

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор по научной и
инновационной деятельности «Казанский
национальный исследовательский
технический университет
им. А.Н. Туполева» (КНИТУ КАИ)



Д.т.н., доцент

В.М. Бабушкин

_____ 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

На диссертационную работу Пальчикова Дениса Сергеевича на тему «Разработка методов и экспериментальное исследование конструкционной прочности углепластиков для рабочей лопатки вентилятора перспективного газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов в диссертационный совет 24.2.327.05, созданный на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Диссертация Пальчикова Дениса Сергеевича посвящена решению одной из сложных научно-технических проблем, связанной с созданием рабочей лопатки вентилятора (РЛВ) из полимерного композиционного материала (ПКМ), а именно разработке технологии экспериментального определения комплекса механических характеристик ПКМ для проектирования РЛВ газотурбинного двигателя (ГТД).

Актуальность темы диссертации. Для успешного создания турбореактивных двигателей с высокой степенью двухконтурности (ТРДД) 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.

Работы по РЛ из ПКМ в РФ возобновились после длительного перерыва в 2016 г. с началом разработки ТРДД ПД-35 (при этом создание РЛВ из ПКМ являлось одной из ключевых «критических» технологий создания 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 Пальчикова Д.С. посвящена формированию технологии экспериментальных исследований и получению характеристик статической прочности и трещиностойкости ПКМ в обеспечение создания РЛ перспективных вентиляторов ТРДД.

Целью работы Пальчикова Дениса Сергеевича является 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. Решаемые автором **задачи** включали: анализ подходов, используемых ведущими зарубежными двигателестроительными компаниями при выборе ПКМ для РЛВ; установление перечня характеристик статической прочности и трещиностойкости ПКМ, необходимых для проектирования, изготовления и прочностной доводки РЛ из ПКМ; анализ методов определения характеристик статической прочности и трещиностойкости ПКМ при создании РЛВ; отработку методов и средств экспериментального определения характеристик статической жесткости, прочности и трещиностойкости ПКМ для РЛВ; определение характеристик перспективных материалов, формирование базы экспериментальных данных для создания РЛВ; формирование номенклатуры и облика конструктивно-подобных элементов (КПЭ) РЛ из ПКМ и перечня прочностных задач,

решаемых при испытаниях КПЭ; сопоставление значений механических характеристик ПКМ, определенных при испытании стандартных образцов, с их значениями, реализованными в РЛ.

Научная новизна. Автором разработана комплексная технология экспериментальных исследований ПКМ в обеспечение создания РЛВ, позволяющая определить полный спектр механических характеристик статической прочности и трещиностойкости, необходимых для проектирования РЛВ. Усовершенствованы существующие и разработаны новые методы определения механических характеристик ПКМ, в том числе с применением метода корреляции цифровых изображений (DIC).

Сформирована 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. В работе получены результаты исследования упруго-прочностных характеристик 7-ми новых углепластиков, разработанных для РЛВ. Даны рекомендации по выбору ПКМ, наиболее удовлетворяющего требованиям прочности, предъявляемым к материалу для РЛВ.

Отработан 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). Разработаны методы сравнительных испытаний образцов-свидетелей хвостовика РЛВ на прочность при растяжении и сжатии (применение данных методов апробировано на образцах-свидетелях из полноразмерной РЛВ). Разработан метод исследования прочности хвостовика РЛ с использованием разработанной конструкции КПЭ («двухзамковый» образец).

Перечисленные и остальные результаты исследования свидетельствуют о новаторских решениях с доказательной базой в области экспериментальных исследований полимерных композиционных материалов в обеспечение создания РЛВ.

Теоретическая значимость работы состоит в разработанных автором комплексе методов испытаний и подходов, методических рекомендациях по подтверждению прочностной надежности РЛВ из ПКМ, а также разработанных при участии автора технических требований для ПКМ РЛВ.

Практическая значимость работы. Полученный автором в результате экспериментальных исследований комплекс механических 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.

Методы испытаний ПКМ, в том числе методы испытаний КПЭ из ПКМ, являются основой для формирования системы специальной квалификации ПКМ для РЛ вентиляторов. Разработанная система вырезки и испытаний образцов из полноразмерной РЛ рекомендована для использования при прочностной доводке и объективном сравнении различных технологий изготовления.

На базе разработанной технологии экспериментального определения комплекса статических механических характеристик ПКМ для РЛ формируются отраслевые методики проведения испытаний.

