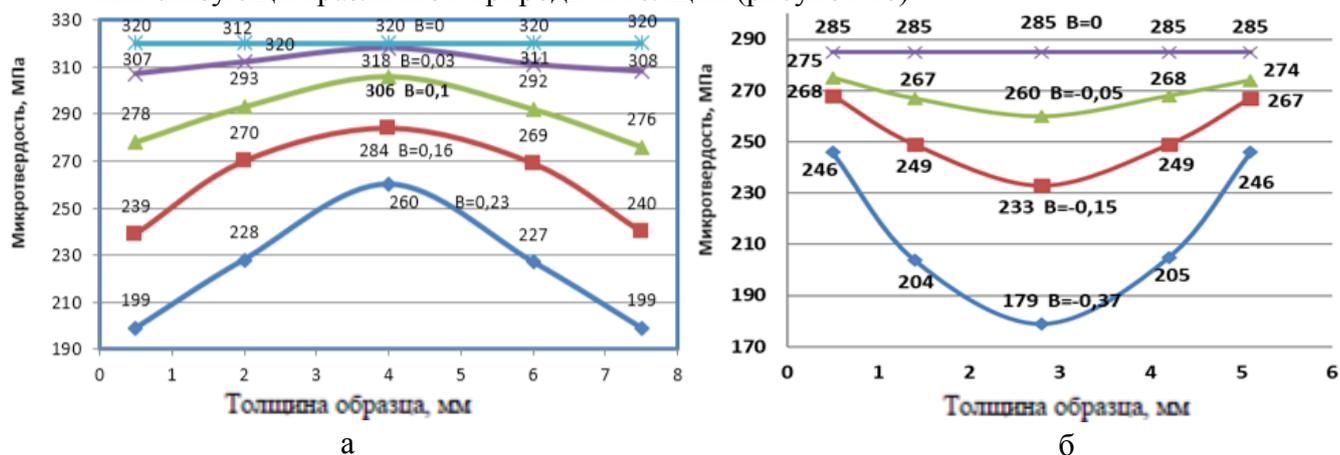


Рисунок 16 - Микротвердость в сечении отверждённых образцов при различной длительности ультрафиолетового облучения полиэфирного связующего PO 4761 (а), микротвердость в сечении образцов связующего марки PC-N (б), отверждённых при различных конечных температурах
 ◆ -135 °C-2 часа, ■ -145 °C-2 часа, ▲ - 165 °C-2 часа, х - 210 °C-2 часа.

Показано, что изменение микротвердости в сечении исследуемых образцов подчиняется параболическому закону. С ростом температуры отверждения ветви параболы становятся более пологими и при некоторой (критической) температуре значения микротвердости в сечении образца выравниваются, а сама парабола перерождается в прямую линию. Для связующих, реакции в которых идёт с выделением тепла (экзотермическая) максимальные значения микротвердости расположены в вершине параболы, а минимальные на её ветвях, которые направлены вниз. Для связующих, реакции в которых идёт с поглощением тепла (эндотермическая) наоборот, минимальные значения микротвердости расположены в вершине параболы, а максимальные на её ветвях, которые направлены вверх. Применённая в проведённых исследованиях методика оценки микротвердости исследуемых пластиков по их толщине показала высокую чувствительность.

Впервые предложена методика расчёта коэффициента объёмной анизотропии (В), отражающая разницу в микротвердости отверждённых полимерных связующих в различных точках образца по его толщине, обусловленную неоднородностью структуры или другими факторами. Коэффициент объёмной анизотропии рассчитывался по формуле:

$$B = (H_{\text{ср}} - H_{\text{пн}})/H_{\text{ср}}, \quad \text{где} \quad (3)$$

$H_{\text{ср}}$ – значение микротвердости в средней зоне образца (МПа); $H_{\text{пн}}$ – значение микротвердости в подповерхностной зоне образца (МПа). Коэффициент объёмной анизотропии (КОА) является безразмерной величиной и свидетельствует о различиях в значениях микротвердости отверждённого связующего в высотном направлении, этот параметр может принимать положительные, отрицательные или нулевые значения.

На рисунке 17 показано изменение коэффициента объёмной анизотропии (КОА) по изменению микротвердости в сечении образцов, отверждённых при различных конечных температурах полимерных связующих ЭДТ-69Н (рисунок 15) и PC-N (рисунок 16 б)

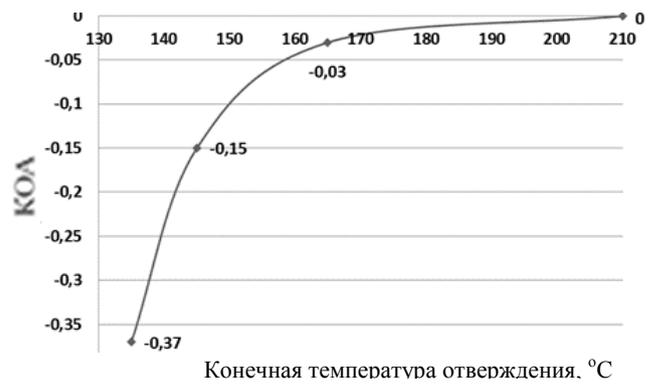
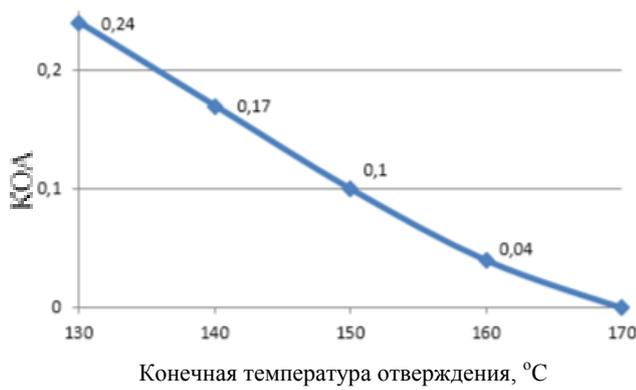


Рисунок 17 - Изменение коэффициента объёмной анизотропии в сечении образцов отверждённого связующего ЭДТ-69Н (а), и РС-Н (б)

Показано, что в различных плоскостях исследуемых образцов ПКМ были зафиксированы стабильные результаты, свидетельствующие о том, что значения микротвердости во всех трех взаимно перпендикулярных плоскостях имеют значимые различия.

Приведены результаты электронной микроскопии плоскостей отверждённого образца связующего ЭДТ-69Н (рисунок 18).

