

Пальчиков Денис Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВ ДЛЯ РАБОЧЕЙ  
ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ПЕРСПЕКТИВНОГО ГАЗОТУРБИННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»).

Научный руководитель: **Ножницкий Юрий Александрович**,  
доктор технических наук, с.н.с.

Официальные оппоненты: **Милейко Сергей Тихонович**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук», главный научный сотрудник

**Нихамкин Михаил Шмерович**  
доктор технических наук, профессор, «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», зам. заведующего кафедрой «Авиационные двигатели»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»

Защита состоится «22» сентября 2025 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <https://mai.ru/events/defence>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.06



Краев В.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Необходимость повышения эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) привела к разработке и использованию турбореактивных двигателей с большой степенью двухконтурности (ТРДД), отличающихся значительными габаритами самых их крупных узлов – вентиляторов. Для успешного создания ТРДД высокой степени двухконтурности необходимо обеспечение приемлемых массы и стоимости изделия. Решение этой актуальной задачи двигателестроительные фирмы мира видят в применении полимерных композиционных материалов (ПКМ) при создании широкохордных рабочих лопаток (РЛ), бронезащитных корпусов и других деталей вентиляторов перспективных ТРДД. Применение ПКМ (углепластика) для изготовления РЛ вентиляторов (РЛВ) позволяет снизить массу двигателя, улучшить эксплуатационные характеристики РЛ (прежде всего усталостную долговечность), повысить надежность и снизить массу смежных деталей и узлов двигателя (за счет снижения нагрузок от РЛ из ПКМ), уменьшить уровень шума. При сертификации ряда зарубежных двигателей было показано, что можно обеспечить крайне малую вероятность обрыва углепластиковой РЛВ. Это обуславливает рассмотрение углепластиковой РЛВ для двигателей с открытым ротором вентилятора, в которых отсутствует корпус вентилятора, обеспечивающий локализацию фрагментов РЛВ при ее разрушении.

Несмотря на известный неудачный опыт компании Rolls Royce (RR) по применению углепластиковых РЛВ в двигателе RB-211-6, компания General Electric (GE) впервые в 1995 г. начала эксплуатацию ГТД GE90 с РЛВ, выполненными из углепластика по препреговой технологии. Удачный опыт эксплуатации двигателя GE-90 (наработка более 30 млн. часов) способствовал внедрению изготовленных из ПКМ по препреговой технологии РЛВ и в последующие модели двигателей (GeNx, Ge9x). Вслед за GE потянулись ведущие двигателестроительные компании, каждая из которых вносит свою лепту в развитие как самих ПКМ, так и способов их применения в двигателях. Так, для двигателя LEAP-X компания Snecma совместно с GE разработала рабочую лопатку вентилятора тканой структуры. К внедрению ПКМ в конструкцию двигателя вернулась и компания RR, которая сегодня ведет активную работу над углепластиковым вентилятором двигателя UltraFan. Данная установка в настоящее время позиционируется как самый большой и самый мощный реактивный двигатель в мире.

Одним из ключевых факторов создания работоспособной РЛВ двигателя GE90 оказалось создание компанией Hexcel уникального углепластика, обладающего повышенными характеристиками ударостойкости. Применение данного материала вкупе с конструкторскими решениями и развитием расчетно-

экспериментальных методов позволили обеспечить прочностную надежность РЛВ при всех видах эксплуатационной нагрузки. При этом для обоснования прочности использовались более жесткие требования (Специальные условия), чем требования, предъявляемые при использовании металлических РЛВ (CS-E, FAR-33). Данный факт подтверждает тезис о том, что композиционный материал не существует вне изделия, а его разработка является важнейшим условием создания детали.

**Степень разработанности темы исследования.** Изучению особенностей конструкционных ПКМ, эффективности их применения в различных отраслях техники посвящена обширная литература. Трудрами таких исследователей как В.В. Болотин, Г.А. Ванин, В.В. Васильев, С.Г. Лехницкий, Ю.Н. Работнов, Ю.М. Тарнопольский, А.Н. Полилов, Дж. Сендецки, Б.В. Розен, К. Чамис, С.В. Цай, Е.М. Ву, З. Хашин и многих других сформировано современное состояние науки в этой отрасли. Следует отметить большой объем работ по созданию РЛВ, выполненный иностранными специалистами, прежде всего сотрудниками фирм GE, Snecma, RR. В СССР определенный опыт в этом направлении был получен в 70-ые годы прошлого века в работах Т.Д. Каримбаева, Л.А. Горшкова, Ю.А. Петрова, Ю.А. Ножницкого, Г.М. Гуняева, А.Ф. Румянцева, А.М. Кшнякина, С.Н. Коновалова, Ю.В. Виганта и других по созданию лопатки двигателя Д-18Т. В постсоветское время работы по РЛ из ПКМ в РФ возобновились после длительного перерыва в 2016 г. с началом разработки ТРДД ПД-35. Отечественная промышленность к этому времени не располагала ни необходимой компонентной базой и материалом, годным для РЛ вентиляторов ТРДД, ни технологией изготовления РЛ, ни методами проектирования РЛ, ни методами испытаний применительно к задачам создания РЛ. В этих условиях формирование в короткие сроки системного подхода для исследований механических характеристик ПКМ для РЛ явилось актуальной технической задачей. Диссертационная работа посвящена формированию технологии экспериментальных исследований и получению характеристик статической прочности и трещиностойкости ПКМ в обеспечение создания РЛ перспективных вентиляторов ТРДД.

**Цель работы – разработка технологии экспериментального определения комплекса механических характеристик ПКМ при статическом нагружении для проектирования РЛВ ГТД на основе:**

- совершенствования методик проведения испытаний;
- создания базы экспериментальных данных вновь разработанных ПКМ;
- формирования системы специальной квалификации ПКМ для РЛ.

#### **Задачи исследования**

1. Анализ подходов, используемых ведущими зарубежными двигателестроительными компаниями, при выборе ПКМ для РЛВ.

2. Установление перечня характеристик статической прочности и трещиностойкости ПКМ, необходимых для проектирования, изготовления и прочностной доводки РЛ из ПКМ.
3. Анализ методов определения характеристик статической прочности и трещиностойкости ПКМ при создании РЛВ.
4. Отработка методов и средств экспериментального определения характеристик статической жесткости, прочности и трещиностойкости ПКМ для РЛВ.
5. Получение характеристик перспективных материалов, формирование базы экспериментальных данных для создания РЛВ.
6. Формирование номенклатуры и облика конструктивно-подобных элементов (КПЭ) РЛ из ПКМ и перечня прочностных задач, решаемых при испытаниях КПЭ.
7. Сопоставление значений механических характеристик ПКМ, определенных при испытании стандартных образцов, с их значениями, реализованными в РЛ.

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные исследования ПКМ проводилось как по стандартам ASTM и ГОСТ, так и с использованием вновь разработанных методов испытаний, в том числе с применением метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation, DIC).

**Научную новизну работы составляют:**

1. Комплексная технология экспериментальных исследований ПКМ, позволяющая определить полный спектр механических характеристик статической прочности и трещиностойкости (более 30 показателей), необходимых для проектирования РЛВ;
2. Новые и усовершенствованные существующие методы определения механических характеристик ПКМ с применением метода DIC:
  - новая методика определения характеристик ПКМ при межслоевом сдвиге по схеме четырехточечного несимметричного изгиба (ЧНИ), которая в отличие от существующих методик, позволяет определять характеристики межслоевого сдвига на образцах малой толщины и образцах-свидетелях, вырезанных из РЛВ, а также обеспечивает существенное снижение стоимости испытания;
  - новый метод определения прочности ПКМ при растяжении в направлении, перпендикулярном плоскости армирования (в трансверсальном направлении), имеющий, в отличие от стандартного (ASTM D7291), более высокую информативность в части возможности определения коэффициентов Пуассона, а также более высокую эффективность в части определения предела прочности (обеспечение разрушения образца в рабочей зоне).
3. Метод определения коэффициента Пуассона  $\nu_{13}$ ;

4. Усовершенствованный метод определения характеристик трещиностойкости ПКМ (тип I) с использованием оригинальной конструкции крепления нагружающих элементов (получен патент RU168913), а также способ измерения длины трещины (получен патент RU2672035);
5. Сформированная концепция нанесения повреждений на ПКМ, которая впервые позволяет использовать классификацию ударных повреждений, традиционно ранжируемых авиационными властями США (Federal Aviation Administration, FAA) по визуальным признакам (barely visible impact damage BVID, visible impact damage VID), для сопоставления с категориями аналогичных повреждений, наносимых методом квазистатического продавливания на плоские образцы;
6. Результаты исследования упруго-прочностных характеристик 7-ми новых углепластиков, разработанных для РЛВ;
7. Рекомендации по выбору ПКМ, наиболее удовлетворяющего требованиям прочности, предъявляемым к материалу для РЛВ;
8. Метод подтверждения соответствия значений механических характеристик ПКМ, полученных при испытаниях образцов и использованных при проектировании РЛВ, значениям, реализованным в РЛВ характеристик конструкционной прочности (с использованием результатов испытаний образцов-свидетелей, вырезанных из лопатки);
9. Методы сравнительных испытаний образцов-свидетелей хвостовика РЛВ на прочность при растяжении и сжатии (применение данных методов апробировано на образцах-свидетелях из полноразмерной РЛВ);
10. Метод исследования прочности хвостовика РЛ с использованием разработанной конструкции КПЭ («двухзамковый» образец).

