

На правах рукописи



Турбин Николай Васильевич

**МЕТОД РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЖИВУЧЕСТИ
НЕСУЩИХ ПАНЕЛЕЙ ПЛАНЕРА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С НЕНОРМИРУЕМЫМ УДАРНЫМ ПОВРЕЖДЕНИЕМ
ПРИ ДЕЙСТВИИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК СЖАТИЯ**

Специальность 2.5.14.

«Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Селюгин Сергей Васильевич**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Терехин Александр Васильевич**
доктор технических наук, начальник лаборатории АО «ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина», Калужская обл., г. Обнинск

Смотров Андрей Васильевич
кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории №45 НИО-3 НИЦ «Прочность» Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского» ЦАГИ, МО, г. Жуковский

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»), МО, г. Хотьково

Защита диссертации состоится «03» декабря 2026 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.09 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: г Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке:
https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=189084

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4. Ученый совет МАИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.327.09, к.т.н, доцент



Д.Ю. Стрелец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Доля композиционных материалов при изготовлении планеров современных летательных аппаратов возрастает. В процессе проектирования элементов конструкций летательных аппаратов важное место занимает анализ эксплуатационной живучести, характеризующей свойства конструкции и способы обеспечения безопасности конструкции по критерию достижения требуемой прочности. В ходе анализа эксплуатационной живучести изучается возможность наличия незначительного повреждения при одновременном обеспечении безопасности в процессе роста повреждения или разрушения элемента конструкции.

Интерес представляет определение длительности роста повреждения - количества циклов нагрузки, вызывающего рост повреждения от определенного начального размера до предельно допустимого граничного размера. Длительность роста зависит от скорости роста повреждения, которая определяется скоростью высвобождения упругой энергии деформации или интенсивностью напряжений при действии циклов нагрузки.

В ходе анализа элементов конструкции из композиционных материалов исследуется пакет: укладка ориентированных композитных монослоев в одно целое. В процессе эксплуатации возникает различных размеров межслоевое расслоение - отсутствие соединения между слоями в многослойном материале. Часть композитного пакета, отклеившаяся вследствие расслоения, называется отслоением.

Количество летательных аппаратов с новыми, сложными и ответственными конструкциями из полимерных композиционных материалов (ПКМ) продолжает увеличиваться. Требуется развитие универсальных аналитических и численных методов, на основе применения которых обеспечивается прочность объектов авиационной техники. В авиационной отрасли отсутствует методика расчетной оценки эксплуатационной живучести элементов конструкции из композитов с ударным повреждением. Типовым объектом анализа эксплуатационной живучести является композитная верхняя панель кессона крыла с ударными повреждениями обшивки и мест соединения стрингеров с обшивкой. Доказательство эксплуатационной живучести композитной конструкции достигается демонстрацией отсутствия роста нанесенных повреждений и сохранения остаточной прочности конструкции после действия стационарных циклов нагрузки в ходе испытаний агрегатов (Рисунок 1). Применение метода позволит оценить характеристики роста ударного повреждения в конструкции на ранних стадиях проектирования и уточнить рабочие схемы укладки композитных элементов конструкций.

Рассматриваются пять категорий повреждения в зависимости от требуемого уровня сохранения остаточной прочности, контролепригодности, интервала между осмотрами, условий появления повреждения и очевидности события, вызывающего повреждение. Классификация повреждений ПКМ представлена на Рисунке 2. Категории 1 и 2 повреждений относятся к малозаметным повреждениям. В диссертации рассмотрены повреждения первых трех категорий.

Механика ПКМ рассматривается в работах Васильева В.В., Алфутова Н.А., Амбарцумяна С.А., Болотина В.В., Дудченко А.А., Бакулина В.Н., Полилова А.Н., Селюгина С.В., Barbero E.J.

Теоретическими исследованиями процессов роста повреждений в ПКМ при циклических нагрузках занимались Дудченко А.А., Лурье С.А., Стрижиус В.Е., Работнов Ю.Н., Болотин В.В., Парцевский В.В., Полилов А.Н., Димитриенко Ю.И., Бабаевский П.Г., Салиенко Н.В.

Экспериментальное исследование живучести образцов и элементов из ПКМ при циклических нагрузках отражены в работах Вильдемана В.Э., Ушакова А.Е., Трунина Ю.П., Смотровой С.А., Смотров А.В., Сапожникова С.Б., Староверова О.А., Калинина А.Г., Pascoe J.-A, Alderliesten R., Irving.P.

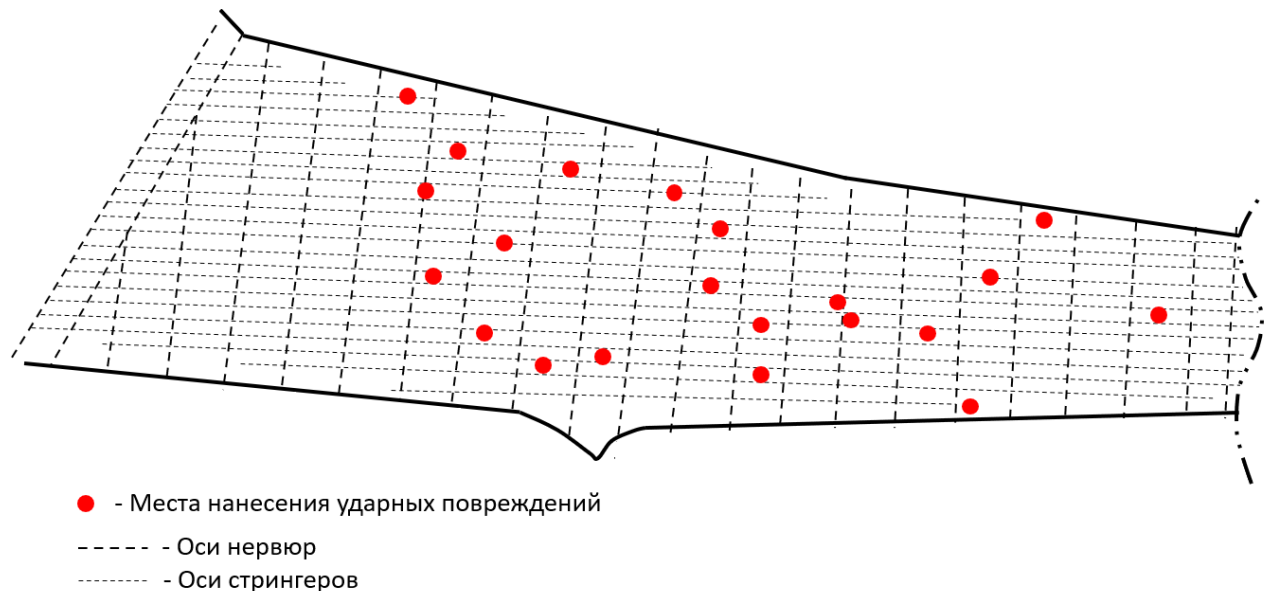


Рисунок 1 - Верхняя панель прототипа кессона крыла с нанесенными ударными повреждениями для испытаний на эксплуатационную живучесть

Вопросам неразрушающего контроля и диагностики состояния структуры композитных конструкций посвящены работы Матвиенко Ю.Г., Смотров А.В., Разумовского Ю.А., Струнгарь Е.М., Чернова Д.В.

Подходы численного моделирования процессов роста повреждений и деградации механических свойств ПКМ при циклических нагрузках изложены в работах Сапожникова С.Б., Димитриенко Ю.И., Turon A., Carlos G. Dávila, Van Paeregem W.

Тема обеспечения прочности композитных конструкций с учетом случайных ударных воздействий раскрывается в работах Ушакова А.Е., Фейгенбаума Ю.М., Дубинского С.В., Божевалова Д.Г.

