

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, генерального директора
АО «НПО Стеклопластик» Трофимова Александра Николаевича
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
специальности 2.6.11 «Технология и переработка синтетических и
природных полимеров и композитов».

Актуальность темы диссертации

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря набору уникальных свойств, в первую очередь по удельным характеристикам прочности и жёсткости, широко применяются в различных отраслях промышленности. Существенный вклад в развитие указанных материалов вносит авиационная отрасль, где спектр их применения в элементах конструкций постоянно расширяется, что требует от разработчиков летательных аппаратов и материаловедов консолидированного подхода. В этой связи в настоящее время направленность развития на ПКМ нового поколения, которые можно описать формулой «материал-технология-конструкция». При их создании необходимо учитывать многочисленные сервисные, эксплуатационные требования к конструкции и технологические процессы переработки (приготовление полимерных связующих и препрегов, а также формование и механическая обработка деталей), что требует особого подхода, сочетающего три направления деятельности: материаловедческое, технологическое и конструкторское.

Диссертационная работа Вешкина Евгения Алексеевича, посвящённая разработке 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 затрат, повышение эффективности производства за счёт выбора наиболее оптимальных способов и режимов изготовления ПКМ, безусловно, является актуальной, а ее результаты вносят научный и практический вклад в развитие технологий и переработки синтетических и природных полимеров и композитов.

Структура и содержание диссертационной работы

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

Во введении описана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны научная новизна и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, указаны публикации и апробации по теме проведенных исследований.

В первой главе приведен обзор научно-технической литературы по теме 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.

Во второй главе описаны объекты и методы исследований, использованные в работе. Показано, что в работе исследуется большое количество термореактивных связующих и армирующих наполнителей различных природы и марок, а также ПКМ на их основе. Наряду со стандартизированными методиками испытаний подробно описаны методики определения свободной энергии поверхности (СЭП) стекло-, органо- и углеродных волокон, которые рассчитывались на основе краевого угла смачивания в двух тестовых жидкостях: полярной (дистиллированная вода) и неполярной (н-гексан) методом Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле (ОВРК). Показана методика определения величины микротвердости образцов с различными режимами отверждения с помощью микротвердомера ПМТ-3М, а также методика оценки образцов склерометрическим методом с использованием скретч-тестера. Для построения прогностических моделей применялся комплекс методов статистического анализа и машинного обучения в программах Python 3.12, PyCharm.

В третьей главе показано, как в соответствии с разработанными научно-технологическими подходами осуществляется выбор технологических параметров полимерных связующих и армирующих наполнителей с учётом требований, предъявляемых к конструкции. Разработаны критерии выбора технологии изготовления конструкций из ПКМ. Отмечена важность точного подбора состава связующего для управления реологией реактопластов (регулирования вязкости), 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. Представлены температурные диапазоны растворения термопластичных добавок различных марок в эпоксидных смолах и их влияние на изменение вязкости. Установлена степень влияния характеристик исходных компонентов на значение клеевого сдвига полимерного связующего марки ВСК-14-2м. По результатам исследований составлено уравнение многофакторной (множественной) линейной регрессии. 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 °С ($r_s = -0.47$, $p < 0.01$), что учтено в процессах создания полимерных связующих других марок. Представлены зависимости расчётных диапазонов поверхностных плотностей плёнок полимерных связующих для изготовления препрегов в зависимости от величины поверхностной плотности и толщины слоя используемого армирующего наполнителя, а также с учётом применяемого удельного давления формования ПКМ. Для оценки совместимости определены значения смачиваемости волокон наполнителей различной природы и результаты исследования смачивающей способности расплавных и растворных связующих.

