

На правах рукописи

Шипунов Глеб Сергеевич

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКОЙ
ПРОЧНОСТИ ЛОПАТКИ СПРЯМЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ИЗ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Аношкин Александр Николаевич

Официальные оппоненты: *Сапожников Сергей Борисович*,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет
(национальный исследовательский
университет)», профессор кафедры
«Прикладная механика, динамика и
прочность машин»

Пестренин Валерий Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский
университет», доцент кафедры
«Механика сплошных сред и
вычислительных технологий»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева»

Защита состоится «27» декабря 2016 года в 14-00 на заседании
диссертационного совета ДМ 212.188.05 на базе Пермского национального
исследовательского политехнического университета и Института механики
сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу:
614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, д. 29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический
университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «____» _____ 2016 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

Щербинин А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время одной из мировых тенденций при разработке авиационных двигателей является замена металлических сплавов на композиционные материалы. Это позволяет добиться значительного снижения веса изделий и повышения их эксплуатационных характеристик. Во всех современных зарубежных авиационных двигателях значительное количество деталей и узлов изготавливается из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Это узлы звукопоглощающего контура, силовые оболочки мотогондолы, сопла и узлы реверса, а также элементы вентилятора, включая обшивку, лопатку вентилятора и лопатку спрямляющего аппарата.

В перспективных российских двигателях также предусматривается применение различных изделий из ПКМ в первую очередь корпусных деталей звукопоглощающего контура, вентилятора и мотогондолы. Однако для дальнейшего совершенствования двигателя необходимо переходить к использованию композиционных материалов в более сложных и нагруженных деталях, таких как лопатка спрямляющего аппарата.

Создание лопатки спрямляющего аппарата (ЛСА) из ПКМ является комплексной научно-технической проблемой, решение которой невозможно без решения целого ряда задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ).

Существует достаточно большое количество работ посвященных расчету различных композитных конструкций. Известны работы Н.А. Алфутова, В. В. Болотина, В.А. Бунакова, В.В. Васильева, Г.А. Ванина, П.А. Зиновьева, Л.М. Качанова, С.Г. Лехницкого, Б.Е. Победри, А.Н. Полилова, Б.Г. Попова, В.П. Трошина, Р.Б. Рикардса, А.М. Скудры, Ю.В. Соколкина, В.П. Тамужа, Ю.М. Тарнопольского, зарубежных исследователей: Г. Чей, Ч.Д. Бэбкока, В. Боттего, У. Йина, Р.К. Кананья, Д.Э. Кардоматиса, Г. Симитсеса, С. Салама и др. В последнее время при проведении таких расчетов широко используется метод конечных элементов (МКЭ) и, в частности, программные пакеты типа ANSYS и ABACUS, это отражено в работах А.Н. Аношкина, В.П. Матвеевко, И.П. Мирошниченко, В.М. Пестренина, С.Б. Сапожникова, О.Ю. Сметанникова, Н.А. Труфанова, И.Н. Шардакова и др.

Расчет композитных конструкций осуществляется как с использованием соотношений механики анизотропных пластин и оболочек, так и в полной двухмерной и трехмерной постановке задач МДТТ для неоднородной анизотропной среды. Существуют работы В.В. Болотина, Ю.И. Дмитриенко, В.Э. Вильдемана, А.А. Ташкинова, О.Б. Наймарка и других авторов, в которых рассматривается не только упругое решение, но и модели кинетических процессов накопления повреждений и развития расслоений в композиционных материалах и элементах конструкции.

Вопросы моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния металлокompозитных и металлических лопаток авиационного

двигателя рассмотрены в работах В.А. Костышева, В.Ф. Павлова, Л.С. Шабия, И.Л. Шитарева, и др.

Однако исследованию механического поведения композитных конструкций типа «лопатка спрямляющего аппарата» или «рабочая лопатка вентилятора» посвящены единичные работы Т.Д. Каримбаева, В.П. Павлова, Э.М. Нусратуллина. Таким образом, применение методов механики деформированного твердого тела для исследования особенностей механического поведения лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов при эксплуатационных нагрузках и оценки запасов прочности является важной практической задачей.

Целью работы является выявление зависимостей между структурой армирования, особенностями деформирования и запасами прочности лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести сравнительный анализ механических свойств различных полимерных композиционных материалов, обеспечивающих возможность создания конструкции с заданными требованиями.

2. Сформулировать постановку задачи МДТТ, разработать геометрические и математические модели для расчета напряженно-деформированного состояния, оценки прочности и жесткости конструкции из полимерных композиционных материалов.

2. Выполнить расчет и сравнительный анализ полей напряженно-деформированного состояния конструкции лопатки с различными схемами армирования при эксплуатационных нагрузках.

3. Провести экспериментальное исследование параметров деформирования и разрушения лопатки из полимерных композиционных материалов при лабораторных испытаниях для подтверждения ее механических характеристик и свойств материалов, реализуемых в конструкции.

4. Определить на основе расчетных и экспериментальных методов динамические (спектральные и амплитудно-частотные) характеристики лопатки из полимерных композиционных материалов.

Научная новизна:

- разработаны новые трехмерные модели механического поведения лопатки из композиционных материалов, учитывающие параметры структуры армирования, позволяющие исследовать зависимости между параметрами структуры и особенностями ее деформирования на макроскопическом и структурном уровнях;
- выявлены новые особенности напряженно-деформированного состояния и получены оценки прочности конструкции лопатки из полимерных композиционных материалов при эксплуатационных нагрузках;
- получены новые экспериментальные данные о параметрах деформирования и закономерностях разрушения лопатки из композиционных

материалов в лабораторных испытаниях, имитирующих эксплуатационное нагружение;

- установлены расчетно-экспериментальные оценки динамических (спектральных и амплитудно-частотных) характеристик лопатки из полимерных композиционных материалов.