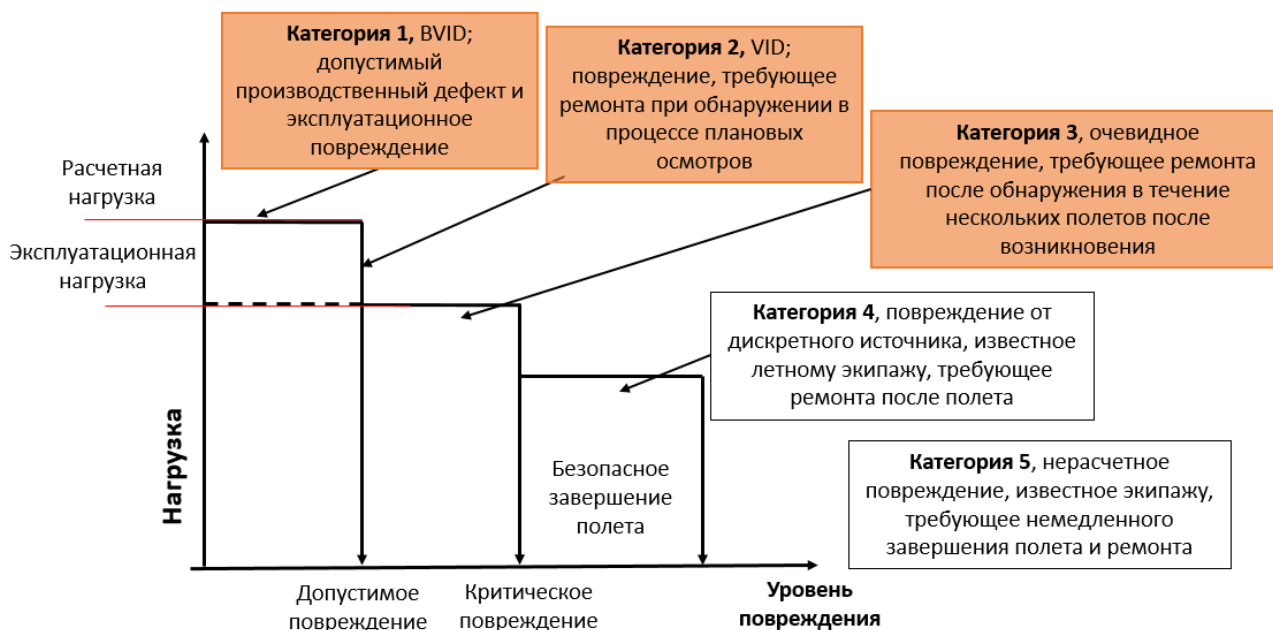


Рисунок - 2 Категорирование повреждений элементов конструкции из ПКМ

Несмотря на разработанность отдельных направлений, близких к теме диссертации, разработке метода расчетной оценки эксплуатационной живучести несущих конструкций из ПКМ посвящено недостаточно работ. Применение современных численных методов и полунатурного моделирования позволяет глубже изучить вопросы развития повреждений в композите при действии стационарных циклических нагрузок.

Цель и задачи работы

Целью диссертации является разработка метода расчетной оценки эксплуатационной живучести несущих панелей элементов конструкции планера летательного аппарата из композиционных материалов с ненормируемым ударным повреждением, полученным при эксплуатации, в условиях циклического сжатия, учитывающего остаточную статическую прочность композита.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Сформировать математическую модель расчетной оценки живучести сжатых элементов конструкции из ПКМ с ударными повреждениями, включающую уточненное уравнение циклического роста расслоения ПКМ и концепцию выбора критической конфигурации ударного повреждения, используя теоретические основы поведения ПКМ под действием стационарных циклических нагрузок.

2. Разработать метод расчетной оценки живучести сжатых композитных элементов с ударным повреждением при действии циклических нагрузок.

3. Провести численное моделирование процесса сжатия элемента конструкции из ПКМ с ударным повреждением на основе сформированной математической модели с целью предсказания длительности роста повреждения, остаточной прочности элемента конструкции, обоснования выбора верхней границы размера повреждения.

4. Провести экспериментальное исследование на циклическое сжатие элементов конструкции летательного аппарата из ПКМ с ударным повреждением для выявления закономерностей роста повреждения и сравнения с результатами расчета.

5. Определить методические особенности исследования живучести конструкционных полимерных композитов в условиях циклического сжатия после ударного повреждения.

Объектом исследования являются основные силовые элементы (ОСЭ) ЛА из слоистых ПКМ с малозаметными ударными повреждениями, работающие в условиях циклического сжатия.

Предмет исследования

Исследование влияния малозаметных ударных повреждений на эксплуатационную живучесть конструкций летательных аппаратов из ПКМ под действием циклического сжатия. Анализ роста несплошностей в виде расслоений в ПКМ, возникающих при изготовлении, сертификационных испытаниях и эксплуатации летательных аппаратов.

Научная новизна

1. Получено новое уравнение циклического роста расслоения, учитывающее принцип подобия обобщенных сил, продвигающих рост расслоения. Разработан новый алгоритм расчетной оценки длительности роста ударного повреждения.

2. Предложена и подтверждена результатами исследования новая концепция выбора критической конфигурации ударного повреждения, приведенного к заложенному расслоению эллиптической формы. Предложен алгоритм нахождения глубины залегания критического расслоения на основе зарегистрированного распределения расслоений в образце после удара.

3. Разработан новый метод расчетной оценки скоростей и длительностей роста ударного повреждения с применением численного моделирования. Проведены расчетные исследования по разработанному методу. Получены новые результаты расчета длительности роста повреждения, остаточной прочности элемента конструкции и обоснования выбора верхней границы размера повреждения.

Теоретическая значимость исследования

○ Полученное в работе уравнение циклического роста расслоения, учитывающее принцип подобия обобщенных сил, продвигающих рост расслоения, позволяет на основе ограниченного объема экспериментальных данных прогнозировать скорости и длительности роста расслоений в элементах конструкции летательных аппаратов с ударными повреждениями при произвольном уровне и коэффициентах асимметрии цикла нагрузки.

○ Предложенная и подтвержденная результатами исследования концепция выбора критической конфигурации ударного повреждения позволяет проводить экспресс-оценки живучести композиционного материала без масштабных параметрических исследований.

Практическая значимость исследования

○ Разработанный алгоритм расчетной оценки эксплуатационной живучести элементов конструкции летательного аппарата из композиционных материалов позволяет на ранних этапах проектирования спрогнозировать живучесть и контролировать живучесть элемента конструкции в зависимости от укладки пакета.

○ Результаты эксперимента на циклическое сжатие образцов с ударным повреждением использованы при разработке новых эмпирических зависимостей для оценки повреждаемости композита.

- Разработанное программное обеспечение позволяет решать класс задач расчетной оценки эксплуатационной живучести элементов конструкции самолета SJ-100 из композиционных материалов. Имеются свидетельство о государственной регистрации программы и акт о внедрении результатов исследования.

- Результаты диссертационной работы применяются при реализации учебных программ дисциплин «Проектирование агрегатов ЛА из ПКМ», «Прочность агрегатов ЛА из ПКМ», «Strength of aircraft units made of PCM» и «Composite Airframe Structures Design», читаемых для студентов Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Методология и методы исследования

- Для исследования роста расслоений в конструкциях с ударным повреждением использованы положения теории упругости анизотропных тел и механики разрушения.

- Для решения уравнения циклического роста расслоения применены явные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

- Для анализа и оценки остаточной прочности элемента конструкции в зависимости от формы и приведенных механических характеристик зоны с ударным повреждением использовано численное моделирование методом конечных элементов.

- Для получения эмпирических зависимостей и проверки теоретических оценок использованы средства прочностного эксперимента и неразрушающей диагностики.

Положения, выносимые на защиту

- Уравнение циклического роста расслоения, учитывающее принцип подобия обобщенных сил, продвигающих рост расслоения, и основанное на теории процессов роста повреждений в ПКМ при циклических нагрузках.

- Концепция выбора критической конфигурации ударного повреждения по условиям живучести, основанная на экспериментальных данных и выявленных механизмах роста повреждений в композитах при циклических нагрузках.

- Метод расчета эксплуатационной живучести композитных элементов конструкции с ударными повреждениями с использованием численного моделирования.

- Результаты расчета длительности роста повреждения, остаточной прочности элемента конструкции и обоснования выбора верхней границы размера повреждения.

- Алгоритм расчетной оценки эксплуатационной живучести сжатых композитных элементов с ударным повреждением, обоснованный теоретически и экспериментально.

