

На правах рукописи



Ле Вьет Туан

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ КОМПОЗИТНЫХ  
АВИАЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ МНОЖЕСТВЕННОМ  
НИЗКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ**

Специальность 02.05.14 - «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск - 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** **Бурнышева Татьяна Витальевна**  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», кафедра прочности летательных аппаратов, заведующий кафедрой, профессор

**Официальные оппоненты:** **Кургузов Владимир Дмитриевич**  
доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория механики композитов, главный научный сотрудник

**Каледин Валерий Олегович**  
доктор технических наук, профессор, Кузбасский гуманитарно-педагогический институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет», научно-исследовательская лаборатория математического моделирования, кафедра математики, физики и математического моделирования, заведующий лабораторией, профессор

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва», г. Самара

Защита состоится «09» июля 2024 года в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета 24.2.347.03 при ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073; г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, д. 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» на сайте: [https://www.nstu.ru/science/dissertation\\_sov/dissertations/view?id=20141](https://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=20141)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » мая 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Тюрин Андрей Геннадиевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Многослойные композитные материалы становятся всё более распространёнными в современных конструкциях летательных аппаратов. В процессе эксплуатации самолёта эти конструкции могут подвергаться воздействию внешних объектов, таких как столкновение с жёсткими или хрупкими телами. Примером таких воздействий является столкновение самолёта с частицами града в режиме полёта или при высыпании града на запаркованный летательный аппарат на аэродроме. Повреждения, вызванные такими воздействиями, часто трудно обнаружить невооружённым глазом. Они проявляются внутри структуры композитных материалов, негативно влияя на процесс работы и безопасность полётов.

При проектировании летательных аппаратов необходимо, в том числе, проводить расчёты на повреждаемость элементов конструкций, выполненных из композиционных материалов при ударе жесткими или хрупкими инденторами. Проведение натурных испытаний цельной конструкции летательных аппаратов или ее элементов на ударные воздействия является экономически не целесообразным. Использование методов математического моделирования, численных методов и современных программных продуктов является обоснованным при решении описанной проблемы.

В связи с вышесказанным является актуальным обоснование и разработка подхода к оценке повреждаемости элементов конструкций летательных аппаратов, выполненных из углеволоконистых композиционных материалов, при низкоскоростном ударе. Основой для этой оценки могут выступать результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния композитных панелей – элементов конструкций летательных аппаратов, критерии разрушения композитных материалов, результаты натурных испытаний и вычислительных экспериментов.

### **Степень разработанности темы исследования**

В литературе встречаются разнонаправленные подходы к решению задач контактного взаимодействия. Работы посвящены получению аналитического решения классической задачи контакта; моделированию контакта с использованием конечно-элементных программных продуктов; возможности применения численных алгоритмов для решения контактных задач различного уровня сложности; результатам экспериментальных исследований совместно с численным анализом. Также исследования связаны с механикой материалов и механикой разрушения. Различным вопросам механики контакта посвящены работы В. М. Александрова, Д. А. Пожарского, Е. М. Морозова, А. С. Кравчука, С. М. Айзековича, Н. В. Неустроева, М. А. Осипенко и других учёных. Проблемы воздействия града на конструкции летательных аппаратов, а также связанные с ними исследования, представлены в работах М. Мео, С. Дж. Юнгвирта, Г. Дж. Томаса, Р. Олссона, Х. Пернас-Санчеса, Х. Макдональда, М. М. Варгаса, К. С. Карни и М. Ангилери. Работы в области теории решения задач механического контакта методом конечных элементов (МКЭ), а также применению коммерческого программного обеспечения

для их решения принадлежат авторству В. М. Александрова, М. Софоня, В. А. Ястребова, Ж. Х. Чжуна, Б. Айронса, М. Г. Катона, О. К. Зенкевича, П. Лётстедта, К. Отаке, Н. Кикучи, Э. Золти, Б. Синли. Критериям разрушения композиционных материалов посвящены работы З. Хашина, А. Пука, Х. Шюрмана, К. Г. Давила, В. Д. Аззи, С. В. Цая, Э. М. Ву, О. Хоффмана и других учёных.

