

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук, доцента, Голубева Василия Ивановича на диссертационную работу Севастьянова Филиппа Сергеевича на тему: «Закономерности развития повреждений в силовых элементах авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов при воздействии виброакустических нагрузок», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Диссертационная работа Севастьянова Филиппа Сергеевича посвящена актуальной проблеме обеспечения усталостной прочности авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) при воздействии виброакустических нагрузок. Исследование направлено на детальное изучение процессов зарождения и развития повреждений в ПКМ с учётом применения этих знаний для решения практических задач, связанных с сертификацией современных летательных аппаратов с композитной силовой конструкцией планера. В связи с этим исследование представляет значительный как фундаментальный, так и практический интерес для авиационной отрасли.

Актуальность научной работы

Актуальность темы обусловлена массовым внедрением ПКМ в авиастроении, что требует разработки новых методов оценки их долговечности под воздействием виброакустических нагрузок. Автор справедливо отмечает, что традиционные подходы, разработанные для металлических конструкций, не всегда применимы к композитам из-за их сложной структуры и особенностей поведения при динамических нагрузках. Работа восполняет этот пробел, предлагая комплексный расчётно-экспериментальный подход для анализа усталостных характеристик ПКМ.

Особого внимания заслуживает практическая значимость исследования. Разработанные методы были успешно применены при сертификации самолёта МС-21-300, что подтверждает их востребованность в реальных инженерных задачах. Кроме того, результаты работы могут быть использованы при проектировании перспективных летательных аппаратов, включая сверхзвуковые, где проблема акустической усталости стоит особенно остро.

Научная новизна и теоретические основы научной работы

Целью работы является исследование усталостного поведения и определение закономерностей развития повреждений в силовых элементах авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), подверженных воздействию акустических нагрузок с широким частотным спектром. Для достижения указанной цели автором поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики проведения расчётно-экспериментальных исследований механизмов зарождения и развития повреждений в элементах из ПКМ в условиях воздействия виброакустических нагрузок применительно к обеспечению акустической прочности конструкций гражданских самолётов в рамках сертификации.
2. Разработка и валидация математической модели для расчёта динамического отклика конструкции из ПКМ на случайное широкополосное виброакустическое нагружение с учётом наличия дефектов.
3. Определение характеристик усталости и допустимости повреждений на основе анализа закономерностей зарождения и развития повреждений в типовых концентраторах силовых элементов конструкций из ПКМ.

Научная новизна работы прямо следует из поставленных задач и выражена в следующих положениях:

1. Разработана методика проведения расчётно-экспериментальных исследований в обоснование акустической прочности силовых элементов авиационных конструкций из ПКМ на основе изучения механизмов зарождения и развития повреждений в типовых конструктивно-подобных образцах.
2. Разработана и валидирована расчётная модель определения динамического отклика на случайное широкополосное виброакустическое нагружение композитной силовой конструкции, содержащей расслоения от технологических дефектов и ударных повреждений.
3. Определены механизмы зарождения и развития повреждений в интегральном композитном соединении обшивки со стрингером при виброакустическом нагружении и получены уникальные экспериментальные данные по усталостным характеристикам типовых конструктивно-подобных образцов из ПКМ.

Методология исследования базируется на сочетании численного моделирования (метод конечных элементов в программной среде Abaqus/CAE) и экспериментальных методов, включая вибрационные

испытания и неразрушающий контроль (вибротермография, томография, ультразвуковой контроль). Такой комплексный подход обеспечивает высокую достоверность результатов.

Результаты и их интерпретация

1. Математическая модель

Автор детально описывает разработанную им математическую модель, основанную на известных уравнениях, используемых для решения статических и динамических задач. Этапы проведённого моделирования включают модальный анализ, расчёт случайного отклика и анализ влияния дефектов.

Численная реализация модели выполнена методом конечных элементов с использованием ПО Abaqus/CAE, при этом важно отметить, что результаты расчёта валидированы экспериментально, а погрешность составила менее 15% для деформаций и ускорений, что является высоким уровнем точности для решения подобных задач.

2. Экспериментальная часть

На основе испытаний 20 Т-образцов, включая образцы с ударными повреждениями, построены кривые усталости для образца композитного соединения, демонстрирующие значительное снижение ресурса при наличии дефектов.

Применение методов неразрушающего контроля, в том числе вибротермографии и томографии, а также мониторинга резонансной частоты образца, позволило выявить скрытые повреждения и проследить их развитие в реальном времени. Это важное достижение, так как традиционные методы часто не обнаруживают внутренние расслоения на ранних стадиях.

3. Практическое применение

Результаты работы использованы при сертификации самолёта МС-21-300 по условиям акустической усталости. Автор показывает, как данные, полученные по испытаниям типовых образцов композитных соединений, масштабируются на натурные агрегаты, что подтверждает эффективность и практическую значимость предложенного подхода.