- Результаты эксперимента, включающего испытания и неразрушающий контроль структурной целостности композитных элементов конструкции с ударным повреждением при действии циклического сжатия.

- Методические особенности исследования живучести конструкционных полимерных композитов в условиях циклического сжатия после ударного повреждения.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов определяется сопоставлением с известными аналитическими и численными решениями частных задач анализа живучести конструкций из ПКМ, сравнительным анализом полученных теоретических результатов с данными испытаний.

Личный вклад автора диссертации состоит в адаптации теоретической модели расчета скоростей и длительностей роста внутреннего расслоения к задаче расчетной

оценки эксплуатационной живучести композитного элемента конструкции летательного аппарата с ударным повреждением, разработке алгоритма определения критической конфигурации ударного повреждения по критерию живучести, корректировке расчетного уравнения для скорости роста расслоения, разработке программного обеспечения, сопровождении и обработке результатов испытаний образцов слоистого ПКМ с ударным повреждением на циклическое сжатие и создании алгоритма расчета живучести слоистого ПКМ с применением численного моделирования.

Результаты диссертации получены лично автором. Из результатов, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включен материал, вклад соискателя в который являлся определяющим.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует п. 2 Паспорта специальности 2.5.14. «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»: обеспечение прочности объектов авиационной, ракетной и космической техники на основе современных аналитических и численных методов, методов натурного и полунатурного моделирования в условиях стационарных и нестационарных внешних воздействий.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований в рамках диссертации доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных конференциях:

1. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», IX Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 120-летию со дня рождения Якова Давидовича Аврасина, 21 ноября 2025 года, г. Москва.
2. 24-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», 17-21 ноября 2025 года, г. Москва.
3. Прочность конструкций летательных аппаратов, 12–13 декабря 2024 года, г. Жуковский.
4. 3-я Международная научно-техническая конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения», 26–30 августа 2024 года, г. Москва.
5. Международный конгресс по аэронавтике, 04–05 декабря 2023 года, г. Москва.
6. 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика», 21–25 ноября 2022 года, г. Москва.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, 3 из которых в изданиях из рекомендованного Перечня ВАК РФ по специальности 2.5.14., 2 статьи – в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus или Web of Science, 6 тезисов докладов по материалам всероссийских и международных научных конференций, Свидетельство о государственной регистрации программы.

Структура и объемы диссертации

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы. Общий объем работы составляет 139 страниц, включая 47 рисунков, 14 таблиц и список литературы из 124 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность диссертационного исследования, степень разработанности темы исследования и цель работы, представлены задачи исследования, объекты исследования, предмет исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, указаны методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, личный вклад автора диссертации, соответствие паспорту специальности, апробация работы, публикации по теме диссертации и содержание работы.

В первой Главе изложены анализ требований соответствующих авиационных правил и типовой метод обоснования живучести, основанный на проведении эксперимента.

Проанализированы ограничения существующих методов расчета эксплуатационной живучести конструкций из ПКМ. Свойства материалов, потребные для предварительной оценки эксплуатационной живучести элементов конструкции из ПКМ, получают в ходе этапа испытаний «Выбор материала и квалификация», но не используют для предварительной оценки эксплуатационной живучести по причине отсутствия утвержденных методик расчетной оценки живучести ПКМ.

Приведен обзор научных исследований в области живучести композитов. Рассмотренные подходы поделены на две группы.

В первую группу включены работы, посвященные подробному численному моделированию роста повреждения в композите. В первой группе подходы к моделированию устойчивости к повреждениям продемонстрированы на стандартных образцах для испытаний на сжатие после удара. Заключено, что подробное численное моделирование роста повреждения в композите нерационально для оценки эволюции повреждений в реальных конструкциях из-за высокой потребности в численных ресурсах для расчета и значительных трудозатратах на предварительную подготовку конечно-элементной модели.

Ко второй группе отнесены инженерные методики расчетной оценки живучести конструкции из композитов. В работах второй группы прогнозирование роста повреждений основано на расчете полей концентрации напряжений вокруг отпечатка расслоения, расчете деградации жесткости от расслоения с использованием правила смеси и использовании предела усталости ПКМ при действии циклического сжатия, в которых величина скорости высвобождения упругой энергии деформации (СВУД) рассчитана для отслоения, потерявшего устойчивость, с использованием приближенных аналитических выражений.

Живучесть композитов с ударным повреждением связана с живучестью композита в присутствии заложенного расслоения. Расслоения в полимерных композитах многосторонне исследованы на теоретическом и на практическом уровнях.

Важным достижением в области изучения кинетики роста расслоений в ПКМ является построенная В.В. Болотиным многопараметрическая теория циклического роста трещин расслоения, позволяющая аналитически выводить уравнения скоростей и длительностей роста расслоений, включая объяснение природы параметров, получаемых из эксперимента.

Экспериментальные исследования, посвященные изучению закономерностей роста повреждений в образцах, испытанных на циклическое сжатие после удара (англ. CFAI – Compression Fatigue After Impact), более распространены в литературе, чем теоретические изыскания. Для регистрации эволюции повреждений в образце с ударным повреждением, нагруженном циклическим сжатием, используются следующие методы: отслеживание изменения жесткости, мониторинг роста расслоения с помощью неразрушающей диагностики на основе ультразвука, термографии и акустографии, косвенная диагностика распространения повреждений с помощью акустической эмиссии и изменения формы потери устойчивости отслоения.

В большинстве исследований зарегистрировано внезапное возникновение роста расслоения. Косвенные индикаторы эволюции процесса повреждения - акустическая эмиссия, термография, изменение формы потери устойчивости отслоения - свидетельствовали о непрерывном процессе, состоящем из нескольких фаз. Показано, что соотношение длительности фаз в процессе повреждения CFAI зависит от уровня сжимающей нагрузки и истории нагружения.

Сформулированы направления развития прикладных исследований живучести конструкций. Основное направление развития – поиск путей увеличения точности и надежности расчетных оценок при допустимой для практического анализа простоте моделей, и разработка расчетных зависимостей, требующих минимума необходимых параметров, получаемых из эксперимента.

Во второй Главе диссертации изложены теоретические основы и базовые расчетные зависимости для определения скоростей и длительностей роста расслоений, предложена адаптация базового расчетного уравнения скорости роста расслоения на основе уточнения выражения для размаха цикла нагрузки.

Модель роста повреждения при циклической нагрузке основана на материалах, изложенных в работе В.В. Болотина. Модель является объединенной: одновременно учитывается фаза невидимого роста при континуальном накоплении повреждения на фронте трещины и фаза видимого роста, когда накопленные повреждения переходят в состояние геометрически выраженной трещины. Использовано основное предположение теории роста трещин, введенной В.В. Болотиным, заключающееся в том, что трещины растут в моменты, когда циклическая нагрузка достигает критических значений.

Для расслоения, рост которого задан одним геометрическим параметром, длиной расслоения l , получено уравнение для скорости роста расслоения $\frac{dl}{dn}$. В усталостных расчетах применяемое количество циклов велико, параметр количества циклов n задается непрерывным, а размеры трещин становятся функциями непрерывного аргумента. Форму уравнения скорости роста расслоения определяет вид функции накопления повреждения на фронте расслоения и связь функции накопления повреждения с обобщенной силой сопротивления продвижению роста трещины.

Для определения размаха СВУД $\Delta G(l, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min})$ в работе предложено использовать формулу

$$\Delta G(l, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}) = \left(\sqrt{G(l, \varepsilon_{\max})} - \sqrt{G(l, \varepsilon_{\min})} \right)^2, \quad (1)$$

где $G(l, \varepsilon)$ – обобщенная сила, продвигающая рост расслоения; $G(l, \varepsilon_{\max})$, $G(l, \varepsilon_{\min})$ – максимальное и минимальное значения обобщенных сил роста расслоения соответственно; $\varepsilon_{\max}$ и $\varepsilon_{\min}$ обозначают максимальную и минимальную деформацию цикла нагрузки. Значение максимальной деформации цикла $\varepsilon_{\max}$ равно минимальному значению деформации в сжимающем цикле, взятому по абсолютному значению.

