

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Разработанные в настоящее время методы и подходы к проблеме оценки прочности композитных конструкций с дефектами в виде расслоений имеют существенные ограничения (за счёт вводимых допущений). Кроме того, формулировки наиболее общей постановки задачи о зарождении и распространении расслоений, предлагаемые различными авторами, достаточно сильно разнятся в зависимости от использования тех или иных прикладных теорий и не учитывают ряд важных факторов.

Применение численных методов к решению упомянутой задачи является одним из наиболее эффективных и целесообразных подходов, особенно при рассмотрении реальных композитных конструкций. Однако в этом случае также открытым остается вопрос об описании напряжённо-деформированного состояния

конструкций из композиционных материалов и их элементов при наличии расслоений и прогнозировании их роста. Таким образом, задача о разработке наиболее эффективного и комплексного подхода к решению поставленной задачи является актуальной и важной.

Одной из наиболее приоритетных задач на данном этапе развития современного авиа- и космического машиностроения является повышение срока службы, безопасности эксплуатации изделий и эффективности их использования. Данные показатели определяются надёжностью изделий, которая была заложена при их проектировании и производстве, объективным и обоснованным выбором методов расчёта конструкций и их элементов. Рассматривая надёжность как вероятность безотказной работы, следует определиться относительно состояния конструкции – бездефектное или дефектное. В первом случае количественная оценка надёжности сводится к определению вероятности непревышения эксплуатационной нагрузки несущей способности.

Существующая сегодня нормативная база в авиационной и ракетно-космической отрасли на этапе проектирования регламентирует коэффициенты

безопасности, назначаемые на основании многолетнего опыта проектирования и эксплуатации техники. Однако, ввиду создания принципиально новых изделий из современных и перспективных материалов, более логичным является расчётное обоснование данных коэффициентов с учётом стохастической природы внешних воздействий и несущей способности конструкций. Такой подход позволяет на

более точно и полно учесть влияние различных случайных величин на прочность и надёжность конструкций. На этапе проектирования из-за

повышенного разброса физико-механических свойств логичным представляется задание дополнительно го коэффициента безопасности. В настоящее время разработанные подходы для обоснованного определения и регламентирования данных коэффициентов представлены в литературе лишь для традиционных конструкционных материалов и носят частный характер.

В отечественной и зарубежной литературе проблеме оценки надёжности конструкций с трещиноподобными дефектами из традиционных конструкционных материалов посвящено достаточно большое количество работ. Все они базируются на методах и подходах общей теории надёжности. Однако для композитных конструкций с расслоениями таких исследований крайне мало. Предложенные в настоящее время подходы носят, как правило, частный характер, и они не получили широкого распространения в инженерной практике расчётов. В большинстве случаев оценка надёжности как вероятности безотказной работы при наличии дефектов проводится при рассмотрении лишь одного дефекта. Однако более важным и интересным на практике оказывается рассмотрение некоторого ансамбля дефектов различной локализации и размеров.

Степень разработанности.

Вопросами практического применения композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов и отработки их прочности занимались следующие организации: ВИАМ, КАИ, УГАТУ, ПНИПУ, ХАИ, ЦИАМ, ЦАГИ. Данному вопросу посвящены работы учёных Аношкина А.Н., Жернакова В.С., Жирнова А.Д., Каблова Е.Н., Каримбаева Т.Д., Никитина С.Н., Ножницкого Ю.А., Соловьёва П.В., Старцева О.Б., Павлова В.П. Основополагающий вклад в современное со-

стояние теории расчёта прочности, долговечности и надёжности композитных конструкций и их элементов с расслоениями внесли такие отечественные учёные как Алфутов Н.А., Бидерман В.Л., Биргер И.А., Болотин В.В., Вольмир А.С., Гольдштейн Р.В., Мурхазанов Г.Х., Парцевский В.В., Перелмутер М.Н., Работнов Ю.Н., Тарнопольский Ю.М., Черепанов Г.П., Щугорев В.Н. В последние два десятилетия активно над этой проблемой работают Бохоева Л.А., Дамдинов Т.А., Качанов Л.М., Матвиенко Ю.Г., Перов Ю.Ю., Разумовский И.А., Тимонин А.М., Чермошнцева А.Н.

Из зарубежных учёных, внесших значительный вклад в исследования проблемы прочности композитов с расслоениями следует отметить Babcock C. D., Bottega W.J., Chai H., Chan W.S., Davidson B.D., De Morais A., De Moura M., Krueger R., Rickards, Turon A. Waas A. M., Xie, J.