Четвертая глава посвящена разработке процессов совмещения армирующих наполнителей и связующих с использованием препреговых или прямых (инфузионных) процессов. Показан процесс разработки технологий изготовления препрегов на офлайн комплексе, состоящем из коутера, используемого для изготовления плёнок полимерного связующего или клея в автоматическом режиме, 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). Экспериментальные зависимости полученных результатов по изготовлению плёнок связующего были подвергнуты математической обработке и выведено уравнение линейной регрессии. Представлена степень влияния параметров технологического процесса на поверхностную плотность плёнки связующего и график корреляции фактических и рассчитанных по уравнению регрессии значений поверхностной плотности плёнки связующего марки ВСЭ-1212. Показаны результаты исследований влияния параметров технологического режима (скорость протяжки ткани, зазор между валами, температура валов и др.) на линии совмещения на характеристики изготавливаемого препрега. Установлена высокая сходимость результатов по массовой доле связующего, разброс указанного показателя в препреге находится в диапазоне не более 2 %, что говорит о прецизионности их изготовления. Показан подход к созданию инфузионных процессов. Предложена схема расчёта содержания связующего в заготовке, с учётом технологических потерь. Показано

имитационное компьютерное моделирование процесса инфузии при изготовлении профилированного настила конструкции мостового сооружения из стеклопластика марки ВПС-58. В заключительной части главы показаны разработка углепластика ВКУ-48/ВТкУ-5, изготавливаемого по аналогичной технологии.

В пятой главе приводится описание алгоритма для выбора температурно-временных и манометрических параметров отверждения ПКМ. Особое внимание уделено неравномерности распределения температуры при отверждении полимерных связующих различной природы и ПКМ на их основе, армированных волокнистыми наполнителями. Представлено моделирование процесса отверждения эпоксидного полимерного связующего марки ЭДТ-69Н и показан градиент температур от поверхности образца к его середине, что приводит к наибольшей степени конверсии в ней, а минимальной – у его поверхности. Данный факт подтверждён с применением предложенных методов склеро- и микротвердометрии. Показано, что изменение микротвердости в сечении исследуемых образцов подчиняется параболическому закону: для связующих, реакции в которых идут с выделением тепла (экзотермические) максимальные значения микротвердости расположены в вершине параболы, а минимальные на её ветвях, которые направлены вниз; для связующих, реакции которых идут с поглощением тепла (эндотермические) наоборот, минимальные значения микротвердости расположены в вершине параболы, а максимальные на её ветвях, которые направлены вверх. Предложена методика расчёта коэффициента объёмной анизотропии, отражающая разницу в микротвердости отверждённых полимерных связующих в различных точках образца по его толщине. Коэффициент объёмной анизотропии (КОА) является безразмерной величиной и свидетельствует о различиях в значениях микротвердости отверждённого связующего в высотном направлении. КОА может иметь положительные, отрицательные или нулевые значения. Показана выраженная закономерность зависимости ширины бороздок от конечной температуры отверждения связующего ЭДТ-69Н. Приведены в графическом виде зависимости прогиба образцов углепластика КМУ-11ТР от микротвердости матрицы на его лицевой поверхности и зависимость прогиба углепластиковых образцов от коэффициента объёмной анизотропии образцов этого углепластика. Показано, что с ростом микротвердости матрицы углепластика растут и значения частоты и амплитуды сигналов акустической эмиссии. С учётом проведённых исследований автором предложены подходы к выбору температурно-временных и манометрических параметров режима отверждения.

В шестой главе 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. 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°C (ВПС-55 и ВПС-59). Показана высокоэффективная технология подготовки поверхности ПКМ под склеивание с применением плазмы атмосферного давления. Приведены технологические параметры режимов раскроя основных и вспомогательных материалов механической обработки при изготовлении конструкций из ПКМ. Приведены режимы обработки, режущий инструмент.

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. Отработаны технологические параметры и разработаны технологии изготовления конструкций из ПКМ способами прессового, вакуум-печного и вакуум-автоклавного формования: листового органотекстолита марки Органит 11ТЛ, заготовок панелей пола из отечественных материалов, зашивок багажно-грузового отсека пассажирских самолётов Ту-214 и Ил-114-300.

Научная новизна работы.