**Цель диссертационной работы:** разработка методики численного моделирования множественного низкоскоростного удара частицами града по композитной панели с учётом экспериментально полученных механических характеристик льда.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать расчётную модель однонаправленного и тканевого композитов, описывающую разные виды разрушений структуры (разорваны волокна, разрушена матрица и расслоение) при ударном нагружении.

2. Разработать численную модель контакта композитной панели с жёстким индентором.

3. Разработать расчётную модель деформирования и разрушения льда по опубликованным в литературных источниках результатам и собственным экспериментальным данным.

4. Сформировать и протестировать расчётную модель одиночного удара частицей льда по композитной панели на основе разработанных ранее моделей композитной панели, контактного взаимодействия и модели разрушения хрупкого ударника.

5. Разработать методику оценки поврежденности авиационных композитных панелей при множественном низкоскоростном ударе частицами града.

### **Научная новизна работы**

1. Предложен подход к оценке повреждаемости авиационных композитных панелей при ударе частицами града, основанный на определении числа повреждённых слоёв композита с помощью численного моделирования множественного низкоскоростного удара и критериев прочности слоистого материала.

2. Разработана и апробирована модель одиночного удара частицей града по композитной пластине, представляющая собой совокупность моделей композитной панели, контактного взаимодействия и модели разрушения хрупкого ударника.

3. Установлены аппроксимирующие зависимости поврежденности (число разрушенных слоёв) композитной панели при ударе частицей града от модуля упругости и скорости частицы.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается:

– предложен подход к построению расчётных моделей при исследовании прочности многослойных композиционных панелей в условиях ударного нагружения МКЭ и методом частиц;

– решён ряд базовых задач определения прочности композитных пластин при воздействии жёсткого и хрупкого инденторов.

### **Методология и методы исследования**

Методология и методы исследования основаны на применении МКЭ и метода

частиц для решения контактных задач; методов вычислительного эксперимента; математической статистики для обработки данных эксперимента.

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

1. Методика оценки повреждаемости авиационных композитных панелей при множественном низкоскоростном ударе частицами града, заключающаяся в масштабировании модели одиночного удара частицей града, задании расчётных параметров для множества градин и их механических характеристик на основе экспериментальных данных.

2. Результаты экспериментального определения механических характеристик льда и результаты исследования повреждаемости пластины из углеродного композита при низкоскоростном ударе хрупким индентором.

3. Результаты исследования прочности и характера разрушения в однонаправленных слоях углеродного композита при контактном взаимодействии с жёстким индентором переменного радиуса.

4. Результаты применения методики оценки повреждаемости при множественном низкоскоростном ударе частицами града к обшивке передней кромки крыла регионального самолёта.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием современных методов вычислительной механики деформируемого твёрдого тела; использованием современных известных программных комплексов расчёта напряженно-деформированного состояния конечно-элементным методом, решения задач контакта, моделирования хрупкого тела методом частиц. Использование сертифицированных измерительных машин и инструментов при проведении натуральных испытаний.

### **Апробация результатов**

Результаты работы по тематике исследования были представлены на следующих научных конференциях: XXII, XXIV, XXV Всероссийской научно-технической конференции «Наука Промышленность Оборона», г. Новосибирск, НГТУ, 2021, 2023, 2024 гг.; XIV, XVII Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, НГТУ 2020, 2024 гг., XLI Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий, посвящённую 60-летию полёта Ю.А. Гагарина в космос, г. Миасс, Челябинской обл., 2021 г., Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов», СибНИА им. С.А. Чаплыгина, г. Новосибирск, 2022 г.

