

**Пеленев Константин Александрович**

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТЬ  
ШПАНГОУТА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

1.1.8 Механика деформируемого твердого тела

**Автореферат**

Диссертационного исследования на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь – 2021

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

Научный руководитель: *Аношкин Александр Николаевич*  
доктор технических наук, профессор, и.о.  
заведующего кафедрой механики  
композиционных материалов и конструкций  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»

Официальные оппоненты: *Сапожников Сергей Борисович*,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Техническая механика», ФГАОУ ВО  
«Южно-Уральский государственный  
университет (национальный исследовательский  
университет)»,

*Пестренин Валерий Михайлович*,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГАОУ 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 «22» декабря 2021 года в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. на заседании  
диссертационного совета 99.0.067.02 (Д 999.211.02) на базе ФГАОУ ВО  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и  
ПФИЦ УрО РАН (Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу:  
614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский д.29, ауд. 423 б.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Щербинин А.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение при изготовлении высоконагруженных деталей и узлов авиационной техники. Внедрение этих материалов обеспечивает снижение массы, повышение топливной эффективности, а в ряде случаев, повышение технологичности и снижение себестоимости. Совершенствование авиационных двигателей связано с увеличением доли использования композиционных материалов, в том числе, при создании высоконагруженных деталей, таких как, рабочая лопатка вентилятора и шпангоуты реверсивного устройства.

Проектирование шпангоута реверсивного устройства из ПКМ, отработка технологии его изготовления, разработка методики и проведение механических испытаний является актуальной проблемой, для решения которой требуется решение целого ряда задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ). Актуальными задачами являются: исследование напряженно-деформированного состояния и оценка прочности шпангоута при эксплуатационных нагрузках, выбор материалов и схемы армирования, обеспечивающей требуемые механические свойства конструкции и возможность технологической реализации, разработка методик лабораторных механических испытаний для подтверждения прочности и жесткости конструкции.

Расчету композитных конструкций и выбору схемы армирования посвящено большое количество работ. Среди них можно отметить работы российских авторов: Н.А. Алфутова, А.Н. Аношкина, В.В. Болотина, Л.А. Бохоевой, В.А. Бунакова, В.В. Васильева, Г.А. Ванина, В.Э. Вильдемана, Е.Л. Гусева, Ю.И. Димитриенко, П.А. Зиновьева, Л.М. Качанова, В.Н. Паймушина, А.Н. Полилова, Б.Г. Попова, В.П. Трошина, Р.Б. Рикардса, С.Б. Сапожникова, А.М. Скудры, А.А. Смердова, Ю.В. Соколкина, В.П. Тамужа, Ю.М. Тарнопольского, В.П. Трошина. За рубежом расчетам композитных конструкций посвящены работы О. Белмонта, В. Боттего, Ч.Д. Бэбкока, У. Йина, Р.К. Кананья, Ф. Леон, М. Макэлрой Дж. Ретклиф, С. Салама, Г. Симитсеса, Рс. Томсон, Г. Чея, и др. Вопросами проектирования и расчета металлических авиационных шпангоутов посвящены работы: А.В. Болдырева, Е.С. Войта, О.С. Гоголева, А.И. Ендогура, В.А. Комарова, А.П. Мазина и др. Проектированию шпангоутов из композиционных материалов посвящены единичные работы И.М. Буланова, В.В. Воробья, Е.С. Кулага, патенты Л. Андреаса, Х. М. Пина Лопеса, Э. Вера Вильереса, М. Санчеса Переса, А. Марковски, Э. Буше, Д. Сула, М. Эльдюаяна, в которых рассмотрены способы изготовления и схемы армирования шпангоутов из композитных материалов, обеспечивающие высокую жесткость в окружном направлении для эффективного применения шпангоута в силовом наборе летательного аппарата.

Рассматриваемый в диссертации шпангоут реверсивного устройства авиационного двигателя подвергается высоким продольным нагрузкам от газового потока, обтекающего решетки реверса и обеспечивающего создание обратной тяги. Такие нагрузки могут вызывать значительный изгиб из плоскости и расслоение композиционного материала в конструкции шпангоута. В

литературе отсутствуют работы, посвященные расчетам и экспериментальному исследованию прочности и жесткости шпангоутов реверсивного устройства авиационных двигателей из композиционных материалов. Кроме того, отсутствуют и работы, посвященные исследованиям и обоснованию решений по подбору материалов и схем армирования позволяющие повысить жесткость и прочность композитных шпангоутов при продольных нагрузках.

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования НДС и запасов прочности для обоснования и выбора рациональных схем армирования шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя из ПКМ при продольных нагрузках является важной научной и практической задачей.

**Целью работы является** установление зависимостей между структурой композиционного материала и особенностями напряженно-деформированного состояния и разрушения шпангоута авиационного двигателя при эксплуатационных нагрузках, выбор рациональной схемы армирования шпангоута и подтверждение его работоспособности.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести сравнительный анализ механических свойств и выбрать полимерные композиционные материалы и схемы армирования, обеспечивающие требуемые деформационные характеристик и запасы прочности конструкции шпангоута при заданных вариантах эксплуатационных нагрузок.

2. Сформулировать постановку задачи механики деформируемого твердого тела, разработать математические модели для расчета напряженно-деформированного состояния, оценки прочности и жесткости шпангоута из полимерных композиционных материалов;

3. Выполнить расчет и сравнительный анализ полей напряжений и деформаций шпангоута с различными схемами армирования при эксплуатационных нагрузках, выбрать рациональную схему армирования, обеспечивающую наибольший запас его прочности и жесткости;

4. Разработать методики и провести экспериментальные и расчетные исследования деформирования и разрушения образцов шпангоута из ПКМ для подтверждения требуемых запасов прочности и жесткости, верификации разработанных математических моделей и характеристик композиционных материалов, реализуемых в конструкции.

**Научная новизна:**

- Показано, что особенностью механического деформирования шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя из полимерных композиционных материалов при эксплуатационных нагрузках является локальный изгиб из плоскости с отгибом переднего фланца;

- Получены новые расчетные и экспериментальные данные о параметрах деформирования и закономерностях разрушения шпангоута авиационного двигателя из композиционных материалов при эксплуатационных нагрузках и лабораторных испытаниях: установлено, что для повышения жесткости шпангоута в конструкторско-технологических схемах необходимо использовать армирование

высокомодульным углепластиком с углами  $\pm 45^\circ$  или  $\pm 25^\circ$ , кольцевое армирование ( $90^\circ$ ) является неэффективным; разрушение шпангоута происходит вследствие расслоения при отгибе фланца и незначительно зависит от схемы армирования;

- Разработаны новые методики экспериментальных исследований конструкции из полимерных композиционных материалов с использованием метода регистрации деформаций в режиме реального времени в заданных точках конструкции с помощью системы волоконно-оптических датчиков и программно-аппаратного комплекса расшифровки сигналов, которые позволяют оценивать текущее состояние конструкции и фиксировать моменты появления разрушений во внутренней структуре материала.