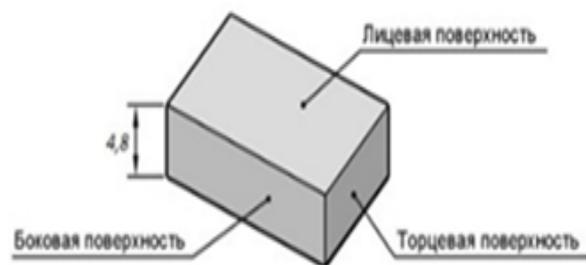
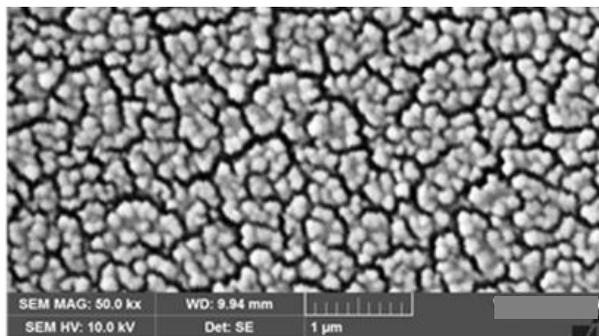
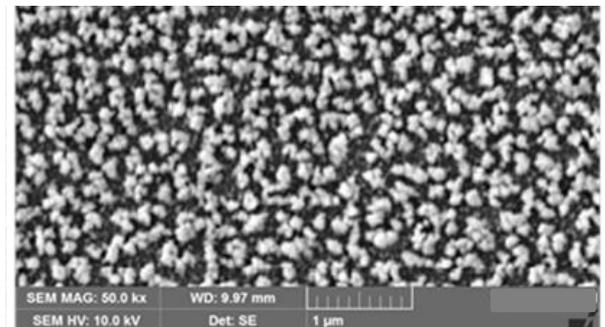
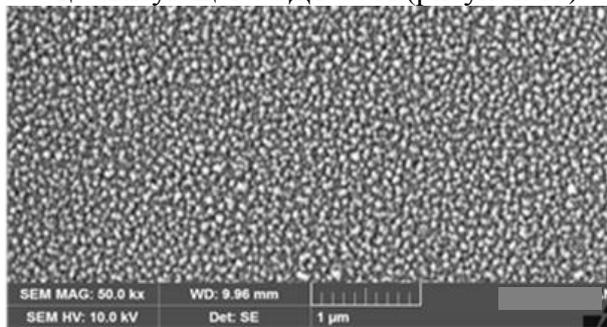


Рисунок 18 - Микрофазовая структура (x50000) лицевой (а), торцевой (б) и боковой (в) плоскостей отверждённого образца ЭДТ-69Н. Схема вырезки исследуемых плоскостей (г)

Таблица 4 Размеры агрегатов дисперсных частиц микрофазовой структуры по диаметру Фере ср. во взаимно перпендикулярных плоскостях

Плоскость	Диаметр Фере ср., мкм		
	Минимальный	Средний	Максимальный
Лицевая	0,06	0,11	0,21
Торцевая	0,17	0,35	0,64
Боковая	0,23	0,52	0,82

Приведённые в таблице 4 сведения, полученные по результатам электронной микроскопии, позволили подтвердить, что и микрофазовая структура различных поверхно-

стей, и размеры агрегатов дисперсных частиц в этих плоскостях значительно различаются между собой.

Представлены результаты склерометрии образцов отверждённого при различных температурах полимерного связующего ЭДТ-69Н по толщине (рисунок 19).

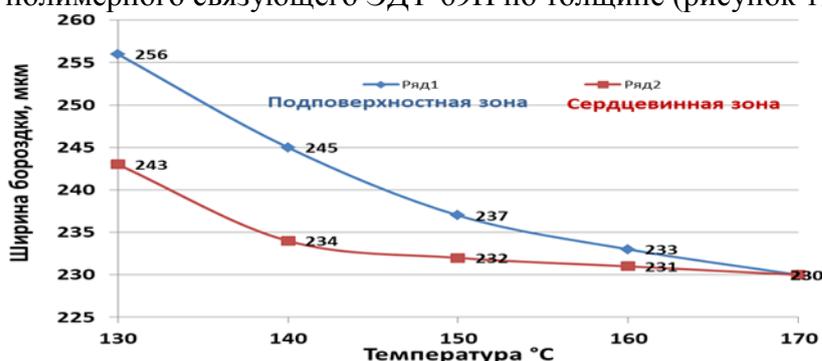


Рисунок 19 - Изменение ширины бороздок по толщине образцов ЭДТ-69Н, отверждённых при различных температурах

Показана выраженная закономерность зависимости ширины бороздок от конечной температуры отверждения связующего ЭДТ-69Н. Однако в отличие от микротвердости, где с ростом температуры увеличивались и значения микротвердости, здесь, наблюдается обратная зависимость, с ростом температуры ширина склерометрических бороздок уменьшается вследствие повышения твёрдости полимера. Представлены результаты измерения прогибов свободных концов (консольных балок) образцов углепластиков марки КМУ-11ТР, отформованных на разных конечных температурах отверждения (таблица 5). Показана схема нагружения указанных выше образцов (рисунок 20) и величины прогиба после приложения к ним нагрузки, соответствующей 10 Н (1 кг), рабочая длина образцов (консоли) во всех случаях составила 220 мм (таблица 5).

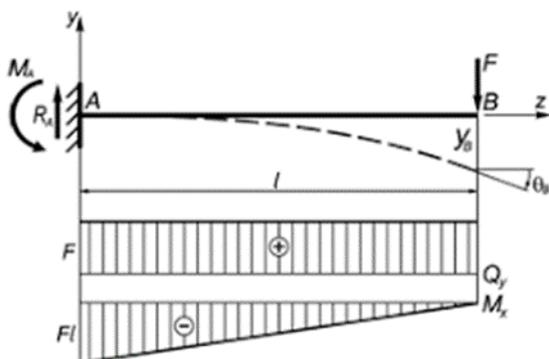


Рисунок 20 - Схема нагружения образцов

Таблица 5 - Значения стрелы прогиба образцов углепластиков

Температурно-временной режим отверждения	Прогиб, мм
100 °C-2 часа	72
120 °C-2 часа	69
130 °C-2 часа	65
140 °C-2 часа	62
90 °C-1 час + 120 °C-2 часа + 145 °C-3 часа	60

Таблица 6 - Значения микротвердости матрицы в образцах КМУ-11 ТР для различных режимов формования

№ образца	Режим формования	Микротвердость, МПа					
		Подповерхностная (0,1 мм)	Полусредняя (0,4 мм)	Сердцевинная (0,8 мм)	Полусредняя (1,2 мм)	Подповерхностная (1,5 мм)	Лицевая поверхность
1	100 °C-2 часа	161	200	273	205	160	240
2	120 °C-2 часа	179	221	293	222	180	287
3	130 °C-2 часа	200	250	313	253	203	350
4	140 °C-2 часа	245	282	353	282	243	379
5	90 °C-1 час + 120 °C-2 часа + 145 °C-3 часа	286	310	388	311	284	411

Представлены результаты измерения микротвердости образцов по толщине и на лицевой поверхности образцов КМУ-11ТР, отверждённых по различным температурным режимам (таблица 6).