**Личный вклад автора** заключается в реализации цели и задач диссертационного исследования, определении его программы и проведении численного исследования. Все экспериментальные исследования, включая испытания на одноосное сжатие льда и удар льда по композитным панелям, были подготовлены автором и выполнены при его непосредственном участии. Построение расчётных моделей, обработка и анализ результатов натуральных испытаний и численного моделирования выполнялись автором лично. Совместно полученные результаты представлены с согласия соавторов.

## Публикации

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 7 печатных работах, из них 2 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 – в прочих изданиях и сборниках трудов всероссийских научно-технических конференций.

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 141 наименований и 7 приложений. Объем диссертации составляет 231 страницу и включает 96 рисунков и 69 таблиц.

**Благодарности.** Особую благодарность автор выражает д.т.н., заведующему кафедрой «Прочность летательных аппаратов» НГТУ Бурнышева Т.В. за определение направленности диссертационного исследования, помощь в подготовке работы, внимание и проявленное терпение. Автор признателен сотрудникам кафедры «Прочность летательных аппаратов» НГТУ в лице Пеля А.Н., Кожевников А.Н., Гунько К.С. и Донских С.В. в части разработки, и консультаций при проведении экспериментальной части работы; Матвеева К.А. и Ковальчука Л.М. за ценные замечания и конструктивные предложения, внесенные в процесс написания диссертации. Также автор благодарен коллективу ООО «ИК ЦТО» в лице Сачкова В.В. за обширные консультации по тематике исследования использованию климатической камеры при испытаниях на одноосное сжатие и средствам проведения неразрушающего контроля образцов композитных панелей.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, обозначены научная новизна, практическая значимость результатов работы и сведения об апробации работы. Приведено краткое описание содержания работы по главам.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена современным подходам и методам в области механики контактного взаимодействия, описаны основные инструменты для анализа и решения, связанных с этим задач. Приведены исторические проблемы механики контактного взаимодействия, представлен обзор исследований воздействия града на конструкцию самолёта. Показано, что проблемы механики контактного взаимодействия являются важным аспектом в различных инженерных областях, включая авиацию. В современных исследованиях особое внимание уделяется разработке методов решения контактно-ударных задач, таких как метод множителей Лагранжа, метод штрафов и расширенный метод Лагранжа, которые обеспечивают эффективное и точное моделирование таких сложных процессов.

Взаимодействие с жёстким или хрупким телом может привести к местным повреждениям композитных материалов и влиять на прочность структуры. Первым этапом разрушения слоистых композитных материалов является разрушение первого слоя или группы слоев. Затем происходит разрушение всего слоистого композитного материала на микроуровне из-за повреждения волокон, матрицы или расслоения. Локальные повреждения не приводят к общим разрушениям структуры, но они оказывают влияние на прочность нагружаемой конструкции или ее

техническое состояние, особенно для конструкций ЛА.

Представлена подборка наиболее известных и надежных критериев разрушения для слоистых материалов: Цая–Хилла, Цая-Ву, Хоффмана, Хашина и максимального напряжения. Эти критерии используют один и тот же набор параметров прочности, имеющих простое физическое значение и могут быть измерены экспериментально. Коэффициент запаса прочности используется для оценки близости к разрушению, где значения менее 1 указывают на наличие повреждений. В рамках диссертации использован обратный коэффициент запаса  $f$  для оценки повреждаемости композиционных материалов. Значение коэффициента  $f$  больше или равное 1 соответствует разрушению, а значение меньше 1 – целостности.

Кроме того, в качестве инструментов для построения численных решений приведены программные продукты ANSYS, LS-Dyna, APM Structure3D, SOLIDWORKS, MSC Nastran, ABAQUS.

**Во второй** главе представлена разработанная расчётная модель для анализа динамического контакта между жёстким индентором в форме шара и многослойной композитной пластиной с использованием программного комплекса ANSYS. Решение контактных задач с помощью программы ANSYS начинается с моделирования геометрии, определения свойств материала, установления условий контакта и определения нагрузок и граничных условий. Затем происходит решение задачи и анализ полученных результатов.