**Достоверность результатов** экспериментальных исследований подтверждается широким использованием международных и отечественных стандартов. Испытания проведены в аккредитованной для проведения сертификационных испытаний Испытательной Лаборатории с использованием аттестованного экспериментального оборудования и поверенных средств измерений. Результаты испытаний с использованием вновь разработанных методов сопоставлены с результатами испытаний по стандартам ASTM, а также результатами расчетов, выполненных методом конечных элементов (МКЭ).

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Экспериментально определенный комплекс упруго-прочностных характеристик новых ПКМ использовался при прочностном проектировании и квалификационных испытаниях опытных РЛ вентиляторов двигателей размерности ПС-12, ПД-14, экспериментального биротативного вентилятора и модельных вентиляторов С194, а также перспективного двигателя ПД-35.

2. Разработаны при непосредственном участии диссертанта технические требования для ПКМ РЛВ.
3. На основе разработанной концепции нанесения повреждений сформирован подход к оценке годности ПКМ для РЛВ путем определения прочности материала с повреждениями.
4. На базе разработанной технологии экспериментального определения комплекса статических механических характеристик ПКМ для РЛ формируются отраслевые методики проведения испытаний.
5. Методы испытаний ПКМ, в том числе методы испытаний КПЭ из ПКМ, являются основой для формирования системы специальной квалификации ПКМ для РЛ вентиляторов.
6. Разработанная система вырезки и испытаний образцов из полноразмерной РЛ рекомендована для использования при прочностной доводке и объективном сравнении различных технологий изготовления.
7. С использованием разработанных методов проведены экспериментальные исследования ряда углепластиков - кандидатов на роль материала РЛВ, выбран материал, в наибольшей степени удовлетворяющий сформированным требованиям к материалу РЛВ.
8. Разработаны методические рекомендации по подтверждению прочностной надежности РЛВ из ПКМ.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Комплексная технология экспериментальных исследований ПКМ, позволяющая определить полный спектр механических характеристик статической прочности и трещиностойкости, необходимых для проектирования РЛВ.
2. Совокупность доработанных и вновь разработанных методов экспериментальных исследований ПКМ для РЛВ.
3. Методы определения механических характеристик ПКМ с применением метода DIC.
4. Методики определения характеристик прочности ПКМ с повреждениями, позволяющая оценить уровень допустимых напряжений в РЛВ.
5. Методики оценки реализации характеристик ПКМ в РЛВ.
6. Методы оценки прочности хвостовиков РЛВ.
7. Результаты экспериментальных исследований наиболее перспективных для РЛВ ПКМ.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждены на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (2011, 2014, 2016, 2018, 2021, 2023 г., г. Самара); на Всероссийской конференции «Проблемы науки и технологий» (2013 г., г. Миасс); на Всероссийской конференции «Тестмат»

(2013, 2017, г. Москва); на Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (2015 г., 2019 г., г. Москва); на Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (2015 г., г. Москва); на Международном технологическом форуме «Инновации, технологии, производство» 2018, 2019 г., г. Рыбинск); на 5-й Международной конференции по механике композиционных материалов «MechComp 2019», (Португалия, г. Лиссабон, 2019 г.); на Международном форуме «Ключевые тренды в композитах» (Москва (2020 г.); на Международной научно-технической конференции «ICAM 2020», (Москва, 2021 г.) и на ежегодных семинарах ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова» (2016, 2017, 2018 г);.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 8 научных статьях (3 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 – в издании Scopus) и в 2-х патентах РФ на изобретения, в 20 технических отчетах и 15 тезисах докладов.

**Вклад автора** в проведенное исследование заключается в определении целей и задач работы; в сборе и анализе информации о методах определения упруго-прочностных характеристик, о механических свойствах зарубежных ПКМ находящихся в эксплуатации РЛ; формировании перечня экспериментальных исследований характеристик статической прочности и трещиностойкости углепластика, необходимых для проектирования РЛ; в экспериментальной отработке методов определения упруго-прочностных характеристик ПКМ, выявлении и устранении недостатков этих методов. В частности, разработан метод испытаний ПКМ на межслоевой сдвиг, позволяющий определять межслоевые характеристики на образцах, вырезанных из РЛ; усовершенствован метод испытаний ПКМ на трещиностойкость; разработан новый метод определения прочности ПКМ при растяжении в трансверсальном направлении; усовершенствован метод определения характеристик прочности при сжатии образцов с повреждениями; разработана и экспериментально отработана методика испытаний КПЭ хвостовика РЛ. Автором диссертации обобщены научные результаты и сформулированы основные положения и выводы.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 88 наименований и содержит 155 страниц текста, 144 рисунка и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана необходимость применения ПКМ для РЛ вентилятора, кратко описаны особенности применения ПКМ в конструкции ТРДД, дан обзор состояния зарубежных работ по применению углепластиковых РЛВ, обоснованы цели и задачи диссертационной работы, её актуальность, научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов.

**В первой главе** описаны особенности упруго-прочностных характеристик ПКМ, отличающие их от металлов. Рассмотрены основные типы упругой симметрии КМ. Проанализирован опыт компании GE при выборе ПКМ для РЛ вентилятора, включая результаты сравнительных испытаний 10 конкурирующих ПКМ для РЛ. Анализ показал, что, наряду с традиционными характеристиками прочности и жесткости ПКМ, для обеспечения эксплуатационной надежности неметаллической РЛВ важными параметрами являются остаточная прочность при сжатии после удара (Compression after impact, CAI) и прочность при сжатии образцов с отверстием (ОНС). Указанные характеристики ПКМ имеют прямую связь с эксплуатационной надежностью РЛ и чувствительностью ПКМ к эксплуатационным повреждениям. Возможность обеспечения работоспособности ПКМ с повреждениями, определение допустимых технологических дефектов и эксплуатационных повреждений являются важнейшими факторами, которые необходимо учитывать при выборе ПКМ для РЛ вентилятора, при условии, что остальные прочностные характеристики имеют приемлемые уровни.

На основе анализа особенностей ПКМ и опыта ведущих зарубежных фирм выделена номенклатура основных механических характеристик, необходимых для создания РЛ вентилятора из ПКМ.

**Во второй главе** описаны используемые методы и средства, обеспечивающие экспериментальное определение механических характеристик ПКМ для РЛ вентиляторов. Рассмотрены испытательное оборудование; средства измерения, в том числе оптическая система измерений деформаций, необходимые для определения комплекса механических свойств ПКМ. Описаны методы определения упруго-прочностных характеристик ПКМ, регламентированные стандартами ASTM и ГОСТ, указаны области их применения и недостатки. Затронуты вопросы неразрушающего контроля (НК) ПКМ. Некоторые методические вопросы рассмотрены ниже.

### **2.1 Растяжение в трансверсальном направлении.**

Для определения механических характеристик ПКМ в трансверсальном направлении используется метод, регламентированный ASTM D7291. В этом случае используются образцы круглого поперечного сечения 2-х видов: с постоянным поперечным сечением (для определения модуля упругости) и с уменьшенным сечением в рабочей зоне (для определения прочности). Нагружение производят при помощи металлических блоков, соединенных с образцом при помощи клевого соединения. Недостатками данного метода являются отсутствие возможности достоверного определения коэффициента Пуассона ввиду формы поперечного сечения, а также зачастую недостаточная для разрушения образца прочность клевого соединения. Автором диссертации предложено для данных испытаний использовать образцы с квадратным поперечным сечением (рис. 1), что

позволяет дополнительно определить значения коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}, \nu_{32}$ , а для увеличения прочности соединения нагружающих блоков с образцом использовать наклейки из стеклопластика.

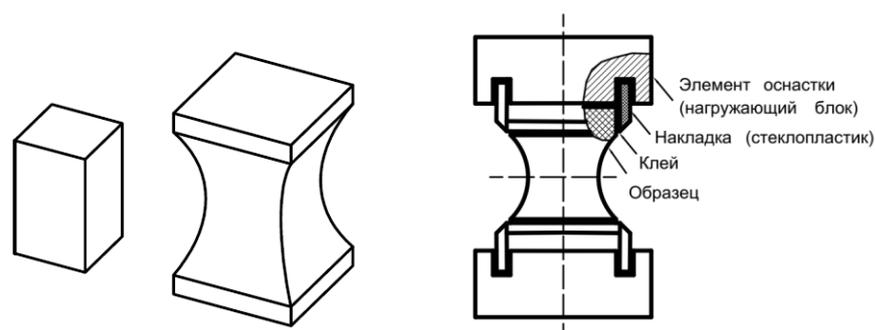


Рисунок 1. Вид образцов и способ соединения образца с нагружающими блоками

Результаты отработки предлагаемого автором метода испытаний представлены в разделе 3.5.

**2.2 Межслоевой сдвиг.** Для определения характеристик при межслоевом сдвиге в соответствии со стандартом ASTM D5379 требуются образцы толщиной  $h=20$  мм. В то же время при специальной квалификации ПКМ для РЛ необходимо получение характеристик ПКМ на образцах, изготовленных по единой технологии с РЛ, или на образцах, вырезанных непосредственно из изделия, что практически невозможно из-за несоответствия требуемых стандартом толщин образцов и толщин изделия. Отмеченные недостатки были устранены путем применения современных методов испытаний и систем измерения. Разработана методика определения характеристик ПКМ при межслоевом сдвиге путем испытаний образцов-балок прямоугольного поперечного сечения толщиной  $h=4$  мм на ЧНИ (рис.2) с применением метода корреляции цифровых изображений для измерения деформаций сдвига.