Замечания к тексту диссертационной работы

Несмотря на высокий уровень работы, можно выделить несколько аспектов, требующих дополнительного внимания:

1. Среди ограничений предложенной автором математической модели указано условие линейного отклика конструкции, что не позволяет учитывать нелинейные эффекты при высоких уровнях нагружения.

2. Упрощённое моделирование контакта между слоями (идеально жёсткие связи) может недооценивать влияние межслоевых напряжений.

3. В работе нет обоснования выбора типа конечных элементов и не описано исследование влияния их типа на результаты расчёта.

4. В работе не описано влияние размера конечно-элементной сетки на результаты расчёта динамического отклика.

5. В работе нет прямого сравнения с результатами аналогичных исследований или хотя бы указания на то, что для такого сравнения недостаточно данных. Хотя автор ссылается на справочники ESDU, более детальное сравнение с современными исследованиями могло бы усилить позиционирование новизны.

Заключение

Следует отметить, что приведённые замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку проделанной работы и полученных научных результатов.

Диссертационная работа Ф.С. Севастьянова представляет собой хорошо структурированный и законченный научный труд, который вносит значительный вклад в область исследования усталостной прочности авиационных конструкций из ПКМ. Материалы диссертации опубликованы в ведущих научных изданиях из списка Высшей аттестационной комиссии (ВАК РФ), а также неоднократно проходили апробацию на научных мероприятиях.

К основным достоинствам работы можно отнести следующее:

- Комплексный подход, сочетающий расчётные и экспериментальные методы.
- Практическую применимость результатов для сертификации летательных аппаратов.
- Получение уникальных экспериментальных данных в результате применения разработанной методики исследований.
- Использование современных методов неразрушающего контроля.

Диссертационная работа Севастьянова Ф.С. выполнена на актуальную тему, базируется на широко применяемых в науке методах и собственных уникальных экспериментальных данных, содержит обоснованные положения о научной новизне и выводы. Результаты диссертационной работы имеют высокую практическую значимость, подтверждённую их применением в рамках сертификационных работ для самолёта транспортной категории.

Работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а соискатель Севастьянов Филипп Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата

технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н., доцент,
профессор кафедры информатики и
вычислительной математики федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский физико-
технический институт (национальный
исследовательский университет)»


(подпись)

Голубев Василий Иванович

Контактные данные:

e-mail: w.golubev@mail.ru, тел.: +7 (926) 457-27-07

Место работы:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

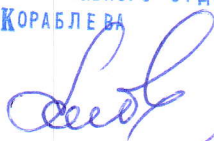
117303, г. Москва, ул. Керченская, д. 1А, корп. 1

e-mail: info@mipt.ru

тел.: +7 (495) 408-45-54

факс: +7 (495) 408-68-69

Подпись РУКИ
ЗАВЕРЯЮ:
Администратор канцелярии
Административного отдела
О.А. КОРАБЛЕВА



18.09.25



ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,
Никитина Ильи Степановича
на диссертацию Севастьянова Филиппа Сергеевича «Закономерности развития повреждений в силовых элементах авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов при воздействии виброакустических нагрузок», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

1. Актуальность темы исследования

Рост доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции современных летательных аппаратов и недостаточная изученность усталостного поведения конструкций из ПКМ при высокочастотных акустических нагрузках с широким диапазоном частот создают необходимость проведения исследований по данной теме.

Наряду с научным интересом актуальность таких исследований также имеет интерес практический, связанный с сертификацией гражданских самолётов в соответствии с требованиями параграфа 25.571(d) Авиационных Правил (АП-25). В качестве одного из таких объектов можно выделить самолёт МС-21, который имеет в своей конструкции элементы из ПКМ и который проходил сертификацию по всем актуальным требованиям к прочности авиационных конструкций.

Автор диссертационной работы Севастьянов Ф.С. принимал участие в сертификационных работах самолёта МС-21, а материалы его диссертации использовались разработчиком воздушного судна, о чём свидетельствует соответствующий Акт о внедрении результатов.

2. Научная новизна результатов диссертации

Научная новизна заключается в разработанной лично диссертантом методике расчётно-экспериментальных исследований закономерностей развития повреждений в конструкциях ПКМ, сочетающей расчётные методы определения динамического отклика конструкций на виброакустическое воздействие и экспериментальные методы исследования усталостного поведения конструкции из ПКМ, в том числе методы проведения испытаний на усталость и методы неразрушающего контроля (вибротермографию, томографию, ультразвуковой контроль).

Автором создана математическая модель для расчёта динамического отклика композитных конструкций с учётом наличия технологических дефектов, обеспечивающей погрешность результатов расчётов менее 15%, что показано с использованием экспериментальных данных.

Кроме того, на основе полученных результатов испытаний Т-образных композитных образцов, автором выявлены и описаны уникальные закономерности развития повреждений в ПКМ, в том числе построены кривые усталости для типового соединения и определено влияние ударных нагрузок (снижение долговечности в 300 раз при энергии удара 5 Дж).