Сферические индикаторы радиусом 1,5 – 12,5 мм изготовлены из конструкционной стали. Исследования проводили на композитных пластинках, размером 80x100 мм. Каждый слой состоит из тканевого стекловолоконного или однонаправленного углеродного волокна, в качестве связующего используется эпоксидная смола. Для пластинки толщина одного слоя составляла 0,7 мм, при использовании 3 – 20 слоёв. При построении КЭ для моделирования пластины использовался элемент SOLID186, а элемент SOLID185 применялся для моделирования индентора. Создавались контактные пары из контактных CONTA174 и целевых TARGE170 элементов. Модель контакта между сферой и композитной пластиной рассматривалась без трения, т.е. касательные силы отсутствуют.

Вдавливание сферы производилось с усилием от 0 до максимального значения  $F_{\max}$ , свидетельствующего о появлении развитой локальной зоны поражения в композите. По критериям прочности можно определить площадь повреждения в каждом слое композита, кроме того, по критерию максимального напряжения можно выделить различные виды разрушения. На отдельном слое ткани показаны разные виды разрушений: разорваны сами волокна, разрушена матрица между волокнами расслоение внутри самого слоя и общая зона разрушения (рисунок 1).

На рисунке 2 можно наблюдать картину распространения разрушения по слоям композита из стеклотканевых материалов для различных значений радиуса сферы. Вверху указаны радиусы сфер в мм. Число в ячейке соответствует номеру слоя, для которого показана зона разрушения. Внизу показаны профили областей разрушения под пятном контакта в многослойном материале. Они составлены из горизонтальных срединных сечений послойных рисунков областей разрушения. Полуокругами над областями разрушения показаны размер и положение пятна контакта.

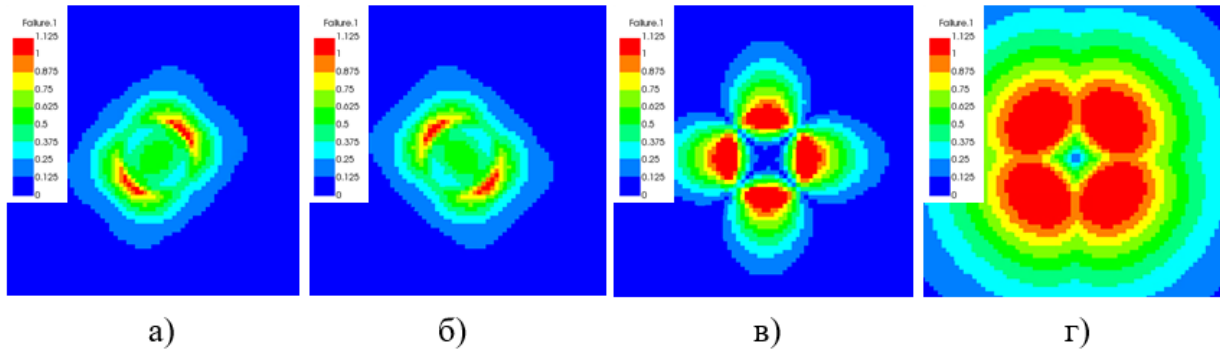


Рисунок 1 – Типичные зоны повреждения для слоя композита  
 а) разорваны сами волокна; б) разрушена матрица между волокнами;  
 в) расслоения внутри самого слоя; г) общая зона разрушения