На защиту выносятся:

- оригинальные численные модели механического поведения лопатки из полимерных композиционных материалов, учитывающие параметры структуры армирования и позволяющие исследовать зависимости между параметрами структуры и особенностями ее деформирования на макроскопическом и структурном уровнях;

- совокупность полученных новых результатов расчетно-экспериментальных исследований параметров деформирования и разрушения лопатки из полимерных композиционных материалов при различных вариантах армирования.

Достоверность результатов подтверждается сравнением с экспериментальными данными. При использовании метода конечных элементов подтверждена практическая сходимость путем исследования зависимости результатов от степени дискретизации.

Практическая ценность.

Практическую ценность составляют новые трехмерные модели механического поведения лопатки из композиционных материалов; зависимости между структурой ее армирования, особенностями деформирования и запасами прочности при эксплуатационных нагрузках; экспериментальные данные о параметрах деформирования и разрушения лопатки в лабораторных испытаниях, ее амплитудно-частотные характеристики. По результатам исследований сделаны практические рекомендации по выбору полимерных композиционных материалов и схемы армирования для изготовления опытных образцов лопатки спрямляющего аппарата. Результаты исследований используются в АО «Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, 93). Получен патент на конструкцию лопатки спрямляющего аппарата с выбранной схемой армирования № 163398.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Научное обоснование конструкторско-технологических решений по созданию высоконагруженных узлов перспективных авиационных двигателей, подверженных интенсивному воздействию аэродинамических факторов, из полимерных композиционных материалов на примере лопатки спрямляющего аппарата». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0080.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались на Всероссийских школах-конференциях молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2015-2016), III Всероссийской научно-технической конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (Москва, 2016), Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2016), 3-ей национальной ежегодной выставке-форуме ВУЗПРОМЭКСПО 2015 (Москва, 2015), 2-ом Пермском инженерно-промышленном форуме (Пермь, 2015), 5-ой Международной конференции «Техническая химия. От теории к практике» (Пермь, 2016).

Полностью диссертация обсуждалась на семинарах кафедр «Механика композиционных материалов и конструкций» (д-р. техн. наук, проф. А.Н. Аношкин), «Вычислительная математика и механика» (д-р. техн. наук, проф. Н.А.Труфанов) ПНИПУ и в Институте механики сплошных сред УрО РАН (академик РАН, д-р. техн. наук, проф. В.П. Матвеев).

Публикации.

По теме диссертационного исследования опубликовано 7 научных работ, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий, индексируемых в **Scopus** или рекомендованных ВАК.

Объем работы.

Диссертационная работа изложена на 134 страницах, иллюстрированных 67 рисунками и 13 таблицами. Состоит из введения, 4 глав и заключения по результатам исследования. Список цитируемой литературы состоит из 165 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана необходимость проведения расчетно-экспериментальных исследований и решения ряда задач МДТТ для конструкции лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов. Обоснована актуальность разработки новых расчетных схем и математических моделей для выявления зависимостей между структурой армирования, особенностями деформирования и запасами прочности лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов.

Первая глава посвящена обзору применения полимерных композиционных материалов в лопатках современных газотурбинных двигателей. Описывается их конструкция и технология изготовления. Приводится выбор перспективных материалов и технологий для изготовления лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов.

Спрямляющий аппарат представляет собой кольцевой набор профилированных лопаток, расположенных за рабочим колесом вентилятора

и обеспечивающих выравнивание воздушного потока с целью уменьшения потерь в наружном контуре двигателя. С учетом большого количества лопаток на один двигатель снижение массы от применения ПКМ вместо металла может достигать порядка 8-10 кг.

Создание лопатки спрямляющего аппарата из ПКМ (рис. 1, а) является комплексной научно-технической проблемой, решение которой невозможно без решения целого ряда задач механики деформируемого твердого тела. По опыту проектирования аналогичных конструкций запасы статической прочности лопатки из ПКМ при эксплуатационных нагрузках должны быть не менее 2.0, перемещения при этом должны быть не выше, чем у металлического аналога.

Предварительная оценка физико-механических характеристик композиционных материалов для создания лопатки проведена на основе соотношений механики слоистых пластин.

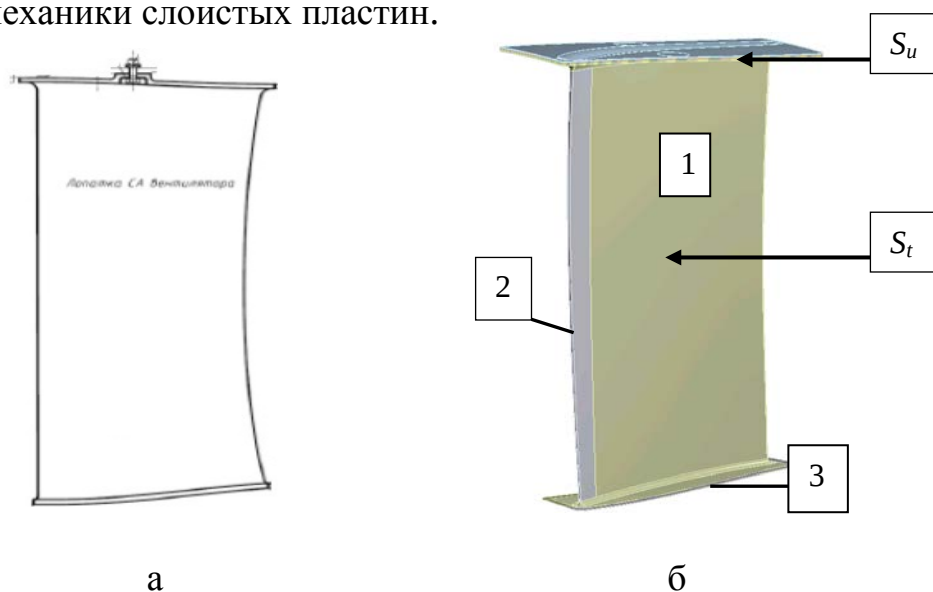


Рис. 1. Общий вид (а) и расчетная схема (б) лопатки спрямляющего аппарата:
1 – перо лопатки; 2 – титановая накладка входной кромки; 3 – резиновая прокладка в зоне крепления полки; S_u , S_t – поверхности задания граничных условий в перемещения и напряжениях