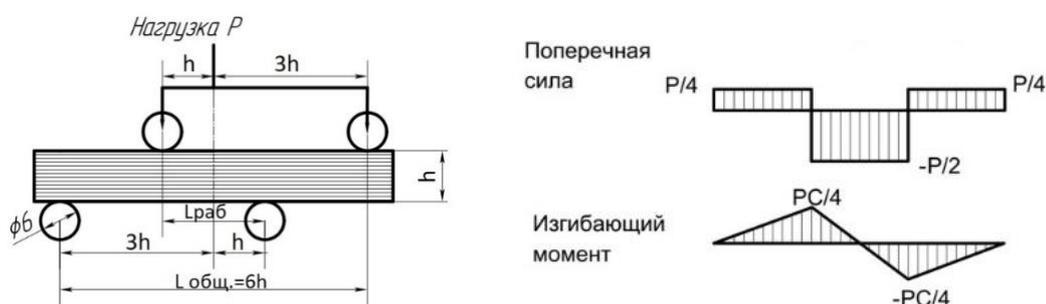


Рисунок 2. Схема нагружения и эпюры поперечной силы и изгибающего момента при испытаниях балки методом ЧНИ

Следует отметить, что для реализации испытаний методом ЧНИ, применяется более простая испытательная оснастка, а использование образцов меньшей относительно стандарта ASTM толщины позволяет снизить затраты на изготовление образцов. Выбранная схема нагружения и ее параметры ( $L_{общ}/h=6$ ,

$L_{\text{раб}}/h=2$ ) обеспечивают состояние «чистого» сдвига в центральной части образца. Максимальные касательные напряжения в этой схеме нагружения для балки прямоугольного поперечного сечения получены по известной формуле Журавского.

Достоверность результатов испытаний, полученных методом ЧНИ, подтверждена сравнительными испытаниями образцов ПКМ методом ЧНИ и стандартным методом ASTM D5379. Сравнительный анализ результатов испытаний показывает хорошее соответствие механических характеристик углепластика при межслоевом сдвиге, полученных двумя различными методами. Различия межслоевых характеристик прочности  $\tau$  и модуля сдвига  $G$ , определенных двумя методами, не превысили 1,5%. При этом новый метод позволяет проводить испытания на образцах меньшей толщины, в том числе на образцах, вырезанных из РЛВ, что не реализуемо при применении стандартного метода ASTM D5379.

**2.3. Трещиностойкость.** Еще одной важнейшей характеристикой ПКМ для РЛВ является трещиностойкость. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости осуществляется при нагружении по различным схемам образца с начальным расслоением в срединной плоскости. С точки зрения реализации наиболее сложными являются испытания при смещении трещины по типу I, регламентированные стандартом ASTM D5528. Согласно стандарту, нагружающие элементы соединяются с образцом при помощи клеевого соединения. Так как для РЛВ используются материалы с высокой характеристикой трещиностойкости, то зачастую при испытаниях прочность клеевого соединения оказывается недостаточной для обеспечения возможности требуемого смещения трещины. Для устранения данной проблемы разработан метод крепления нагружающих элементов с образцом через паз типа «ласточкин хвост» (рис. 3).

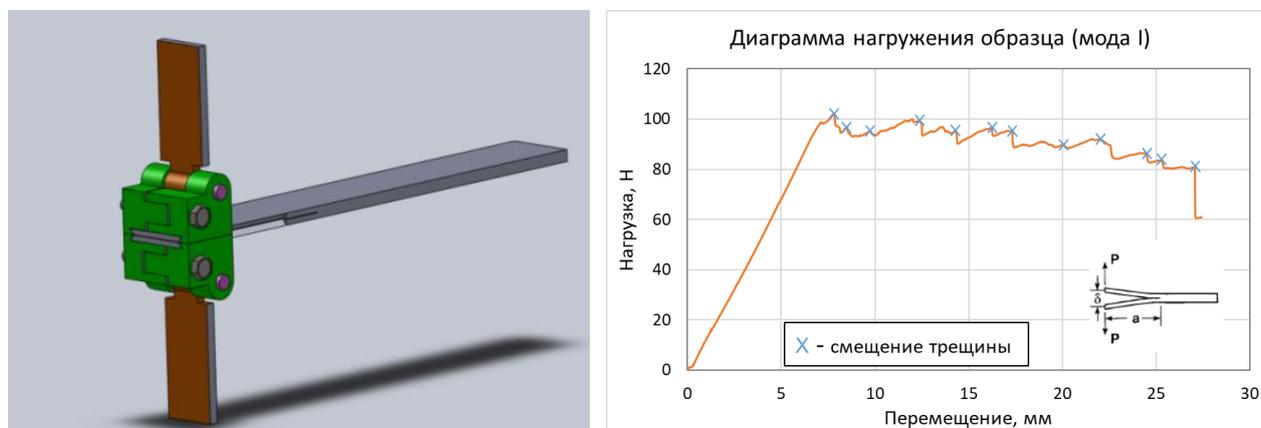


Рисунок 3. Конструкция нагружающих элементов и вид диаграммы нагружения образца ПКМ при испытаниях на трещиностойкость по моде I

Применение разработанной конструкции обеспечивает надежное определение характеристик трещиностойкости, а также построение зависимостей энергии разрушения от длины трещины (R-кривых) при испытаниях ПКМ в необходимом диапазоне температур. Экспериментальные исследования ПКМ с использованием разработанного метода представлены в разделе 3.4.

**2.4. Стойкость к удару.** Как было показано ранее, решающим фактором при выборе ПКМ для РЛВ является ударостойкость, характеризующаяся такими косвенными характеристиками, как соотношения прочности при сжатии после удара (САІ) с прочностью при растяжении (ОНТ) /сжатии (ОНС) образцов с отверстием.

Метод определения прочности САІ регламентирован стандартом ASTM D7137 и заключается в сжатии пластины из ПКМ с укладкой  $[+45/0/-45/90]_{ns}$  с предварительно нанесенным ударным повреждением. Удар наносят при помощи башенного копра с фиксированной энергией. Данная характеристика непосредственно не используется в прочностных расчетах. Однако зарубежный опыт показывает, что характеристика прочности ПКМ с повреждением является одной из важнейших для оценки допустимых в эксплуатации значений напряжений и работоспособности будущей детали в целом. Диссертантом предложено расширить диапазон энергий удара при проведении данных испытаний. Полученная при этом зависимость остаточной прочности ПКМ от энергии удара и размера расслоения позволяет оценить допустимые повреждения РЛВ из ПКМ (раздел 3.3).

**Третья глава** содержит результаты экспериментальных исследований характеристик упругости, статической прочности (в том числе с учетом повреждений) и трещиностойкости вновь созданных ПКМ для опытных РЛВ двигателей ПС-12, ПД-14, биротативного вентилятора, модельных вентиляторов. Экспериментальные исследования проводились как для отработки предложенных диссертантом методов испытаний, так и в обеспечение выбора материала для РЛВ.

**3.1 Углепластики для РЛВ.** В рамках данной работы исследовались материалы как на зарубежной, так и на отечественной компонентной базе. Все рассматриваемые ПКМ имеют в своей внутренней структуре дополнительные слои нетканого материала низкой плотности («вуали» из термопластичного материала), обеспечивающие высокую «вязкость разрушения», что делает их наиболее перспективными для РЛВ.

Исследуемые углепластики (табл. 1) были разработаны компанией ЗАО «Инумит» с учётом технических требований, сформулированных при непосредственном участии диссертанта.

Таблица 1 - Исследуемые углепластики для РЛВ

Обозначение	Тип наполнителя	Марка наполнителя	Схема армирования	Связующее
ПКМ №1	Однонаправленная лента	IMS65	[0/+45/0/-45]	Т26
ПКМ №2		ТС35		
ПКМ №3		ТС35	[0] <sub>n</sub>	Т60
ПКМ №7		*	[0/+45/0/-45]	*
ПКМ №4	Ткань с редким утком	УТО-1000-280	[0] <sub>n</sub>	Т26
ПКМ №5		(волокна IMS65, редкий уток - 12,2%)	[0/+45/0/-45]	
ПКМ №6			[0/+60/0/-60]	

\*Отечественный препрег авиационного назначения

В данной главе представлены результаты отработки усовершенствованных и вновь разработанных автором диссертации методов на примере исследований ПКМ №7, а также проведен анализ соответствия механических характеристик рассматриваемых материалов требованиям к материалу РЛВ.

**3.2 Межслоевой сдвиг.** Испытания рассматриваемых для применения в РЛВ ПКМ материалов на межслоевой сдвиг проводились с помощью предложенного в диссертации метода ЧНИ с использованием метода DIC для измерения деформаций, подробно описанного в главе 2. По результатам испытаний определены значения предела прочности и модуля межслоевого сдвига всех рассматриваемых ПКМ. На рис. 4 результаты испытаний представлены в нормализованных относительно прочности межслоевого сдвига ПКМ №7 значениях.

