

УТВЕРЖДАЮ:

Врио проректора по научной  
деятельности и цифровизации,  
доктор технических наук, доцент  
Бабушкин Виталий Михайлович

«25» 11 2025 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

(«Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»)  
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 работы

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: материаловедческий, технологический и конструкторский. В этой связи разработка технологии по созданию конструкций из ПКМ является комплексной научно-технической задачей, включающей расчёт и проектирование композитного материала, определение его конструктивных особенностей, а также выбор материалов, технологической схемы и оптимальных технологических режимов изготовления.

Поэтому диссертационная работа Вешкина Евгения Алексеевича, посвящённая разработке научно-технологических основ для создания взаимосвязанных высокоэффективных технологических процессов изготовления расплавных полимерных связующих, препрегов и авиационных конструкций из них 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** сформулированы цели и задачи диссертации, обосновывается актуальность выбранной темы,

**В первой главе** проведён подробный обзор литературы, в котором рассмотрены современное состояние в области технологических разработок в современном авиационном производстве полуфабрикатов и конструкций из ПКМ нового поколения. Определены наиболее перспективные и проблемные направления исследований в области переработки ПКМ. Представлена структурная схема научно-технологических основ создания высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов конструкций из ПКМ нового поколения, учитывающий единство «материала-технологии-конструкции».

**Вторая глава** содержит описание объектов исследований: полимерных связующих различной природы, исходных компонентов для них, армирующих наполнителей различных марок, а также препрегов на их основе. Также описаны методики измерений основных характеристик исследуемых образцов, основная масса из которых стандартизована, но есть и нестандартные, такие как методика определения свободной энергии поверхности (СЭП) армирующих волокон, методика определения величины микротвердости отверждённых полимерных образцов ПКМ с помощью микротвердомера ПМТ-3М, а также склерометрическим методом с использованием изготовленного скретч-тестера. Построения математических моделей велось с применением комплекса методов статистического анализа и машинного обучения в программах Python 3.12, PyCharm.

**В третьей главе** представлена в виде таблицы схема выбора параметров и технологий переработки ПКМ, направленная на выбор свойств полимерного связующего и армирующего наполнителя, их технологических свойств и способа совмещения и формования конструкций. Показано что для регулирования вязкости полимерных связующих на этапе отверждения ПКМ для обеспечения пропитки армирующего наполнителя и исключения избыточного вытекания полимерного связующего из пакета заготовки,



проводят его модификацию полисульфонами различных марок. Представлены особенности введения полисульфона марки ПССФ-30 и его влияния на реологические и реокинетические свойства смеси. По результатам исследований статистических данных составлено уравнение многофакторной (множественной) линейной регрессии, описывающее степень влияния свойств исходных компонентов на прочность клеевого сдвига полимерного связующего с высокой степенью прогнозирования.

Показаны статистические данные по разбросу поверхностной плотности применяемых тканых наполнителях, установлено, что разброс составляет до 5 %. Представлены исследования влияния прилагаемого удельного давления на толщину наполнителя для расчёта содержания связующего в ПКМ. Представлены значения краевого угла смачивания и свободной энергии поверхности волокон армирующих наполнителей различных марок, и их совместимость с полимерными связующими.

**Четвертая глава** работы посвящена процессам совмещения полимерных связующих с армирующими наполнителями. Для разработки технологии изготовления препрегов на оффлайн линии, состоящей из коутера и линии совмещения исследован процесс изготовления плёнки полимерного связующего на коутере, по результатам исследований построено уравнение многофакторной линейной регрессии, описывающее влияние зазора между валами, коэффициента вращения вала относительно скорости протяжки подложки и скорости протяжки подложки на поверхностную плотность изготавливаемой плёнки связующего. Показана высокая сходимость между прогнозными и фактическими показателями. Разработаны технологии изготовления препрегов на линии совмещения. 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. Представлены подходы к созданию трансферных (инфузионных) процессов. 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.

**Пятая глава** посвящена выбору температурно-временных параметров и удельного давления формования при отверждении ПКМ. С применением моделирования показан значительный перегрев средней части при отверждении эпоксидных связующих, что отражается в неравномерной степени отверждения полимера по его толщине. В этой связи с применением



предложенных методов склеро- и микротвердомерии, показано, что изменение микротвердости в сечении исследуемых образцов подчиняется параболическому закону: 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. Разница в твёрдости полимерной матрицы по толщине образцов получены и по результатам склерометрии. 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. Для отражения разницы в микротвердости по толщине отверждённых полимерных связующих предложен коэффициент объёмной анизотропии. Установлены зависимости прогиба углепластиковых образцов от их коэффициента объёмной анизотропии. Показано, что с ростом микротвердости матрицы углепластика растут и значения частоты и амплитуды сигналов акустической эмиссии.

**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. Разработаны стеклопластики марок ВПС-55 и ВПС-59 и технологии изготовления полимерных формообразующих оснасток с рабочими температурами до 140 °С и 200 °С. Показано влияние плазмы атмосферного давления при подготовке поверхности ПКМ под склеивание на величину адгезии, установлено ее значительное повышение при использовании клеев холодного отверждения.

**В седьмой главе** показаны разработанные серийные технологии изготовления конструкций из ПКМ способами прессового, вакуум-печного и вакуум-автоклавного формования.