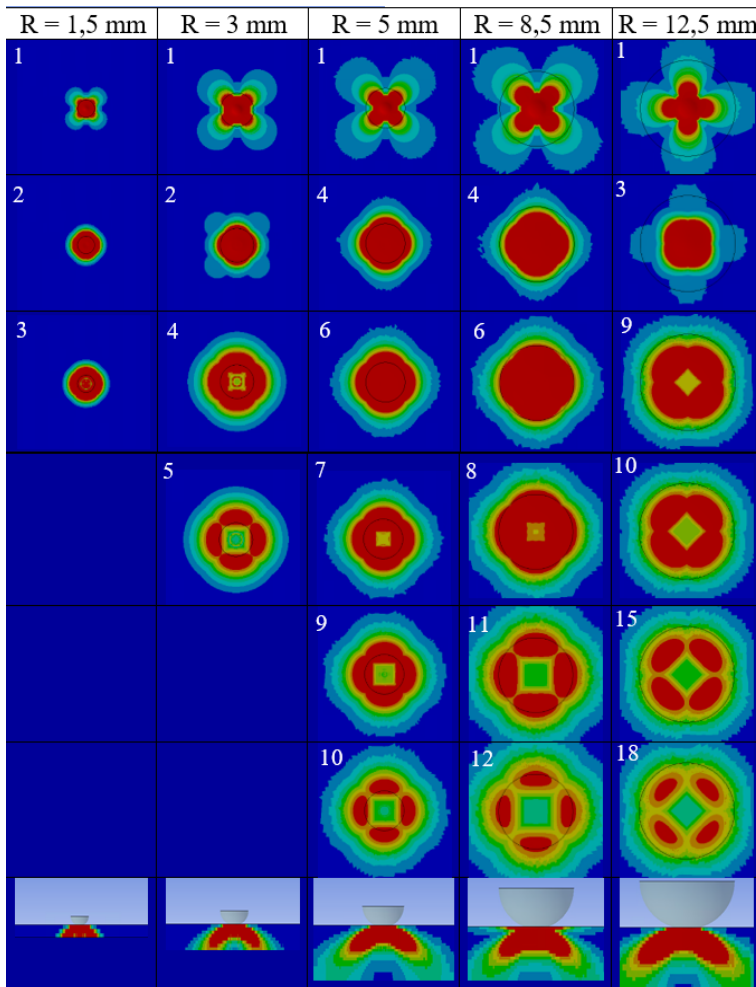


Рисунок 2 – Области повреждений  
 в слоях стеклотекстолита при контакте  
 со сферами разного радиуса

проявляется конически расходящейся областью разрушения, которая рассеивается по мере проникновения вглубь материала. Это объясняется тем, что в данном случае происходит разрушение материала на уровне отдельных слоёв, что приводит к распределению области разрушения по конусу.

В свою очередь, при использовании инденторов с радиусами 8,5 и 12,5 мм наблюдается третий тип разрушения, когда область разрушения по форме ближе к цилиндру. Это связано с тем, что при таком действии индентора происходит

В результате при приложении силы на поверхности композита от контакта с шарообразным индентором, начинается процесс роста трещин сверху вниз. При этом зоны разрушения внутри композитной пластины увеличиваются по мере увеличения радиуса сферы и силы, действующей на неё. По мере углубления индентора в материал область разрушения может либо расширяться (соответствует инденторам с меньшими радиусами 1,5; 3 и 5 мм) или сужаться (8,5 и 12,5 мм). В материале послойные зоны повреждений смещаются в обоих направлениях, и на каждом слое зоны разрушения содержат разрывы ткани, ориентированные в направлении волокон. В экспериментах было выявлено, что при использовании инденторов с радиусами 1,5; 3 и 5 мм первый тип разрушения



разрушение на уровне нескольких слоёв, что приводит к более ограниченной области разрушения, близкой к цилиндру.

Проведено сопоставление результатов численного моделирования вдавливания жёстких инденторов разного диаметра в тканевую композитную пластину со слоями из стекловолокна и результатов эксперимента, проведённого сотрудниками Лаборатории механики композитов ФГБУН «Институт гидродинамики гидродинамики им. М.А. Лаврентьева» СО РАН. Показано согласование результатов численного эксперимента и реальных испытаний.