Приведены в графическом виде зависимости прогиба образцов углепластика КМУ-11ТР от микротвердости матрицы на его лицевой поверхности (рисунок 21 а) и зависимость прогиба углепластиковых образцов от коэффициента объёмной анизотропии образцов того углепластика (рисунок 21 б).

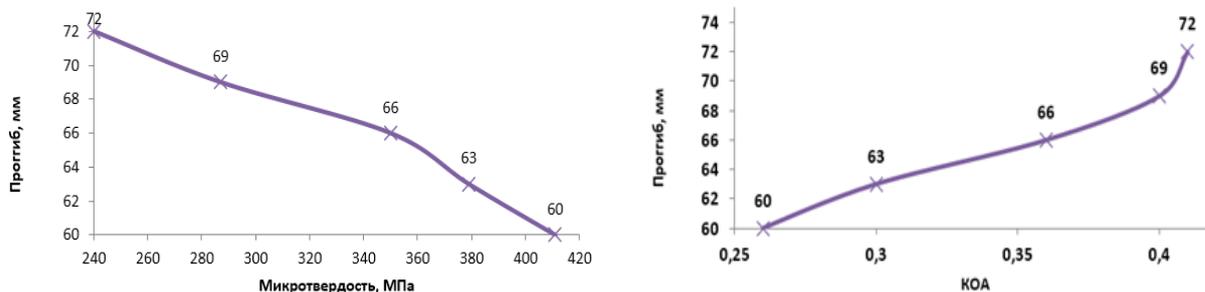


Рисунок 21 - зависимости прогиба образцов углепластика КМУ-11ТР от микротвердости матрицы на его лицевой поверхности (а) и от коэффициента объёмной анизотропии образцов того углепластика (б)

Установлено, что с ростом микротвердости матрицы и снижением КОА стрелы прогиба образцов также снижаются. Кроме того установлено, что двукратное увеличение толщины стеклопластика и углепластика с равнопрочными наполнителями приводит к четырёх-пятикратному снижению стрелы прогиба.

Показаны изменения частоты, амплитуды и длительности акустических сигналов (полученные из осциллограмм, сигналов акустической эмиссии при нагружении образцов) в зависимости от микротвердости лицевой поверхности образцов КМУ-11ТР (рисунки 22 и 23).

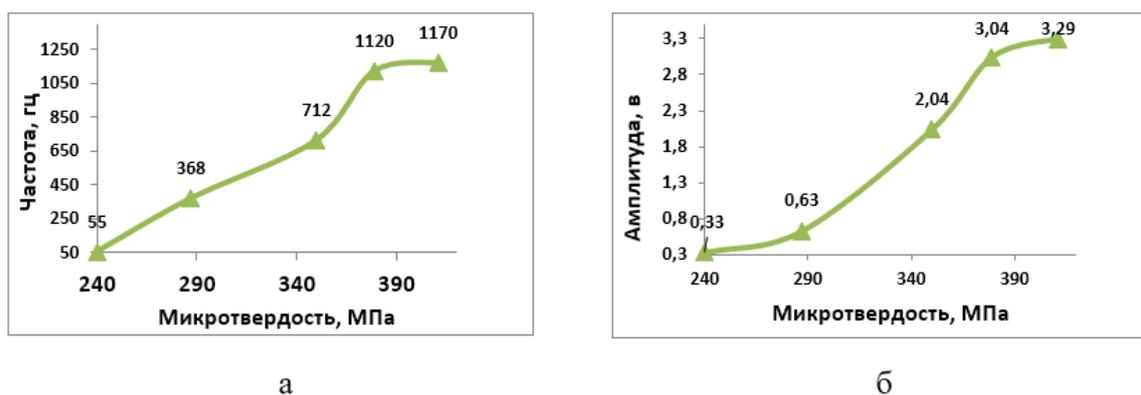


Рисунок 22 - Изменение частоты (а) и амплитуды (б) акустических сигналов в зависимости от микротвердости лицевой поверхности

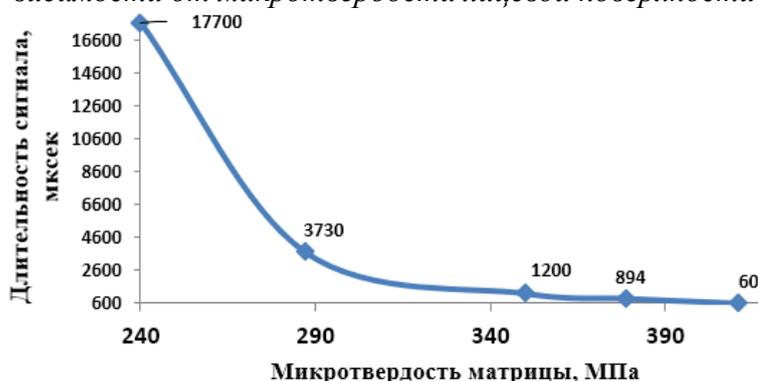


Рисунок 23 - Изменение длительности акустического сигнала от микротвердости матрицы

Из представленных рисунков видно, что с ростом микротвердости матрицы углепластика растут и значения частоты и амплитуды сигналов акустической эмиссии. Длительность сигналов акустической эмиссии с ростом значений микротвердости матрицы

напротив уменьшается, то есть наблюдается обратная зависимость, что должно привести к росту модуля упругости углепластика КМУ-11ТР.

Показано, что повышение конечной температуры отверждения стеклопластика на основе ЭДТ-69Н (СТ-69Н) уменьшает падение механических свойств после кипячения в дистиллированной воде.

