

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Милейко Сергей Тихонович 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 Е.А. Вешкина «Научно-технологические основы разработки высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов и конструкций из полимерных композиционных материалов нового поколения» посвящена решению задач по разработке технологий изготовления полуфабрикатов и конструкций из композитов с полимерной матрицей нового поколения. Целью диссертационного исследования является разработка научно-технологических основ для создания высокоэффективных технологий изготовления полуфабрикатов и конструкций из композиционных материалов нового поколения, учитывающих технологические параметры полимерных связующих, полуфабрикатов на их основе, а также параметры процессов формообразования и отверждения деталей из ПКМ. На сегодняшний день эта область научных исследований одна из самых востребованных в материаловедении и соответствует текущим интересам и проблемам современного авиастроения. По содержанию и поставленным задачам можно утверждать, что данная работа направлена на выполнение критически важных государственных программ, включая импортозамещение и создание новых композиционных материалов. Поэтому тема диссертации Вешкина Е.А., посвященная разработке научно-технологических основ производства ПКМ нового поколения, является значимой и актуальной.

## **Научная новизна и практическая значимость исследований.**

В диссертации Е.А. Вешкина представлены результаты, обладающие научной новизной, имеющие практическую значимость:

- Разработана и реализована целостная научно-технологическая концепция «материал-технология-конструкция», представленная в виде информативной структурной схемы научно-технологических основ создания высокоэффективных процессов изготовления полуфабрикатов конструкций из ПКМ нового поколения. Проведён анализ взаимосвязей между свойствами исходных компонентов полимерных связующих, армирующих наполнителей, параметрами технологических процессов переработки и конечными характеристиками ПКМ.

- Впервые для определения степени отверждения полимеров и оптимизации температурно-временных параметров отверждения наряду с методами вискозиметрии и ДСК предложены методы склеро- и микротвердометрии, позволяющие оценить структурную неоднородность и анизотропию полимерной матрицы с помощью коэффициента объёмной анизотропии (КОА), методика расчета которого также впервые предложена диссертантом. Установлены закономерности изменения микротвердости в объёме полимеров, представляющих различные классы отвержденных связующих (на основе эпоксидных, полиэфирных и фенолформальдегидных смол). Установлено, что микроструктура и микротвердость отверждённой полимерной матрицы во всех трех взаимно перпендикулярных плоскостях различна. Установленные закономерности экспериментально подтверждены результатами склерометрии.

- Впервые построена зависимость влияния температурно-временных параметров режима отверждения полимерного связующего на изменение величины микротвёрдости и сигналов акустической эмиссии в ПКМ. Построены диаграммы зависимости параметров сигналов акустической эмиссии от изменения микротвердости лицевой поверхности полимерной матрицы композита.

- Построены зависимости смачивающей способности полимерными связующими различных классов стеклянных, углеродных и арамидных волокон. Рассчитаны объемно-массовые характеристики полуфабрикатов композитов с



полимерной матрицей, в зависимости от характеристик и классов армирующих наполнителей.

- Построение уравнений множественной регрессии, устанавливающих количественные связи между свойствами исходных компонентов, технологическими параметрами процессов и прочностными и объемно-массовыми характеристиками материалов, что переводит технологию из области эмпирики в область прогнозируемого проектирования;

В работе детально изучены процессы 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. По результатам исследований показана высокая сходимости результатов, 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.

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.

### **Достоверность работы.**

Достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе Вешкина Е.А., подтверждается применением современного сертифицированного оборудования, воспроизводимостью экспериментальных данных, полученных различными независимыми методами, привлечением современных, преимущественно стандартизованных и взаимно дополняющих друг друга экспериментально аналитических методов и испытаний.

### **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, описаны научная новизна и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, апробация работы, а также указаны публикации по теме проведенных исследований.

**В первой главе** проведён обзор литературы по теме диссертационной работы, в котором рассмотрены современное состояние в области технологических разработок в современном авиационном производстве полуфабрикатов и конструкций из ПКМ. Автор проводит декомпозицию всей технологической цепочки переработки ПКМ в конструкцию на элементарные процессы, давая им критическую оценку. Определяет наиболее перспективные и проблемные направления исследований в области переработки ПКМ. Логическим итогом главы становится рисунок 1.12 – структурная схема, которая является не просто иллюстрацией, а концептуальной моделью всего диссертационного исследования.

**Вторая глава** содержит описание объектов исследований. Автором сформирован репрезентативный набор объектов исследования, охватывающий как традиционные растворные связующие (ЭДТ-69Н), так и полный спектр современных расплавных систем (линейка ВСК-14, ВСЭ-1212 и др.), а также широкую номенклатуру препрегов и ПКМ на их основе. 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: комплекс методов исследования поверхностных свойств наполнителей и связующих (тензиометрия, метод Вашбурна); координатная схема измерения микротвердости по высоте образца (Рис. 2.5) и склерометрический контроль. как методика определения свободной энергии поверхности (СЭП);– Применение передовых методов



статистики для обработки многопараметрических данных, с использованием машинного обучения в программах Python 3.12, PyCharm.