На основе предложенной расчётной модели проведён сравнительный анализ рассчитанных численно полей напряжений в композитных пластинах из углеродного волокна (схемы укладки волокон  $[45^\circ/-45^\circ]_n$  на рисунке 3 и  $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]_n$ ) с эпоксидной матрицей и пластине из стекловолоконного композита при вдавливании жёсткого индентора. Установлено сходство разрушений в углеволокнистом и стекловолоконном композитах при соответствующих условиях, а также выявлены различия в зонах разрушений в зависимости от схемы укладки волокон. Полученные результаты

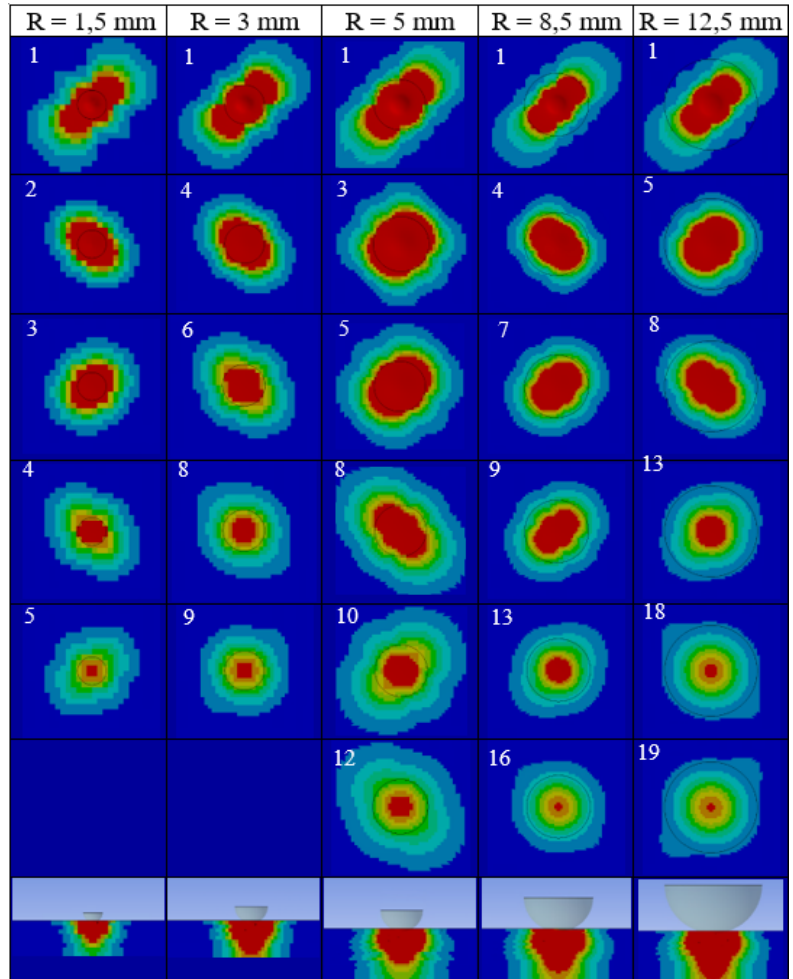


Рисунок 3 – Зона разрушения внутри углепластиковой композитной панели  $[45^\circ/-45^\circ]_n$  при вдавливании стальных шариков

позволили провести анализ послойных разрушений композитных пластин с использованием различных критериев. Они также дали представление о механизме и видах разрушений в связующем и волокне композитных материалов при динамическом воздействии индентора. Предложено в качестве оценки поврежденности композитной пластины использовать число разрушенных слоев композита.

В третьей главе разработан и приведён алгоритм численного решения задачи низкоскоростного контакта частицы града и композитной пластины. Разработана модель частиц града на основе метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с описанием подбора механических свойств, позволяющих моделировать поведение града при высоких скоростях деформации. Представлены теоретические основы метода SPH и его применение для моделирования частицы града. Для

моделирования деформации льда при высоких скоростях деформации используются два типа связей: линейно-упругая модель материала и упруго-пластическая модель.

