

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Воротынцева Ильи Владимировича на диссертационную работу Вешкина Евгения Алексеевича «Научно-технологические основы разработки высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по научной специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Актуальность представленной к защите докторской диссертационной работы Е.А. Вешкина обусловлена многообразием способов переработки полимерных композиционных материалов, возникших в отрасли под влиянием сложного сочетания процессов возникающих при совершенствовании технологий изготовления деталей из них. Наряду с растворными полимерными связующими широкое применение находят и расплавные модифицированные различными добавками связующие, что требует особых подходов к переработке их в полуфабрикаты и детали. В тоже время широкое применение ПКМ в авиационной и других отраслях промышленности, что требует разработки новых материалов и технологий, обеспечивающих снижение себестоимости, повышение надежности и ресурса конструкций. В этой связи решение научно-технических задач по созданию ПКМ нового поколения и высокоэффективных технологий их переработки, имеющих важное значение для развития отечественного авиастроения и других высокотехнологичных отраслей промышленности является актуальным направлением современного материаловедения. Поэтому тема диссертации Вешкина Е.А., посвященная разработке научно-технологических основ производства ПКМ нового поколения, является **актуальной**.

Научная новизна работы

Работа выполнена на высоком научном уровне, отличается комплексным подходом, сочетающим глубокий анализ современного состояния проблемы,

масштабные экспериментальные исследования, математическое моделирование и успешное внедрение результатов в производство.

Научная новизна работы сформулирована четко и подтверждается следующими положениями, выносимыми на защиту:

1. Разработаны научно-технологические основы для создания серийных высокоэффективных технологий изготовления полуфабрикатов и конструкций из ПКМ нового поколения, комплексно учитывающие особенности свойств связующих, армирующих наполнителей и режимов их отверждения. Разработана и реализована целостность научно-технологической концепции «материал-технология-конструкция».

2. Впервые построены уравнения многофакторной регрессии, характеризующие влияние исходных компонентов полимерных расплавных связующих на их прочностные свойства, а также влияния технологических параметров на объемно-массовые свойства пленок полимерных связующих. Это позволяет перейти от эмпирического подбора к целенаправленному проектированию составов и режимов. Помимо регрессионного анализа проведен глубокий анализ большой базы данных с применением специализированного ПО и методов машинного обучения и статистического анализа (Python).

3. Систематизированы результаты оценки смачиваемости поверхностей волокон армирующих наполнителей различной природы, что создает основу для научно обоснованного выбора пар «наполнитель-связующее».

4. Впервые установлены и количественно описаны зависимости влияния температурно-временных параметров отверждения полимерного связующего на изменение микротвёрдости и сигналов акустической эмиссии в ПКМ. Использование методов микротвердометрии, склерометрии и акустической эмиссии для оценки степени отверждения полимерной – это прорывной методологический подход, позволяющий получать информацию, недоступную стандартными методами. Установленные параболические закономерности изменения микротвердости по толщине и связь этих данных с механическими характеристиками (прогибом) являются значимым научным результатом.

5. Введено новое понятие «коэффициент объёмной анизотропии» для оценки степени и однородности отверждения ПКМ по высоте изделия, что является новым эффективным критерием диагностики качества отверженного материала.

Особый вклад соискателя и практическая значимость диссертационной работы Вешкина Е.А. заключается во внедрении в серийное производство технологий изготовления широкой номенклатуры материалов и конструкций для самолётной и вертолётной техники, что подтверждается внушительным объёмом нормативной документации (ТУ, ТР, ТИ) и патентов.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы неоспорима и подтверждается актами внедрения. Результаты работы нашли применение в серийном производстве:

- Отработаны и внедрены технологии изготовления целого ряда расплавных полимерных связующих нового поколения (ВСК-14-1, ВСК-14-2, ВСК-14-2м, ВСК-14-4, ВСЭ-1212 и др.).
- Разработаны и внедрены технологии изготовления стабильных по толщине плёночных kleев (ВК-36, ВК-36Р, ВК-36РТ).
- Созданы и освоены в серии технологии производства препегов на основе стеклянных, углеродных и органических наполнителей с автоматизированным контролем и разбросом содержания связующего $\pm 1\text{--}2\%$.
- Разработаны материалы и технологии изготовления полимерной формообразующей оснастки, в том числе с интегрированным нагревателем, что позволило значительно снизить энергозатраты.
- Внедрены конкретные технологии изготовления широкой номенклатуры изделий для авиационной техники: панелей пола, радиопрозрачных обтекателей, элементов системы кондиционирования воздуха (СКВ), капотов вертолетной техники, профилированного настила и др., что обеспечило существенное снижение массы, трудоемкости и энергозатрат.