Принцип подобия, использованный для вывода формулы (1), заключается в том, что скорость роста трещины для двух разных образцов одинакова, если равны соответствующие движущие силы продвижения расслоений.

Полученное уравнение для скорости роста расслоения с учетом выражения (1) для размаха СВУД имеет вид

$$\frac{dl}{dn} = \frac{\rho}{\beta^m} \frac{[g_{\Delta}]^m}{[1 - g_{\max}]^{1/\alpha}}, \quad l(0) = l_0, \quad (2)$$

где n – число циклов нагружения, l_0 – начальная длина расслоения,

$$g_{\max} = g(l, \varepsilon_{\max}) = \frac{G(l, \varepsilon_{\max})}{\Gamma_0}, \quad g_{\Delta} = g_{\Delta}(l, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}) = \frac{(\sqrt{G(l, \varepsilon_{\max})} - \sqrt{G(l, \varepsilon_{\min})})^2}{\Gamma_0}, \quad \Gamma_0 -$$

обобщенная сила сопротивления росту расслоения, ρ – характерный размер зоны интенсивного накопления повреждения, m, α – параметры уравнения скорости роста трещины, получаемые в результате обработки результатов эксперимента; β – параметр, связывающий обобщенные силы сопротивления росту расслоения в зоне интенсивного процесса накопления повреждения на фронте трещины Γ_{ψ} и в неповрежденном материале: $\beta = \frac{\Gamma_{\psi}}{\Gamma_0}$, $\beta \in (0, 1)$.

С учетом наличия пороговой СВУД G_{th} уравнение (2) принимает форму

$$\frac{dl}{dn} = \begin{cases} \frac{\rho}{\beta^m} \frac{[g_{\Delta th}(l, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min})]^m}{[1 - g_{\max}]^{1/\alpha}}, & \sqrt{G(l, \varepsilon_{\max})} - \sqrt{G(l, \varepsilon_{\min})} > \sqrt{G_{th}}, \\ 0, & \sqrt{G(l, \varepsilon_{\max})} - \sqrt{G(l, \varepsilon_{\min})} \leq \sqrt{G_{th}}, \end{cases} \quad l(0) = l_0, \quad (3)$$

$$\text{где } g_{\Delta th}(l, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}) = \frac{(\sqrt{G(l, \varepsilon_{\max})} - \sqrt{G(l, \varepsilon_{\min})} - \sqrt{G_{th}})^2}{\Gamma_0}.$$

Задача нахождения длины расслоения заключается в решении задачи Коши для уравнений (2), (3) с заданным начальным условием, определяемым начальной длиной расслоения. Для решения задачи Коши применяются явные методы численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений различного порядка точности. Процесс интегрирования заканчивается при достижении заданного числа циклов или достижении длины расслоения критической величины, определяемой видом исследуемой конструкции.

Проведено сравнение результатов использования разработанного уравнения (2) в форме $\frac{dl}{dn} = C_1 \frac{[g_\Delta]^{m_1}}{[1 - g_{\max}]^{1/\alpha}}$ и известного уравнения $\frac{dl}{dn} = C_2 (g_{\max})^{m_2}$ на примере обработки данных испытаний на определение характеристик межслоевой трещиностойкости при циклическом нагружении по типу I. Выявлено, что достоверность аппроксимации разработанным уравнением совпадает с достоверностью аппроксимации известным уравнением и составляет $R^2 = 0,82$.

В третьей Главе представлена процедура расчетной оценки длительности роста ударного повреждения в композите, то есть количества ΔN циклов нагрузки, вызывающего рост повреждения от определенного начального размера до предельно допустимого граничного размера. Разработанная процедура основана на использовании численного моделирования процесса роста с применением уравнения (2). Представлен пример расчетной оценки длительности роста ударного повреждения, приведены результаты сравнения длительностей роста ударного повреждения для разных уровней циклической нагрузки, изложены особенности выбора величины критического размера повреждения в зависимости от уровня циклической нагрузки.

Разработан пошаговый алгоритм расчетной оценки длительности роста ударного повреждения с использованием численного моделирования:

1. Задать параметры цикла нагрузки $\varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}$, количество конфигураций конструкции с размерами расслоения (i – номер конфигурации), упругие и прочностные свойства композита, вязкость разрушения по трем модам $G_{Ic}, G_{IIc}, G_{IIIc}$. Принять, что обобщенная сила сопротивления росту трещины равна вязкости разрушения по первой моде, то есть $\Gamma_0 = G_{Ic}$.

2. Задать поврежденное состояние ПКМ после низкоскоростного ударного воздействия, характеризуемое размерами и глубиной h заложенного расслоения, а также упругими свойствами отслоения.

3. Задать закон изменения формы расслоения по ходу наработки циклов нагрузки. На основании принятого закона изменения формы расслоения выбрать ряд расчетных конфигураций модели, характеризуемых размером расслоения a_i , где i – номер конфигурации. Для каждой последующей конфигурации размер расслоения увеличивать, то есть $a_{i+1} > a_i$.

4. Для каждой расчетной конфигурации численно определить скорость высвобождения упругой энергии деформации СВУД $G_i(a_i, \varepsilon_{\max})$, соответствующую максимальной нагрузке цикла на фронте расслоения, и напряженно-деформированное состояние, соответствующее максимальной нагрузке цикла.

5. Полученные результаты расчета СВУД $G_i(a_i, \varepsilon_{\max})$ представить функцией $G(a, \varepsilon_{\max})$, полученной кусочно-линейной интерполяцией $G_i(a_i, \varepsilon_{\max})$.

6. Задать параметры правой части уравнения (2) скорости роста расслоения применительно к рассматриваемой задаче:

$$\frac{da}{dn} = \frac{\rho}{\beta^m} \frac{[g_\Delta(a, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min})]^m}{[1 - g_{\max}]^{1/\alpha}}, \quad a(0) = a_0, \quad (4)$$

где $g_{\Delta}(a, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}) = \frac{(\sqrt{G(a, \varepsilon_{\max})} - \sqrt{G(a, \varepsilon_{\min})})^2}{\Gamma_0}$, $g_{\max} = \frac{G(a, \varepsilon_{\max})}{\Gamma_0}$, a_0 – начальный

размер расслоения, $G(a, \varepsilon_{\min})$ определить при помощи численного моделирования аналогично $G(a, \varepsilon_{\max})$ (пп.4, 5) с заменой в расчете максимальной нагрузки цикла $\varepsilon_{\max}$ на минимальную $\varepsilon_{\min}$. Параметры уравнения (4) ρ, β, m, α найти в результате обработки результатов испытаний на циклический рост расслоения по первой моде. Для автоматизированного определения параметров уравнения (4) применить разработанное программное обеспечение ДРОЗД-М1, обрабатывающее данные стандартных испытаний и возвращающее параметры уравнения (4) в форме таблицы [6].

7. Определить критический размер расслоения a_f , исходя из возможностей средств неразрушающего контроля, принятых при разработке самолета геометрических характеристик типов повреждений, а также на основании анализа полученной аппроксимации $G(a, \varepsilon_{\max})$ и анализа рассчитанного напряженно-деформированного состояния элемента конструкции для ряда геометрических конфигураций расслоения.

8. Найти решение $a(n)$ уравнения (4) с начальным условием $a(0) = a_0$. Процесс интегрирования завершить при удовлетворении условия $a(n_f) = a_f$, где n_f – число циклов, потребовавшихся для достижения условия окончания. Для решения задачи Коши использовать явные численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений различных порядков точности. Вычислить длительность роста ударного повреждения: $\Delta N = n_f$.

В качестве примера использования разработанного алгоритма проведен расчет длительности роста заложенного расслоения в стандартном образце. Модель элемента конструкции имеет размеры в плоскости стандартного образца (Рисунок 3), $H = 150$ мм, $W = 100$ мм, укладку $[45, -45, 0_3, 90]_s$, общая толщина панели $t = 1.397$ мм. Круглое расслоение заложено между слоями 2 и 3 (слои –45 и 0). Граничные условия для численного моделирования соответствуют стандарту испытаний на сжатие после удара.