Вопросу количественной оценки надёжности конструкций при отсутствии дефектов посвящены фундаментальные работы Алексева А.С.,

Волко ва Л.И., Биргера И.А., Бойцова Б.В., Вейбулла В., Вольмира А.С., Когаева В.П., Кузнецова А.А., Панасюка В.В., Ржаницина А.Р., Селихова А.Ф., Серенсена С.В. в которых изложены методы и подходы к оценке прочности материалов, дейст вующих нагрузок, расчета надежности и долговечности конструкций.

Большой вклад в развитие науки о надёжности внесли учёные Белова В.В, Гнеденко Б.В., Горский Л.К., Рудаков В.Б., Радченко В.П., Тарасов Ю.Л. Цель диссертационного исследования – разработка комплексного подхода к расчётно-экспериментальной оценке прочности и надёжности композитных элементов конструкций с учётом дефектов в виде расслоения при квазистатических и циклических нагрузках.

Объектом настоящего диссертационного исследования являются процессы деформирования конструкций из многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов с расслоениями и процессы роста расслоений в структуре материала при действии квазистатических и циклических нагрузок.

Предметом исследования являются композиционные материалы с дефектами в виде расслоений.

Для достижения цели диссертационного исследования необходимо решить следующие задачи:

1) обосновать минимально необходимый объём исходных данных для расчёта напряжённо-деформированного состояния композитных конструкций с расслоениями и оценки их склонности к росту, разработать рекомендации по использованию современной нормативной базы для проведения механических испытаний многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов;

2) провести комплексные экспериментальные исследования физико-механических свойств современных многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов и величин их вариации, провести экспериментальные исследования трещиностойкости многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов по типу расслоения;

3) разработать методику численного моделирования деформирования и разрушения композитных элементов конструкций с расслоениями при квазистатических и циклических нагрузках с учётом получаемых экспериментальных данных;

4) разработать методику определения величины дополнительного коэффициента безопасности для композитных конструкций, обусловленного повышенным разбросом физико-механических свойств многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов;

5) разработать методику количественной оценки вероятности безотказной

работы композитных конструкций и их элементов с расслоениями с учётом полу чаемых экспериментальных данных и с использованием методики численного моделирования деформирования и разрушения композитных элементов конструкций с расслоениями.

#### Методы исследования

Экспериментальные исследования проводились на современном испытательном оборудовании с применением высокоточных приборов снятия и обработки данных. Численное решение задачи о распространении расслоений при квазистатических и циклических нагрузках проводилось в программном продукте САЕ моделирования ANSYS, реализующем метод конечных элементов, на основе оригинальных подходов и алгоритмов моделирования и разработанных программ макросов. Нормирование дополнительного коэффициента безопасности и оценка вероятности безотказной работы проводились на основе методов общей теории надёжности технических систем. Решение задачи статистической динамики выполнялось с использованием метода статистических испытаний (метода Монте Карло). Обработка результатов экспериментальных исследований и оценка вероятности безотказной работы выполнялись с помощью аппарата математической статистики. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения проводилась с применением критериев согласия.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основании подходов механики композиционных материалов обоснован минимально необходимый набор исходных данных для расчётов напряжённо деформированного состояния конструкций из многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов с расслоениями и оценки склонности расслоений к росту.

2. На базе проведенного комплексного экспериментального исследования получены физико-механические свойства современных типов многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов и характеристики их трещиностойкости по типу расслоения, позволяющие решать задачу об оценке прочности композитных конструкций с расслоениями и склонности расслоений к росту.

3. Разработана методика численного моделирования композитных многослойных конструкций с расслоениями, позволяющая решать задачу об оценке прочности композитных конструкций с расслоениями и склонности расслоений к росту при квазистатических и циклически изменяющихся нагрузках.

4. Предложена методика определения дополнительного коэффициента безопасности, задаваемого на этапе проектирования композитных конструкций за счёт повышенного разброса физико-механических свойств многослойных полимерных волокнистых композиционных материалов.

5. Впервые разработана методика количественной оценки вероятности безотказной работы композитных конструкций при наличии ансамбля расслоений при действии случайно меняющихся нагрузок, позволяющая учитывать совместное влияние на несущую способность группы дефектов.

На защиту выносятся

– методика численного моделирования композитных многослойных конструкций, содержащих расслоения при квазистатических и циклических нагрузках, включающая:

а) алгоритм численного моделирования композитных многослойных конструкций, содержащих расслоения при квазистатических и циклических нагрузках; б) алгоритм моделирования процесса роста расслоения в композитной конструкции при действии циклически изменяющихся нагрузок;

– методика определения дополнительного коэффициента безопасности, обусловленного повышенным разбросом физико-механических свойств композиционных материалов;

– методика количественной оценки вероятности безотказной работы композитных конструкций при наличии ансамбля расслоений при стохастическом внешнем воздействии;

– результаты комплексных экспериментальных исследований физико-механических свойств и характеристик трещиностойкости полимерных композиционных волокнистых материалов, позволяющие решать задачу об оценке прочности композитных конструкций с расслоениями и склонности расслоений к росту.