#### **Методы исследования:**

Для исследования НДС и оценки прочности шпангоута из ПКМ при эксплуатационном нагружении применялся метод конечных элементов и программный комплекс Ansys Workbench. Этот же метод и программный комплекс применялись для оценки прочности и жесткости композитного шпангоута при моделировании механических лабораторных испытаний. Для исследования прочности и жесткости композитного шпангоута использовался экспериментальный метод, и метод регистрации деформаций в режиме реального времени с помощью системы волоконно-оптических датчиков.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Научная гипотеза о возможности создания заднего шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя из полимерных композиционных материалов эквивалентного титановому прототипу по геометрическим размерам, прочности и жесткости при заданной системе эксплуатационных нагрузок.

- Численные модели деформирования композитного шпангоута авиационного двигателя, учитывающие параметры структуры армирования и позволяющие исследовать зависимости между параметрами структуры и особенностями деформирования и разрушения конструкции шпангоута;

- Методики экспериментальных исследований деформирования и разрушения композитного шпангоута и его сегментов, использующие для регистрации деформаций в режиме реального времени систему волоконно-оптических датчиков и программно-аппаратный комплекс расшифровки сигналов;

- Новые результаты расчетных и экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения шпангоута из полимерных композиционных материалов.

**Достоверность результатов** обеспечивается выбором сертифицированных программных пакетов, подтверждением сходимости численных решений краевых задач механики деформируемого твердого тела для исследуемого шпангоута и сравнением результатов расчётных и экспериментальных исследований, описывающих механические характеристики полимерных композиционных материалов и процессы деформирования и разрушения шпангоута из ПКМ. Достоверность также подтверждается корректным использованием поверенного

испытательного и измерительного оборудования научно-образовательного центра авиационных композитных технологий ФГАОУ ВО ПНИПУ.

**Теоретическая ценность:**

- Установлено, что особенностями деформирования шпангоута реверсивного устройства при эксплуатационных нагрузках является изгиб из плоскости и отгиб фланца; разрушение композитного шпангоута происходит по типу расслоения в области перегиба слоев фланца, после расслоения композитный шпангоут частично сохраняет несущую способность;

- Изучено влияние параметров армирования слоистого композиционного материала на НДС и прочность шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя. Показано, что применение углепластика позволяет получить прочность композитного шпангоута с различными вариантами армирования выше титанового прототипа, а жесткость эквивалентную титановому прототипу можно обеспечить только с использованием углепластика с высокомодульными волокнами и применением схем армирования с углами  $\pm 45^\circ$ ;

- Апробирован метод регистрации деформаций в режиме реального времени с помощью системы волоконно-оптических датчиков и программно-аппаратного комплекса расшифровки сигналов при лабораторных механических испытаниях шпангоута из композиционных материалов, позволяющий фиксировать моменты появления разрушений во внутренней структуре материала.

**Практическую ценность** составляют:

- Методики расчета НДС и оценки прочности шпангоутов из ПКМ, позволяющие обосновать выбор материалов и рациональной схемы армирования при их проектировании для конструкций авиационной и ракетной техники;

- Методики лабораторных механических испытаний натуральных образцов и сегментов шпангоута из ПКМ с использованием системы волоконно-оптических датчиков для регистрации деформаций в режиме реального времени, позволяющие экспериментально подтвердить прочность и жесткость конструкции шпангоута.

- Рекомендации по проектированию, выбору композиционных материалов и рациональных схем армирования шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя для обеспечения требуемой жесткости и прочности.

Разработанные методики расчетных и экспериментальных исследований и рекомендации по проектированию шпангоутов из композиционных материалов могут быть использованы в конструкторских бюро при создании новых образцов авиационной и ракетно-космической техники. Результаты исследований внедрены и используются при создании деталей и узлов из полимерных композиционных материалов новых авиационных двигателей в АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь), в научно-образовательном центре акустических исследований и композитных звукопоглощающих конструкций ФГАОУ ВО ПНИПУ (г. Пермь). Результаты работы использовались при выполнении НИР по государственному заданию 11.2391.2017/4.6 «Разработка системы мониторинга состояния конструкций из полимерных композиционных материалов для современных авиационных двигателей на основе встроенных волоконно-оптических датчиков».

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты работы докладывались на международном симпозиуме «XX Зимняя школа по механике сплошных сред» ИМСС УрО РАН (Пермь, 2017), 8-ой международной конференции «Composites Testing and Model Identification» (Leuven, Belgium 2017), Всероссийском форуме «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2017), Международном форуме «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» Межотраслевой инжиниринговый центр "Композиты России" МГТУ им. Баумана (Москва, 2018), международном симпозиуме «Aircraft Materials» (Compiègne, France 2018), 18-ой международной конференции по композитным материалам «ECCM18» (Athens, Greece 2018), XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкции» (Екатеринбург, 2018), XX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2019» (Пермь). XIII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМАТ» по тематике «Цифровые технологии, моделирование и автоматизация процессов неразрушающего контроля в аэрокосмической области. Проблемы и перспективы внедрения» (Москва, 2021)

Полностью диссертация обсуждалась на объединенном семинаре кафедр «Механика композиционных материалов и конструкций» и «Экспериментальная механика» ФГАОУ ВО ПНИПУ (рук. д. ф.-м. н., профессор В.Э. Вильдеман), и Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН, д. тех. н., профессор В.П. Матвеевко).

### **Публикации.**

По теме диссертационного исследования опубликовано 7 научных работ, из них 4 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и в изданиях, индексируемых в Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 149 страницах, иллюстрированных 83 рисунками и 17 таблицами. Состоит из введения, 4 глав и заключения по результатам исследования. Список цитируемой литературы состоит из 135 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** продемонстрирована важность проведения расчетно-экспериментальных исследований шпангоута авиационного двигателя при эксплуатационных и лабораторных нагрузках. Сформулированы цели, задачи и научная новизна диссертационного исследования. Обоснована актуальность выбранной темы исследования.