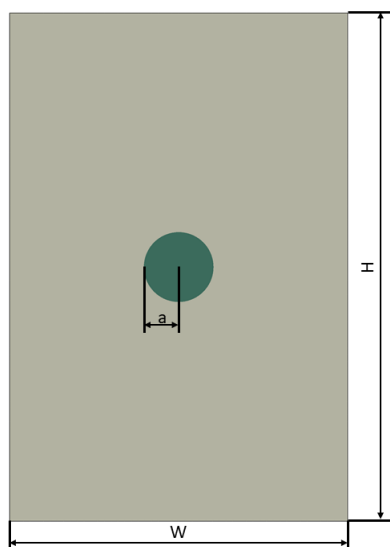


Рисунок 3 - Общий вид модельного элемента конструкции

1. Задаются параметры цикла нагрузки $\varepsilon_{\max} = 0,3\%$, $\varepsilon_{\min} = 0\%$ и вязкости разрушения материала $G_{Ic} = G_{IIc} = G_{IIIc} = 0,28 \text{ кДж/м}^2$.

2. Поврежденное состояние углепластика после низкоскоростного ударного воздействия в виде заложенного расслоения круглой формы задается диаметром $2a_i$ и глубиной $h = 0,254 \text{ мм}$. Модули упругости материала отслоения меньше соответствующих модулей материала неповрежденной части образца в два раза: $E_1^d = 0,5E_1$, $E_2^d = 0,5E_2$, $G_{12}^d = 0,5G_{12}$.

3. Принимается, что под действием циклической нагрузки расслоение сохраняет форму окружности и меняет радиус $a_i, i = 1, \dots, 6$. Рассчитываются модели размерами расслоения: $2a_1 = 6 \text{ мм}$, $2a_2 = 7,4375 \text{ мм}$, $2a_3 = 8,875 \text{ мм}$, $2a_4 = 10,3125 \text{ мм}$, $2a_5 = 11,75 \text{ мм}$, $2a_6 = 15 \text{ мм}$.

4. Величина СВУД $G_i(a_i, \varepsilon_{\max})$ для размеров расслоений вычисляется с помощью метода виртуального закрытия трещины (англ. VCCT – Virtual Crack Closure Technique). Напряженно-деформированное состояние и прочность рассчитываются в комплексе конечно-элементного моделирования (КЭМ) Abaqus. Определяются величины разрушающей нагрузки на элемент $P_{fi}, i = 1, \dots, 6$. За начальную прочность элемента до приложения циклической нагрузки P_{f0} принята разрушающая нагрузка на элемент с минимальным размером $2a_1 = 6 \text{ мм}$, то есть $P_{f0} = P_{f1}$.

5. Строится кусочно-линейная интерполяционная зависимость СВУД от размера расслоения $G(a, \varepsilon_{\max})$ (Рисунок 4). В заданном диапазоне размеров расслоения зависимость $G(a, \varepsilon_{\max})$ имеет три выраженных участка, на которых наклон кривой $G(a, \varepsilon_{\max})$ значительно изменяется.

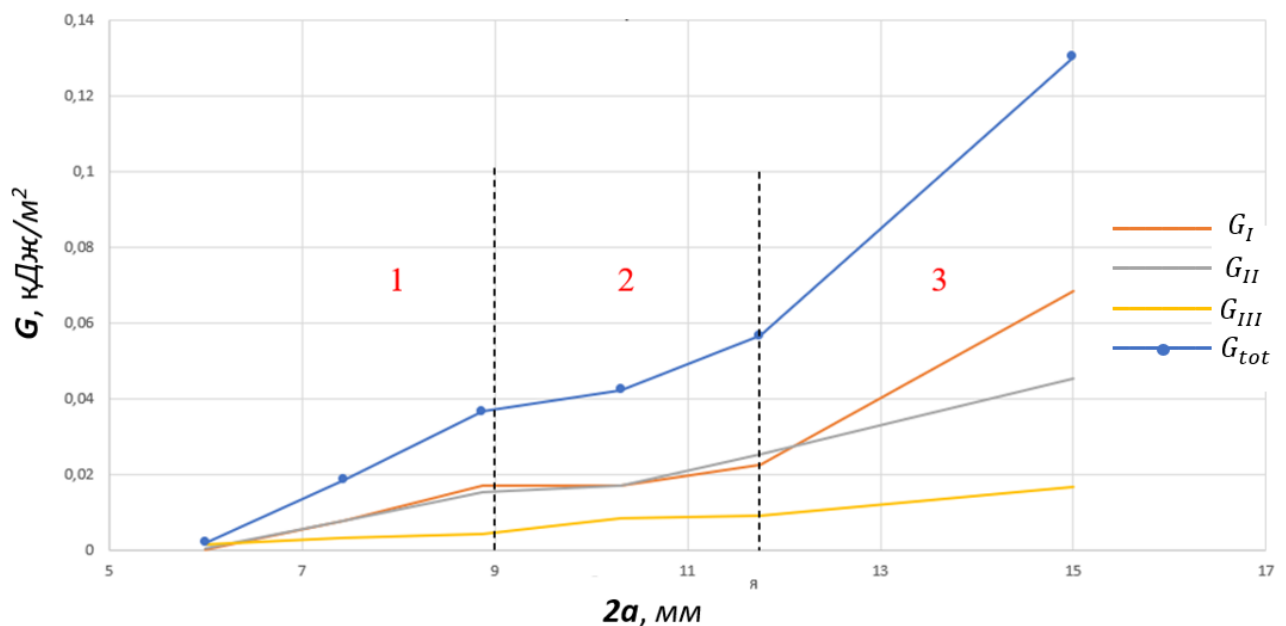


Рисунок - 4 Зависимость скорости высвобождения энергии упругой деформации СВУД от размера повреждения: отдельные моды (G_I , G_{II} , G_{III}), общая (G_{tot}) и этапы роста расслоения $j = 1, 2, 3$

6. Принимаются следующие параметры правой части расчетного уравнения (4):

$$\frac{\rho}{\beta^m} = 0,0275; \quad m = 3,1; \quad \alpha = 2.$$

7. На основании графика зависимости относительной разрушающей нагрузки от размера расслоения $\frac{P_{fi}}{P_{f0}}(2a)$ (Рисунок 5) определяется критический размер расслоения a_f

8. Производится расчет длительности роста заложенного расслоения с использованием численного решения уравнения (4) и полученной аппроксимации $G(a, \varepsilon_{\max})$. Результаты расчета остаточной прочности конструкции с повреждением, выполненные с использованием численного моделирования представлены на Рисунке 5 в форме зависимости относительной разрушающей нагрузки от размера повреждения $\frac{P_{fi}}{P_{f0}}(2a)$. Расчетная нагрузка соответствует разрушающей деформации $\varepsilon_f = 0,5\%$.

Критический размер расслоения соответствует такому, при котором остаточная прочность элемента снижается до 67% от расчетной нагрузки (Рисунок 5). В результате получена величина критического расслоения $2a_f = 11,75$ мм.

Длительности роста расслоений представлены в Таблице 1, где номер участка роста соответствует графику, изображенному на Рисунке 4. На Рисунке 6 представлены результаты численного интегрирования уравнения (4). В результате обработки данных Таблицы 1 выявлено, что длительность ускоренного роста повреждения составляет 0,2% от суммарной длительности роста малозаметного повреждения до критического размера.