По материалам диссертационной работы сделаны 4 публикации в изданиях ВАК и 7 докладов на конференциях, включая международные.

3. Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость заключается в развитии методов исследования механики разрушения применительно к ПКМ, включая моделирование влияния расслоений и ударных повреждений.

Практическая значимость заключается в использовании материалов диссертационной работы разработчиком самолёта МС-21 при обосновании акустической прочности элементов конструкций из ПКМ. Кроме того, полученные экспериментальные данные могут послужить основой для создания отечественной базы данных усталостных характеристик ПКМ, аналогов которой (для вибрационных испытаний) ранее не существовало.

4. Структура и содержание работы

Диссертация является структурно завершённым научным трудом и включает:

1. Введение, в котором описана актуальность исследования, степень разработанности темы и формулируются цель и задачи работы.
2. Главу 1, в которой приведён анализ мировой практики обеспечения усталостной прочности конструкций из ПКМ, а также обоснование выбора Т-образного образца в качестве объекта исследований.
3. Главу 2, описывающую разработку и валидацию КЭ-модели для расчёта динамического отклика конструкции из ПКМ на виброакустическое воздействие.
4. Главу 3, в которой приведены результаты экспериментальных исследований и на их основе сформулированы закономерности развития повреждений в типовом композитной соединении обшивки и стрингера.
5. Главу 4, в которой описана роль проведённых автором исследований применительно к сертификации самолёта МС-21.
6. Заключение, в котором обобщены основные результаты решения поставленных в диссертационной работе задач.
7. Список использованных источников, который включает 68 наименований по теме исследований.
8. Приложения, включающие образец программы испытаний образцов и акты внедрения результатов работы.

Объём работы (187 страниц, 86 рисунков, 21 таблица) соответствует требованиям ВАК. Логика изложения убедительна, а выводы подтверждены расчётами и экспериментами.

5. Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность результатов обеспечена:

- Сопоставлением расчётных и экспериментальных данных (погрешность $\leq 15\%$).
- Использованием широко известных методов исследований (например, МКЭ, вибротермография, томография, ультразвуковой контроль).
- Валидацией на реальных агрегатах (испытания агрегатов самолёта в реверберационной камере РК-1500).

6. Замечания и рекомендации

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Диапазон частот акустических нагрузок 50...1550 Гц, в котором проведены исследования, не перекрывает весь акустический диапазон, в том числе и применительно к нагрузкам, встречающимся в эксплуатации самолётов транспортной категории. Для всестороннего исследования желательно расширить этот диапазон до частот порядка 20000 Гц.
2. Проведённые исследования на Т-образных образцах не учитывают влияние статической подгрузки на усталостные характеристики композитного соединения.
3. Приведённое на рисунке 3.5 сравнение усталостных характеристик с аналогичными импортными образцами не является репрезентативным с точки зрения построения каких-либо закономерностей, а может использоваться только для иллюстрации близости значений величин.
4. Недостаточно раскрыт вопрос масштабирования результатов с Т-образных образцов на полноразмерные агрегаты (например, каким образом на основе данных по образцам определяется демпфирование для конструкции).
5. Не затронуты вопросы саморазогрева образцов, являющегося широко распространённым явлением при усталостных вибрационных испытаниях, а также влияния температуры на усталостные характеристики образца.

Приведённые замечания не снижают ценности работы, но могут быть учтены автором в дальнейших исследованиях по выбранной теме.

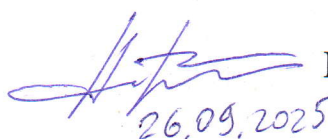
6. Заключение

Диссертация Севастьянова Ф.С. представляет собой законченное научное исследование, в котором решена актуальная задача обеспечения

акустической прочности композитных авиационных конструкций. По научной новизне, актуальности темы, личному вкладу автора, теоретической и практической ценности, а также по достоверности полученных результатов работа соответствует всем требованиям ВАК, а её автор является квалифицированным специалистом, освоившим методы проведения как расчёта, так и эксперимента, а также интерпретации и анализа полученных данных для выявления закономерностей физических явлений, стоящих в основе усталости композиционных материалов.

Считаю, что диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ и соответствует критериям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор Севастьянов Филипп Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н.,
директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
автоматизации проектирования
Российской академии наук


26.09.2025

Никитин
Илья Степанович

Контактные данные:

e-mail: i_nikitin@list.ru, тел.: +7 (916) 637-70-28

Место работы:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
автоматизации проектирования Российской академии наук»

123056, город Москва, 2-я Брестская ул., д.19/18

e-mail: icad@icad.org.ru

тел.: +7 (499) 250-02-62

Подпись Никитина Ильи Степановича заверяю:

Начальник отдела кадров
(должность)

(подпись)

Турчаков Т.В.
(Ф.И.О.)