Практическая значимость

1. Теоретически обоснован минимально необходимый объём физико-механических характеристик многослойных полимерных волокнистых материалов, необходимых в качестве исходных данных на этапе проектирования композитных конструкций и их элементов, а также для расчёта склонности расслоений

к росту.

2. Полученные результаты комплексного экспериментального исследования являются минимальным объёмом физико-механических характеристик для решения задачи оценки прочности композитных конструкций, выполненных из двух типов современных композиционных материалов (однонаправленного и тканого углепластика), с расслоениями и склонности расслоений к росту. Выработаны практические рекомендации по использованию нормативной базы по испытаниям, а также по трактовке некоторых получаемых результатов.

3. Разработана методика численного моделирования, позволяющая проводить оценку прочности композитных конструкций с расслоениями и

склонности рас слоений к росту в многослойных полимерных композиционных материалах с учё том геометрической и физической нелинейностей при квазистатических и циклических нагрузках на этапе проектирования и эксплуатации и разрабатывать на ос нове получаемых результатов меры по повышению прочности.

4. Разработанная методика количественной оценки надёжности конструкций из многослойных полимерных волокнистых материалов при наличии расслоений позволяет получать количественную оценку вероятности отказа во время эксплуатации и на этапе проектирования.

5. Разработанная методика определения коэффициентов безопасности на ос нове данных экспериментальных исследований о физико-механических свойствах композиционных материалов и их вариаций позволяет разрабатывать новые конструкции с заданным уровнем надёжности.

Разработанные методики и модели были использованы при выполнении базовой части государственного задания № 2738 (№ гос. рег. 114120870164) «Разработка и обоснование теоретических и экспериментальных методов обеспечения прочности и надёжности авиационных конструкций из современных и перспективных композиционных материалов», 2014-2015г.

Теоретическая значимость.

1. На базе методов механики композиционных материалов обоснован минимальный объём физико-механических характеристик композиционных материалов, необходимый для корректного и точного решения задачи о прочности композитных конструкций с расслоениями и оценки склонности расслоений к росту. 2. Разработана методика численного моделирования задачи о зарождении и росте расслоений в композитных конструкциях в геометрически и физически не линейной постановке, учитывающая контактное взаимодействие слоёв композиционного материала и характеристики когезионного слоя, получаемые на основе экспериментальных исследований. В рамках методики разработан алгоритм по учёту накопления усталостных повреждений перед фронтом расслоения при циклическом нагружении.

3. Разработана методика определения дополнительного коэффициента безопасности, учитывающая повышенный разброс физико-механических свойств композиционных материалов.

4. Разработана методика количественной оценки надёжности композитных конструкций при наличии ансамбля расслоений, учитывающая стохастический характер внешних воздействий и параметров поведения системы.

Достоверность основных положений, результатов и выводов основывается на стандартных методах и сертифицированных устройствах испытаний материалов, применении современных подходов и методов численного решения, а

также современного программного обеспечения, проведении решения тестовых задач, согласовании результатов численных расчётов по предложенным методам с экспериментальными данными автора, а также данными других авторов. Апробация работы.

Основные положения работы и полученные результаты апробированы при выступлении на научно-технических и отраслевых конференциях: - X Международная научно-техническая конференция "Информационные технологии в науке, технике и образовании" (Пицунда, 2014г.); - XX Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов (г.Королёв, 2014г., РКК "Энергия");

- III Научно-техническая конференция молодых специалистов «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» (г. Железногорск, 2014г., ИСС М.Ф. Решетнёва);

- Международная конференция "7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST2015)" (Стамбул, 2015г.); - Всероссийская молодежная научно-практическая конференция "Космодром "Восточный" и перспективы развития российской космонавтики" (г. Благовещенск, 2015г.)

- Международная конференция "11-th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences" (Ла-Рошель, 2016г.); - V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием "Актуальные проблемы ракетно-космической техники" ("V Козловские чтения") (Самара, 2017г., "АО РКЦ "Прогресс");

- Международная конференция "12-th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences" (Ереван, 2018г.); - Международная конференция "9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST2019)" (Стамбул, 2019г.). Публикации.

По теме диссертационного исследования опубликовано 12 работ, в том числе 3 доклада на конференциях (3 тезиса) и 8 статей, из них 4 индексируются базами данных Scopus/WOS, 4 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК Минобрнауки России..

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 215 наименований и 2 приложений. Объём работы составляет 231 страницу, в том числе 107 рисунков и 40 таблиц.