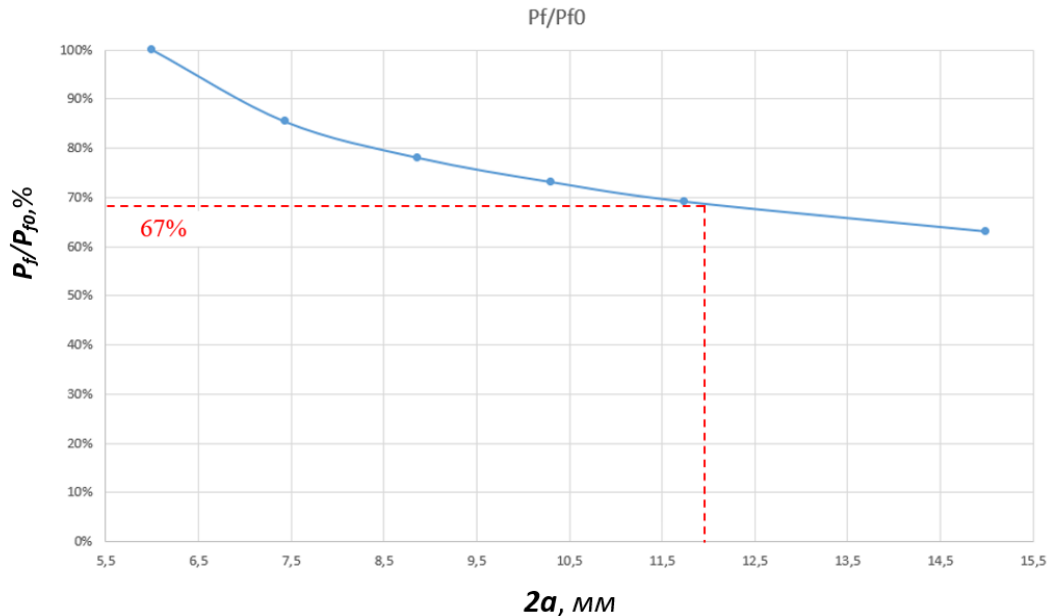


Рисунок 5 - Зависимость относительной разрушающей нагрузки на панель от размера повреждения

Таблица 1 - Длительности роста ударного повреждения

Участок, j	Размер начального повреждения, $2a_{0,j}$, мм	Размер конечного повреждения, $2a_{1,j}$, мм	Длительность роста, ΔN_j , циклы нагрузки
1	6	8,88	$7,262 \times 10^8$
2	8,8	11,75	$1,548 \times 10^6$
1+2	6	11,75	$7,278 \times 10^8$

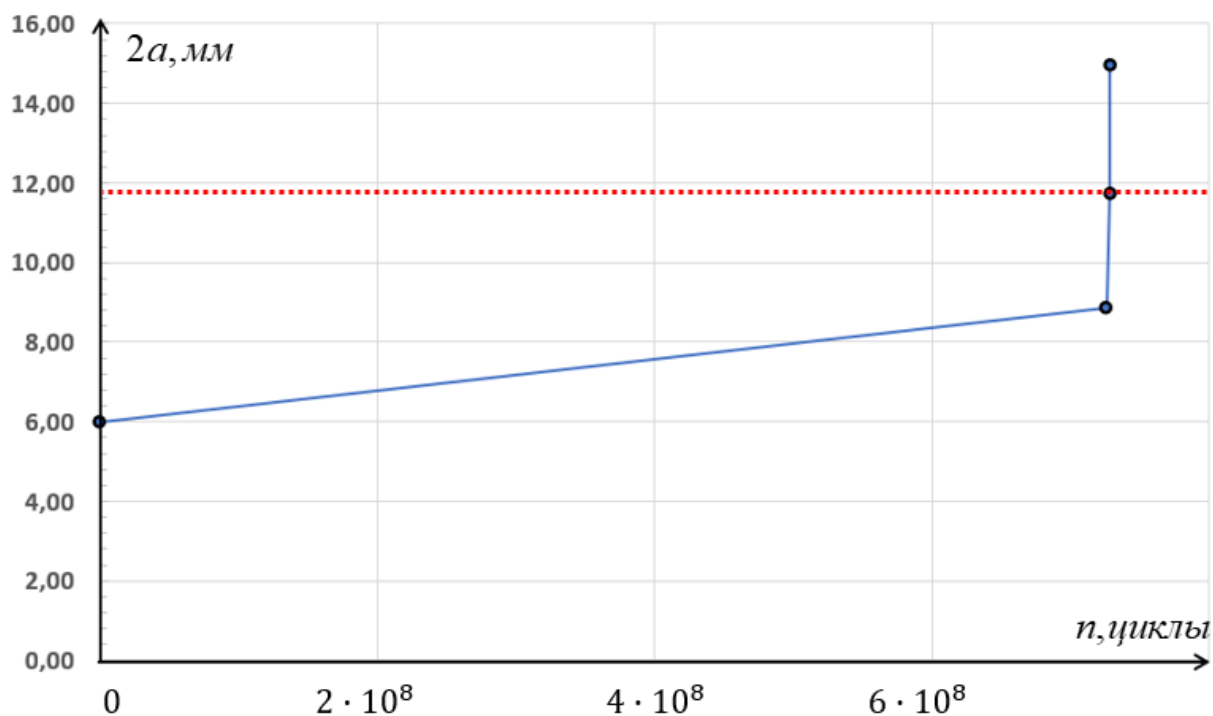


Рисунок 6 - Зависимость количества циклов нагрузки до соответствующего размера расслоения

В результате анализа результатов выявлено, что при увеличении нагрузки цикла $\varepsilon_{\max}$ меняется принцип выбора критического размера расслоения. При значениях циклической нагрузки, равных 70% и 80% от расчетной, критический размер расслоения определяется границей устойчивого роста, то есть условием $G(a, \varepsilon_{\max}) = \Gamma_0$, где обобщенная сила сопротивления росту расслоения Γ_0 принимается равной межслоевой вязкости разрушения по первой моде, определяемой по соответствующему стандарту испытаний. Длительность роста дефекта до критического размера при увеличении циклической нагрузки значительно сокращается (Таблица 2).

Таблица 2 - Длительность роста и критический размер ударного повреждения на разных уровнях циклической нагрузки

Уровень циклической нагрузки $\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_f} *$, %	Длительность роста повреждения ΔN , циклы	Критический размер повреждения $2a_f$, мм
60	$7,28 \times 10^8$	11,75
70	$8,63 \times 10^7$	10,31
80	$1,51 \times 10^6$	8,88

* ε_f - предельная деформация, константа материала

В четвертой Главе представлены содержание и результаты эксперимента на циклическое сжатие образцов с ударным повреждением, результаты неразрушающего контроля образцов, полученные по ходу наработки базы испытаний.

При проведении эксперимента выполнены:

- Фиксация наличия роста ударного повреждения в образце из ПКМ при действии циклических нагрузок с использованием методов неразрушающей диагностики.
- Качественное определение динамики роста повреждений в ходе испытаний: по форме вспучивания отслоения, по изменению податливости образца и по полям деформаций.
- Количественная оценка структурных изменений в образце на определенных значениях наработки циклов нагрузки.
- Сопоставление расчетов по инициации и росту расслоений, полученных с помощью аналитических зависимостей Главы 2 и результатов эксперимента.

Испытаны образцы ПКМ, изготовленные на основе однонаправленной ленты углеродно-эпоксидного препрега ACM 102 C130UD. Последовательность укладки с преобладанием нулевых слоев выбрана таким образом, чтобы процентное соотношение формулы пакета приближалось к [50%,40%,10%]. Числа в квадратных скобках обозначают относительную долю слоев с углом 0° , $\pm 45^\circ$ и 90° соответственно. Номинальная толщина пакета ПКМ составила 4,94 мм.

Образцы испытаны на ударное воздействие в соответствии со стандартом. Использовано окно в оснастке по стандарту ГОСТ 33496-2015 с размерами по длине и ширине 125 ± 1 мм и 75 ± 1 мм соответственно. Применен полусферический ударник диаметром 16 мм. Энергия удара рассчитана по стандартным предписаниям, исходя из энергии удара 6,67 джоуля на миллиметр толщины образца, и составила 33 Дж.

Испытания на сжатие и циклическое сжатие проведены с использованием приспособления для сжатия после удара ГОСТ 33495-2015. Приспособление предназначено для испытания на ударное сжатие образцов с геометрией плоской пластины размерами 150 мм на 100 мм. Результаты динамических испытаний получены при испытании образцов в циклах сжатие-сжатие с максимальной сжимающей нагрузкой, равной 70% от максимальной статической нагрузки, коэффициентом асимметрии цикла $R=10$ и частотой нагружения 5 Гц.

Для отслеживания динамики роста повреждений использованы система цифровой корреляции изображений и инструментальные средства неразрушающей диагностики: акустическо-эмиссионный мониторинг и эхо-импульсный ультразвук.