Анализ построенных диаграмм анизотропии и статической прочности квазиизотропных пакетов показал, что предпочтительным вариантом для изготовления ЛСА является однонаправленный углепластик (препреговая технология), кроме того допустимо использовать текстильные углепластики на основе препреговой и RTM технологии. Выбранные композиционные материалы соизмеримы по удельной жесткости с алюминием, но обладают более высокой удельной прочностью.

Во второй главе сформулирована физическая и математическая постановки задачи расчета НДС лопатки спрямляющего аппарата газотурбинного двигателя. Расчетная схема лопатки показана на рис.1, б. В процессе работы лопатка нагружается газодинамическими силами, сложным образом распределенными на поверхности пера. Закрепление осуществляется

в обойме корпуса верхнего по плоскости верхней полки и корпуса нижнего по периметру нижней полки.

Математическая постановка задачи соответствовала теории упругости анизотропного тела. В вариационной формулировке эта постановка для рассматриваемой неоднородной конструкции заключается в отыскании минимума функционала Лагранжа с дополнительными условиями. Вариация функционала при отсутствии массовых сил имеет вид:

$$\delta J_u = \int_V \varepsilon_{ij} C_{ijkl} \delta \varepsilon_{kl} dV - \int_{S_i} F_i \cdot \delta u_i dS, \quad (1)$$

где ε_{ij} и $\delta \varepsilon_{ij}$ - тензор и вариация тензора деформаций, C_{ijkl} - тензор упругих модулей, δu_i - вариация вектора перемещений, F_i - вектор внешних сил.

Для каждого ортотропного слоя углепластика подобласти $V^{(1)}$ компоненты тензора модулей упругости $C_{ijkl}^{(1)}$ зависят не только от материала, а также от его ориентации относительно глобальной системы координат конструкции. В связи с особенностями деформирования лопатки на макроскопическом и структурном уровнях кроме глобальной системы координат конструкции OXYZ в расчетах использовалась локальная система координат ортотропного слоя материала $OX_1X_2X_3$. В ней ось OX_1 совпадала с направлением основы, OX_2 - утка, OX_3 - перпендикулярна плоскости слоя.

Для оценки запасов прочности использовался критерий максимальных напряжений, при этом напряжения анализировались в локальной системе координат слоя. Анализ перемещений лопатки проводился в системе координат конструкции.

Разработана компьютерная модель лопатки, описывающая схему армирования с учетом комплекта выкроек, подготовленных в программном пакете FiberSim (рис. 2). Решение задачи осуществлялось МКЭ в пакете ANSYS. Проведено исследование сходимости решения задачи на различных сетках. Установлено, что при использовании конечных элементов с характерной толщиной в два армирующих слоя (0,5 мм) разница между максимальными нормальными напряжениями составляет не более 5%.

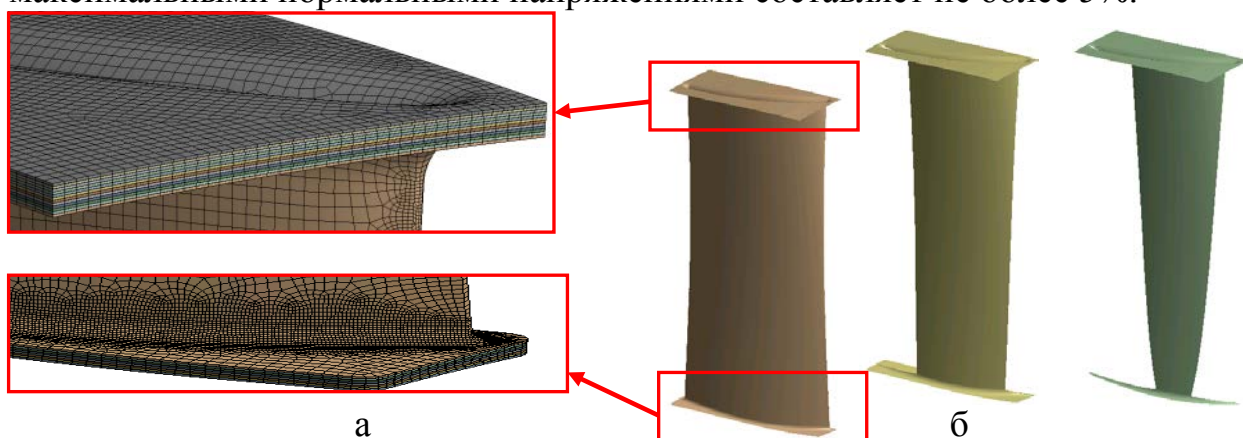


Рис. 2. Конечно-элементная модель (а) и общий вид образующих поверхностей (б), соответствующих комплекту выкроек

В третьем разделе второй главы проведены расчеты НДС и получены оценки запасов статической прочности прототипа лопатки из алюминиевого сплава. Поля перемещений и напряжений по критерию Мизеса для прототипа лопатки показаны на рис. 3. Анализ результатов расчетов показал, что в нагруженном состоянии наибольшие прогибы (0,41 мм) имеет центральная часть пера лопатки в связи с изгибно-крутильным характером деформирования.