**В первой главе** проводится обзор применения крупногабаритных силовых шпангоутов, в конструкциях авиационной и ракетной техники. Проводился анализ возможных вариантов деформирования шпангоута авиационного двигателя от воздействия эксплуатационных нагрузок. Приводился обзор механических и технологических свойств перспективных полимерных композиционных материалов пригодных для изготовления шпангоута. По

результатам обзора свойств материалов и анализа особенностей деформирования шпангоута формулируются рекомендации по подбору материалов и формированию схем армирования для его изготовления.

Шпангоуты являются элементами силового каркаса и придают ему форму и жесткость. Основным предназначением силовых шпангоутов является передача местных сосредоточенных нагрузок на оболочку или другие силовые элементы ЛА. Как правило, они имеют форму кольца или овала и изготавливаются из сплавов на основе алюминия или титана, обладают низкой технологичностью и достаточно большой массой. Применение полимерных композиционных материалов позволяет на 40-60 % снизить массу шпангоута. При этом для обеспечения его прочности и жесткости на уровне металлических аналогов необходимо проведение исследований для выбора материалов слоев и рациональной схемы армирования, обеспечивающей высокие механические характеристики и технологичность изготовления.

В диссертационном исследовании объектом исследования выбран типовой шпангоут П-образного профиля из композиционного материала (рисунок 1,а), являющийся прототипом заднего шпангоута реверсивного устройства (РУ) авиационного двигателя.

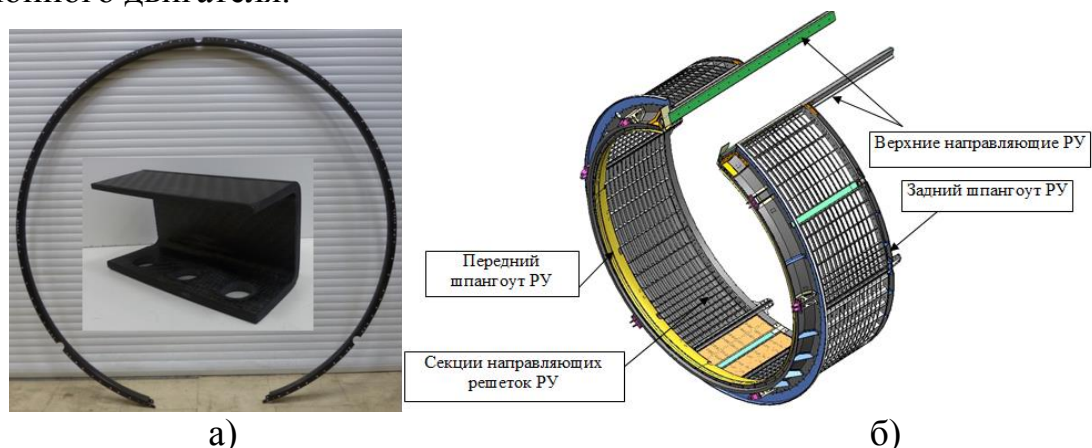


Рисунок 1 – Общий вид заднего шпангоута реверсивного устройства из ПКМ (а), силовой каркас реверсивного устройства (б)

Задний шпангоут является элементом силового каркаса РУ (рисунок 1,б), куда помимо него входит передний шпангоут и секция направляющих решеток. К переднему фланцу заднего шпангоута крепятся секции решеток, образующие жесткий силовой каркас реверсивного устройства. В результате действия воздушного потока на решетки РУ через болтовое соединение на передний фланец заднего шпангоута передаются сосредоточенные силы.

Анализ деформирования шпангоута в процессе эксплуатации показал, что фланцы увеличивают его жесткость на изгиб в плоскости, а наиболее опасными для шпангоута являются осевые нагрузки, которые приводят к его неравномерному изгибу из плоскости и отгибу фланцев. Следовательно, материалы слоев и схема армирования должны выбираться для увеличения жесткости шпангоута на изгиб из плоскости, а при анализе НДС необходимо оценить уровень межслойных напряжений в слоистом композиционном



материале при отгибе фланцев в наиболее нагруженном сегменте шпангоута.

Таким образом, для рационального проектирования композитного шпангоута РУ требуется решение ряда теоретических задач МДТТ, посвященных исследованию характера НДС и особенностей разрушения шпангоута из композиционных материалов с разными схемами армирования при эксплуатационной нагрузке. Кроме того, требуется решение экспериментальных задач для подтверждения механических характеристик и верификации разработанных математических моделей шпангоута из ПКМ.

**Во второй главе** сформулирована математическая постановка задачи анизотропной теории упругости для неоднородного тела, решение которой позволяет определить НДС шпангоута авиационного двигателя при эксплуатационных нагрузках. В качестве силовых граничных условий в местах болтового соединения переднего фланца шпангоута с секциями решеток реверса задается система сосредоточенных сил (рисунок 2), обусловленных давлением газового потока на решетки. В качестве кинематических граничных условий в местах болтового соединения заднего фланца шпангоута с неподвижным кожухом реверсивного устройства задаются нулевые перемещения (рисунок 2). Расчетная схема шпангоута показана на рисунке 2.

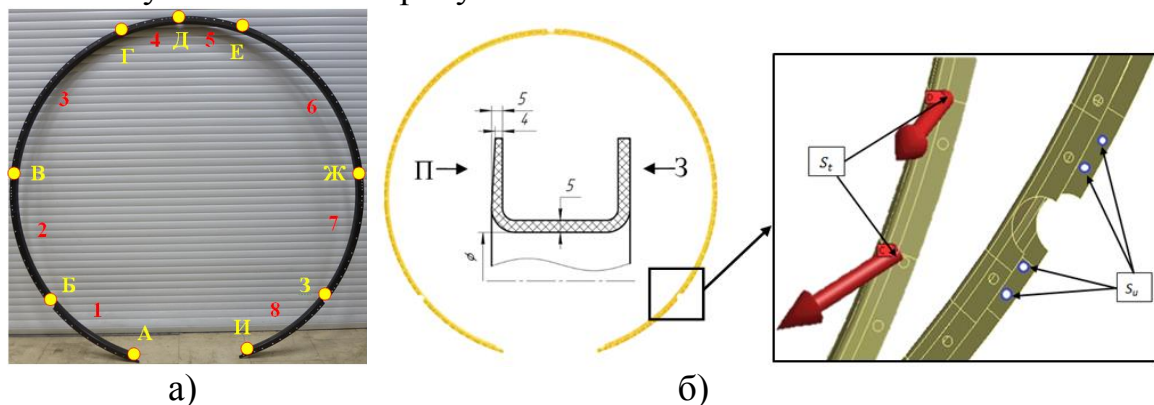


Рисунок 2 – Места закрепления (А-И) шпангоута в процессе эксплуатации и условное разделение его на сегменты (1-8) (а); расчетная схема шпангоута (б), где  $S_t$  – усилия, действующие на шпангоут,  $S_u$  – жесткое закрепление

В результате решения задачи МДТТ оценивалась прочность и жесткость шпангоута для восемнадцати комбинаций сосредоточенных сил, соответствующих шести условиям нагружения и трем режимам работы двигателя. В диссертации на основе сравнительного анализа максимальных и суммарных усилий рассматриваемых комбинаций сил для дальнейшего исследования выбраны шесть расчетных случаев, соответствующих одному режиму работы двигателя. В связи с небольшим различием значений максимальных суммарных усилий выбор наиболее нагруженного варианта проводился по результатам расчета НДС титанового шпангоута (рисунок 3).