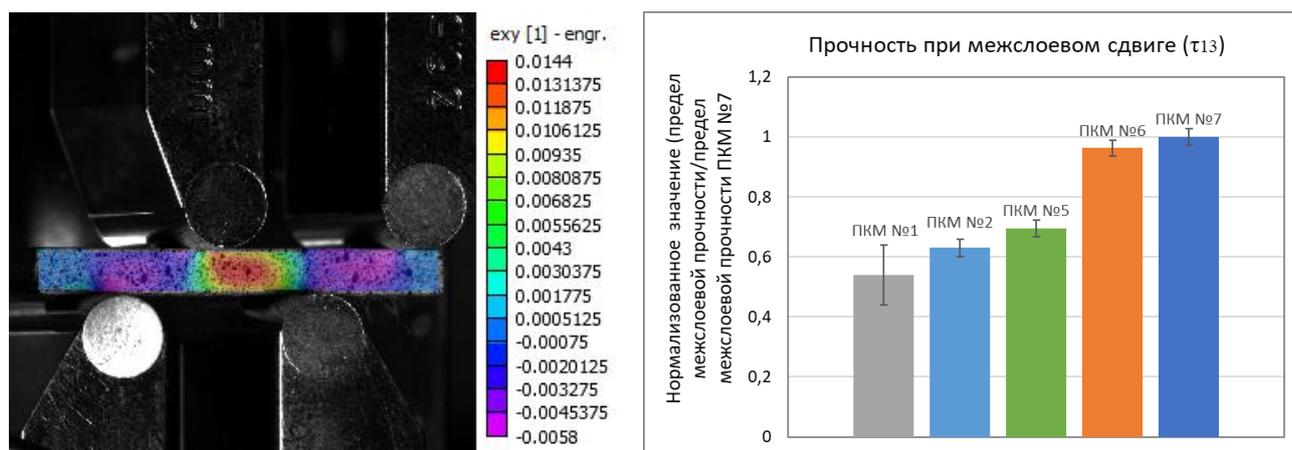


Рисунок 4. Результаты определения прочности при межслоевом сдвиге методом ЧНИ

По результатам проведенных испытаний выявлено 2 материала, обладающих наилучшими механическими характеристиками при межслоевом сдвиге (материалы №№ 6, 7). Значения межслоевой прочности в плоскости «13» с учетом среднеквадратичного отклонения можно принять равными, в плоскости

«23» более высокие характеристики имеет ПКМ №7. В то же время ПКМ №6 имеет более высокие значения модулей межслоевого сдвига.

Как показали результаты проведенных экспериментальных исследований ряда различных ПКМ при сдвиге (межслоевом и в плоскости слоя) и растяжении в плоскости армирования (рис. 5), выбрать очевидно лучший по значениям рассмотренных механических характеристик материал для той или иной конструкции РЛВ не представляется возможным. Аналогичная ситуация наблюдалась в представленных в главе 1 результатах исследований компании GE при отборе материалов для РЛВ двигателя GE90.

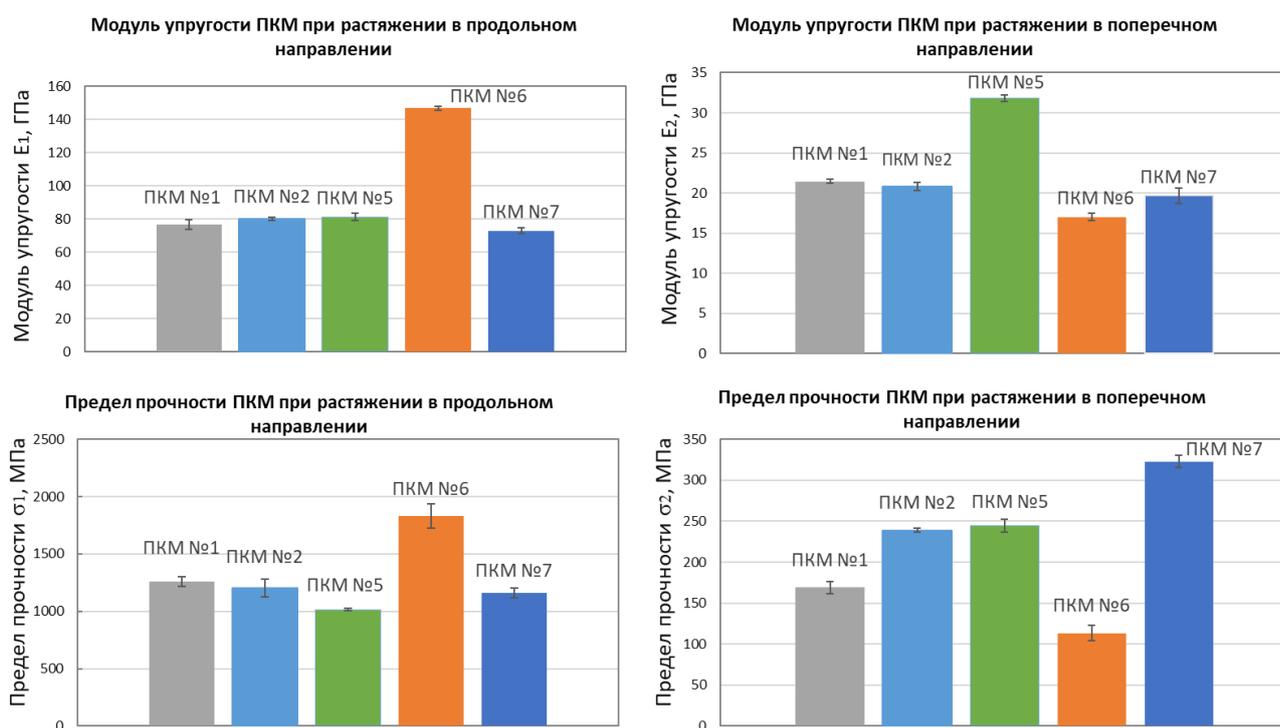


Рисунок 5. Результаты испытаний ПКМ для РЛВ на растяжение

Однако можно заключить, что по «базовому» перечню упруго-прочностных характеристик наиболее конкурентоспособной для РЛВ является группа материалов ПКМ №№4-6, а также материал на основе отечественного препрега - ПКМ №7. Определенный в предыдущих разделах комплекс упруго-прочностных характеристик ПКМ является необходимым (базовым) для расчетного проектирования РЛ, но недостаточным. На следующем этапе разработки материала для РЛ должны быть определены характеристики ударостойкости и трещиностойкости, а также характер изменения прочностных свойств вследствие ударного повреждения.

**3.3 Стойкость к повреждениям.** В настоящее время при оценке стойкости ПКМ к ударным повреждениям базовой является характеристика прочности при сжатии после удара (CAI), определение которой регламентировано стандартом ASTM D7137. Так как стандартом строго регламентирована схема армирования

[+45/0/-45/90]<sub>ns</sub>, а рассматриваемые материалы имеют отличную от указанной схему армирования, то для объективного сравнения стойкости к повреждениям ПКМ для РЛВ на сжатие после удара были испытаны образцы ПКМ №№ 1, 3, 4, 7, но имеющие схему армирования [+45/0/-45/90]<sub>ns</sub>. По результатам данных испытаний выявлен абсолютный лидер – ПКМ №7, значение остаточной прочности САІ которого на 24% выше, чем у ближайшего конкурента - материала на компонентах ПКМ №4-6 (рис. 6).

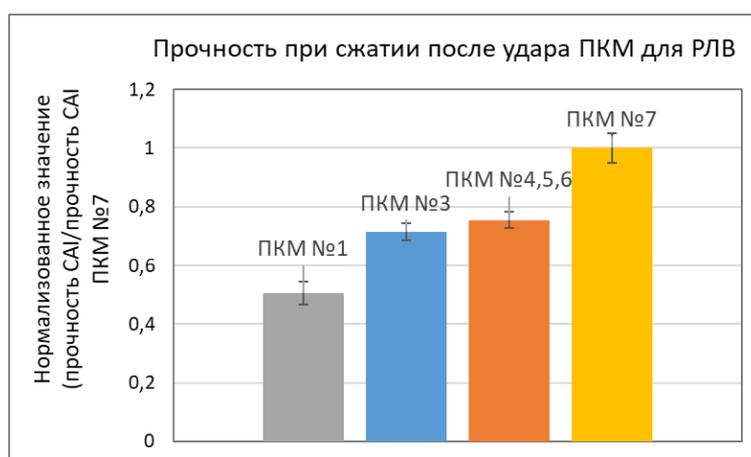


Рисунок 6. Сравнение значений САІ для ПКМ – кандидатов на роль материала РЛВ

В обеспечение развития данной методики для ПКМ №7 с «лопаточной» схемой армирования проведены исследования прочности при сжатии в более широком диапазоне энергий воздействия. Отличие от стандартизированной методики заключается не только в значениях энергий и схеме армирования образцов, но и в способе нанесения повреждений. Автором диссертации предложен альтернативный удару падающим грузом метод нанесения повреждений – метод квазистатического продавливания полусферическим индентором. Главной особенностью и преимуществом метода продавливания является возможность нанесения повреждения заданной категории, согласующейся с классификацией повреждений в руководстве FAA (циркуляр AC 25.107B), которое регламентирует механизм назначения допустимых нагрузок для деталей из ПКМ, исходя из несущей способности с учетом различных категорий повреждений (различных уровней урона, определяемых визуально). Научной новизной в этом разделе диссертации является формулировка концепции, которая впервые позволяет использовать классификацию ударных повреждений, традиционно ранжируемых FAA по визуальным признакам (BVID, VID), для сопоставления с категориями аналогичных повреждений, наносимых методом квазистатического продавливания на плоские образцы. В последнем случае критерием тяжести полученных повреждений является характер отклика образца на действие внешней нагрузки. Таким способом требования FAA, касающиеся допустимых уровней действующих нагрузок для поврежденной конструкции, в

целом переводятся автором в область требований к остаточной прочности материала с повреждениями.

В рамках данной части работы для ПКМ №7 получены значения остаточной прочности при сжатии с различными категориями повреждений (категории 1-4). На рис. 7 приведены полученные значения остаточной прочности при сжатии образцов ПКМ №7 в зависимости от категории повреждений совместно с предварительно полученной кривой полного продавливания образца полусферическим индентором.