Сделан предварительный вывод, что при выборе схемы армирования лопатки из ПКМ для обеспечения ее прочности и жесткости при изгибно-крутильном деформировании обязательным условием является наличие слоев с укладкой волокон под углом 0° и 90° с добавлением слоев 45° .

Таким образом, для проектирования лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов рациональнее применять квазиизотропные схемы армирования $[0^\circ; 90^\circ; \pm 45^\circ]$, $[0^\circ; 90^\circ]$, $[0^\circ; 60^\circ; 120^\circ]$.

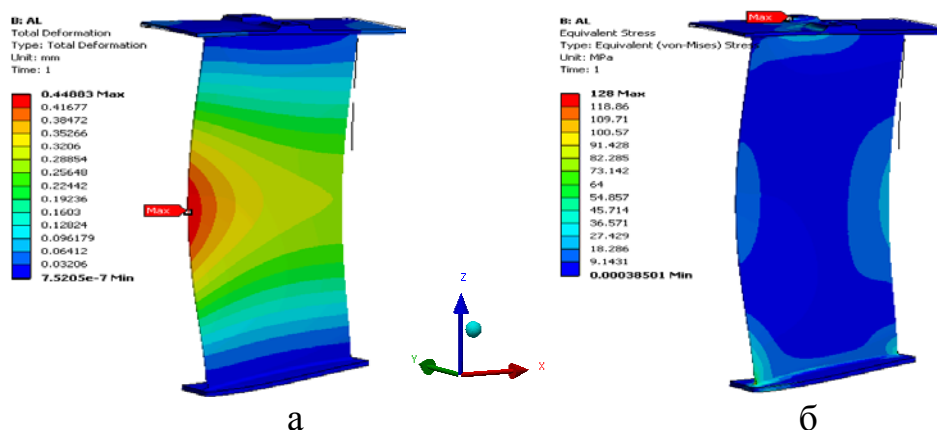


Рис. 3. Поля перемещений (мм) (а) и напряжений по критерию Мизеса в МПа (б) лопатки из алюминиевого сплава

Третья глава посвящена расчету НДС, оценке прочности и жесткости лопатки из ПКМ при эксплуатационных нагрузках. Всего было рассмотрено два материала на основе однонаправленной углеродной ткани со схемами армирования $[0^\circ; 90^\circ; \pm 45^\circ]$ и $[0^\circ; 60^\circ; 120^\circ]$ и два материала на основе текстильной углеродной ткани со схемой армирования $[0^\circ; 45^\circ]$.

В качестве примера на рис. 4 и 5 представлены поля перемещений в системе координат конструкции и нормальных касательных напряжений в системе координат слоя для двух типовых вариантов армирования лопатки с использованием однонаправленного и текстильного композиционного материала. Анализ полей напряжений показал, что наибольшие напряжения реализуются в поверхностных армирующих слоях лопатки: напряжения вдоль и поперек направления армирования – в первом слое, касательные напряжения – во втором слое. Это характерно для всех рассмотренных расчетных вариантов.

Поля перемещений лопатки из ПКМ близки к аналогичным полям для лопатки из алюминия, однако, максимальные перемещения лопатки из ПКМ выше. В случае армирования лопатки однонаправленным материалом

максимальные перемещения (рис. 4, а) равны 0,73 мм; в случае армирования текстильным (рис. 5, а) – 0,59 мм.

В результате расчетных исследований обнаружено, что для лопатки из однонаправленного углепластика (препреговая технология) поперечные растягивающие (рис. 4, б) напряжения возникают в поверхностных слоях конструкции в районе кромки лопатки и достигают значения 183 МПа, что превышает предельные значения для этого материала (44 МПа).

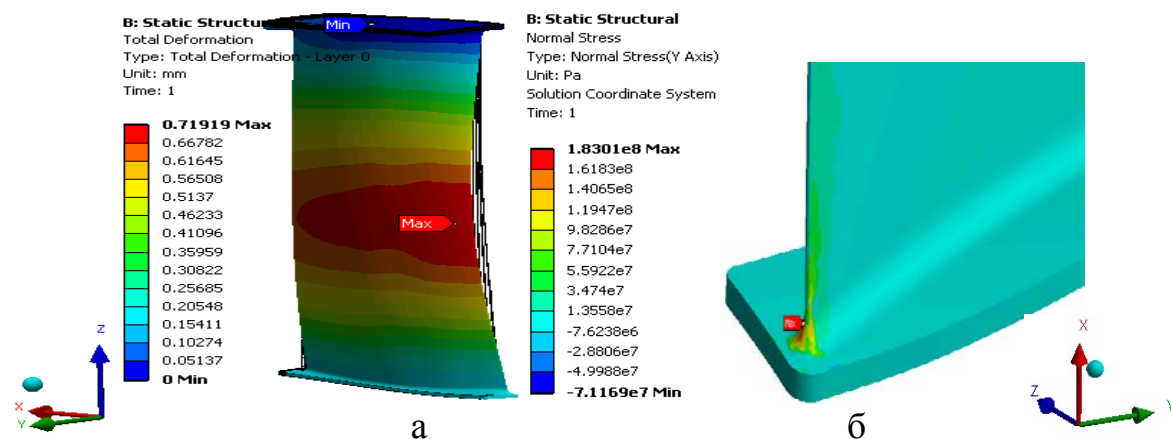


Рис. 4. Поля перемещений (мм) (а) и нормальных напряжений σ_{22} (МПа) в системе координат слоя (б) для лопатки из однонаправленного углепластика (препреговая технология) при схеме армирования $[0^\circ;90^\circ;\pm45^\circ]$

Это обстоятельство может вызвать появление поперечных трещин в поверхностных слоях по кромкам лопатки при эксплуатационных нагрузках. Хотя при этом конструкция первоначально сохранит несущую способность, трещины при длительном воздействии вибрационных нагрузок могут привести к развитию расслоений и потере жесткости с последующим разрушением. Таким образом, рассмотренные схемы армирования лопатки однонаправленным композиционным материалом не являются допустимыми с точки зрения прочности.