Для выбранных комбинаций нагрузок методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Workbench проведен расчет и анализ НДС шпангоута из титанового сплава - прототипа композитного шпангоута. Установлено, что деформирование шпангоута носит изгибно-крутильный

характер и сопровождается отгибом переднего фланца (рисунок 3, а). Поле деформаций является неоднородным, наибольшие абсолютные деформации (до 0,78 мм) локализуются в одном или двух, для разных комбинаций нагрузок, сегментах шпангоута длиной  $\approx 300$  мм по окружности (рисунок 3, б). Максимальные напряжения по Мизесу (218,85 МПа) возникают в области болтового крепления заднего фланца, запас прочности шпангоута при этом  $\approx 2,5$ .

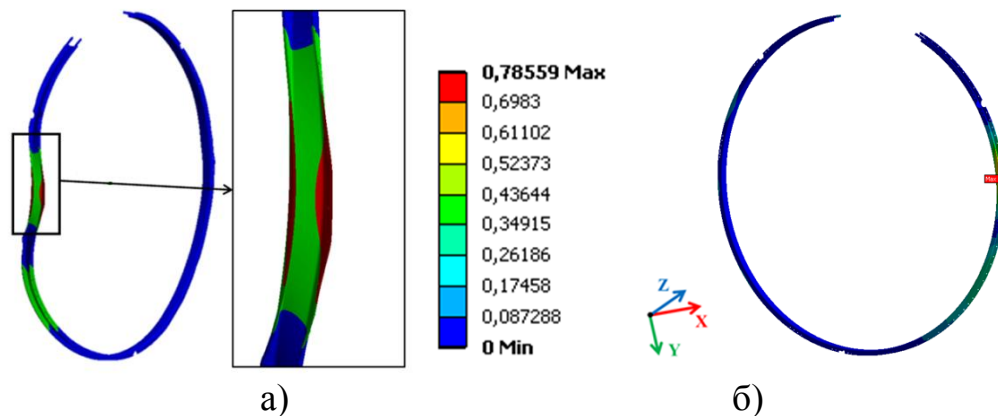


Рисунок 3 – Характер деформирования (а) и поля суммарных перемещений (б) в мм в титановом шпангоуте для расчетного случая с максимальной нагрузкой

На основе анализа НДС титанового шпангоута для различных комбинаций нагрузок предложена стратегия выбора рациональной схемы армирования композитного шпангоута, обеспечивающая повышения его жесткости в осевом направлении и снижение деформаций изгиба из плоскости и отгиба фланца.

**Третья глава** посвящена сравнительному исследованию влияния характеристик материалов слоев и схем армирования на жесткость и прочность композитного шпангоута при эксплуатационных нагрузках. По результатам исследования предложены рациональные схемы армирования шпангоута.

При проектировании композитного шпангоута одним из основных требований является обеспечение жесткости, не уступающей титановому аналогу, при максимальном снижении массы. В качестве научной гипотезы диссертационного исследования рассматривается возможность создания - выбора материалов слоев и схемы армирования, композитного шпангоута эквивалентного титановому прототипу по геометрическим размерам, прочности и жесткости при заданной системе эксплуатационных нагрузок. Дополнительными условиями являются технологичность и, по возможности, минимальная корректировка технологически и конструктивно отработанных схем армирования.

Поскольку жесткость большинства ПКМ уступает жесткости металлических сплавов, для создания шпангоута рекомендуется выбирать углепластики, обладающие наибольшим удельным модулем Юнга. В диссертационном исследовании проведено сравнение механических свойств нескольких типов углепластиков: текстильный равнопрочный среднемодульный, однонаправленный среднемодульный, однонаправленный высокомодульный. Механические свойства сравнивались по паспортным и литературным данным, для двух первых типов

углепластиков модули Юнга и пределы прочности вдоль армирования были определены экспериментально в процессе диссертационного исследования.

Учитывая изгибно-крутильный характер деформирования и дополнительные технологические условия, рациональная схема армирования шпангоута выбиралась на основе сравнения механических характеристик композиционного материала с несколькими вариантами модификации среднемодульным или высокомодульным однонаправленным углепластиком технологически отработанной квазиизотропной схемы  $[0p^\circ/90p^\circ/\pm 45p^\circ]$  на базе равнопрочного среднемодульного углепластика.

По известным соотношениям механики слоистых пластин были рассчитаны эффективные упругие свойства ПКМ с одиннадцатью предварительно назначенными схемами армирования, количество слоев которых принималось из условия равенства толщины (5 мм) композитного и титанового шпангоута. По результатам сравнения эффективных упругих характеристик этих ПКМ для последующего исследования НДС конструкции были выбрано шесть схем:  $[0p^\circ/90p^\circ/\pm 45p^\circ]$ ,  $[0во^\circ/90во^\circ/\pm 45во^\circ]$ ,  $[0p^\circ/0во^\circ/90во^\circ/\pm 45во^\circ]$ ,  $[0p^\circ/\pm 25во^\circ]$ ,  $[0p^\circ/90во^\circ/90во^\circ]$  и  $[0p^\circ/90во^\circ/90во^\circ/90во^\circ/90во^\circ]$  из комбинаций текстильного равнопрочного (р) и однонаправленного высокомодульного (во) углепластиков.

По разработанной в главе 2 модели проведен расчет и анализ НДС композитных шпангоутов с шестью схемами армирования и геометрическими размерами идентичными титановому прототипу. Сравнение НДС показало, что характер деформирования композитного шпангоута для всех вариантов армирования аналогичен титановому прототипу, запасы прочности по напряжениям в плоскости армирующих слоев ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$ ) превышает запасы прочности шпангоута из титанового сплава, однако получить жесткость эквивалентную титановому прототипу возможно только с применением высокомодульного углепластика.