Таблица 7 - Свойства пластика СТ-69Н до и после кипячения

Температура отверждения	Маркировка образцов	Предел прочности при (20 °С)			Модуль упругости при изгибе E_n , ГПа	Температура стеклования T_g , °С
		сжатии σ^c , МПа (Cv,%)	изгибе σ^n , МПа (Cv,%)	межслойном сдвиге τ , МПа (Cv,%)		
145 °С,	И	<u>610 (4,8)</u> 575-630	<u>1010 (3,2)</u> 980-1060	<u>66 (1,2)</u> 64-66	28 <u>28-29</u>	126
	К	<u>465 (7,6)</u> 435-505	<u>875 (3,0)</u> 845-910	<u>56 (5,3)</u> 51-58	25 <u>25-26</u>	102
-	Динамика, %	- 31	-15,4	-17,8	-12	- 23,5
170 °С	ТО	<u>590 (1,5)</u> 580-595	<u>1005 (2,7)</u> 965-1010	<u>64 (6,0)</u> 59-68	28 <u>27-29</u>	138
	КТО	<u>570 (4,0)</u> 550-595	<u>965 (8,0)</u> 910-1055	<u>69 (1,0)</u> 67-69	28 <u>27-29</u>	119
-	Динамика, %	-3,5	-4,1	+7,8	0	-15,9
Паспортные данные		490	880	63	-	-

И – образцы после формования при конечной температуре 145 °С, К – образцы И, но подвергшиеся кипячению в дистиллированной воде, ТО – образцы дополнительно термобработанные при температуре 170 °С, КТО – образцы ТО, подвергшиеся кипячению в дистиллированной воде.

По результатам исследований стекло- и углепластиков на основе эпоксидных и фенолформальдегидных связующих выявлено, что кипячение в дистиллированной воде снижает показатели микротвердости полимерной матрицы в пластике, однако последующая термообработка пластика приводит к восстановлению свойств на уровень исходных значений. Кроме того, анализ полученных результатов, свидетельствует о том, что дополнительная термообработка пластика положительно сказывается как на сохранении физико-механически свойств, так и структурных свойств полимера, т.к. конверсия по толщине плиты ПКМ выравнивается, достигая пиковых значений.

Показано, что при одновременном формовании разнотолщинных монолитных стекло- и углепластиков величина микротвердости в их средней зоне увеличивается с ростом толщины заготовки ПКМ.

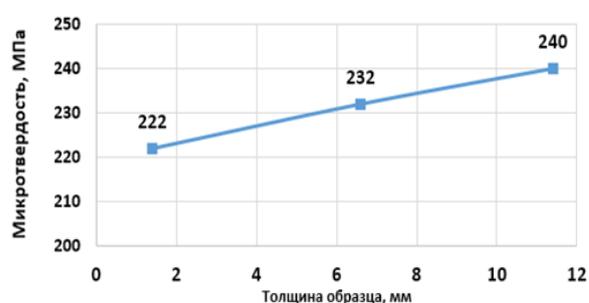
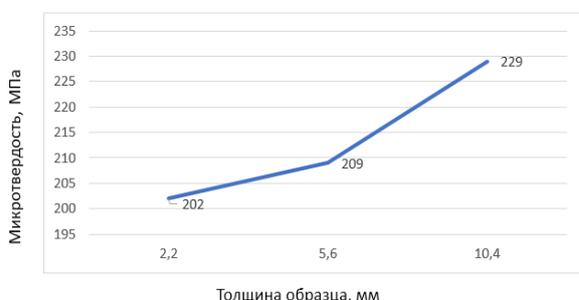


Рисунок 24 - Изменение микротвёрдости сердцевинной зоны в зависимости от толщины образца стеклопластика марки СТ-69Н (а) и образца углепластика КМУ-11Э (б)

Показано, что способ формования (прессовый, автоклавный) не вносит значимый вклад в формирование полимерной матрицы в разрезе микротвердости, но может отразиться на механических характеристиках ПКМ.

Представлены характеристики плит ПКМ, отформованных при разном избыточном давлении (таблица 8)

Таблица 8 - Основные свойства стеклопластика марки ВПС-53/Т-10 в зависимости от удельного давления формования

Свойства	Значения свойств при давлении формования, кН/м ²					
	0,9	1	2	3	5	7
Предел прочности, МПа:						
при растяжении	500	605	640	655	710	720
при сжатии	500	535	560	530	535	550
при изгибе	770	815	815	840	875	865
при межслойном сдвиге	59	64	66	66	65	63
Толщина монослоя, мм	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,21
Пористость, %	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3
Температура стеклования, °С	153	155	155	147	148	150

Приведены результаты измерения микротвердости отверждённой матрицы в образцах из стеклопластика марки ВПС-53/Т-10, отформованных по разным температурно- и манометрически-временным режимам. Эмпирическим путём определены характеристики микротвердости отформованных плит ПКМ в высотном сечении (таблица 9).

Таблица 9 – Микротвердость матрицы в образцах из стеклопластика марки ВПС-53/Т-10, изготовленных по разным режимам формования

Режим формования (температура, °С/давление, кН/м ²)	Микротвердость, МПа, в различных зонах проведения испытания				
	подповерхностная	полусредняя	сердцевинная	полусредняя	подповерхностная
	с толщиной ПКМ, мм				
	0,1	0,5	1,0	1,5	1,9
130/7	208	208	211	209	207
150/7	217	221	232	225	218
140/0,9	204	205	215	206	207
140/1	208	212	221	213	210
140/2	201	206	211	208	207
140/3	207	213	215	211	207
140/5	208	213	215	214	209
140/7	212	217	220	219	215

Установлено, что в исследуемых образцах из стеклопластика марки ВПС-53/Т-10, в зависимости от их зоны проведения испытаний, критической разницы по показателям микротвердости не наблюдается, что подтверждает правильность выбора температурно-временных параметров процесса отверждения.

Научно обоснована доработка подходов к подбору технологических параметров (температурно-временных и манометрических), указанных в начале главы, к ней прибавились пункты:

6 – моделирование тепловых полей при формовании разнотолщинных конструкций из ПКМ, с целью оценки распределения тепловых полей и обеспечения $КОА \leq 0,2$;

7 – выбор манометрических параметров формования ПКМ и конструкций из них.

В перспективе решение данных задач будут осуществлять в специализированном ПО, для чего необходимо создание больших баз данных со свойствами полимерных матриц и композиционных материалов на их основе и наполнителей различной природы. Данный переход нацелен на сокращение материальных затрат на проведения экспериментов и поиск оптимальных соотношений для приготовления связующих, матриц на их основе, а также ПКМ. Однако для оценки достоверности расчётных данных будут требоваться исследования, но в гораздо меньшем объёме.

Решение задач по моделированию температурных полей проводят в специальных программах, но требует создание больших баз данных со свойствами полимерных матриц и композиционных материалов на их основе в присутствии наполнителей различной природы. Подобный расчёт индивидуален для каждой конструкции из ПКМ с учётом её конфигурации толщины и структуры.