Глубина вмятины после удара не превышала 0,3 мм, полученные повреждения отнесены к малозаметным ударным повреждениям (англ. BVID – Barely Visible Impact Damage). Определено, что значительная часть кинетической энергии удара поглощалась без сквозного пробития образцов.

Для определения поврежденного состояния внутри образцов динамические испытания для ряда образцов проведены с остановками для промежуточной диагностики образцов ультразвуковым методом. По результатам послойной эхо-импульсной ультразвуковой диагностики выявлено, что воздействия с одинаковой энергией вызывали схожую картину распределения расслоений по толщине образца. Пример картины распределения расслоений с указанием глубины залегания представлен на Рисунке 7.



Рисунок 7 - Данные ультразвуковой диагностики поврежденного образца 5040.UMT.241.01 после циклов нагрузки

Глубина залегания критического расслоения определена по разработанному алгоритму на основе зарегистрированного распределения расслоений в образце после удара.

1. Каждое зарегистрированное расслоение привести к эллипсу с осями $2a$ и $2b$ (Рисунок 8). Ось эллипса, соответствующая стороне $2b$, ориентирована поперек действующей нагрузки цикла ε_x и является направлением роста расслоения при действии циклической нагрузки.

2. Для каждого приведенного расслоения рассчитать обобщенную силу, продвигающую расслоение $G(b, \varepsilon)$, и обобщенную силу, сопротивляющуюся росту расслоения $\Gamma_b(b)$.

3. Для каждого приведенного расслоения рассчитать деформацию потери устойчивости отслоения ε^* (критическая деформация)¹.

4. Выявить критические расслоения, в которых высокие значения фактора роста расслоения $\frac{G(b, \varepsilon)}{\Gamma_b(b)}$ сочетаются с малой величиной деформации потери устойчивости ε^* .

Глубину залегания расслоения h , используемую в расчете $\frac{G(b, \varepsilon)}{\Gamma_b(b)}$, определить на основе результатов ультразвукового контроля и данных по укладке образца. Выбрать глубину h , соответствующую ближайшей границе монослоев.

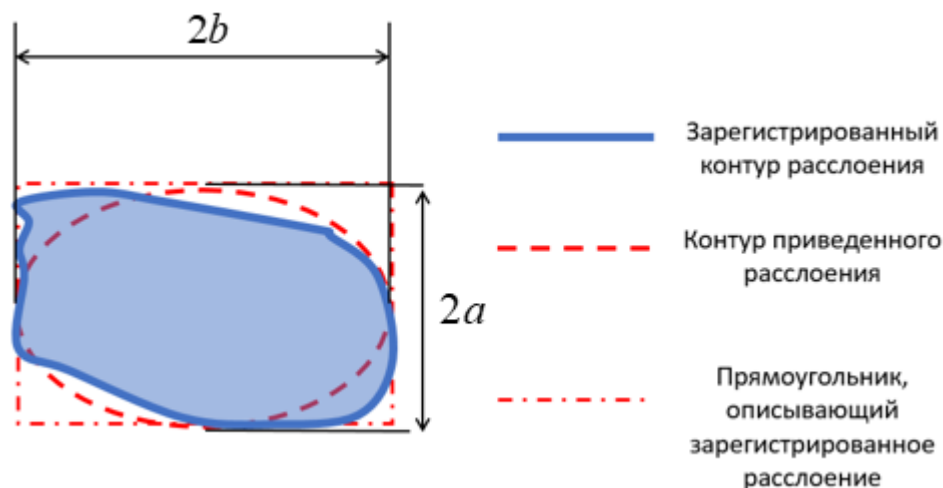


Рисунок 8 - Приведение расслоения из эксперимента к эллиптической форме

Результаты использования алгоритма для анализа расслоений в образце 5040.UMT.241.01 приведены в Таблице 3.

Таблица 3 - Результаты анализа появления роста расслоения в образце 5040.UMT.241.01

Толщина отслоения h , мм	Фактор роста расслоения $\frac{G(b, \varepsilon_{\max})}{\Gamma_b}$	Критическая деформация $\varepsilon^* \cdot 100$, %	Наличие роста расслоения
0,52	0,05	0,04	Нет
0,78	0,09	0,1	Нет
0,91	0,06	0,08	Нет
1,43	0,1	0,16	Нет
1,69	0,23	0,17	Нет
2,21	0,09	0,29	Нет
1,43	0,13	0,13	Нет
0,91	0,08	0,07	Нет
0,57	0,11	0,002	Да

¹ Болотин В.В. Дефекты типа расслоений в конструкциях из композитных материалов // Механика композитных материалов. - 1984. - № 2. - С. 239-255.

Расслоение, для которого выявлен рост в результате приложения циклической нагрузки, имеет высокий фактор роста $\frac{G(b, \varepsilon)}{\Gamma_b(b)}$ и минимальную для всех отслоений деформацию потери устойчивости ε^* . Два фактора, вычисляемые с помощью предложенного алгоритма, достоверно определяют критическую конфигурацию ударного повреждения.

В пятой Главе представлены положения метода расчетной оценки эксплуатационной живучести композитных элементов конструкции, работающих в условиях циклического сжатия, приведены уточнения по процедуре приведения ударного повреждения к заложенному дефекту типа «расслоение» эллиптической формы, даны необходимые уравнения для расчета матриц жесткости эквивалентной ортотропной пластины.

Разработан пошаговый алгоритм расчетной оценки эксплуатационной живучести композитных элементов конструкции:

1. Определить параметры стационарного сжимающего цикла нагрузки на элемент конструкции. Цикл нагрузки описывается минимальной $\varepsilon_{\min}$ и максимальной $\varepsilon_{\max}$ деформацией сжатия. Величина $\varepsilon_{\max}$ соответствует минимальной сжимающей нагрузке цикла, взятой по абсолютному значению.

2. Определить критическую конфигурацию заложенного эллиптического расслоения.

2.1. Для заданных размеров отслоения в плане и каждой границы монослоев по глубине провести расчет величины критической деформации ε^* .

2.2. Если значение величины критической деформации ε^* меньше минимальной действующей деформации цикла нагрузки $\varepsilon_{\min}$, взятой по абсолютному значению, то для заданной толщины отслоения h определить обобщенный фактор роста расслоения $\frac{G(b, \varepsilon)}{\Gamma_b(b)}$.

2.3. Для анализа скорости и длительности роста отслоения выбрать отслоение с заданными приведенными размерами в плане a, b (Рисунок 8) и глубиной h , соответствующими максимальному значению $\frac{G(b, \varepsilon)}{\Gamma_b(b)}$.

3. Определить границу роста повреждения b_f , исходя из регламентированных размеров повреждения по критерию контролепригодности, размеров повреждения, соответствующих границе квазиравновесного роста и размеров повреждения, снижающих остаточную прочность конструкции ниже допустимого уровня. Для расчета живучести выбрать минимальное значение размера b_f границы роста повреждения.

4. Применить уравнение скорости роста расслоения, аналогичное (4):

$$\frac{db}{dn} = \frac{\rho}{\beta^m} \frac{[g_{\Delta}(b, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min})]^m}{[1 - g_{\max}]^{1/\alpha}}, \quad b(0) = b_0, \quad (5)$$

где b_0 – начальный размер расслоения, соответствующего критической конфигурации,

$$g_{\Delta}(b, \varepsilon_{\max}, \varepsilon_{\min}) = \frac{\left(\sqrt{G(b, \varepsilon_{\max})} - \sqrt{G(b, \varepsilon_{\min})}\right)^2}{\Gamma_0}, \quad g_{\max} = \frac{G(b, \varepsilon_{\max})}{\Gamma_0}.$$

Параметры уравнения скорости роста ρ, β, m, α определить путем обработки результатов стандартных испытаний на получение характеристик межслоевой трещиностойкости при циклическом нагружении по типу I.

5. Решить уравнение скорости роста расслоения методом численного интегрирования. Найти величину длительности роста повреждения $\Delta N|_{b_0}^{b_f}$ от начального размера b_0 до критического размера b_f .