По результатам проведенных расчетов композитного шпангоута с различными схемами армирования сделаны следующие выводы. Обеспечить жесткость шпангоута при изгибе из плоскости, эквивалентную титановому прототипу можно только с применением высокомодульного углепластика и использованием углов армирования  $\pm 45^\circ$  или  $\pm 25^\circ$ , усиление кольцевого армирования ( $90^\circ$ ) неэффективно. При этом можно полностью либо большей частью (80%) заменить обычный среднемодульный в традиционной квазиизотропной схеме  $[0p^\circ/90p^\circ/\pm 45p^\circ]$  на высокомодульный, однако, для практического использования рекомендуется две схемы армирования ( $[0p^\circ/\pm 25во^\circ]$ ,  $[0p^\circ/90во^\circ/90во^\circ]$ ), на 60% состоящие из высокомодульного углепластика, уступающие титановому прототипу по жесткости на 12-15%, но более экономично использующие высокомодульный материал.

В заключительном разделе главы проведено исследование межслоевой прочности композитного шпангоута при эксплуатационной нагрузке. В качестве объекта исследования выбран сегмент длиной 100 мм, соответствующий наиболее нагруженному участку композитного шпангоута, армированного равнопрочным и высокомодульным углепластиком по схеме  $[0_p^\circ/0_{во}^\circ/90_{во}^\circ/\pm 45_{во}^\circ]$ . Дополнительно,

было проведено исследование межслоевой прочности композитного шпангоута на основе равнопрочной углеродной ткани  $[0p^\circ/90p^\circ/\pm 45p^\circ]$ . Для сегмента сформулирована пространственная задача неоднородной анизотропной теории упругости. Построена геометрическая модель сегмента с явным описанием армирующих слоев. Граничные условия задавались в виде приложенных на торцах сегмента полей перемещений, полученных из решения задачи для полноразмерного шпангоута и характеризующих воздействие его отсеченной части на сегмент (рисунок 4,а). Задача решалась МКЭ в программном комплексе Ansys, дискретизация модели осуществлялась с помощью трехмерных 8-и узловых элементов Solid185.

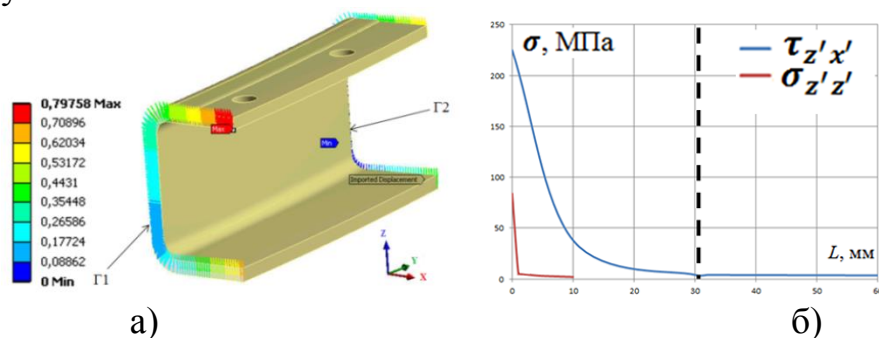


Рисунок 4 – Граничные условия (а) и график зависимости нормальных межслоевых  $\sigma_{z'z'}$  и межслоевых касательных  $\tau_{z'x'}$  напряжений от удаления от торца сегмента (б)

Анализ расчетов показал, что полученные поля напряжений и деформаций имеют максимальные значения вблизи границ сегмента и стремятся к постоянному значению при удалении от границы на расстояние от 2 мм до 30 мм (рисунок 4,б). Учитывая этот «краевой эффект», обусловленный модельными граничными условиями, для последующего анализа рассматривались поля напряжений и деформаций на расстоянии 30 мм от границы сегмента. В исследуемой области межслойные нормальные  $\sigma_{z'z'}$  и касательные  $\tau_{z'x'}$  напряжений достигают максимальных значений 1,1 МПа и 8,9 МПа соответственно в средних слоях (11-13 слои) зоны перегиба переднего фланца шпангоута, а межслойные касательные напряжения имеют максимум 8,9 МПа вблизи внешней поверхности (21-23 слои).

Оценка прочность шпангоута на расслоение по критерию Хашина с учетом взаимного влияния нормальных и сдвиговых межслойных напряжений показала, что коэффициенты запаса прочности при отгибе фланца при эксплуатационной нагрузке для композитных шпангоутов со схемами армирования  $[0p^\circ/0во^\circ/90во^\circ/\pm 45во^\circ]$  и  $[0p^\circ/90p^\circ/\pm 45p^\circ]$  равны 6 и 5 соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что межслоевая прочность композитного шпангоута незначительно зависит от используемой схемы армирования.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям особенностей деформирования и разрушения шпангоута из композиционных материалов. Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение деформационных характеристик шпангоута при изгибе из плоскости и оценка его жесткости и прочности при отгибе фланца, а также проверка адекватности разработанных математических моделей шпангоута. В диссертации разработаны методики контроля деформаций в режиме реального времени при механических испытаниях шпангоута и его сегментов с использованием системы волоконно-

оптических датчиков (ВОД). Опытный образец шпангоута и его сегменты были изготовлены в научно-образовательном центре авиационных композитных технологий ПНИПУ по разработанной технологии методом пропитки под давлением.

Испытания полноразмерного шпангоута в соответствии с разработанной методикой, проводились при закреплении его горизонтально в оснастке в местах эксплуатационных болтовых соединений (рисунок 2,а) и нагружении подвешенным грузом в точках действия максимальной осевой составляющей эксплуатационной нагрузки для всех заданных комбинаций нагружения. Расчеты НДС в главе 2 показали, что в сегменте шпангоута  $\approx 700$  мм между точками закрепления наблюдаются наибольшие деформации изгиба из плоскости (рисунок 3,а). В результате анализа НДС шпангоута при лабораторном нагружении, для контроля в эксперименте выбраны окружные деформации  $\epsilon_{\theta\theta}$  (рисунок 5) на поверхности шпангоута в зоне перегиба слоев переднего фланца на отрезке 20 мм от точки приложения нагрузки.

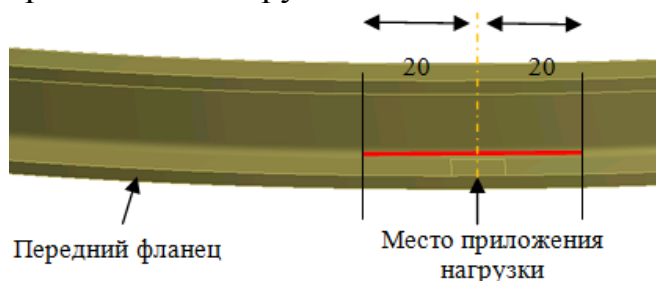


Рисунок 5 – Схема приклейки ВОД при испытании шпангоута на изгиб

По результатам испытаний сделано заключение об адекватности разработанной математической модели шпангоута, достоверности значений упругих характеристик композиционного материала в плоскости укладки слоев и достоверности полученных расчетных оценок жесткости композиционного шпангоута.