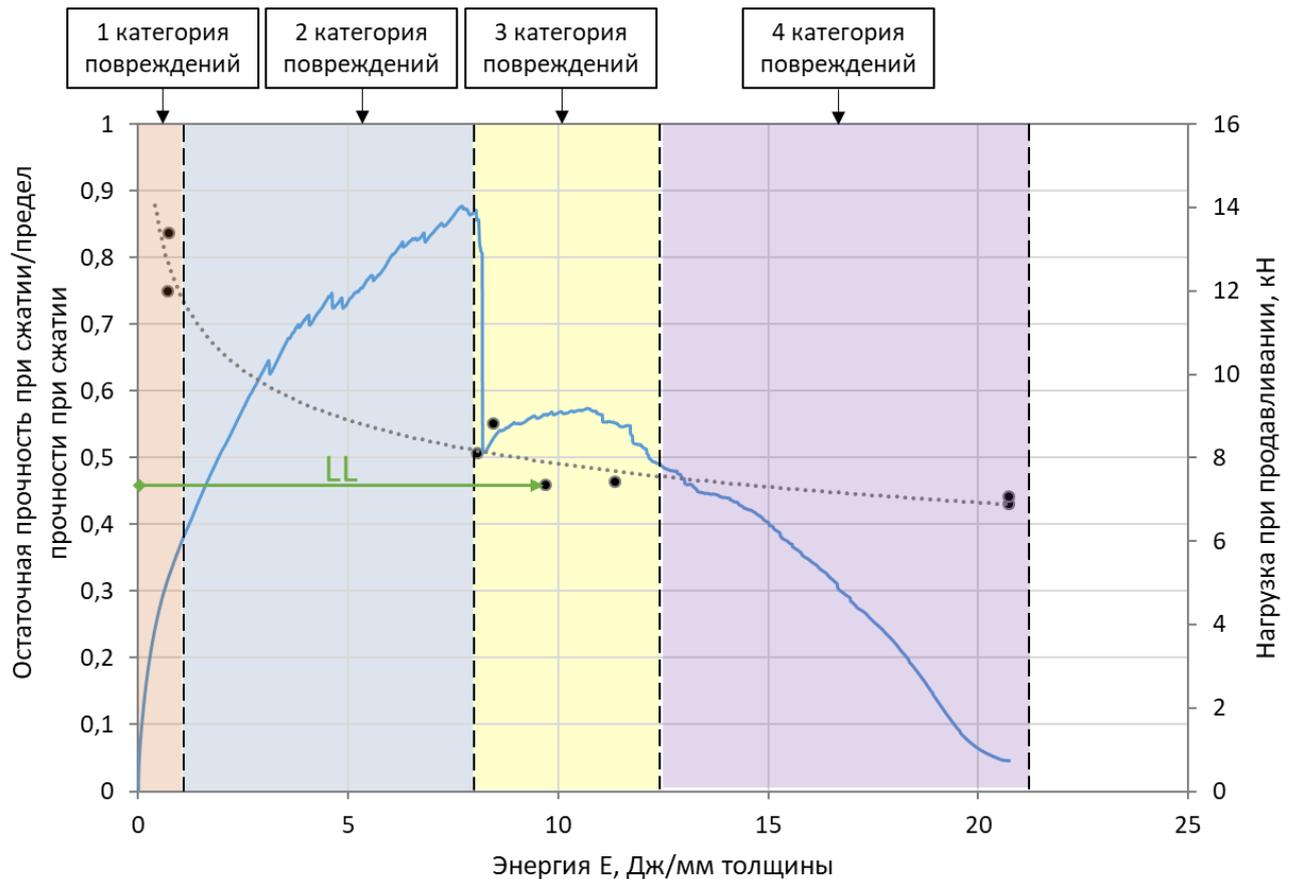


Рисунок 7. Остаточная прочность при сжатии ПКМ №7 в зависимости от категории повреждений

На основе требований FAA и результатов проведенных экспериментальных исследований установлен допустимый уровень эксплуатационной нагрузки/напряжения при сжатии ( $\sigma_{LL}$ ) для РЛВ из ПКМ №7. Согласно FAA деталь с наличием повреждения 3-й категории должна оставаться работоспособной, т.е. выдерживать предельную эксплуатационную нагрузку (Limit Load,  $\sigma_{LL}$ ). Деталь с повреждениями первой категории должна иметь запас прочности  $n_{1k}=1,5$  относительно предельно допустимого в эксплуатации уровня нагрузки ( $\sigma_{UL}=1,5 \sigma_{LL}$ ), для второй категории –  $n_{2k}=1,2$ , для третьей категории –  $n_{3k}=1$ , для 4-й –  $n_{4k}=0,7$ . Таким образом, допустимое сжимающее напряжение в детали из выбранного материала ПКМ №7 с учётом требований FAA по работоспособности изделия при наличии в нём повреждений:

$$\sigma_{LL} = \sigma_{ik} / n_{ik}, \text{ где} \quad (1)$$

$\sigma_{ik}$  - значение остаточной прочности при сжатии ПКМ с  $i$ -й категорией повреждений;

$n_{ik}$  - значения необходимого запаса прочности по FAA, соответствующее  $i$ -й категории повреждения.

В экспериментах для ПКМ №7 в диссертации были получены значения остаточной прочности при сжатии с различными категориями повреждений (табл. 2), а также с использованием соотношения (1) получены значения допустимого уровня напряжений.

Таблица 2 - Оценка допустимых напряжений при сжатии ПКМ №7 с учетом повреждений

Категория повреждения	Прочность при сжатии с повреждением $\sigma_{ik}$	Запас (FAA) $n_{ik}$	Допустимое напряжение при сжатии $\sigma_{LL}$
1	$0,79\sigma_b^*$	1,5	$0,53\sigma_b$
2	$0,53\sigma_b^*$	1,2	$0,44\sigma_b$
3	$0,46\sigma_b^*$	1,0	$0,46\sigma_b$
4	$0,44\sigma_b^*$	0,7	$0,62\sigma_b$

*\* $\sigma_b$  - предел прочности ПКМ при сжатии без повреждения*

Выбирая по наименьшему значению для удовлетворения всем критериям, искомый уровень допустимого сжимающего напряжения в детали при предельной эксплуатационной нагрузке не должен превышать  $\sigma_{LL} = 0,44\sigma_b$ .

Следует отметить, что представленная оценка допустимых напряжений получена на основе коэффициентов запаса FAA ( $n_{ik}$ ), применяемых для деталей воздушного судна и в рамках диссертации представлена для демонстрации способа применения разработанных методик. К РЛВ из ПКМ предъявляются более жесткие требования по запасам прочности.

Диссертантом предложено применять данный подход к нанесению повреждений для определения допустимых напряжений не только при сжатии, но и при растяжении и сдвиге.

**3.4 Трещиностойкость.** Для экспериментальной отработки методов определения характеристик трещиностойкости, определения параметров одного из наиболее сложных критериев роста трещины («Benzeggah and Kenane criterion»), а также выявления наиболее трещиностойкого материала проведены испытания углепластиков, обладающих наибольшей ударостойкостью: ПКМ №4 и ПКМ №7. Испытания на трещиностойкость при смещении трещины по типу I ( $G_{IC}$ ) проведены по методике, описанной в главе 2. Для реализации данных испытаний использовался разработанный автором диссертации способ соединения образца с нагружающими блоками – через паз типа «ласточкин хвост». Определение

характеристик трещиностойкости при смещении трещины по типу II ( $G_{IIc}$ ) и смешанному типу ( $G_{I+II}$ ) осуществлялось стандартизированными методами, регламентированными ASTM D7905 и ASTM D6671. Определение трещиностойкости при смещении трещины по типу III ( $G_{IIIc}$ ) впервые осуществлялось методом кручения пластины с трещиной. На основе испытания рассматриваемых материалов определены параметры «В-К» критерия разрушения («Benzeggah and Kenane criterion»):

$$\frac{G_c}{G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II}}{G_T}\right)^\eta} = 1, \text{ где} \quad (2)$$

$G_c$  - общая критическая скорость высвобождения упругой энергии деформации;  
 $G_{II}$  - действующая скорость высвобождения упругой энергии деформации (тип II);

$G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  - критические значения скоростей высвобождения упругой энергии деформации для ПКМ (определяются экспериментально);

$G_T$  - суммарная действующая скорость высвобождения упругой энергии деформации ( $G_I + G_{II}$ );

$\eta$  - коэффициент, определяемый экспериментально (как показатель степени зависимости  $G_c$  ( $G_{II}/G_T$ )).

Экспериментально полученные параметры «В-К критерия» разрушения (характеристики трещиностойкости) 2-х рассматриваемых ПКМ в нормализованных относительно трещиностойкости  $G_{IIc}$  ПКМ №7 значениях приведены на рис. 8.

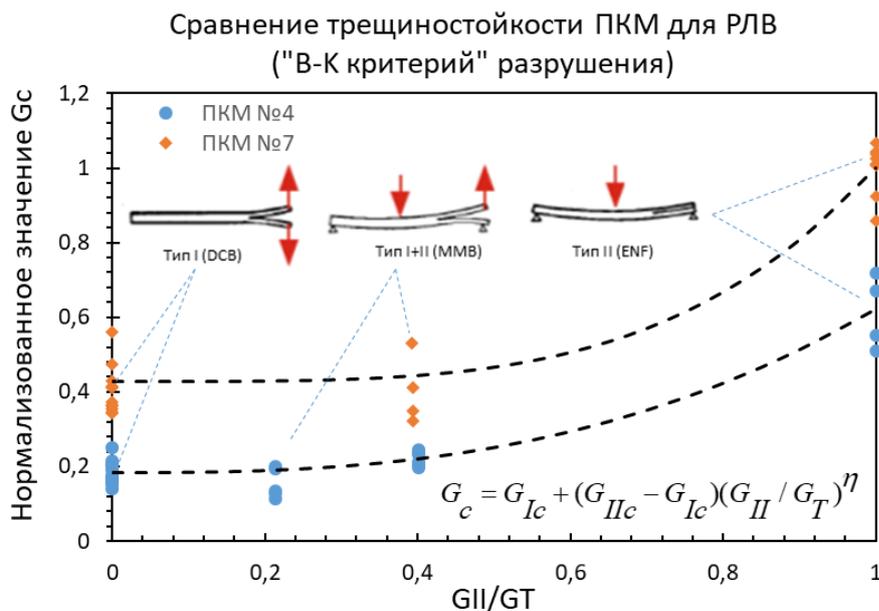


Рисунок 8. Сравнение интегральных характеристик трещиностойкости ПКМ №4 и ПКМ №7

В результате проведенных экспериментальных исследований для 2-х материалов определены параметры «В-К критерия» разрушения:  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$ ,  $\eta$ .