С учётом результатов проведённых исследований и моделирования тепловых полей при отверждении ПКМ были определены подходы к выбору температурно-временных и манометрических параметров режима отверждения, схема которых показана ниже (рисунок 25)

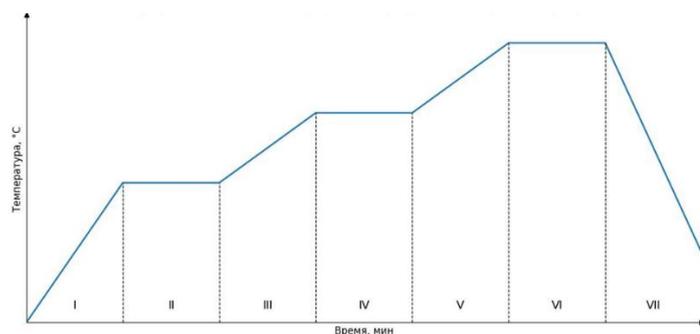


Рисунок 25 – Схема зон режима отверждения ПКМ

1 зона - в процессе нагрева технологического пакета, при любых скоростях, происходит образование температурного градиента по толщине от краёв к его центру (сердцевинная зона прогрета меньше полусредней, а полусредняя меньше подповерхностной).

2 зона - ступень для нивелирования градиента температур в нагреваемом технологическом пакете, и выбирается исходя из минимальной вязкости полимерного связующего, с целью уплотнения технологического пакета до расчётных показателей толщины. Момент подачи выбранного давления формования.

3 зона - образование градиента как на 1 этапе, но до температуры активной реакции полимеризации, для связующих отверждающихся с экзотермическим эффектом, после указанной температуры наблюдается обратный градиент температуры от средних слоёв к краям, и необходима дополнительная температурная ступень, для выравнивания температурного поля. В случае отверждения связующих с эндотермической реакцией не требуется.

4 зона - величина температурно-временной ступени определяется из данных дифференциально-сканирующей калориметрии и моделирования образования и распределения тепловых полей и зависит от толщины ПКМ.

5 зона - дальнейший нагрев до конечной температуры отверждения.

6 зона - выдержка на конечной температуре отверждения, температура и длительность выдержки определяется исходя из моделирования градиента степени конверсии по толщине ПКМ (практическим измерением микротвердости ПКМ).

7 зона - охлаждение с постоянной низкой скоростью, для снижения накопления внутренних напряжений по причине неравномерной усадки наполнителя и полимерной матрицы.

В шестой главе в соответствии со схемой научно-технологических основ проводится разработка конструктивных и технологических решений для изготовления изделий из ПКМ. Представлены конструкторские и технологические критерии и рекомендации с целью улучшения технологичности и упрощения изделий при их изготовлении в серийном производстве. Показаны основные этапы подготовки производства и их влияния на свойства изделий из ПКМ.

Изложены требования к формообразующей технологической оснастке (ФТО), описаны достоинства и недостатки материалов, применяемых при её изготовлении, критерии их применения. Приведено влияние шероховатости поверхности ФТО и применяемых разделительных составов на качество поверхности готового изделия из ПКМ. Сформулированы рекомендации по проектированию, изготовлению и эксплуатации ФТО. Представлены исследования материалов для применения в мастер-моделях. Разработаны технологии изготовления мастер-моделей. Разработаны ПКМ и технология изготовления полимерных ФТО с рабочими температурами до 200 °С (ВПС-55 и ВПС-59). Обоснована работоспособность изготовленных ФТО до 110 циклов (нагрев/охлаждение).

Разработанные пластики применяются для изготовления ФТО в собственном производстве УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» при выполнении хозяйственных договоров.

Показана высокоэффективная технология подготовки поверхности ПКМ под склеивание с применением плазмы атмосферного давления (ПАД), исключая применение операций обезжиривания с использованием токсичных растворителей и зашкуривания. Показана эффективность применения данной технологии (рисунок 26).

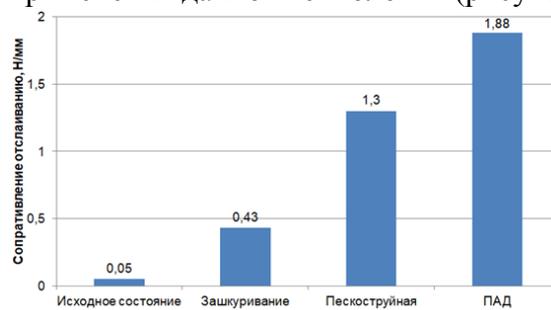


Рисунок 26 - Результаты исследования влияния способов подготовки поверхности стеклопластика на изменение прочности клеевого соединения

Приведены основные показатели поверхности стеклопластика и углепластика до и после обработки ПАД.

Приведены технологические параметры режимов раскроя основных и вспомогательных материалов механической обработки при изготовлении конструкций из ПКМ. Приведены режимы обработки, режущий инструмент.

Проведены исследования параметров липкости препрега и установлено их влияние на свойства, и процесс изготовления ПКМ и конструкций на их основе.

В седьмой главе рассмотрены вопросы отработки параметров и разработки серийных технологических процессов изготовления конструкций из ПКМ с оформлением нормативной документации на их изготовление и поставку. Ниже приведены разработанные технологии изготовления конструкций из ПКМ способами прессового, вакуум-печного и вакуум-автоклавного формования:

Отработаны технологические параметры и разработана высокоэффективная технология изготовления способом прессового формования листового органотекстолита марки Органит 11ТЛ для вертолётной техники. Основным преимуществом технологии является исключение большей части вспомогательных материалов и сокращение энергозатрат, в сравнении с ранее используемой технологией вакуум-автоклавного формования. Разработана НД и освоено серийное производство. Статистический анализ более 230 партий изготовленного органотекстолита марки Органит 11 ТЛ показал, что разработанная технология обеспечивает стабильность свойств и массово-габаритных характеристик в диапазоне $\pm 3 \%$, с сохранением прочностных свойств на уровне паспортных характеристик.

Отработаны технологические параметры и разработана высокоэффективная серийная технология изготовления способом прессового формования (исключающего применения вспомогательных материалов на изготовление вакуумного мешка) заготовок панелей пола из отечественных материалов (в рамках программы импортозамещения) для пассажирского самолёта Ил-114-300. Разработана НД на изготовление и поставку. Освоено серийное производство. Оценка результатов испытаний небольшого количества поставленных партий показал обеспечение стабильности упруго-прочностных и массово-габаритных характеристик в диапазоне $\pm 5 \%$.

Отработаны технологические параметры и разработана высокоэффективная серийная технология изготовления способом прессового формования (исключающего применения вспомогательных материалов на изготовление вакуумного мешка) зашивок багажно-грузового отсека (БГО) пассажирского самолёта Ту-214. Указанные выше зашивки были

разработаны с целью восстановления утраченных технологий взамен зашивок БГО из материала СТ-ФП-1.