1. Разработаны научно-технологические основы для создания серийных высокоэффективных технологий изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения, учитывающие особенности технологических свойств полимерного связующего и армирующего наполнителя, а также режимов отверждения ПКМ.
2. Для научно обоснованного выбора характеристик армирующих наполнителей построены зависимости смачивающей способности полимерными связующими различных классов стеклянных, углеродных и арамидных волокон. В зависимости от характеристик армирующих наполнителей впервые рассчитаны и систематизированы объемно-массовые характеристики полуфабрикатов полимерных композиционных материалов.
3. Установлены закономерности изменений микротвердости в объеме полимеров матриц на основе различных классов связующих от режимов переработки. Проведённые исследования образцов полимеров показали наличие анизотропии свойств по микротвердости в объёме отверждённых связующих, на основании чего рассчитаны коэффициенты объёмной анизотропии. Впервые установлено, что микроструктура и

микротвердость полимерной матрицы во всех трех взаимно перпендикулярных плоскостях различна.

4. Для научно обоснованного выбора режимов переработки полимерных композиционных материалов построена математическая модель, характеризующая влияние свойств исходных компонентов на прочностные свойства отверждённой полимерной матрицы и технологических параметров на объёмно-массовые свойства плёнок полимерных связующих.
5. Систематизированы результаты и построена зависимость влияния температурно-временных параметров режима отверждения полимерного связующего на изменение величины микротвёрдости и сигналов акустической эмиссии в полимерных композиционных материалах.
6. Введено понятие «коэффициент объёмной анизотропии» для оценки степени отверждения ПКМ. Определен критерий отверждения ПКМ.
7. В соответствии с разработанными научными основами создан ряд новых эффективных полимерных композиционных материалов и технологий их переработки.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертационной работы Вешкина Евгения Алексеевича вызывает заслуженное уважение. Автор по результатам проведённых исследований разработал конкретные алгоритмы по разработке серийных технологий изготовления расплавных полимерных связующих стабильных по толщине $\pm 0,5$ % (масс.); плёночных клеев марок ВК-36, ВК-36Р, ВК-36РТ; препрегов на основе полимерных связующих и стеклянных, углеродных и органических армирующих волокнистых материалов 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 ткани технической арт. 5381/1-89 и клеевой

плёнки марки ВК-36РТ.140, обеспечивающая стабильность свойств и массово-габаритных характеристик в диапазоне $\pm 3 \%$.

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 $\pm 5 \%$. 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 и технология изготовления конструкции методом пропитки под действием вакуума из огнестойкого углетекстолита марки ВКУ-48 для изготовления капотов вертолётной техники, снижающая энергозатраты на 20%. Разработана технология изготовления конструкции пылезащитного устройства из углетекстолита с антиэрозионным слоем из органотекстолита, обеспечивающая стабильность массово-габаритных характеристик в диапазоне $\pm 2 \%$ и стойкую антиэрозионную защиту.

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе Вешкина Евгения Алексеевича, подтверждается комплексным подходом при планировании и проведении исследований и большим объемом экспериментальных данных. Результаты испытаний были получены с использованием современного оборудования и подвергнуты всесторонней статистической обработке. Кроме того, полученные в работе экспериментальные результаты были грамотно проанализированы, сравнены с аналогичными результатами, опубликованными в отечественной и зарубежной научной литературе.

Публикации и апробация работы.

Результаты работы отражены в 66 публикациях, из них 37 - в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России и 29 входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, и получено 7 патентов РФ.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 21 Международной конференции.

Общая оценка выполненных диссертантом исследований и работы в целом

Диссертационная работа Вешкина Евгения Алексеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержатся решения важных материаловедческих и конструктивно-технологических проблем, в виде систематизации подходов к подбору полимерных связующих и армирующих наполнителей различной природы, а также технологий их совмещения и переработки в конструкции с учетом выбора технологических и эксплуатационных характеристик существующих и вновь разрабатываемых ПКМ.