Проведено сравнение метода SPH с произвольным лагранжево-эйлеровым описанием тел (ALE) и реальными экспериментами, в которых частицы градины ударяются о жесткую пластину. На рисунке 4а показано развитие смоделированного удара частицы льда о стальную пластину со скоростью 152,4 м/с, полученное по результатам проверочного моделирования SPH.

Сравнивая это с изображениями из источника, показанных на рисунке 4б, можно сказать, что попытки воспроизвести работу по моделированию дали качественно сопоставимые результаты. На рисунке 4 показано, как структура льда разрушается из твердого в жидкий/ порошкообразный состав по мере развития ударного события.

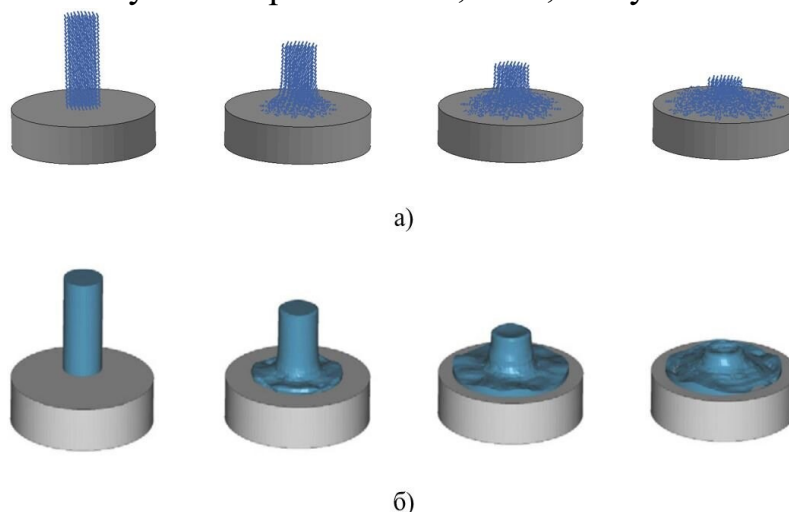


Рисунок 4 – Численное моделирование в LS-DYNA удара частицы града со скоростью 152,4 м/с о стальную пластину: а) – метод SPH; б) – метод ALE

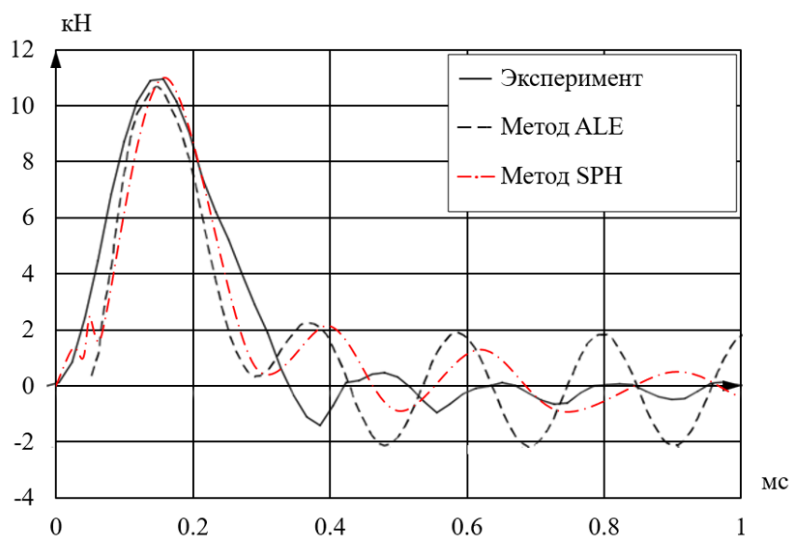


Рисунок 5 – Изменение силы при ударе частицей льда о стальную пластину со скоростью 213,36 м/с

Сравнение проводилось при ударе по стальной пластине частицей льда со скоростями: 91,44 м/с; 152,4 м/с и 213,36 м/с (рисунок 5). Получена хорошая согласованность результатов пикового значения силы удара. Достигнув как качественно, так и количественно сопоставимых результатов с исследованием из источников было решено, что подход SPH является подходящим и эффективным способом моделирования льда в LS-DYNA.