Испытания на отгиб фланца шпангоута проводились на сегментах длиной 100 мм, что соответствует размеру его наиболее нагруженного участка в эксплуатации. Разработана методика испытаний сегмента с двумя вариантами приложения нагрузки к верхнему фланцу в оснастке: через площадку свободного опирания и болтовое соединение (рисунок 6). Деформации сегмента при второй схеме испытания регистрировались с помощью ВОД, расположенных на задней поверхности полки шпангоута (рисунок 8).

Анализ результатов испытаний показал, что в эксперименте на отгиб фланца по первой схеме (рисунок 6,а) при нагрузке 1,27 кН в зоне перегиба слоев переднего фланца образуется первое расслоение (рисунок 7,а), соответствующее первому пику на диаграмме (рисунок 6,в). При этом сохраняется несущая способность, но изменяется жесткость образца. При последующем увеличении нагрузки в зоне перегиба слоев появляются множественные расслоения, сопровождаемые скачками на диаграмме нагружения и изменением наклона диаграммы (снижением жесткости образца). При достижении максимальной нагрузки происходит растрескивание зоны перегиба слоев (рисунок 7,б) и

Эксперимент проводился при увеличении нагрузки, с шагом 150 Н. В результате получена линейная зависимость зарегистрированных ВОД деформаций, которая свидетельствует об упругом деформировании шпангоута. Отличие расчетных и экспериментальных значений деформаций  $\epsilon_{yy}(\epsilon_{\theta\theta})$  составило не более



раскрытие сегмента шпангоута. В связи с отсутствием разрыва армирующих слоев несущая способность образца шпангоута частично сохраняется.

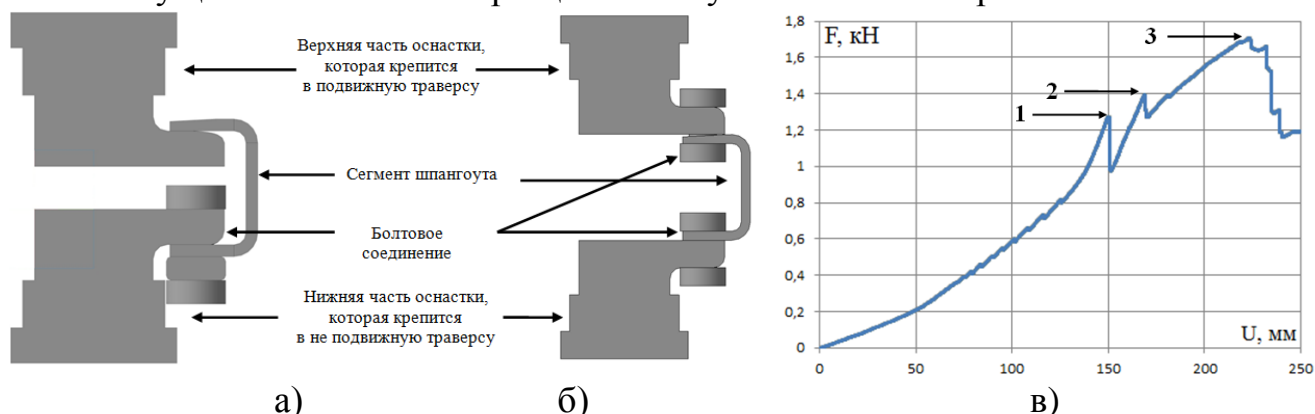


Рисунок 6 – Схемы испытаний шпангоута на отгиб фланца со свободным опиранием (а) и жесткой заделкой (б) и диаграмма деформирования сегмента шпангоута со свободным опиранием (в)

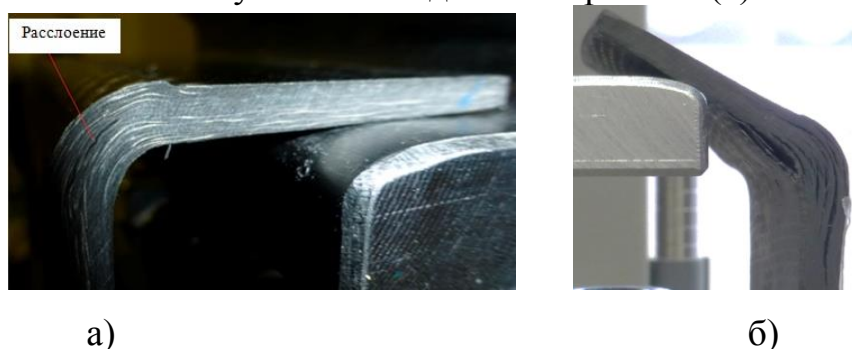


Рисунок 7 – Расслоение шпангоута при отгибе фланца в соответствии с точками на диаграмме (рисунок 6, в): 1 – первое расслоение при  $U=2,5$  мм,  $F=1,27$  кН (а), 3 – множественные расслоения с раскрытием трещин при  $U= 3,6$  мм,  $F= 1,7$  кН (б)

В эксперименте при болтовом соединении фланца сегмента шпангоута (рисунок 8,а) наблюдается большая жесткость образца в оснастке - первое расслоение так же в зоне перегиба слоев (рисунок 8,в) происходит при нагрузке 4 кН. После расслоения наклон диаграммы нагружения меняется, на ней появляется горизонтальная площадка (рисунок 8,а), при этом несущая способность образца сохраняется. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к развитию расслоений (рисунок 8,г) и уменьшению жесткости образца, а при достижении нагрузки 9 кН наблюдаются множественные расслоения в зоне перегиба слоев. Далее, отгиб переднего фланца сопровождается растяжением армирующих слоев и при нагрузке 12,4 кН (рисунок 8,а) происходит разрыв армирующих слоев с полной потерей несущей способности образца.

Графики деформирования, регистрируемые ВОД (рисунок 8,а) в режиме реального времени позволяют фиксировать деформации на поверхности образца и по скачкам сигнала - появление расслоений в его внутренних слоях на расстоянии не более 25 мм от места расположения датчика. Следует отметить, что после образования первого разрушения, датчики зафиксировали лишь незначительное изменение полей деформаций, а после образования множественных разрушений

происходит не только резкое изменение полей деформаций, но и изменяется характер деформирования - сжатие изменяется на растяжение (рисунок 8,а).