К достоинствам диссертационной работы можно отнести следующее:

- значительный объем экспериментальных исследований и математической обработки полученных результатов;
- рассмотрено влияние термопластичных модификаторов на реологию расплавных эпоксидных связующих, а также влияние на их свойства диспергирования порошковых отвердителей по объему;
- показан механизм влияния, в виде уравнения 8-факторной регрессии, характеристик исходных компонентов на свойства полимерных связующих;
- проведена оценка краевого угла смачивания и свободной энергии поверхностей волокон армирующих наполнителей различной природы, а также смачивающей способности полимерных связующих растворного и расплавного типов;
- в диссертационной работе приведена методика расчёта массового содержания полимерного связующего в ПКМ, в зависимости от удельного давления формования;
- в работе представлены новые фундаментальные результаты, в частности, исследование неоднородности свойств полимерной матрицы в объеме материала методами склеро- и микротвердомерии. Разработан и применён комплекс инновационных методов, позволяющих количественно оценивать качество отверждения полимерного связующего, а также введён новый параметр – «коэффициент объемной анизотропии»;
- в диссертации автор использовал специализированное программное обеспечение по созданию больших баз данных и задействовал методы машинного обучения (Python), что является новым и перспективным инструментом обработки экспериментального материала.

В целом работа обладает необходимым внутренним единством, а представленные в ней научные результаты, позволяют их квалифицировать как новые, что свидетельствует о вкладе диссертации в науку о технологиях и переработке синтетических полимеров и композитов. Личный вклад соискателя и практическая значимость диссертационной работы

Вешкина Е.А. заключается во внедрении в серийное производство технологий изготовления широкой номенклатуры материалов и конструкций для авиационной техники, что подтверждается внушительным объемом нормативной документации (ТУ, ТР, ТИ) и патентов.

Перечень выступлений на научных конференциях и публикаций автора по теме диссертационной работы свидетельствует о высоком личном вкладе автора в научное исследование. Опубликованные научные статьи отражают результаты работы на должном уровне.

Замечания по работе:

1. Автореферат оформлен с нарушениями требований ГОСТ 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». В автореферате отсутствует раздел «Научная новизна». В диссертации раздел «Научная новизна» сформулирован.

2. При доказанной технологической эффективности по снижению энергозатрат на 50% в работе отсутствуют данные по экономическому эффекту от внедрения технологий в сравнении с традиционными, что могло бы усилить аргументацию их высокой эффективности и конкурентоспособности.

3. В работе не рассмотрено влияние режимов формования ПКМ на их долговечность в условиях эксплуатации (усталость, старение, климатические воздействия).

4. Работа содержит значимо большой объем экспериментальных данных, при этом текст диссертации очень лаконичный, не содержит подробного обсуждения результатов и сравнительного анализа разработанных материалов с отечественными и зарубежными аналогами.

5. Текст содержит опечатки, касающиеся орфографии, нумерации таблиц и подписи к рисункам. Список литературы оформлен не полностью в соответствии с ГОСТ Р 7.1.

Сделанные замечания не влияют на основные результаты работы и не снижают ее общую высокую оценку, научную новизну и научно-практическую значимость.

Заключение

По актуальности темы исследований, степени обоснованности научных положений, объему исследований и научно-практической значимости полученных результатов, выводов и рекомендаций представленная диссертационная работа Вешкина Е.А. на тему «Научно-технологические основы разработки высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения» представленная на соискание ученой степени доктора технических наук

соответствует 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 специальности 2.6.11. «Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов».

Официальный оппонент:

доктор технических наук,
Генеральный директор

АО «НПО Стеклопластик»


28.11.2025

Трофимов Александр Николаевич

Акционерное общество «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова»

Адрес: 141551, Московская область, г.о. Солнечногорск, пгт Андреевка, к. 3А/4

Телефон: 84955360694

Адрес электронной почты: info@npostek.ru

Подпись Трофимова Александра Николаевича удостоверяю

Ученый секретарь

АО «НПО Стеклопластик»,

доктор технических наук



Демина Наталья Михайловна



(М.П.)

28.11.2025.