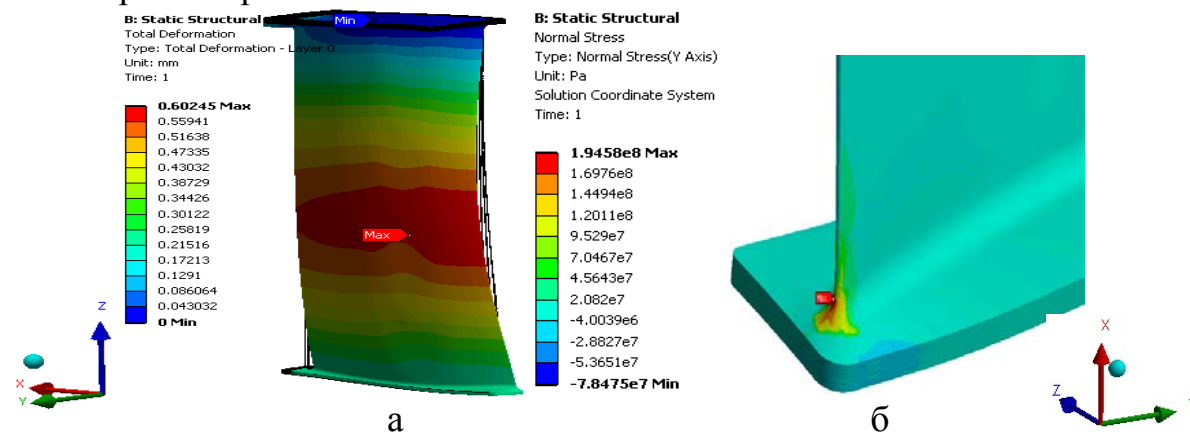


Рис. 5. Поля перемещений (мм) (а) и нормальных напряжений σ_{22} (МПа) в системе координат слоя (б) для лопатки из текстильного углепластика (препреговая технология), при схеме армирования $[0^\circ;45^\circ]$

Для лопатки из текстильного углепластика (препреговая технология) поперечные растягивающие напряжения (рис. 5, б) возникают так же в поверхностных слоях конструкции в районе кромки лопатки и достигают значений 190 МПа. Однако для данного расчетного варианта напряжения поперек армирования не превышают предельных значений, поскольку пределы статической прочности углепластика с текстильной структурой вдоль и поперек армирования практически идентичны и составляют 809 МПа.

Сравнение полученных в результате расчета перемещений и нормальных и касательных напряжений в слоях для рассмотренных вариантов армирования лопатки показало, что минимальные перемещения наблюдаются в случае использования текстильного углепластика (препреговая технология). При использовании однонаправленных материалов максимальные нормальные напряжения поперек армирования в поверхностных слоях на кромке лопатки превышают предел прочности. Применение текстильных равнопрочных материалов обеспечивает выполнение критерия прочности со значительным запасом.

Оценка запасов прочности по критерию максимальных напряжений $k_{ij}^{\pm} = \frac{[\sigma_{ij}^{\pm}]}{\max(\sigma_{ij}^{\pm})}$ приведена в таб. 1. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что однонаправленные материалы не удовлетворяют необходимым запасам прочности, и наиболее подходящим для дальнейших исследований является текстильный углепластик (препреговая технология).

Таб. 1. Коэффициенты запаса прочности лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов.

Расчётный вариант	k_{11}^{+}	k_{22}^{+}	k_{11}^{-}	k_{22}^{-}	k_{12}
Однонаправленный углепластик (RTM технология) $[0^{\circ}; 90^{\circ}; \pm 45^{\circ}]$	6	0,2	2,95	1,07	2,6
Однонаправленный углепластик (RTM технология) $[0^{\circ}; 60^{\circ}; 120^{\circ}]$	6,2	0,3	4,4	2	3,7
Однонаправленный углепластик (препреговая технология) $[0^{\circ}; 90^{\circ}; \pm 45^{\circ}]$	3,7	0,2	3,7	1,8	1,42
Однонаправленный углепластик (препреговая технология) $[0^{\circ}; 60^{\circ}; 120^{\circ}]$	3,6	0,3	6	1,8	2,1
Текстильный углепластик (препреговая технология) $[0^{\circ}; 45^{\circ}]$	4,1	5	10,5	10,3	2,8
Текстильный углепластик (RTM технология) $[0^{\circ}; 45^{\circ}]$	3,2	3,6	5	5,7	1,3

Третий раздел третьей главы посвящен исследованию межслойных нормальных и касательных напряжений в конструкции лопатки. Известно, что слоистые композитные конструкции, имеющие сложный профиль, часто разрушаются по типу расслоения от межслоевых напряжений на участках перегиба слоев. В рассматриваемой конструкции лопатки перегиб слоев

происходит при переходе армирующих слоев из области пера к полкам лопатки. Для расчета таких напряжений использовалась уточненная постановка задачи, учитывающая реальные условия закрепления лопатки в обойме корпуса верхнего и нижнего по периметрам верхней и нижней полок через резиновую прокладку, а также наличие металлической накладке на кромке пера (рис. 1,б). Контакт между накладкой, резиновой прокладкой и лопаткой принимался идеальным.