По результатам испытаний выявлено, что трещиностойкость ПКМ №7 превосходит ПКМ №4: по характеристике  $G_{IC}$  в среднем на 53%, по  $G_{IIC}$  – на 38%, по показателю степени  $\eta$  - на 30%.

Преимущество ПКМ №7 относительно ПКМ №4 также выявлено и по характеристике трещиностойкости при смещении трещины по типу III ( $G_{IIIC}$ ). Для ПКМ №7 значение  $G_{IIIC}$  на 39 % выше, чем в случае ПКМ №4.

**3.5 Растяжение в направлении, перпендикулярном плоскости армирования.** Отработка предлагаемого в диссертации метода определения механических характеристик ПКМ в направлении, перпендикулярном плоскости армирования, проводилась на образцах материала ПКМ №7. Испытания проводились согласно методике, описанной в главе 2. Для испытаний использовались образцы разработанной диссертантом геометрии с квадратным поперечным сечением 15x15 мм и высотой  $h=20$  мм двух видов: образцы с постоянным поперечным сечением для определения упругих характеристик и образцы с уменьшенной радиусом рабочей зоны для определения характеристики прочности. Соединение образцов с нагружающими блоками осуществлялось предложенным диссертантом способом, с использованием дополнительных накладок (рис. 9).



Рисунок 9. Соединение образца с нагружающими блоками

По результатам испытаний образцов ПКМ №7 с прямой рабочей зоной впервые определены значения коэффициентов Пуассона ( $\nu_{31}$ ,  $\nu_{32}$ ), а также модуля упругости ( $E_3$ ). По результатам испытаний образцов с уменьшенной радиусом рабочей зоной определен предел прочности при растяжении в данном направлении ( $\sigma_3$ ). Для подтверждения работоспособности разработанного способа крепления образца, а также достоверности получаемых данных, Лупповым А.А. создана КЭ модель образца из ПКМ №7 с уменьшенной радиусом рабочей зоной и определено напряженно-деформированное состояние (НДС) при растяжении. На рис. 10 слева представлены результаты расчетного определения распределения растягивающих деформаций ( $\varepsilon_{33}$ ), справа – полученное экспериментально методом DIC. Различия расчета и эксперимента по максимальным растягивающим деформациям при одном и том же уровне нагрузки составили 1,4%.

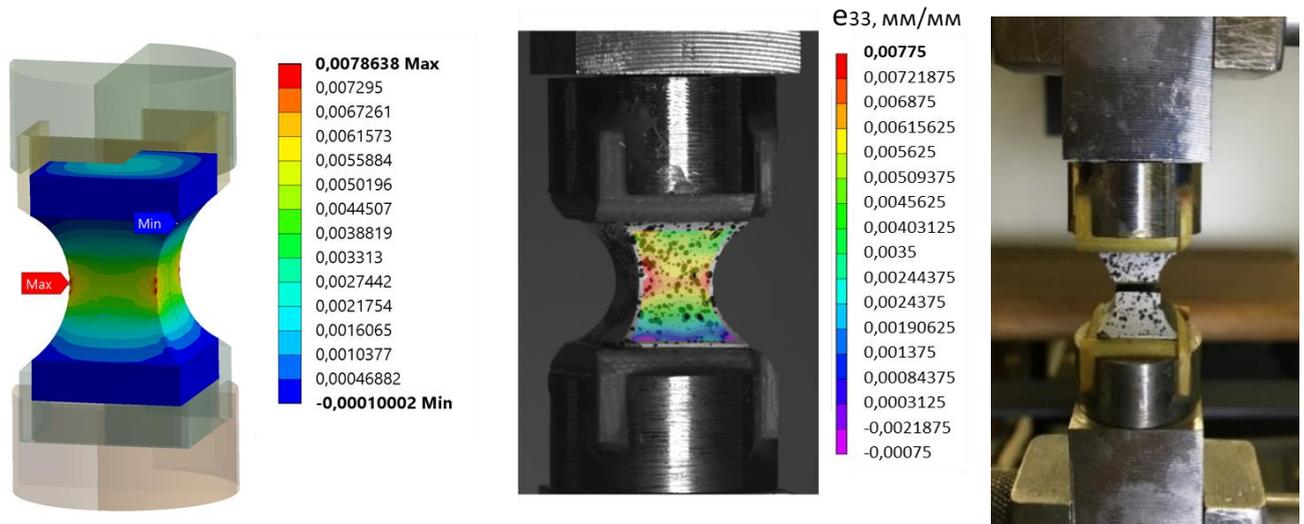


Рисунок 10. Распределение продольных растягивающих деформаций при нагрузке  $P=3$  кН: слева – расчет МКЭ, справа – эксперимент

Близость расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует о верности используемых в конечно-элементной модели значений упругих характеристик, полученных на предыдущем этапе растяжением образца с прямой рабочей зоной по аналогичной схеме, а также работоспособности модели в целом с учетом предложенной в диссертации схемы крепления образца с нагружающим блоком при помощи накладок.

В рамках данной методики предположено определять предельное напряжение как произведение модуля упругости и деформации в области концентрации:

$$\sigma_{33} = \varepsilon_{33max} \cdot E_{33} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{33max}$  – максимальные (предельные) растягивающие деформации в зоне концентрации при разрушении, мм/мм;  $E_{33}$  – модуль упругости при растяжении в направлении, перпендикулярном плоскости армирования, МПа.

Применение данного соотношения обеспечивает удовлетворительное соответствие расчетного и экспериментального значений предела прочности (различия расчета и эксперимента 1,40%)

**Четвертая глава** посвящена разработке предложения по системе специальной квалификации ПКМ для РЛВ. Специальная квалификация включает:

- испытания образцов ПКМ, вырезанных непосредственно из РЛ;
- испытания образцов хвостовика, вырезанных из РЛ;
- разработку конструкции, методов испытаний и экспериментальные исследования конструктивно-подобных элементов (КПЭ - «двухзамковых» образцов).

Оценка реализации механических свойств в изделии необходима для проведения уточняющих расчетов РЛВ на стадии прочностной доводки.

Экспериментальные исследования реализации проектируемых механических характеристик ПКМ в РЛ вентилятора показаны на примере модели РЛВ двигателя размерности ПС-12. Особое внимание уделено испытаниям КПЭ, имитирующих конструкцию «хвостовика» лопатки, так как узел крепления РЛ является максимально нагруженным при действии центробежных нагрузок, а требования норм летной годности по запасу прочности данного узла  $n > 2$  (EASA CS-E 810). Представлены результаты экспериментальных исследований прочности КПЭ хвостовика для модели углепластиковой РЛВ двигателя размерности ПД-14.

**4.1 Образцы, вырезанные из полноразмерной РЛ.** Важной составной частью доводки РЛ до необходимого уровня технологической готовности является определение реализованных в РЛ характеристик жесткости и прочности. В связи с этим в программу специальной квалификации ПКМ для РЛ включены экспериментальные исследования механических характеристик образцов, вырезанных из РЛ.

**4.1.1. Реализация свойств ПКМ в профильной части РЛ.** Впервые исследован комплекс упруго-прочностных характеристик ПКМ, путем испытаний образцов-свидетелей соответствующего вида, вырезанных из модели РЛВ двигателя размерности ПС-12 (рис. 11). Номенклатура вырезанных образцов-свидетелей включала образцы для определения механических характеристик при растяжении в двух направлениях, сдвиге в плоскости слоя и межслоевом сдвиге. Зона и направление вырезки образцов того или иного типа выбирались в соответствии с результатами анализа напряженно-деформированного состояния РЛВ в условиях эксплуатации.

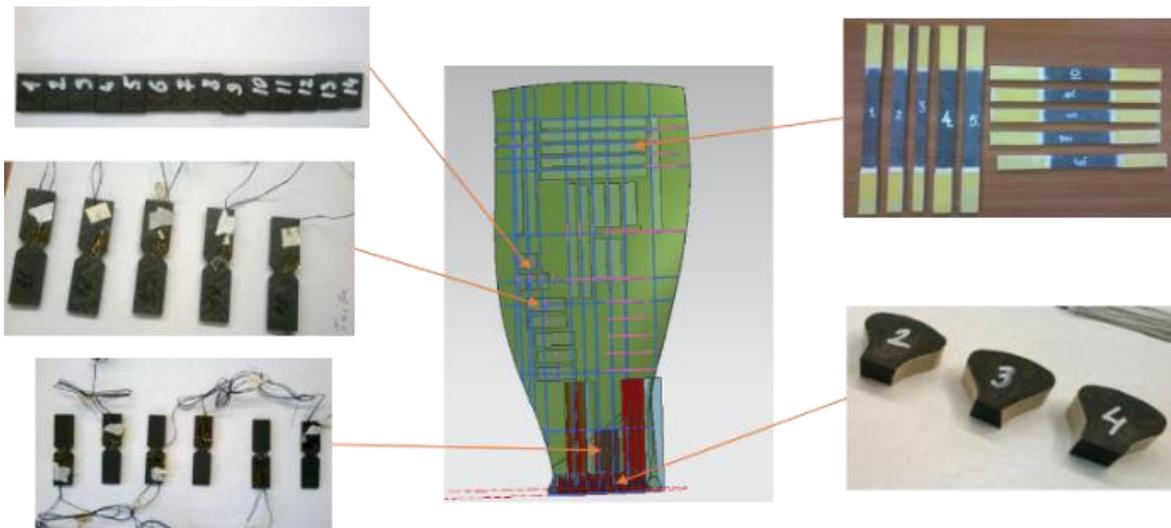


Рисунок 11. Схема вырезки образцов-свидетелей из РЛВ двигателя размерности ПС-12

По результатам экспериментальных работ проведен сравнительный анализ результатов испытаний образцов, вырезанных из РЛ, с результатами испытаний

плоских образцов, имеющих «лопаточные» структуру и схему армирования (табл. 3).