Результаты работы использовались при выполнении крупных научно-исследовательских программ и проектов (грантов), а также при разработке

нормативной документации (ТУ –14 шт., ТР –3 шт., ТИ – 36 шт), что подтверждает их востребованность.

Достоверность работы.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается комплексным подходом к проведению исследований, т.е. применением современных взаимодополняющих, в том числе стандартизованных (физико-химические, механические, термоанализ, оптическая микроскопия) и специализированных (склеро-и микротвердометрия, акустическая эмиссия) методов анализа и испытаний, использованием сертифицированного оборудования и приборов, статистической обработкой экспериментальных данных.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа отличается структурной целостностью и логической завершенностью, каждая последующая глава является развитием предыдущей. Диссертация состоит из введения, 7 глав и выводов, изложена на 359 страницах, включая 147 рисунков, 67 таблиц и список литературы из 262 наименований.

Представленный иллюстративный материал демонстрирует эффективность предложенных методов исследований и служит полноценным инструментом аргументации и достоверности полученных результатов, повышая доказательную базу диссертации.

Во введении содержится убедительное обоснование актуальности темы. Автор справедливо отмечает, что современная тенденция замены металлов на ПКМ в конструкциях летательных аппаратов требует разработки новых материалов и технологий, обеспечивающих снижение себестоимости, повышение надёжности и ресурса при сохранении высоких эксплуатационных характеристик. Автор также обоснованно указывает на необходимость импортозамещения и создания отечественных аналогов материалов и технологий в условиях санкционных ограничений. Поставленные цели и задачи полностью соответствуют актуальным направлениям развития материаловедения и технологий обработки ПКМ, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы, отражена структура диссертации.

В первой главе проведен аналитический обзор современного состояния исследований и разработок в области ПКМ, как в России, так и за рубежом. Автор не только констатирует существующие тенденции (рост доли ПКМ в авиатехнике, переход на расплавные связующие, развитие безавтоклавных методов), но и критически анализирует проблемы, в частности, разрозненность данных и отсутствие системного подхода к выбору технологических цепочек. На основе проведенного анализа чётко сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, а также представлена структурная схема работы, которая служит логичной основой для всего последующего изложения. Выявлены ключевые проблемы, связанные с переходом на расплавные связующие и безавтоклавные методы формования. Сформулирована необходимость разработки системного подхода к созданию ПКМ нового поколения.

Во второй главе описана комплексная методическая база, включающая физико-химические, механические, термические и микроскопические методы исследований. Помимо стандартных методов исследований, автор применяет такие современные нестандартные методы, как поверхностно-адсорбционный анализ для оценки смачиваемости, склеро – и микротвердометрию, а также методы акустической эмиссии для оценки структуры полимерной матрицы. Глава демонстрирует широту охвата исследований. В качестве объектов изучения выбраны образцы связующих различного состава, наполнителей разной природы, препрегов и готовых ПКМ на основе связующих как растворного, так и расплавного типа.

В третьей главе получен ряд ключевых результатов. Разработаны и formalizованы критерии выбора технологии переработки ПКМ на основе конструктивно-технологического анализа, что имеет большое практическое значение. Детально исследованы реологические свойства расплавных связующих, показана их зависимость от температуры и состава, выявлены критические этапы (плато вязкости), определяющие технологическое режимы обработки. Глубоко изучены процессы совмещения эпоксидных олигомеров с термопластами, установлены температурные интервалы растворения и их зависимость от

химического строения полиарилсульфонов. Разработаны и апробированы рекомендации по диспергированию отвердителей, обеспечивающие высокую гомогенность композиций. Наиболее значимым результатом главы является построение уравнений регрессии, связывающих свойства исходных компонентов с прочностью связующих, что превращает разработку рецептуры из эмпирического поиска в научно обоснованный процесс. Систематизированы результаты по изменению объёмных характеристик армирующих наполнителей в зависимости от условий формования и смачиваемости поверхностей их волокон полимерными связующими.

В четвертой главе представлены результаты по разработке технологии изготовления препрегов на онлайн-линиях по двухстадийной схеме с применением автоматизированной системы контроля, что обеспечило высокую стабильность свойств полуфабрикатов ($\pm 1\text{--}2\%$ по содержанию связующего). Исследовано влияние технологических параметров на разброс поверхностной плотности пленок связующего, что позволило оптимизировать процесс. Проведён всесторонний анализ качества препрегов на различных наполнителях и исследовано влияние времени хранения на их свойства. 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 kleев. С использованием разработанных подходов отработаны высокоэффективные технологические процессы изготовления прецизионных препрегов по массовой доли содержания связующего (2%). Оформлена соответствующая НД на их изготовление. Приведены результаты структурных исследований поверхности расслоения углепластика ВКУ-48/ВТкУ-5 с помощью растровой электронной микроскопии. Параллельно разработаны инфузионные (трансферные) методы совмещения, включая технологию RFI, с моделированием процессов пропитки, что расширяет технологический арсенал производства.