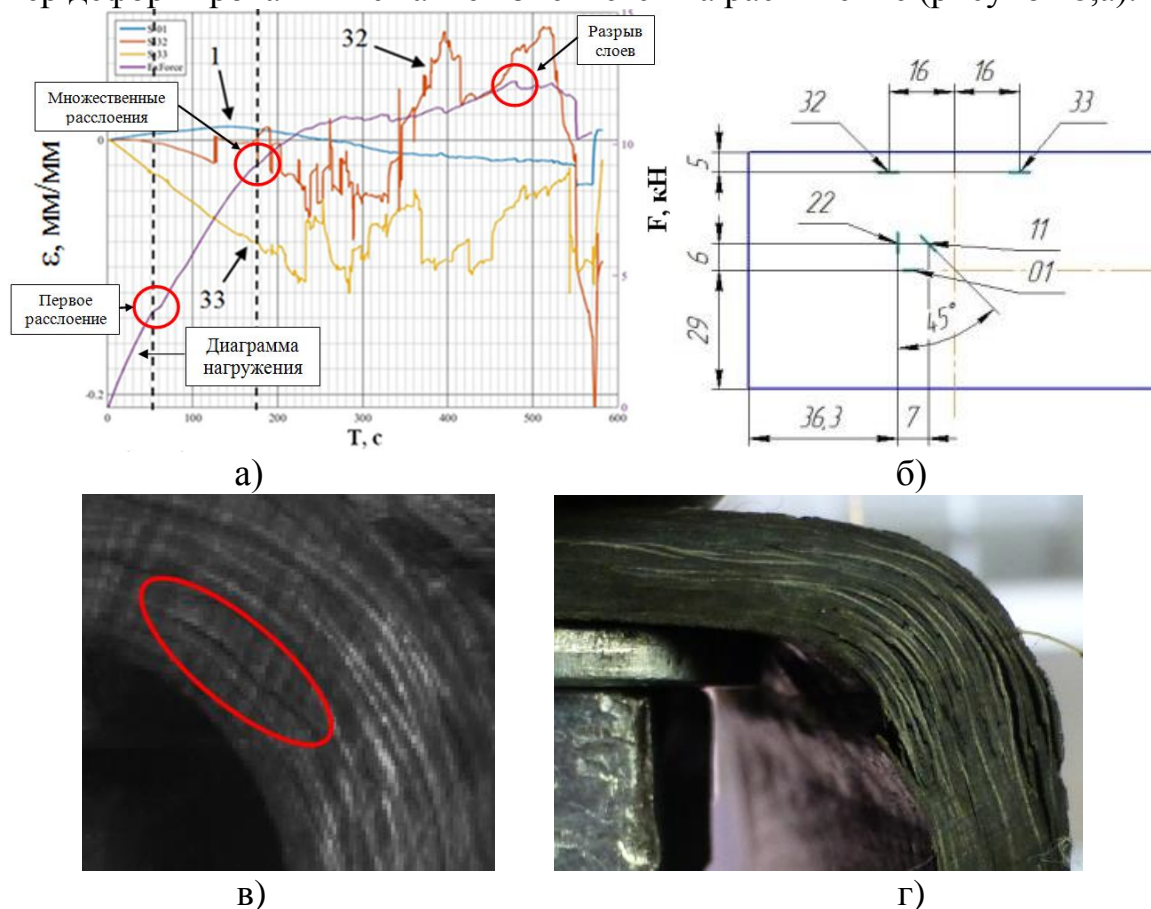


Рисунок 8 – Диаграмма нагружения, графики деформирования (а), схема наклейки ВОД (б), первое расслоения (в) и множественное расслоение (г) сегмента шпангоута во втором испытании (болтовое соединение)

В заключительном разделе четвертой главы проведено численное моделирование испытаний сегментов шпангоута на отгиб фланца. При моделировании первого испытания между оснасткой и верхним фланцем сегмента задавался контакт с коэффициентом трения 0,3, при моделировании второго испытания все контакты считались идеальными. В качестве граничных условий задавалось закрепление заднего и вертикальное перемещение переднего фланца шпангоута в соответствии со схемой испытаний.

При моделировании первого испытания вследствие нелинейности контактной задачи перемещение задавалось переменным: от 0 мм до 2,5 мм с шагом 0,1 мм. Моделирование показало, что при перемещении 2,2 мм в середине зоны перегиба слоев, где в эксперименте наблюдается расслоения (рисунок 7, а), возникают высокие (до 45 МПа) межслойные нормальные напряжения  $\sigma_{z'z'}$  (рисунок 9), которые по критерию Хашина соответствуют разрушению образца. Моделирование второго испытания показало, что критические межслойные нормальные напряжения  $\sigma_{z'z'}$  (до 45 МПа), соответствующие расслоению по критерию Хашина, возникают в середине зоны перегиба слоев при перемещении

1,6 мм. Межслойные касательные ниже межслойных нормальных напряжений и не превышают 17 МПа для первой схемы испытаний и 25 МПа – для второй.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов показало, что расчетные значения перемещений и интегральных усилий, соответствующих началу разрушения образца при моделировании первого испытания, на 12% и 15% меньше экспериментальных, а при моделировании второго - на 18,7% и 12% больше экспериментальных значений. Различие расчетных и экспериментальных значений может быть связано с отличие физико-механических характеристик композиционного материала в зоне перегиба слоев от значений, полученных на плоских образцах, вследствие отличия технологических параметров формования материала в этой зоне. Следует отметить, что различие может быть обусловлено и отличием реального положения образца в оснастке при проведении эксперимента вследствие отличия размеров и расположения площадок контакта и болтовых соединений от модельных граничных условий.