Расчеты показали, что при введении в модель резиновой прокладки наблюдается увеличение перемещений на 21% как для алюминиевого прототипа, так и для лопатки из ПКМ. Анализ межслойных напряжений в наиболее нагруженной и опасной зоне конструкции лопатки – в зоне перегиба слоев показал, что нормальные межслойные напряжения σ_{33} не велики, запас прочности по ним составляет порядка $k_{33}=4,7$. Более опасны межслойные касательные напряжения (рис. 6) τ_{13} и τ_{23} , их значения достигают 30 МПа, запас прочности по ним составляет $k_{13}=2,0$, $k_{23}=2,0$.

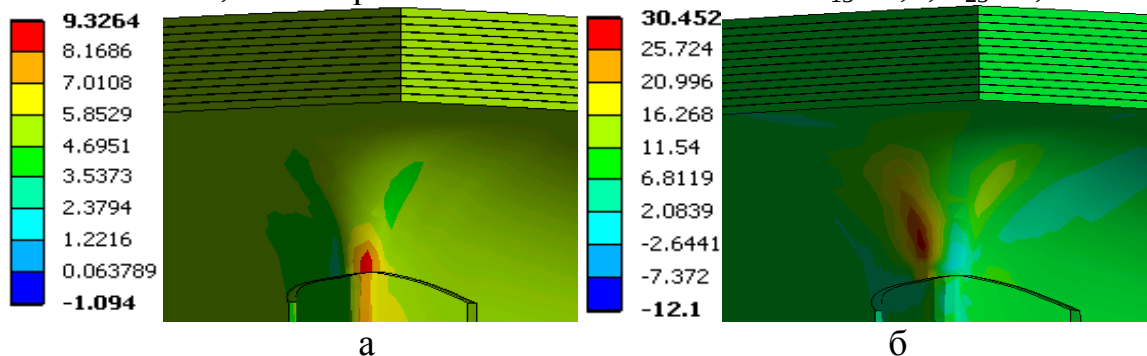


Рис. 6. Распределение межслойных нормальных σ_{33} (а) и касательных τ_{13} (б) напряжений в районе передней кромки верхней полки ЛСА (в МПа)

Таким образом, показано, что наиболее опасными, определяющими начало расслоения конструкции ЛСА из ПКМ при эксплуатационных нагрузках, являются сдвиговые межслойные напряжения.

Четвертая глава посвящена расчетно-экспериментальному подтверждению механических характеристик ЛСА из ПКМ с выбранной схемой армирования. Предложена методика лабораторных механических статических испытаний для определения прочностных и жесткостных свойств лопатки. Для подтверждения результатов, полученных в ходе лабораторных испытаний, и уточнения запасов прочности проведено моделирование механического поведения ЛСА при лабораторном нагружении.

Схема эксперимента приведена на рис. 7, приложение нагрузки от испытательной машины к образцу лопатки осуществлялось через мешок с дробью. Механические испытания были проведены совместно с испытательной лабораторией АО «Авиадвигатель».

Математическая постановка задачи расчета полей НДС лопатки при лабораторных испытаниях аналогично представленной в главе 2 включала основные соотношения теории упругости анизотропного тела для ЛСА.

Эквивалентная нагрузка на ЛСА передавалась через мешок с дробью, введенный в расчетную схему в явном виде. Мешок рассматривался как единое упругое изотропное тело с эффективными свойствами. Закрепление лопатки в испытательной оснастке считалось абсолютно жестким, оснастка в расчетную схему не включалась. Контакт между лопаткой и мешком с дробью принимался идеальным. Физико-механические характеристики мешка с дробью получены из СНиП 2.02.01-82, эффективный модуль сдвига для сыпучей среды (0,025 ГПа) получен подбором для обеспечения лучшего соответствия перемещений, полученных при испытаниях лопатки из алюминия, с результатами расчетов по разработанной модели.

В результате проведения механических испытаний построены диаграммы перемещений в центре пера лопатки от нагрузки испытательной системы (рис.8). Разрушение лопатки из ПКМ произошло при нагрузке 10000Н, что соответствует приблизительно десятикратному запасу статической прочности.