Пятая глава является самой объёмной и одной из наиболее сильных в диссертации с точки зрения фундаментальности подхода. Автор детально исследует

влияние температурно-временных и манометрических параметров на свойства как ненаполненных связующих (ЭДТ-69Н, РО 4761, РС-Н) так и ПКМ (стеклопластики СТ-69Н, углепластики ВКУ-29, ВКУ-39 на основе связующего ВСЭ-1212). Для материалов ВКУ-29/ ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 определены температурно-временные параметры достижения степени конверсии более 95%. Разработана и апробирована оригинальная методика оценки микротвердости по высоте образца, на базе которой введен и применен новый диагностический параметр – «коэффициент объемной анизотропии». Этот критерий позволяет количественно оценить неоднородность структуры и степени отверждения в объеме материала. Установлено, что отверждение ПКМ по температурно-временным режимам, обеспечивающих высокий КОА ($\leq 0,1$) полимерной матрицы в ПКМ, положительно сказывается как на сохранении физико-механических свойств, так и структурных свойств полимера, т.к. конверсия по толщине плиты ПКМ выравнивается, достигая пиковых значений микротвердости. Использование методов акустической эмиссии и склерометрии для контроля степени полимеризации демонстрирует инновационный подход к решению задачи неразрушающего контроля. Методом акустической эмиссии проведено исследование влияния объемной анизотропии полимерной матрицы на свойства ПКМ при деформации образцов, впервые построены зависимости величины прогиба образцов от КОА и микротвердости полимерной матрицы в ПКМ. Показана возможность управления структурой полимерной матрицы путем оптимизации режимов отверждения. Полученные результаты позволяют целенаправленно выбирать режимы отверждения для формирования заданной структуры полимерной матрицы.

Шестая глава имеет ярко выраженную прикладную направленность. Разработаны материалы и технологии изготовления полимерной формообразующей оснастки, в том числе с интегрированным нагревательным элементом, что является современным и эффективным решением, позволяющим вдвое снизить энергозатраты. Исследованы параметры липкости препрега и их влияние на качество выкладки и свойства конечного изделия, даны практические рекомендации. Изложены требования к формообразующей технологической оснастке (ФТО),

описаны достоинства и недостатки материалов, применяемых при её изготовлении, критерии их применения. Сформулированы рекомендации по проектированию, изготовлению и эксплуатации ФТО, представлены исследования материалов для применения в мастер-моделях. Проанализированы и предложены современные методы подготовки поверхности ПКМ под склейку, включая обработку плазмой атмосферного давления, что соответствует мировым тенденциям.

В седьмой главе представлен итог всей проведенной работы – разработка и внедрение конкретных технологий изготовления конструкций. Показано успешное применение разработанных полуфабрикатов и методик при прессовом, вакуум-печном и вакуум-автоклавном формировании. Создана широкая номенклатура изделий для авиационной техники, от листового органотекстолита марки Органит 11ТЛ для лопастей вертолетов до крупногабаритных панелей интерьера и радиопрозрачных обтекателей. Для каждого из приведенных примеров продемонстрированы достигнутые положительные эффекты: снижение массы, трудоемкости, энергозатрат, стабилизация массово-габаритных и прочностных характеристик. В частности, серийная технология прессового формования листов органотекстолита обеспечивает стабильность свойств и массово-габаритных характеристик в диапазоне $\pm 3\%$, с сохранением прочностных свойств на уровне паспортных характеристик; серийная технология прессового формования заготовок трёхслойных панелей интерьера и радиопрозрачных крышек обеспечивает сокращение энергозатрат на 50 % и уменьшение цикла изготовления более чем в 10 раз; 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 обеспечивает получение характеристик, соответствующих требованиям технического задания. Автором диссертации также разработана НД на изготовление и поставку заготовок жёстких и гибких трубопроводов системы кондиционирования воздуха (СКВ) из материала ВПС-42П/Т64, освоенное серийное производство СКВ способом вакуум-печного формования обеспечило снижение массы самолёта Ил-114-300 не менее чем на 20 %.

Выводы которые делает диссертант, логично завершают обсуждение результатов, полностью отражают суть проделанной работы, соответствуют поставленным задачам и позволяют достичь цели исследования.

Соответствие работы критериям, предъявляемым к диссертациям

Диссертационная работа Вешкина Евгения Алексеевича является законченной научно-квалификационной работой, представляет собой пример интеграции науки и производства и вносит значительный вклад в науку о полимерных композиционных материалах и технологиях их переработки.