**В третьей главе** представлены одни из основных с точки зрения управления В разделе 3.1 разработан практико-ориентированный классификатор для конструктивно-технологического анализа, позволяющий обоснованно выбирать технологию изготовления детали, с обоснованием выбора свойств полимерного связующего, матрицы и армирующего наполнителя, их свойств, способа совмещения и формования конструкций. В разделе 3.2 проведено детальное исследование реологии связующих, где наглядно показаны принципиальные различия между растворными и расплавными системами (Рис. 3.1, 3.2). Представлено изучение кинетики растворения термопластов в эпоксидных олигомерах (Рис. 3.3-3.10), выполненное с применением реологических и дифференциально калориметрических анализов. Показано влияния дисперсности отвердителя на гомогенность и изменение реакционной способности композиции (Раздел 3.2.4, Таблица 3.5, Рис. 3.12). Представлено статистическое исследование с построением прогностических моделей, позволивших количественно оценить влияние восьми параметров на прочность отверждённого полимерного связующего (Раздел 3.2.5). Представлены статистические данные по разбросу поверхностной плотности применяемых тканых наполнителях, установлено, что разброс составляет до 5 %. Представлена методика расчёта содержания связующего в ПКМ с учётом характеристик армирующего наполнителя. Представлены зависимости смачиваемости волокон армирующих наполнителей различных классов от свободной энергии поверхности и поверхностных натяжений полимерных связующих.

**Четвертая глава** носит технологический характер и разделена на два блока. Первый посвящён созданию высокоточных технологий изготовления препрегов на офлайн-линии. Автор детально исследует влияние технологических параметров на стабильность свойств (Раздел 4.1.3) по результатам исследований построена закономерность влияния технологических параметров на поверхностную плотность изготавливаемой плёнки связующего, и отрабатывает рецептуры для

широкой номенклатуры материалов. Во втором данный переход сфокусирован на безавтоклавных трансферных процессах (вакуумная инфузия, RFI). Показаны исследования и имитационное компьютерное моделирование процесса инфузии при изготовлении детали из ПКМ, а также ряд разработанных материалов.

**Пятая глава** посвящена выбору температурно-временных параметров и удельного давления формования при отверждении ПКМ, для этого проводятся исследования:

- На уровне полимерной матрицы, где вводится и обосновывается новый критерий «коэффициент объемной анизотропии», и разрабатывается метод склерометрии для интегральной оценки.
- На уровне ПКМ, где комплексно, с применением микротвердометрии и акустической эмиссии, изучается влияние режимов отверждения на свойства композита в объеме, в том числе для сложных случаев (гибридные, разнотолщинные конструкции).
- Исследуется влияние давления, что завершает создание полной модели управления процессом формования.

**В шестой главе** рассмотрены критически важные, но часто игнорируемые аспекты: от проектирования и материалов оснастки до управления липкостью препрега, раскрытия и современных методов подготовки поверхности.

**Седьмая глава** является, по сути, практически важным итогом всей работы. В ней описаны отработанные технологии всех основных методов формования: прессового, вакуум-печного и вакуум-автоклавного, с указанием конкретных изделий и достигнутых технико-экономических показателей.

**Выводы** лаконичны, структурированы и полностью отражают результаты проделанной работы. Таким образом, структура диссертации представляет собой выверенную последовательность от постановки проблемы и исследования к разработке технологий и их практической реализации, что положительно характеризует проделанную автором работу.

К достоинствам работы можно отнести следующее:



- Системный подход. Работа охватывает полный жизненный цикл создания ПКМ от молекулярного уровня (синтез связующего) до уровня готовой конструкции, что является признаком высокого уровня научного обобщения;

- Междисциплинарность. Исследование органично сочетает знания в области химии полимеров, реологии, механики композитов и технологии машиностроения;

- Ориентация на внедрение. Все научные и технологические разработки автора имеют практическую направленность и доведены до стадии промышленного применения;

**Замечания по работе** не умаляют достоинств работы:

– Рекомендуется в дальнейших публикациях более детально осветить методику интерпретации сигналов акустической эмиссии и их корреляции с микродефектами структуры ПКМ.

– Целесообразно в выводах по главам более четко дифференцировать установленные закономерности для ПКМ с различной природой наполнителя (стекло-, угле-, органопластики) и матрицы.

– Не приведены сравнительные характеристики разработанных материалов с зарубежными аналогами.

– Излишнее цитирование в подтверждение очевидных утверждений лишь затрудняет чтение. В то же время некоторые ссылки явно устаревшие. Например, [10,12,13] относят A350XWB Dreamliner Боинга к «перспективным лайнерам». В то же время оба эти самолёта коммерчески используются уже более 10 лет. Наш MC-21 является, действительно, перспективным лайнером.

– Некоторые иллюстрации (например, 1.2 с данными по прочности и жесткости материалов) могут ввести в заблуждение некушённного читателя.

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

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-технических конференциях.

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.

**Милейко Сергей Тихонович**

Доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института физики  
твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН

  
Милейко С.Т.  
27.11.2025

подпись главного научного сотрудника, доктора технических наук  
Милейко С.Т. заверяю



**УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
ИФТТ РАН  
ТЕРЕЩЕНКО А.Н.**

**Полное наименование организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН)

**Адрес:** ИФТТ РАН, г. Черноголовка, Московская обл., ул.Академика Осипьяна д.2, 142432, Россия

**Телефон:** 8(496)52 219-82; +7 906 095 4402

**Сайт организации:** <http://www.issp.ac.ru>

**e-mail:** [adm@issp.ac.ru](mailto:adm@issp.ac.ru)