**В заключении** формулируются наиболее важные результаты и выводы, полученные автором в ходе проведения исследований:

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. С их учётом в серийном производстве УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» составлены технологические регламенты изготовления 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;

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 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, имеющие минимальный разброс по массовой доле связующего, проведена статистическая оценка их свойств;

4. 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.

5. 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.

6. 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 – 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.

7. Представлены способ и критерии выбора температурно-временных и манометрических параметров процесса отверждения ПКМ, в зависимости от толщины конструкции.

#### **Научная новизна**

Разработаны научно-технологические основы для создания серийных высокоэффективных технологий изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения на основе различных классов связующих и армирующих волокнистых наполнителей.

Для научно обоснованного выбора параметров технологического режима отверждения установлены зависимости характеристик полимерных композиционных материалов от свойств полимерных матриц. Впервые установлено, что изменение микротвердости по толщине отверждённых полимерных матриц происходят по параболической зависимости с экстремальными значениями микротвердости в середине высотного сечения образцов для полимеров отверждаемых с протеканием экзотермических реакции, и минимальные значения в середине для полимеров с протеканием эндотермической реакций. Установлено, что с ростом толщины образцов ПКМ на основе эпоксидных связующих растут и максимальные значения микротвердости в их середине. Установлено, что с ростом конечной температуры отверждения ветви параболы становятся более пологими и при некоторой температуре значения микротвердости в сечении образца



выравниваются, а сама парабола перерождается в прямую, для характеристики подобного изменения микротвердости показана методика расчёта коэффициенты объёмной анизотропии. Впервые установлено, что микроструктура и микротвердость полимерной матрицы во всех трех взаимно перпендикулярных плоскостях различна. Установленные закономерности экспериментально подтверждены результатами склерометрии.

Для научно обоснованного выбора характеристик армирующих волокнистых 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.

Для научно обоснованного выбора технологических параметров переработки полимерных композиционных материалов установлено, что процессы совмещения полиарилсульфонов с эпоксидными олигомерами сопровождаются экстремумами на зависимости вязкости от температуры и экзотермическими эффектами, связанными с процессами растворения и взаимодиффузии термопластов и эпоксидных олигомеров. Построены математические модели, характеризующая влияние свойств исходных компонентов на прочностные свойства отверждённой полимерной матрицы и технологических параметров на объёмно-массовые свойства плёнок полимерных связующих.

Впервые построена зависимость влияния температурно-временных параметров режима отверждения полимерного связующего на изменение величины микротвёрдости и сигналов акустической эмиссии в полимерных композиционных материалах.

В соответствии с разработанными научно-технологическими основами создан ряд новых полимерных композиционных материалов и технологий изготовления конструкций из них.

Несмотря на общую положительную оценку диссертационной работы Вешкина Е.А., необходимо выделить следующие замечания, возникшие в ходе ознакомления с работой:

1. Отсутствует детализация моделей. Уточнить области применения и погрешности регрессионных моделей для свойств связующих и пленок.
2. Отсутствует сравнительный анализ. Добавить сравнительные данные, подтверждающие конкурентоспособность разработанных материалов и технологий с мировыми аналогами.



3. Для более детального изучения анизотропии полимерной матрицы и исключения влияния армирующих наполнителей на полученные значения микротвердости предлагается опробовать метод наноиндентирования с применением нанотвердомеров.

4. Долговечность и надёжность. В перспективных исследованиях целесообразно более глубоко изучить вопросы длительной прочности, усталости и старения разработанных ПКМ в реальных эксплуатационных условиях.

5. Не представлена схема и методика измерения сигналов акустической эмиссии при нагружении консольного образца.

Сделанное замечание не снижает научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы.

**Практическая значимость** диссертации Вешкина Е.А. подтверждается тем, что полученные результаты представляют интерес не только для ученых-материаловедов, но и для технологов и конструкторов, т.е. работа имеет ярко выраженную прикладную направленность. Разработанные автором технологии, материалы и нормативная документация внедрены в серийное производство. Результаты воплощены в конкретных изделиях для авиационной техники (Ил-114-300, Ту-214, вертолетной техники), что привело к существенному технологическому и экономическому эффекту. Высокий уровень апробации и внедрения (66 публикаций, 7 патентов, НД) - одна из сильных сторон рассматриваемой работы.

**Достоверность полученных 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.

Диссертационная работа *«Научно-технологические основы разработки высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения»* выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические и технологические решения по подходам к созданию серийных технологий переработки ПКМ.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 21 научно-технической конференции.



Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

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.

Диссертационная работа Вешкина Е.А. рассмотрена на заседании кафедры производства летательных аппаратов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (протокол № 3 от «20» октября 2025 г.), на котором присутствовало 23 научно-педагогических работника, проголосовавших единогласно за утверждение данного отзыва.

Заведующий кафедрой производства  
летательных аппаратов  
ФГБОУ ВО КНИТУ-КАИ,  
кандидат технических наук,  
доцент



В.В. Батраков

Профессор кафедры производства  
летательных аппаратов  
ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»,  
доктор химических наук



Л.М. Амирова



Батраков В.В.  
Амирова Л.М.

Адрес: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
ФГБОУ ВО КНИТУ-КАИ, тел.: +7 (843) 231-03-25,  
<http://www.kai.ru/> E-mail: [pla.kai@mail.ru](mailto:pla.kai@mail.ru)