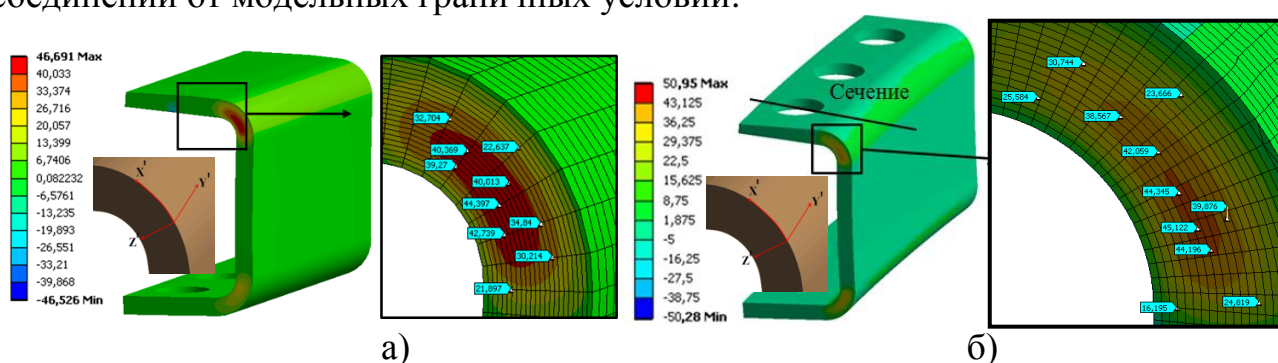


Рисунок 9 – Распределение межслойных нормальных напряжений  $\sigma_{z'z'}$  (МПа) в сегменте шпангоута при первой,  $u=2,2$  мм, (а) и второй,  $u=1,6$  мм, (б) схеме испытаний на отгиб фланца

Сравнение расчетных и экспериментальных, регистрируемых ВОД, значений деформаций на поверхности сегмента шпангоута показало, что в окружном направлении (датчики 01, 32 и 33, рисунок 8,б) отличие составляет не более 3%, а в осевом направлении и под углом 45 (датчики 22 и 11) отличие - больше чем в два раза. Это связано с появлением сдвиговых деформаций на поверхности образца при испытаниях вследствие его неравномерного закрепления по местам болтовых соединений в оснастке. Следует отметить, что по показаниям ВОД – скачкам и изменением наклонов регистрируемых графиков деформаций, можно идентифицировать появление расслоений во внутренней структуре композиционного материала шпангоута в процессе испытаний.

Таким образом, моделирование испытаний сегментов шпангоута на отгиб фланцев и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными подтвердили адекватность разработанных математических моделей и физико-механических характеристик композиционных материалов, используемых для расчета НДС, и достоверность полученных оценок прочности композитного шпангоута на расслоение при эксплуатационных нагрузках. Волоконно-оптические датчики позволяют в режиме реального времени регистрировать деформации в заданных точках композитной конструкции. При сопоставлении регистрируемых и



расчетных деформаций следует обращать внимание на точное моделирование условий закрепления и нагружения образца в оснастке.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования:

1. Проведен анализ типовых конструктивных вариантов и условий нагружения силовых шпангоутов для узлов авиационной и ракетной техники, показано, что особенностью деформирования шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя является изгиб из плоскости под действием высоких осевых нагрузок. Применение композиционных материалов в конструкции шпангоута при сохранении геометрических размеров, жесткости и прочности позволяет снизить его массу в 3 раза.

2. Проведен сравнительный анализ механических свойств и выбраны перспективные полимерные композиционные материалы и схемы армирования для обеспечения требуемых деформационных характеристик и запасов прочности исследуемой конструкции шпангоута реверсивного устройства при заданных вариантах эксплуатационных нагрузок: текстильный равнопрочный среднемодульный и однонаправленный высокомодульный углепластики.

3. Сформулирована постановка задачи механики деформируемого твердого тела и разработаны математические модели для расчета напряженно-деформированного состояния, оценки прочности и жесткости шпангоута из полимерных композиционных материалов.

4. Проведен расчет, сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния и получены оценки запасов прочности шпангоута реверсивного устройства (РУ) из титанового сплава и из композиционных материалов с различными схемами армирования при эксплуатационных нагрузках; по результатам анализа выбрана схема армирования композитного шпангоута РУ, обеспечивающая жесткость и запас прочности, эквивалентные титановому прототипу. Показано, что для повышения жесткости шпангоута при изгибе из плоскости и отгибе фланца в технологическую схему армирования необходимо включать слои высокомодульного углепластика с углами  $\pm 45^\circ$  или  $\pm 25^\circ$ , кольцевое армирование ( $90^\circ$ ) при этом является менее эффективным.

5. Разработаны методики экспериментального и расчетного исследования особенностей деформирования и разрушения опытных образцов и сегментов шпангоута из полимерных композиционных материалов. По результатам исследований опытного образца углепластикового шпангоута определена его жесткость при характерном виде деформирования – изгибе из плоскости, и его запасы прочности при характерном виде разрушения – расслоение при отгибе фланца. По результатам сравнения расчетных и экспериментальных данных проведена верификация разработанных математических моделей шпангоута и его сегмента.

6. Апробирована система волоконно-оптических датчиков, программно-аппаратный комплекс регистрации и расшифровки сигналов ВОД и методика их использования для определения деформаций конструкции из ПКМ при лабораторных испытаниях. Показано, что система ВОД на поверхности

конструкции регистрирует изменения деформированного состояния при появлении расслоений в композиционном материале. Систему волоконно-оптических датчиков и программно-аппаратный комплекс можно рекомендовать для дальнейшего использования при испытаниях конструкций из композиционных материалов и разработки систем их мониторинга.

7. Конструкция шпангоута авиационного двигателя с выбранной схемой армирования соответствует требуемым запасам прочности и жесткости, разработанные методики испытаний позволяют оценить его основные деформационные и прочностные характеристики, а разработанные математические модели позволяют с достаточной точностью прогнозировать механическое поведение шпангоута при эксплуатационных нагрузках.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

##### **Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе Scopus:**

1. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Пеленев К.А., Писарев П.В., Шипунов Г.С. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния композитного шпангоута авиационного назначения для разработки методики контроля с применением волоконно-оптических датчиков// Вестник ПНИПУ. Механика– 2018. – № 4. – С. 47-57. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.04

2. G. S. Shipunov, A. A. Voronkov, K. A. Pelenev, and K. N. Shestakova Calculation and experimental study of the stress-strain state of the power frame of an aviation engine equipped with fiber optic sensors// AIP Conference Proceedings 2053, 040091 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5084529>

3. Потрахов Н.Н., Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Осокин В.М., Писарев П.В., Пеленев К.А. Расчетно-экспериментальная оценка прочности сегмента композитного шпангоута с применением метода in-situ рентгеновского контроля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 1. – С. 118–133. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.08

4. Anoshkin A.N., KavaleroV B. V., Osokin V.M., Pelenev K.A., Tretyakov A.A. Experimental-Theoretical Study of Mechanical Behavior of Polymer Composite Construction When Developing a Method of Reliable Detection of Defects by Microfocus Radiography// AIP Conference Proceedings 2053, 030002 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5084363>

5. Шипунов Г.С., Воронков А.А., Пеленев К.А., Шестакова К.Н. Расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния силового шпангоута авиационной двигательной установки оснащенного волоконно-оптическими датчиками// В сборнике: механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. XII международная конференция : Сборник материалов. 2018. С. 448.