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.

Результаты исследования Пальчикова Дениса Сергеевича могут использоваться в процессе проектирования РЛВ из ПКМ для перспективных газотурбинных двигателей. Разработанные автором методы, а также результаты экспериментальных исследований могут представлять интерес для организаций, занимающихся разработкой авиационных газотурбинных двигателей и силовых установок на их основе.

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).

Публикации основных результатов диссертации. Основное содержание диссертации отражено в 23 публикациях: 3 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья опубликована в научном журнале, индексируемом базой

данных Scopus; 4 статьи опубликованы в других изданиях; 15 работ опубликованы в сборниках международных и всероссийских конференций, симпозиумов, форумов и т.д. Также Пальчиков Д.С. является автором двух патентов РФ, основанных на испытаниях ПКМ на трещиностойкость («Метод крепления нагружающих элементов при испытаниях ПКМ на трещиностойкость»; «Способ испытания на трещиностойкость образцов ПКМ») и разработанных в рамках диссертации.

Содержание диссертации, ее завершенность, замечания по оформлению.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 88 наименований и содержит 155 страниц текста, 144 рисунка и 20 таблиц. Существенные замечания по оформлению отсутствуют.

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 цель 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. Показано, 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.

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.

Четвертая глава посвящена разработке предложений 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).

Экспериментальные исследования реализации проектируемых механических характеристик ПКМ в РЛ вентилятора показаны на примере модели РЛВ двигателя размерности ПС-12. Особое внимание уделено испытаниям КПЭ, имитирующим конструкцию «хвостовика» лопатки, так как узел крепления РЛ является максимально нагруженным при действии центробежных нагрузок. Представлены результаты экспериментальных исследований прочности КПЭ хвостовика для модели углепластиковой РЛВ двигателя размерности ПД-14, по результатам которых оценены запасы по статической прочности хвостовика РЛ.

В заключении приведены ключевые результаты диссертационной работы.

Замечания по диссертации. При общей положительной оценке диссертационной работы можно отметить следующие замечания:

- 1) В главе 3 при представлении экспериментальных данных по механическим характеристикам ПКМ для РЛВ в некоторых случаях отсутствует информация о количестве испытанных образцов.
- 2) При проведении экспериментальных исследований механических характеристик материалов для РЛВ (глава 3) приведены, в том числе, результаты исследования материала с однонаправленной схемой армирования (ПКМ №3), которые в дальнейшем

сравнительном анализе не используются. Представление результатов исследования ПКМ №3 в данном случае является излишним.

3) Оценка допустимых напряжений РЛВ с учетом повреждений (глава 3) осуществлялась только по напряжениям сжатия. Было бы целесообразно провести данную оценку также и по напряжениям растяжения и сдвига.

4) С использованием результатов, полученных в диссертации, разработаны методические рекомендации по подтверждению прочностной надежности РЛВ из ПКМ (приведена ссылка), однако статус данного документа не указан.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов исследования.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при разработке рабочих лопаток вентилятора из ПКМ для перспективных газотурбинных двигателей, в том числе с открытым ротором вентилятора. Разработанные методики экспериментальных исследований ПКМ и КПЭ могут быть использованы при проектировании РЛВ, выборе оптимальной конструкции РЛВ, а также прочностной доводке РЛВ.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для дальнейшего использования и внедрения в отраслевых проектно-конструкторских организациях, в том числе: АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн».

Заключение

Диссертация Пальчикова Дениса Сергеевича на тему: «Разработка методов и экспериментальное исследование конструкционной прочности углепластиков для рабочей лопатки вентилятора перспективного газотурбинного двигателя», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук в целом выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научно-квалификационной работой, направленной на решение актуальной задачи в области авиационного двигателестроения. Приведенные результаты диссертационной работы можно классифицировать, как новые, обоснованные и имеющие практическое значение.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям, установленным п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Пальчиков Денис Сергеевич заслуживает присуждения

ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв на диссертационную работу Пальчикова Дениса Сергеевича рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н. Туполева» (протокол №__15__от «_26_» __08__ 2025 г.).

Заведующий кафедрой

«Реактивные двигатели и энергетические

установки» КНИТУ-КАИ

к.т.н., доцент



А.А. Лопатин

Подпись Лопатин А.А.
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля



С отзывом ознакомлен 27.08.2025