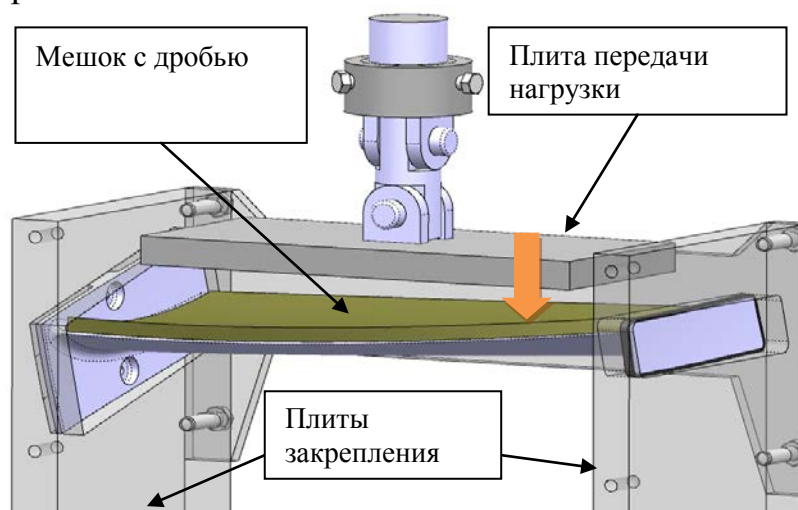


Рис. 7. Схема проведения лабораторных механических испытаний ЛСА

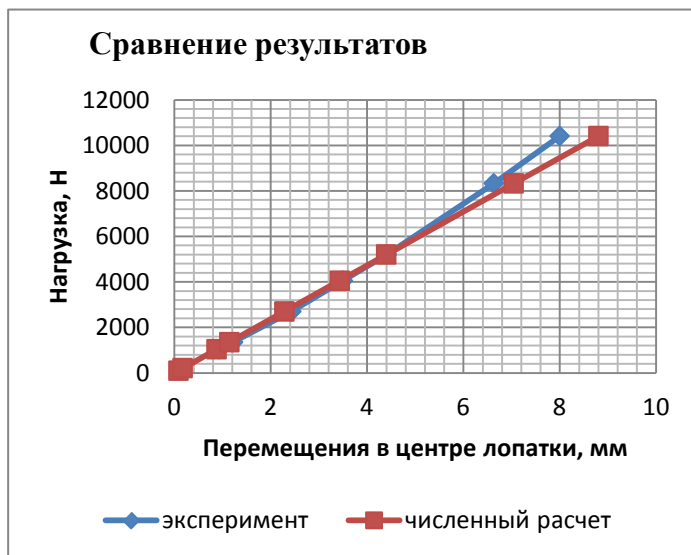
Анализ полученных результатов (таб.2) для лопатки из ПКМ показал, что поле полных перемещений, реализующееся при лабораторных испытаниях, близко к полю полных перемещений в процессе эксплуатации. Первые признаки разрушения по межслоевым напряжениям τ_{13} , τ_{23} возникли при нагрузке 3900 Н, запас прочности при этом составляет $k_{13}=2,4$, $k_{23}=2,4$.

В третьем разделе третьей главы для оценки динамических параметров лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов были проведены исследования по определению её амплитудно-частотных характеристик. Результаты исследований можно использовать для отстройки лопатки от резонансных режимов, а также для выборочного контроля качества лопаток и поиска дефектов. Оценка динамических параметров проводилась в лаборатории исследования многоциклового усталости образцов материалов газотурбинных двигателей ПНИПУ с использованием прибора сканирующей лазерной виброметрии PSV-400-3D.

Для численного расчета частот и форм лопатки из ПКМ разработана математическая модель, которая позволяет в последующих исследованиях

оценить изменение собственных частот при изменении ее схемы армирования и конструктивных особенностей.

Математическая постановка задачи соответствует основным соотношениям теории упругости анизотропного тела, рассмотренным в главе 2, с добавлением сил инерции. Для определения собственных частот рассматриваемой конструкции принималось, что внешние силы и демпфирование равны нулю. Задача решалась численно с использованием разработанной в главе 2 компьютерной модели лопатки в программном пакете ANSYS.



Таб. 2. Максимальные перемещения лопатки из ПКМ при испытаниях

Нагрузка, Н	Перемещения ОУ, мм.	
	Эксперимент	Ansys
1000	0,93	0,87595
1300	1,22	1,1445
2600	2,43	2,2891
3900	3,50	3,4336
5000	4,41	4,4021
8000	6,63	7,0434
10000	8,00	8,8042

Рис. 8. Сравнение результатов численного моделирования ЛСА из ПКМ с данными лабораторных механических испытаний

Сравнение амплитудно-частотных характеристик, полученных экспериментальным путем, для трех исследованных лопаток приведено на рис.9. Значение частот, соответствующих пикам на диаграмме, хорошо согласуется, различие между ними составляет 5,6 %.

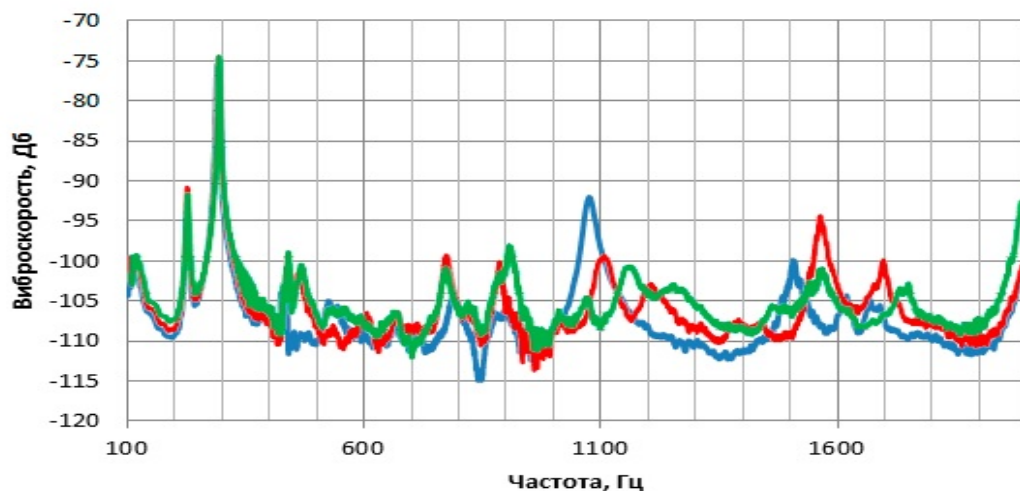


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики ЛСА

Формы колебаний в каждом из экспериментов определялись в результате анализа анимационных картин динамического поведения лопатки в процессе колебаний. На рис. 10 представлены первые две формы колебаний лопатки из ПКМ. В диапазоне частот до 6400Гц у исследованных лопаток выявлено до 22 собственных частот колебаний.