6. Живучесть элемента конструкции определить как длительность роста повреждения $\Delta N|_{b_0}^{b_f}$, деленную на коэффициент η надежности расчета: $\Delta T = \frac{\Delta N|_{b_0}^{b_f}}{\eta}$.

Коэффициент надежности расчета для композитных элементов принимает значения $\eta \in [20, 100]$ в зависимости от накопленного опыта по расчету и испытаниям на прочность выбранного типа композиционного элемента конструкции.

Способ выбора критической конфигурации элемента с заложенным расслоением по критерию минимума живучести основан на том, что максимальный фактор появления роста расслоения $\frac{G(b, \varepsilon)}{\Gamma_b(b)}$ достигается при максимальном поперечном размере расслоения b и увеличивается с ростом b в процессе действия стационарной циклической нагрузки.

Определение геометрических параметров приведенного к эллипсу критического отслоения в плоскости пакета проводится на основе связи между энергией удара и площадью пятна повреждения, изложенной в альбоме ударов в соответствии с отраслевыми рекомендациями. Разработанная схема приведения расслоения к эллиптической форме схематично представлена на Рисунке 8. Поперечный размер приведенного расслоения равен размеру пятна повреждения поперек направления циклической нагрузки сжатия. Продольный размер приведенного расслоения вычисляется исходя из максимальной площади пятна расслоений для заданной энергии удара

Эффективность разработанного метода расчетной оценки эксплуатационной живучести подтверждена на основе расчета потребного периода детального осмотра конструкции панели из ПКМ. Выявлено, что потребный период детального осмотра конструкции, рассчитанный по количеству циклов до обнаружения роста расслоения больше на 52% по сравнению с потребным периодом детального осмотра конструкции, рассчитанному по количеству циклов до начала роста расслоения. При фиксированном целевом периоде детального осмотра конструкции допустимая нагрузка типового полета увеличивается на 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод расчета эксплуатационной живучести несущих панелей планера летательного аппарата из композиционных материалов с ненормируемым ударным повреждением при действии циклических нагрузок сжатия.

Новые научные результаты, полученные в диссертации, состоят в следующем:

1. Сформирована новая математическая модель расчетной оценки живучести сжатых элементов конструкции из ПКМ с ударными повреждениями, включающая уравнение циклического роста расслоения ПКМ и концепцию выбора критической конфигурации ударного повреждения. Достоверность аппроксимации экспериментальных данных уравнением модели составляет $R^2 = 0,82$.

2. Разработан новый метод расчетной оценки живучести сжатых композитных элементов с ударным повреждением при действии циклических нагрузок. Метод позволяет увеличить период детального осмотра конструкции ЛА на 52%, а также увеличить допустимую нагрузку типового полета на 5% при сохранении принятого периода детального осмотра.

3. На основе сформированной математической модели проведено численное моделирование процесса сжатия элемента конструкции из ПКМ с ударным повреждением с целью предсказания длительности роста повреждения, остаточной прочности элемента конструкции и обоснования выбора верхней границы размера повреждения. Выявлено, что длительность ускоренного роста повреждения составляет 0,2% от суммарной длительности роста малозаметного повреждения до критического размера.

4. Проведено экспериментальное исследование на циклическое сжатие элементов конструкции из ПКМ с ударным повреждением, выявлены закономерности роста ударного повреждения. В результате приложения циклического сжатия зафиксирован рост расслоений в образцах в поперечном относительно приложенной нагрузки направлении. Из множественных расслоений, распределенных по глубине образца и полученных вследствие удара, под действием циклического сжатия растет только одно. Зарегистрировано, что типовая площадь пятна расслоений для образцов после удара составляет 16% от площади поверхности образца.

5. Проведено сравнение результатов эксперимента на циклическое сжатие после удара с расчетами по разработанному методу. Подтверждена эффективность разработанного метода. Положение критических расслоений, определенных по глубине залегания и размерам с помощью расчетов по разработанному методу и данных неразрушающего исследования образцов после нанесения удара, совпало с зарегистрированным состоянием образца после приложения циклической нагрузки.

6. Определены методические особенности исследования живучести конструкционных полимерных композитов в условиях циклического сжатия после удара на уровне лабораторных образцов. Возникновение роста расслоений регистрируется оптическими методами по полям вертикального прогиба отслоений без остановки циклических испытаний. Глубина залегания и размеры в плоскости расслоений образца идентифицируются методом эхо-импульсного ультразвука.

7. Разработано программное обеспечение для определения параметров математической модели расчета живучести элементов конструкции самолета из ПКМ.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Развитие метода на случай сложного, случайного циклического нагружения с учетом климатических условий работы конструкции. Определение и применение комплексной меры поврежденности композитной конструкции. Уточненная мера поврежденности учитывает вклад различных мод разрушения композита: растрескивания, разрывов и складывания волокон.

Основные научные результаты диссертации изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени:

Научные статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень высшей аттестационной комиссии Российской Федерации:

1. Турбин, Н. В. Численное моделирование роста ударного повреждения в слоистом углекомпозите под действием циклического сжатия //Инженерный журнал: наука и инновации. – 2025. – № 12(168) – С.1-15.
2. Погосян М.А., Турбин Н.В., Староверов О.А. Исследование живучести деталей ЛА из конструкционных полимерных композиционных материалов в условиях циклического сжатия после удара // Вестник Московского авиационного института. – 2025. – Т. 32, № 4. – С. 126-136.
3. Турбин Н. В., Кононов Н. О. Комплексный анализ роста ударных повреждений в композитном элементе конструкции при циклическом сжатии // Вестник Московского авиационного института. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 108-117.

Научные статьи в журналах и изданиях, включенных в международные системы цитирования:

1. Turbin N., Shelkov K. Analysis Method for Post-Impact Damage Development in Carbon Fiber Reinforced Laminate under Repeated Loading //Journal of Composites Science. – 2023. – Т. 7. – №. 5. – С. 201.
2. Rodin N. A., Turbin N. V., Selyugin S. In search for realistic post-impact damage progression scenario in composite materials: a parametric study //Aerospace Systems. – 2025. – С. 1-17.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. Турбин Н. В., Кононов Н. О., Ковтунов С. С., Колениченко Г. Программа для автоматизированного расчета параметров уравнения скорости и длительности роста заложенной деламинации "ДРОЗД-М1" // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU № 2025692122 , 19.11.2025 г.

Материалы всероссийских и международных научных конференций

1. Турбин Н. В., Кононов Н. О., Ковтунов С. С. Определение параметров объединенной модели усталостного роста расслоений // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения : Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 120-

- летию со дня рождения Якова Давидовича Аврасина, Москва, 21 ноября 2025 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ "Курчатовский институт". - 2025. – С. 150-163.
2. Турбин Н.В., Кононов Н.О., Ковтунов С.С. Модификация объединенной модели усталостного роста расслоений // 24-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 17-21 ноября 2025 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2025 – С. 190-191.
 3. Турбин Н. В., Лутошкина А.Е., Кутдюсов Р.Р., Татаринцев Н.С., Шрамко К.К., Кононов Н.О. Исследование роста повреждений в слоистом углепластике с ударным повреждением при действии циклического сжатия // Прочность конструкций летательных аппаратов : Сборник статей научно-технической конференции, Жуковский, 12–13 декабря 2024 года. – Москва: Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. - 2025. – С. 158-160.
 4. Турбин Н. В., Мольков О. Р., Селюгин С. В. Моделирование процессов развития ударного повреждения в слоистом углепластике под действием циклического сжатия // Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения : тезисы 3-й Международной научно-технической конференции, Москва, 26–30 августа 2024 года. – Москва: Перо, 2024. – С. 40-42.
 5. Турбин Н. В., Шелков К. А., Селюгин С. В. Методика расчета развития ударного повреждения в слоистом углепластике под действием циклических нагрузок // Международный конгресс по аэронавтике : Сборник тезисов, Москва, 04–05 декабря 2023 года. – Москва: Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. - 2023. – С. 445-447.
 6. Турбин Н. В., Шелков К. А. Методика расчета развития ударного повреждения в слоистом углепластике под действием циклических нагрузок // Авиация и космонавтика : тезисы 21ой международной конференции, Москва, 21–25 ноября 2022 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Издательство "Перо", 2022. – С. 430-431.