Разработана высокоэффективная серийная технология изготовления способом прессового формования (исключающего применения вспомогательных материалов на 80 %) заготовок трёхслойных панелей интерьера и радиопрозрачных крышек. Разработанная технология, обеспечивающая сокращения энергозатрат на 50 % и уменьшение цикла изготовления более чем в 10 раз. Осуществляются поставки радиопрозрачных крышек.

Отработаны технологические параметры и разработана высокоэффективная серийная технология изготовления способом прессового формования (исключающего применения вспомогательных материалов на изготовление вакуумного мешка) заготовок панелей пола из отечественных материалов (в рамках программы импортозамещения) для пассажирского самолёта Ил-114-300. Разработана НД на изготовление и поставку. Освоено серийное производство.

Отработаны технологические параметры и разработана серийная технология изготовления способом вакуум-автоклавного формования радиопрозрачного обтекателя переменного сечения с применением сотового заполнителя ССП-1-3,5 и препрегов марок КМКС-4.175.Т10.37, КМКС-4.175.Т10.55. Разработана НД на изготовление и поставку. Освоено серийное производство. Разработанная технология позволила обеспечить стабильные массово-габаритные характеристики.

Отработаны технологические параметры и разработана серийная технология изготовления способом вакуум-автоклавного формования лямбда-образного пылезащитного устройства двигателя вертолётной техники из углетекстолита с антиэрозионным слоем из органотекстолита, обеспечивающая стабильность массово-габаритных характеристик в диапазоне $\pm 2\%$ и стойкую антиэрозионную защиту.

Разработаны материал ВПС-42П/Т64 для изготовления заготовок жёстких трубопроводов системы кондиционирования воздуха. Отработаны технологические параметры и разработана серийная технология изготовления способом вакуум-печного формования жёстких сложнопрофильных трубопроводов системы кондиционирования воздуха. Гибкие и жёсткие трубопроводы, обеспечили снижение массы СКВ самолёта Ил-114-300 не менее чем на 20 %. Разработана НД на изготовление и поставку. Освоено серийное производство.

Отработаны технологические параметры и разработана технология изготовления способом вакуумно-печного формования (безавтоклавная) стекателя и разделителя потока авиационного двигателя.

Отработаны технологические параметры и разработана технология изготовления способом вакуум-печным (безавтоклавная) конструктивно-подобного образца капота мотогондолы силовой установки вертолётной техники.

Результаты исследований физико-механических свойств изготавливаемых по разработанным серийным технологиям конструкций из ПКМ подтвердили реализацию в них паспортного уровня свойств, что подтверждает правильность выбора технологических параметров процесса.

На основании изучения закономерностей в приготовлении полимерных высоковязких расплавных связующих, исследований механизмов смачивания поверхностей волокнистых армирующих наполнителей, изучения закономерностей изменения толщины слоя армирующих наполнителей, предложенного способа расчёта объёмно-массового содержания полимерного связующего в полуфабрикате, с учётом способа формования конструкции из ПКМ и прикладываемого удельного давления, изучения закономерностей производственного процесса изготовления калиброванных препрегов, с применением математического моделирования процесса, исследования кинетики отверждения полимерных связующих методами микротвердомерии, склерометрии, дифференциально-сканирующей калориметрии, акустических методов, и с учётом указанных особенностей подбор температурно-временных и манометрических параметров режима отверждения, с построением

математических моделей масса и теплопереноса разработаны высокоэффективные производственные технологические процессы изготовления полуфабрикатов и конструкций из стекло-, угле- и органопластиков нового поколения.

Полученный значительный объем научно-обоснованных экспериментальных и расчетных данных позволяет трактовать результаты данной работы как научно-технологические основы создания технологий изготовления полуфабрикатов и конструкций из ПКМ нового поколения.

Выводы

1. Разработаны научно-технологические основы для создания высокоэффективных производственных процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения, учитывающие конструктивно-технологические особенности конструкции, технологические параметры полимерных связующих, полуфабрикатов на их основе, а также параметры процессов формообразования и отверждения деталей из ПКМ.

2. Определены особенности приготовления высоковязких расплавных полимерных связующих. Проведена оценка влияния свойств исходных компонентов на их прочностные свойства, построено уравнение многофакторной (множественной) регрессии, описывающее влияние факторов характеристик компонентов на свойства связующих. Отработаны серийные технологии изготовления полимерных расплавных связующих;

3. Изучены процессы и разработаны серийные технологии для изготовления полуфабрикатов (препрегов, плёночных клеев и плёнок связующего) на основе расплавных полимерных связующих нового поколения и наполнителей различной природы на офлайн линии, имеющих минимальный разброс по массовой доле связующего, проведена статистическая оценка их свойств;

4. Разработаны материалы и технологии изготовления полимерных формообразующих оснасток, в том числе с интегрированным нагревателем, обеспечивающие энергоэффективность при формовании конструкций из ПКМ;

5. Исследованы трансферные (инфузионные) процессы совмещения полимерных связующих и армирующих наполнителей и разработана серийная технология изготовления листов органопластика;

6. Установлены закономерности изменений микротвердости в объёме полимеров, представляющих различные классы отверждённых связующих. Проведённые исследования образцов полимеров различной природы показали наличие анизотропии свойств по микротвердости в объёме отверждённых связующих, причём изменение микротвердости по их толщине происходит по параболической зависимости с экстремальными значениями микротвердости в середине высотного сечения образцов. Связующие на эпоксидной основе и полиэфирные смолы, отверждаемые по экзотермической реакции, имеют максимальные значения микротвердости в середине высотного сечения образцов. Связующие на основе фенолформальдегидных смол, отверждаемые по эндотермической реакции, в сердцевине высотного сечения образцов имеют минимальные значения микротвердости. Установлено, что с ростом толщины образцов растут и максимальные значения микротвердости.

7. Установлено, что проведённые склерометрические исследования для оценки свойств пластиков, показали высокую чувствительность к изменению состояния ПКМ, так параметры склерометрической бороздки, такие как ее глубина и ширина чутко реагируют на технологические режимы формования образцов и даже на изменение свойств пластика по его толщине.

8. Предложен новый термин, получивший название «Коэффициент объёмной анизотропии», характеризующий постоянство свойств в объёме отверждённого полимера, чем выше значение абсолютной величины коэффициента объёмной анизотропии, тем большие различия будут наблюдаться в значениях микротвердости отверждённого связующего по толщине образца. Коэффициент объёмной анизотропии может принимать положительные

($B > 0$), отрицательные ($B < 0$) и нулевые значения ($B = 0$). Нулевые значения коэффициента объемной анизотропии характеризуют отсутствие анизотропии свойств в сечении образца.