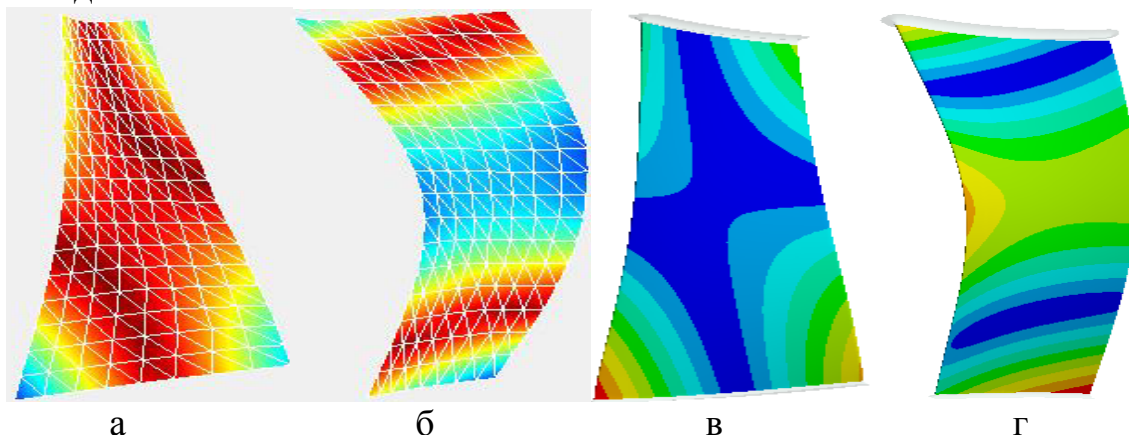


Рис. 10. Собственные формы колебаний ЛСА из ПКМ, полученные в рамках лабораторных испытаний (а, б) и численного расчета (в, г)

Количественное сравнение собственных частот лопатки из ПКМ (таб. 3) показало, что отклонения расчетных и экспериментальных значений наблюдаются в диапазоне от 1,08% (седьмая собственная частота) до 5,64% (первая собственная частота).

Таб. 3 Количественное сравнение собственных частот лопатки из ПКМ.

№ соб. формы	Собственная частота, Гц		Отличие %	№ соб. формы	Собственная частота, Гц		Отличие %
	Эксперимент	Расчет			Эксперимент	Расчет	
1	204,7	216,93	5,64	6	1070,9	1039,6	2,98
2	277,0	284,15	2,52	7	1373,4	1388,4	1,08
3	483,6	505,51	4,33	8	1493,4	1472,5	1,94
4	716,2	705,16	1,54	9	1760,9	1733,9	1,53
5	837,3	867,01	3,43	10	2002,9	1894,4	5,42

Результаты показывают хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных, что свидетельствует об адекватности разработанной модели и физико-механических характеристик материалов, используемых при расчетах лопатки.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования:

1. На основе анализа механических свойств выбраны современные полимерные композиционные материалы, обеспечивающие возможность создания лопатки спрямляющего аппарата, удовлетворяющие заданным требованиям. Сформулирована постановка задачи МДТТ и разработана геометрическая модель для расчета напряженно-деформированного

состояния, оценки прочности и жесткости композитной лопадки на макроскопическом и структурном уровнях.

2. Установлены зависимости между структурой армирования, особенностями деформирования и запасами прочности лопадки при эксплуатационных нагрузках, выбран наиболее рациональный материал и схема армирования для ее изготовления: текстильный углепластик $[0^\circ/45^\circ]$ (препреговая технология).

3. Разработана методика выбора материалов и схемы армирования для аналогичных конструкций с использованием выявленных зависимостей между структурой армирования и структурными напряжениями, показано преимущество использования текстильных материалов при изготовлении лопадки, проведена верификация методики путём сравнения с результатами механических статических и динамических испытаний.

4. Проведены экспериментальные исследования параметров деформирования и разрушения лопадки из полимерных композиционных материалов при лабораторных испытаниях, получено подтверждение ее механических характеристик при эксплуатационных нагрузках.

5. На основании численно-экспериментальных исследований установлены частоты и формы собственных колебаний, амплитудно-частотные характеристики лопадки из полимерных композиционных материалов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопадки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С., Третьяков А.А. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – № 4. – С. 5–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01 (**Scopus**)

2. Компьютерное моделирование механического поведения композитной лопадки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / Гринев М.А., Аношкин А.Н., Писарев П.В., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 3. – С. 38–51. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.04 (**Scopus**)

3. Исследование НДС и оценка прочности композитной лопадки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / Гринев М.А., Аношкин А.Н., Писарев П.В., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 4. – С. 293–307. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.17 (**Scopus, BAK**)

4. Разработка и проектирование высоконагруженных узлов перспективных авиационных двигателей из полимерных композиционных материалов на примере лопадки спрямляющего аппарата / Иноземцев А.А., Нутфуллин И.Г., Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С., Меркушева Н.П., Тихонова А.А., Воронков А.А. // Сборник докладов 3-ей Всероссийской научно-технической конференции ФГУП ВИАМ: Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития

материалов и технологий их переработки на период 2030 года. – 2016. – С. 41.

5. Расчет напряженно-деформированного состояния лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов/ Аношкин А.Н., Писарев П.В., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С./ Математическое моделирование в естественных науках. Пермь, - 2015. – С. 21-25.

6. Исследование влияния схемы армирования на прочность и жесткость лопатки спрямляющего аппарата из полимерных композиционных материалов/ Гринев М.А., Аношкин А.Н., Писарев П.В., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С. // Сборник докладов 5-ой Международной конференции «Техническая химия. От теории к практике». Пермь, – 2016, - с 54.

7. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния лопатки спрямляющего аппарата при проведении механических испытаний./ Аношкин А.Н., Русинова Т.А., Писарев П.В., Шипунов Г.С. / Математическое моделирование в естественных науках. Пермь, - 2016. – С. 25-29.

8. Патент 163398, МПК F01D9/00 (2006.01), F01L5/00 (2006.01) Лопатка спрямляющего аппарата / Поспелов А.Б., Аношкин А.Н., Шипунов Г.С.

Подписано в печать _____ г.
Формат 60 х 90/16. Набор компьютерный.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № ____/2016.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский, 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33