К достоинствам диссертационной работы можно отнести следующее:

- Системность и комплексность подхода. Разработана и реализована целостная научно-технологическая концепция «материал-технология-конструкция», что является современным и востребованным направлением в материаловедении. Диссертация охватывает полный технологический цикл: от синтеза связующих и изготовления препрегов до проектирования оснастки и отработки режимов формования сложных конструкций. Использование современных методов моделирования (реологических, тепловых процессов, инфузии) повышает обоснованность разрабатываемых технологий.

- Фундаментальность исследований. Проведён глубокий анализ взаимосвязей между свойствами исходных компонентов, параметрами технологических процессов и конечными характеристиками ПКМ. Разработка и применение комплекса нестандартных методов (микротвердометрия, склерометрия, акустическая эмиссия) является методологическим открытием для анализа структуры и свойств ПКМ.

- Междисциплинарность. Работа успешно объединяет химию полимеров, материаловедение, механику и технологию машиностроения, что является признаком исследований высокого уровня.

- Технологический трансфер. Особую ценность представляет успешный трансфер технологий из области авиационных материалов в гражданские отрасли (строительство мостовых сооружений, автомобилестроение). Это демонстрирует универсальность и масштабируемость разработанных подходов.

- Высокий уровень апробации результатов. Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на 21 международной и всероссийской научно-технической конференции. Результаты исследований отражены в 66 научных публикациях, из них 37 – в журналах из перечня ВАК, 29 – в индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также защищены 7 патентами РФ на изобретения, что свидетельствует о новизне и достоверности полученных данных.

Диссертационная работа Вешкина Евгения Алексеевича свидетельствует о выполнении масштабного и актуального исследования, результаты которого имеют фундаментальное и прикладное значение для отечественного авиастроения и других отраслей и соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Замечания по работе:

- термин «коэффициент объёмной анизотропии» характеризует отверждённый полимер по изменению величины микротвёрдости и не связан с параметрами прочности в указанных направлениях, в этой связи он некорректно использован в указанной интерпретации, т.к. только отражает неоднородность полимерной матрицы.

- в диссертации представлен обширный перечень разработанных материалов и технологий, но отсутствует их прямое сопоставление с лучшими зарубежными аналогами по ключевым показателям (удельные прочностные характеристики, стабильность свойств, экономический эффект). Такое сравнение усилило бы позиционирование работы как соответствующей мировому уровню или превосходящей его.

- раздел, посвященный акустической эмиссии, выглядит несколько обособленно. Не в полной мере раскрыт потенциал этого метода для неразрушающего контроля и прогнозирования ресурса разработанных конструкций в составе реальных изделий.

- в работе указано, что при некоторой «критической температуре» параболическая зависимость микротвердости выравнивается. Было бы ценно дать

более четкое определение этой температуры и ее связи с термодинамическими и кинетическими параметрами системы (температурой стеклования, максимальной температурой реакции).

- достаточно подробно исследовано влияние аппретирования угле- и стекловолокна на их поверхностно-энергетические характеристики и смачиваемость в растворных связующих, но неясно, как оценивалась полнота удаления аппрета после выдержки материала в ацетоне.

- не приведены статистические данные по пределу прочности клеевого соединения при сдвиге после изменений в технологических режимах изготовления связующих с учетом составленной прогностической модели.

- в диссертационной работе единицы измерения термодинамической температуры при проведении теплофизических испытаний указаны в градусах Цельсия, хотя согласно формулировки Международного бюро мер и весов в «брошюре СИ» в качестве основной единицы измерений термодинамической температуры принят кельвин (К).

Выдвинутые замечания не умаляют общей ценности диссертационной работы, носят в основном рекомендательный характер и определяют направления дальнейших исследований.

Диссертационная работа Вешкина Евгения Алексеевича представляет собой законченное научное исследование, в котором решена крупная научно-технологическая задача. Личный вклад автора является определяющим. Полученные результаты обладают высокой степенью новизны и практической значимости, подтверждены внедрением в производство и публикациями в рецензируемых изданиях. Вешкин Е.А. демонстрирует глубокие знания, высокую квалификацию и умение решать сложные комплексные задачи.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Вешкин Евгений Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по

научной специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов.

Профессор кафедры физической химии,

РХТУ им. Д.И. Менделеева

доктор технических наук, профессор

«02» 12 2025 г.

 И.В. Воротынцев

Подпись И.В. Воротынцева заверяю



Адрес организации: 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева",

Электронный адрес: vorotytsev.i.v@muctr.ru

Телефон: +7 920 060 9030