Таблица 3. Результаты сравнительных испытаний плоских образцов ПКМ и образцов, вырезанных из РЛ

Характеристика	Плоские образцы (УТ-900(И)-Т-800/Т-26), схема армирования [0; +60; 0; -60] <sub>ns</sub>	Образцы, вырезанные из лопатки (УТ-900(И)-Т-800/Т-26)
Предел прочности при растяжении $\sigma_{11}$ , МПа	980,70	659,75
Модуль упругости $E_{11}$ , ГПа	90,58	79,74
Модуль упругости $E_{22}$ , ГПа	43,18	36,80
Предел прочности при межслоевом сдвиге $\tau_{13}$ , МПа	61,68	58,72
Модуль межслоевого сдвига $G_{13}$ , ГПа	4,12	3,69
Предел прочности при сдвиге в плоскости слоя $\tau_{12}$ , МПа	84,92	121,10
Модуль сдвига в плоскости слоя $G_{12}$ , ГПа	18,45	17,00

Сравнительный анализ прочностных характеристик образцов, вырезанных из плоской пластины и из РЛ, выполненных из идентичных материалов и по одинаковой технологии, выявил, что «лопаточные» образцы (образцы-свидетели) при испытаниях показывают заниженные значения характеристик прочности и упругости. Реализованная в РЛВ прочность при растяжении  $\sigma_{11}$  существенно ниже (более, чем на 30%) прочности материала в исходном состоянии. Полученный результат подтверждает целесообразность проведения таких испытаний при специальной квалификации ПКМ РЛВ для уточнения параметров прочностного проектирования и оценки качества изделия.

**4.1.2 Испытания вырезанных из хвостовика РЛ образцов.** Отдельного внимания заслуживают образцы, вырезанные из наиболее нагруженной в эксплуатации части РЛВ - хвостовика. В диссертации разработан относительно простой в реализации метод определения несущей способности образцов из хвостовика РЛ, который может быть реализован двумя способами: путем приложения растягивающих или сжимающих усилий (рис. 12). В обоих случаях оценивается несущая способность элемента хвостовика РЛ по сдвиговым напряжениям. Отличия заключаются в размерах образцов (в обоих случаях геометрия хвостовика РЛ сохраняется), их подготовке и испытательной оснастке.

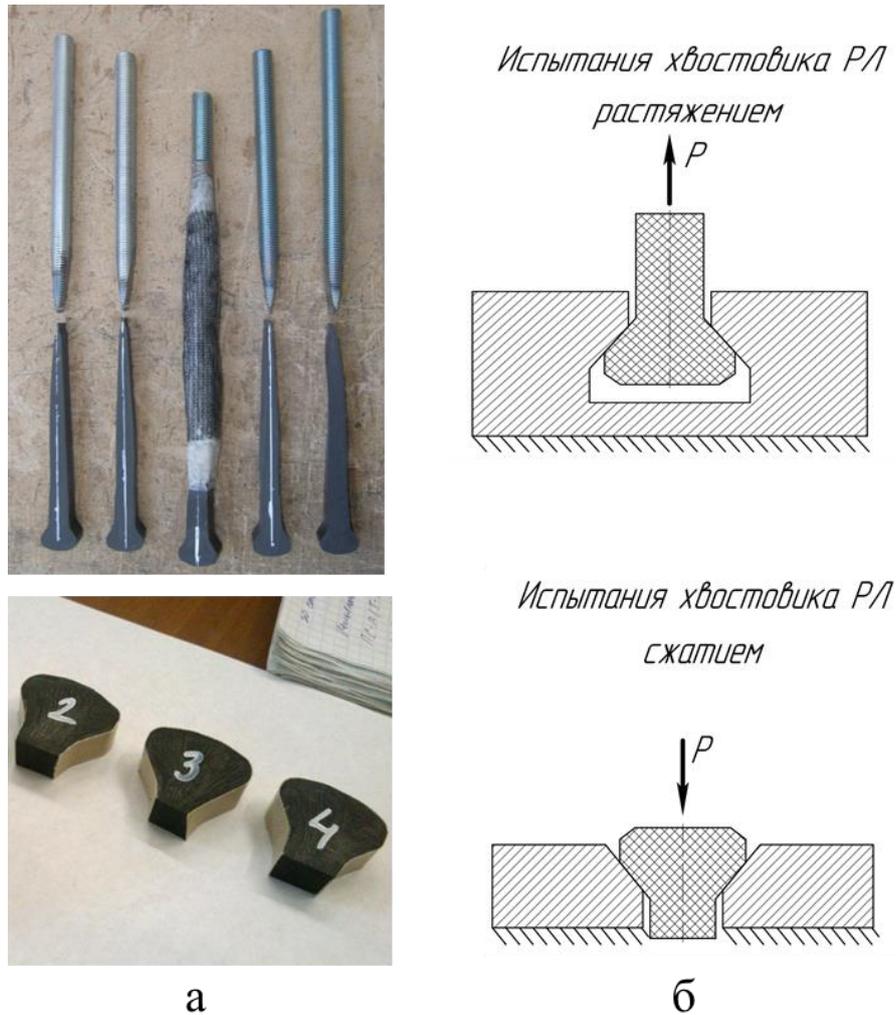


Рисунок 12. Вид (а) и схемы нагружения (б) образцов хвостовика РЛ растяжением и сжатием

С точки зрения схемы нагружения оба метода идентичны, однако к реальным условиям эксплуатации более приближен метод испытаний хвостовика на растяжение. Закрепление нижней части образца (хвостовика) осуществляется в оснастке, имеющей паз, повторяющий паз диска, верхняя часть образца для испытаний на растяжение закрепляется через резьбовое соединение.

Испытания хвостовика на несущую способность при приложении сжимающего усилия проводятся при помощи оснастки, которая представляет собой замкнутый металлический контур с расположенными внутри контактными опорными поверхностями, установленными под углом, соответствующим углу хвостовика лопатки. Сжимающее усилие прикладывалось непосредственно к образцам по плоскости подошвы хвостовиков. Испытания позволяют оценить предел прочности при межслоевом сдвиге, реализуемый в реальной РЛВ, а также исследовать характер разрушения. Методика использована для образцов, вырезанных из опытных РЛ двигателя размерности ПС-12 различных поколений (изготовленных из различных ПКМ), а также РЛВ модельного вентилятора. Результаты сравнительных испытаний на сжатие (средние значения предельных

напряжений по 5-ти образцам) вырезанных из РЛ хвостовиков представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты оценки несущей способности элементов хвостовиков опытных моделей РЛВ двух поколений

Материал лопатки	Напряжение предела проп-ти кривой деформирования, МПа	Напряжение сдвига при разрушении, МПа
УП-610, УТ-900 (РЛ ПС-12-2012)	37,87	69,36
Т-26, УТ-900И (РЛ ПС-12-2013)	57,00	87,60

В данном случае удалось оценить различия в прочности хвостовиков двух РЛВ из различных ПКМ. Полученные результаты разработанных простых в реализации испытаний являются технически значимыми как в качестве сравнительных для выбора материала, так и с точки зрения обеспечения эксплуатационной надежности хвостовика РЛ.

**4.2 КПЭ хвостовика РЛ.** Задача экспериментального определения НДС, прочности и характера разрушения хвостовика РЛВ может быть упрощена. Применительно к модели РЛВ двигателя размерности ПД-14 спроектирован КПЭ хвостовика РЛ, представляющий собой «двухзамковый» образец. Геометрия и внутренняя структура замковой части КПЭ повторяет геометрию хвостовика и структуру армирования хвостовика реальной РЛВ (рис. 13). При этом для изготовления таких образцов (КПЭ) требуются гораздо меньшие материальные и временные затраты, чем для изготовления полноразмерной РЛВ.