9. В результате проведенных исследований образцов из стекло- и углепластиков установлено, что микротвердость матрицы во всех трех исследованных взаимно перпендикулярных плоскостях по толщине изученного стеклоуглепластика изменяется по параболической зависимости с максимальными значениями микротвердости в середине высотного сечения образцов. Величины микротвердости матрицы в одноименных зонах разных плоскостей образцов имеют существенные различия, что возможно при наличии структурных неоднородностей в полимерной матрице.

10. На основании проведенного комплекса исследований сформулированы следующие основные закономерности при деформации образцов из различных полимерных композиционных материалов по методу консольного изгиба, образовании и распространении сигналов акустической эмиссии. Во-первых, двукратное увеличение толщины стеклопластика и углепластика с равнопрочными наполнителями приводит к четырёх-пятикратному снижению стрелы прогиба. Во-вторых, стрела прогиба однонаправленных углепластиковых образцов на 40 % превосходит стрелу прогиба углепластиковых образцов такой же толщины, но с равнопрочным наполнителем. И в-третьих, установлено для всех исследованных видов образцов, что амплитуда и частота сигналов акустической эмиссии возрастают с ростом микротвердости матрицы, а длительность прохождения акустического сигнала падает, полученные эмпирические кривые этих характеристик свидетельствуют о том, что изменение этих величин происходит по асимптотам.

11. Уточнён способ выбора температурно-временных и манометрических параметров процесса отверждения ПКМ, в зависимости от толщины конструкции.

12. Разработанные научно-технологические подходы использованы для составления технологических регламентов в серийном производстве УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» при изготовлении полуфабрикатов и конструкций из ПКМ различными способами формования (прессовыми, вакуум-печными, вакуум-автоклавными). По результатам работы оформлена следующая НД: ТУ – 14 шт., ТР – 3 шт., ТИ – 36 шт., получено 7 патентов.

Список основных трудов по теме диссертации опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России и переводных журналах входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science:

1. Е.А. Вешкин [и др.] / Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 2 (79). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

2. Е.А. Вешкин [и др.] / К вопросу изготовления огнестойких и огнестойких капотов мотогондол силовой установки вертолетной техники из полимерных композиционных материалов Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2025. № 8 (150). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-123-133.

3. Вешкин Е.А. [и др.] / Влияние шероховатости на поверхностно-энергетические характеристики и смачиваемость стеклопластика // *Авиационная промышленность*. 2025. №2 (79). С. 48-58.

4. Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Влияние технологии подготовки препрега на свойства ПКМ// *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2013. № 9. С. 8–14.

5. Е.А. Вешкин [и др.] / Исследование влияния конденсационной влаги на препрег углепластика на основе растворного эпоксидного связующего и ПКМ на его основе //

Труды ВИАМ. 2019. №9 (81). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-80-88.

6. Е.А. Вешкин, Абрамов П.А., Постнов В.И./Особенности подготовки полимерного связующего для снижения пористости стеклопластиков, получаемых методами вакуумного формования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 462–468.

7. Е.А. Вешкин [и др.] / Разработка и производство конструкционных органо-пластиков для авиационной техники // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (2). С. 411–416.

8. Е.А. Вешкин [и др.] / Свойства конструкционных углепластиков изготовленных пропиткой под вакуумом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (2). С. 762–766.

9. Е.А. Вешкин [и др.] / Опыт применения технологического контроля полуфабрикатов из полимерных композиционных материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6 (2). С. 393–398.

10. Е.А. Вешкин [и др.] /О технологии изготовления препрега // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 4. С. 26–31.

11. Е.А. Вешкин [и др.] / Роль подготовки поверхности стеклопластика под склеивание // Клеи. Герметики. Технологии. 2019. № 6. С. 19–27. DOI: 10.31044/1813-7008-2019-0-6-19-27.

12. Вешкин Е.А. [и др.] / Влияние механической обработки образцов при порезке на испытания композитов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4 (2). С. 214–219.

13. Е.А. Вешкин [и др.] /Исследование динамических характеристик образцов из металлополимерных материалов и алюминиевого сплава Д16Ч-АТ// Труды ВИАМ. 2025. № 4. (146) Ст. 70-80 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 3.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-70-80

14. Е.А. Вешкин [и др.] / Исследование свойств эпоксидных композиций, модифицированных полиарилсульфоном, и полимерных композиционных материалов на их основе // Труды ВИАМ. 2023. № 12 (130). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-53-62.

15. Е.А. Вешкин [и др.] / Зависимость реологических характеристик эпоксидного клевого связующего от степени гомогенности премиксной композиции // Пластические массы. 2024. № 5. С. 33-37.

16. Е.А. Вешкин [и др.] /Исследование поверхностного натяжения и смачивающей способности термореактивных растворных связующих с помощью процессорного тензиометра // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 1 (78). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-49-58.

17. Е.А. Вешкин [и др.] /Оценка влияния времени хранения препрега на коробление и свойства ПКМ на его основе // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI:10.18577/2307-6046-2023-0-3-48-57.

18. Е.А. Вешкин [и др.] / Зависимость реологических характеристик эпоксидного клевого связующего от степени гомогенности премиксной композиции // Пластические массы. 2024. № 5. С. 33–37.

19. Е.А. Вешкин [и др.] / Моделирование процесса отверждения полимерного связующего и изменения микротвердости в его объеме // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-92-99.

20. Е.А. Вешкин [и др.] / Микротвердость и склерометрия, как критерии степени отверждения связующего ЭДТ-69 Н // Материаловедение. 2018. № 10. С. 3–7.

21. Е.А. Вешкин [и др.] / Анизотропные свойства отвержденных связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 8. С. 20–24.
22. Е.А. Вешкин [и др.] / Об эффективности отверждения заготовок из полимербетона с полиэфирной матрицей ультрафиолетовым облучателем // Труды ВИАМ. 2017. № 12. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-7-7.
23. Е.А. Вешкин [и др.] / Анализ некоторых характеристик полимербетона нетрадиционными методами // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 2. С. 29–34.
24. Е.А. Вешкин [и др.] / Особенности отверждения полиэфирного связующего, обусловленные разной длительностью воздействия ультрафиолетового облучения // Пластические массы. 2019. № 9–10. С. 27–30.
25. E.A. Veshkin [et al.] / Analysis of some characteristics of polymer concrete by nontraditional methods // Polymer Science. Series D. 2018. Vol. 11. No. 3. P. 242–246.
26. Е.А. Вешкин [и др.] / Закономерности изменения микротвердости в высотном сечении стеклопластиков, сопротивление царапанию индентором и формирование текстуры склерометрических бороздок // Материаловедение. 2021. № 3. С. 23–31.
27. E.A. Veshkin [et al.] / Anisotropic properties of cured binders // Polymer Science. Series D. 2019. Vol. 12. No. 1. P. 5–8.
28. Е.А. Вешкин [и др.] / Методология оценки изменения свойств матрицы в объеме полимерных композитов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 7. С. 25–32.
29. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V. Evaluating the microhardness of samples based on binder vst-1210 cured under various conditions as a method of testing // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 127–130.
30. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В. Оценка микротвердости образцов на основе связующего ВСТ-1210, отвержденного по различным режимам, как способ тестирования // Материаловедение. 2018. № 6. С. 3–6.
31. Е.А. Вешкин [и др.] / Исследование микротвердости и склерометрических характеристик связующего УП-2227н, отвержденного при различных режимах // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1. С. 39–45. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-39-45.
32. Е.А. Вешкин [и др.] / Исследование микротвердости матрицы стеклопластиков по толщине образцов, отформованных различными способами // Физика и химия обработки материалов. 2021. № 6. С. 65–71.
33. Е.А. Вешкин [и др.] / Закономерности изменения микротвердости в объеме связующего ЭДТ-69Н отвержденного при различных температурах // Физика и химия обработки материалов. 2020. № 4. С. 65–71.
34. Е.А. Вешкин [и др.] / Оценка воздействий климатических факторов на эксплуатационные свойства стеклопластика марки ВПС-42П/Т-64 // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-21-29.
35. Е.А. Вешкин, В.И. Постнов, Р.А. Сатдинов Влияние тепловлажностного воздействия на прочностные свойства полимерных композиционных материалов // Материаловедение. 2020. № 5. С. 28–32.
36. Е.А. Вешкин [и др.] / Закономерности проявления анизотропии свойств в трех взаимно перпендикулярных сечениях стеклоуглепластика // Пластические массы. 2020. № 5–6. С. 15–19.
37. Е.А. Вешкин [и др.] / Исследование микротвердости по толщине образцов углепластиков различных марок // Материаловедение. 2019. № 8. С. 33–38.
38. Е.А. Вешкин [и др.] / Анизотропия свойств в высотном сечении образцов стеклопластиков, отформованных прессовым и автоклавным способами // Композиты и наноструктуры. 2019. Т. 11. № 2 (42). С. 51–58.

39. Е.А. Вешкин [и др.] / Исследование свойств образцов углепластика, отформованных методом инфузии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 3. С. 39–43.
40. Veshkin E.A., Semenychev V.V., Postnov V.I., Krasheninnikova E.V. / Regularities of change in microhardness in the high section of fiberglass, scratch resistance by indenter, and formation of texture of sclerometric grooves // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Т. 13. № 1. С. 21-28. (дата обращения: 26.08.2025) DOI: 10.1134/S2075113322010403
41. Е.А. Вешкин [и др.] / Полимерная оснастка – материалы, технологии и применение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 5. С. 24–30
42. Е.А. Вешкин [и др.] / К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4 (2). С. 198–213.
43. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. / Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
44. Барботько С.В., Вешкин Е.А. [и др.] / Оценка огнестойкости материалов и конструктивных элементов для авиационной техники // *Авиационная промышленность*. 2018. №2. С. 62-67.
45. Е.А. Вешкин [и др.] / Технология ускоренного формования трехслойных сотовых панелей интерьера самолета // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4. С. 799–805.
46. Е.А. Вешкин [и др.] / Конструктивно-технологические совершенствования в создании пространственно-сложных конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2020. № 9 (91). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-68-77
47. Вешкин Е.А. / Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ. 2016. № 2. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI 10.1857/2307-6046-2016-0-2-7-7.
48. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Савицкий Р.С. / Подход к выбору технологического режима изготовления ПКМ // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111.
49. Е.А. Вешкин [и др.] / Особенности изготовления криволинейных деталей сложного контура из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023 0-9-57-68.
50. Veshkin E.A., Semenychev V.V., Postnov V.I., Krasheninnikova E.V. / Investigation of the microhardness in the fiberglass matrix over the thickness of the samples molded by various method // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022. Т. 13. № 3. С. 887-891.
51. Вешкин Е.А., Истягин С.Е., Кирилин С.Г., Семенычев В.В. / Характеристики акустической эмиссии в деформируемых образцах из стеклопластика с различными режимами отверждения // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). С. 15-25.
52. Вешкин Е.А. [и др.] / Применение метода акустической эмиссии и склерометрии для исследования образцов углепластиков с различной степенью отверждения матрицы // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. № 3. С. 85-95.
53. Вешкин Е.А. [и др.] / Анизотропия свойств матрицы крупногабаритных углепластиков по толщине полуфабриката // Композиты и наноструктуры. 2021. Т. 13. № 2 (50). С. 37-42.
54. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V. / A method for evaluating the change of matrix characteristics in bulk polymer composites // *Polymer Science, Series D*. 2021. Т. 14. № 1. С. 80-85.

55. Veshkin E.A., Postnov V.I., Satdinov R.A. / Effect of heat and moisture exposure on the strength properties of polymer composite materials // Inorganic Materials: Applied Research. 2021. Т. 12. № 1. С. 101-105.

56. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Strelnikov S.V. / The role of fiberglass surface preparation for adhesive bonding // Polymer Science, Series D. 2020. Т. 13. № 1. С. 38-44.

Патенты:

1. Способ изготовления препрега: пат. RU 2447097 С1; заявл. 08.09.10; опубл. 10.04.12.

2. Оснастка для формования изделий из полимерных композиционных материалов: пат. RU 126283 U1; заявл. 23.10.12; опубл. 27.03.13

3. Способ изготовления деталей из полимерных композиционных материалов: пат. RU 2574269 С1; заявл. 14.11.14; опубл. 10.02.16.

4. Мастер-модель: пат. RU 137487 U1; заявл. 14.10.13; опубл. 20.02.14.

5. Фенолформальдегидное связующее и стеклопластик на его основе/ Патент на изобретение RU 2633717 С1, 17.10.2017. Заявка № 2016142318 от 27.10.2016

6. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него/Патент на изобретение RU 2585638 С1, 27.05.2016//– Минпромторг России, ФГУП «ВИАМ» –Заявка № 2014151404/05 от 18.12.2014

7. Установка для пропитки ленточного материала расплавленным связующим: пат. RU 152991 U1; заявл. 10.11.14; опубл. 27.06.15.

«Научно-технологические основы разработки высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения»

Подписано в печать

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ
105005, г. Москва, ул. Радио,17