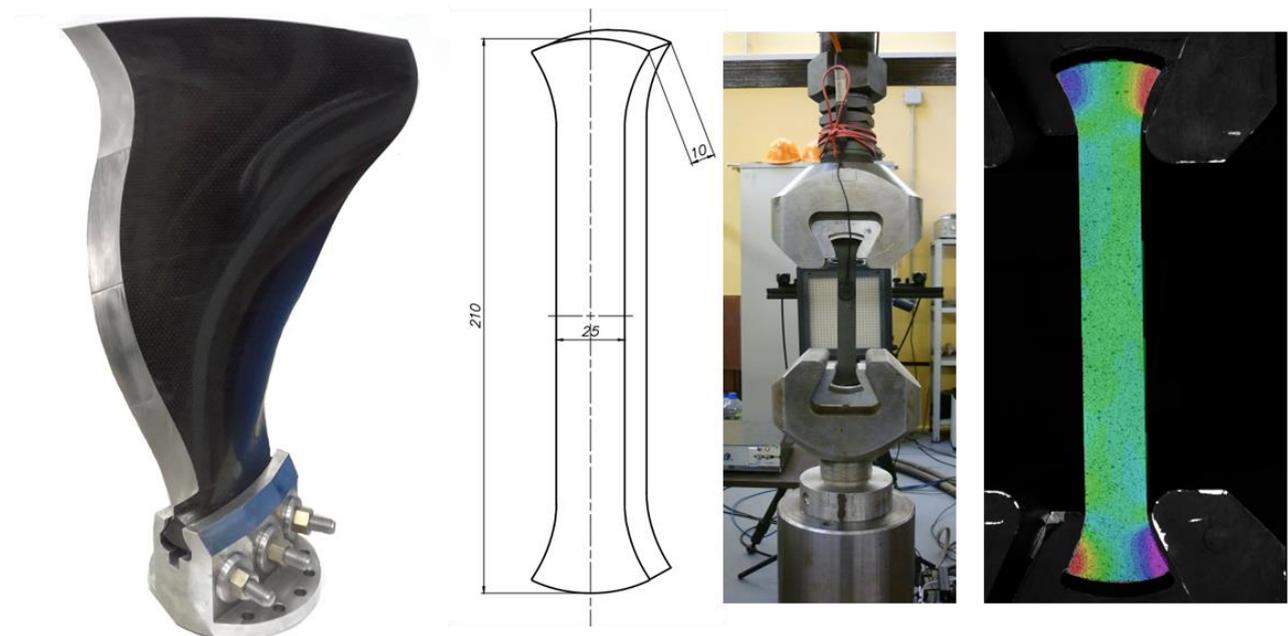


Рисунок 13. Вид модели углепластиковой РЛВ двигателя размерности ПД-14 и КПЭ хвостовика («двухзамкового» образца), распределение деформаций межслоевого сдвига при растяжении «двухзамкового» образца

Применение «двухзамкового» образца позволяет на стадии проектирования РЛВ оценить несущую способность и характер разрушения хвостовика РЛ при действии кратковременных, циклических и длительных растягивающих нагрузок, имитирующих центробежные. Для отработки данной методики проведены испытания КПЭ хвостовика опытной РЛ вентилятора двигателя размерности ПД-14 на кратковременную прочность. Определены нагрузки, соответствующие потере несущей способности. При помощи оптической системы измерения (Vic-3D) определены поля распределения продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, что позволило оценить НДС хвостовика. По результатам анализа экспериментальных данных определены этапы разрушения КПЭ хвостовика. С использованием полученных значений нагрузок, соответствующих этапам разрушения, а также результатов расчета эксплуатационных нагрузок на элемент хвостовика при действии центробежных сил оценены запасы по статической прочности хвостовика РЛ (запас по несущей способности  $n_{nc}=2,5$ ).

Разработанные методики испытаний (испытания образцов-свидетелей, образцов хвостовика и КПЭ хвостовика) позволяют оценить реализацию механических характеристик ПКМ в изделии, а также значения запасов прочности хвостовика РЛВ. Данные методики должны быть использованы как при проектировании РЛ, так и при проведении специальной квалификации материала РЛ.

### **Основные результаты и выводы**

1. На основе обобщения опыта экспериментальных исследований ПКМ для РЛВ установлен перечень «базовых» характеристик статической прочности и трещиностойкости ПКМ, методов определения этих характеристик, необходимых для проектирования ПКМ для РЛВ и прочностного проектирования РЛВ, что является решением актуальной задачи.
2. На основе анализа опыта компании GE определена номенклатура важных механических характеристик ПКМ для РЛВ. Показано, что, наряду с «базовыми» характеристиками жесткости и прочности, важнейшее значение имеют характеристики трещиностойкости и прочности с учетом ударного повреждения.
3. Выявлены проблемы определения механических характеристик ПКМ для РЛВ при использовании стандартизированных методов.
4. Доработан метод определения характеристик прочности ПКМ при растяжении в трансверсальном направлении. Изменена (по сравнению с рекомендацией стандарта) геометрия образца в обеспечение возможности определения коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$ ,  $\nu_{32}$ , разработан способ соединения образца с нагружающими блоками через дополнительные накладки. Эффективность метода показана как экспериментально, так и расчетно.

5. Для определения свойств ПКМ при межслоевом сдвиге на образцах, вырезанных из РЛВ, разработан альтернативный метод определения межслоевых характеристик с применением метода DIC – ЧНИ, который в отличие от существующих методов, позволяет определять характеристики межслоевого сдвига на образцах малой толщины и образцах-свидетелях, вырезанных из РЛВ. Возможность применения метода подтверждена сравнением с результатами испытаний по ASTM D5379.
6. Решены проблемы, возникающие при испытаниях ПКМ на трещиностойкость по типу I, связанные с недостаточной прочностью клеевого соединения нагружающих элементов с образцом. Разработаны альтернативные способ крепления и конструкция элементов оснастки, получен патент RU168913. Данным методом определены характеристики трещиностойкости 2-х ПКМ – основных кандидатов на роль материала РЛВ.
7. Для отработки существующих и вновь разработанных методов испытаний проведен комплекс экспериментальных исследований 7-ми ПКМ – потенциальных претендентов на роль материала РЛВ. По результатам анализа полученных результатов (базовый перечень упруго-прочностных характеристик) определены два ПКМ (№№4, 7), наиболее подходящие для создания РЛВ ГТД.
8. В развитие методов оценки ударостойкости предложена расширенная методика определения прочности при сжатии образцов с повреждениями. Предложена классификация повреждений (4 категории), которая соотносится с классификацией повреждений, ранжируемой FAA. Разработана методика нанесения повреждений заданной категории на образцы ПКМ методом квазистатического продавливания. Для 2-х наиболее подходящих для РЛВ материалов (ПКМ №№4,7) получены зависимости прочности от категории повреждения. Выявлен наиболее ударостойкий материал – ПКМ №7. На основе полученных зависимостей и требований FAA оценены допустимые уровни напряжений при сжатии в РЛВ при применении ПКМ №7.
9. С помощью разработанных в диссертации методов проведена экспериментальная оценка реализации механических характеристик ПКМ в РЛ, включающая испытания образцов и элементов хвостовика, вырезанных из лопатки, а также КПЭ хвостовика. Показана важность использования предложенного подхода для прочностного проектирования РЛ. Сравнительный анализ прочностных характеристик образцов из плоской пластины и из лопатки выявил, что «лопаточные» образцы имеют более низкие значения прочностных характеристик. Показана практическая ценность испытаний образцов хвостовика как при проектировании ПКМ для РЛ, так и проектирования РЛ в целом.
10. Проведенные в рамках данной работы исследования показали многофакторность критериев выбора ПКМ для РЛ, что подтверждает

необходимость применения предложенного комплекса исследований при проектировании РЛВ.

**Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:**  
**Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1) Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Пальчиков Д.С. О формировании технических требований к полимерному материалу перспективной рабочей лопатки вентилятора ТРДД // Журнал «Двигатель». - №1 (97+244). – Москва. 2015. - С.2-8.

2) Каримбаев К.Д., Пальчиков Д.С. О критериях потери устойчивости сжатых стержней за пределами упругости при жестком нагружении // Вестник УГАТУ №3 (69) 2015. – С. 126-131.

3) Каримбаев Т.Д., Пальчиков Д.С. Методы неразрушающего контроля деталей авиадвигателей из композиционного материала. Выявление границ допустимости дефектов // Вестник СГАУ. - №5 (47). – Самара. 2014. – С.96-104.

**Публикации в научных журналах Scopus**

4) Palchikov D.S. – Methods for experimental research of CFRP with damages for fan blades // Journal of Physics: Conference Series 1990 (2021) 012028. 2021 г.

**Патенты:**

5) Патент РФ RU168913/ Метод крепления нагружающих элементов при испытаниях ПКМ на трещиностойкость / Пальчиков Д.С., Афанасьев Д.В. – опубл. 2017. – Бюл. №7. – 8 с.

6) Патент на изобретение RU2672035/ Способ испытания на трещиностойкость образцов полимерных композиционных материалов / Матюхин Д.В., Пальчиков Д.С., Сеницын А.В. – опубл. 2018. – Бюл. №31. – 20 с.

**Публикации статей в других изданиях:**

7) Каримбаев Т.Д., Мыктыбеков Б., Мезенцев М.А., Пальчиков Д.С. Исследования трещиностойкости армированных композиционных материалов по моде II с применением ENF-метода // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. - №9-2 (48), 2020. – С.113-117. DOI: 10.24411/2500-1000-2020-11039

8) Каримбаев Т.Д., Пальчиков Д.С., Афанасьев Д.В. Развитие новых методик определения характеристик прочности полимерных композиционных материалов для деталей авиационных двигателей // Прочность и надежность газотурбинных двигателей. Сборник научных трудов / Под редакцией Ножницкого Ю.А. М.: ЦИАМ. 2020, с. 218-222.

9) Пальчиков Д.С. Экспериментальное определение долговечности хвостовиков рабочих лопаток вентиляторов, изготовленных из полимерных композиционных материалов // Прочность и надежность газотурбинных двигателей. Сборник научных трудов / Под редакцией Ножницкого Ю.А. М.: ЦИАМ. 2020, с.223-225.

10) Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В., Пальчиков Д.С., Макаева Е.А., Николаева М.П. Развитие расчетных методов проектирования

широкохордных лопаток из полимерных композиционных материалов для вентиляторов авиационных двигателей // Прочность и надежность газотурбинных двигателей. Сборник научных трудов / Под редакцией Ножницкого Ю.А. М.: ЦИАМ. 2020, с. 191-195.