Композитная пластина моделировалась МКЭ, который позволяет анализировать разрушение многослойных конструкций. В LS-DYNA восьми узловой твёрдотельный элемент по умолчанию обычно использует комбинацию одной точки интегрирования и методов управления Hourglass. Метод интегрирования в одной точке включает в себя оценку свойств элемента и его поведения внутри элемента. Контакт между ударником и всем ламинатом был смоделирован с использованием алгоритма контакта \*AUTOMATIC-NODE-TO-SURFACE. Повреждение от расслоения было реализовано в имитационной модели

за счет использования алгоритма \*CONTACT\_AUTOMATIC\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK между слоями. Алгоритм разрыва связи «поверхность-поверхность» основан на знании межламинарных свойств материала с точки зрения нормальной прочности и прочности на сдвиг.

Композитные пластины Toray T800 из углеродного однонаправленного волокна со схемой укладки слоёв  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$  имели размеры 200x200 мм и состояли из 8 – 20 слоев. В модели материала \*MAT\_059\_SOLIDS существует восемь различных режимов разрушения, основанных на критерии Хашина. В LS - DYNA для представления зон разрушения применяются переменные истории повреждений (DHV – Damage History Variables). Переменная DHV №1 описывает разрушение в продольном направлении волокна по напряжениям, переменная № 2 – в поперечном направлении волокна, а № 4 – расслоение между слоями.

Проведен анализ численного моделирования и тестовых испытаний удара частицей града по восьми композитным пластинам. Испытания проводились на лабораторной баллистической установке в ИТПМ СО РАН. Результаты численного моделирования и натуральных испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов моделирования с экспериментом

№	m, кг	V, м/с	Толщина пластины, мм	Повреждения	
				в эксперименте	в численном моделировании
1	0,033	90,18	4	Без внешних изменений	Без разрушения
2	0,032	104,62	4	Без внешних изменений	Без разрушения
3	0,033	109,27	2,4	Без внешних изменений	Без разрушения
4	0,034	102,37	2,4	Без внешних изменений	Без разрушения
5	0,041	80,71	2,4	Повреждения в виде расслоения материала	Появление расслоения и обрыв волокон
6	0,041	69,35	4	Без внешних изменений	Без разрушения
7	0,040	60,29	1,6	Повреждения в виде расслоения материала	Появление расслоения и обрыв волокон
8	0,031	73,96	1,6	Повреждения в виде расслоения материала	Появление расслоения и обрыв волокон

Показано хорошее согласование между результатами моделирования удара частицей града по композитной пластине и экспериментом. Это еще раз подтверждает корректность выбранной модели материала льда и способов моделирования льда и композитных пластин в среде LS-DYNA.

Таким образом, приведён подход к обоснованному выбору и заданию механических свойств льда как материала в расчётной модели. Что позволяет моделировать воздействие льда на композитную панель и оценивать поведение композитных конструкций под воздействием ударных нагрузок. Разработанная расчётная модель низкоскоростного удара ледяной градиной по композитной пластине будет использована при моделировании множественного удара.

**В четвертой главе** проведены испытания на одноосное сжатие ледяных образцов, изготовленных двумя методами: с использованием силиконовой формы и формы, полученной методом 3D-печати. Показано, что формирование образцов с

помощью силиконовой формы с удалением воздуха позволяет получить более прозрачные образцы с меньшим количеством дефектов. На испытательной машине Instron проведены испытания трех групп образцов льда при разных температурах заморозки ( $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$  и  $-20^{\circ}\text{C}$ ). Определены их механические свойства, а также плотность льда при различных температурах. Далее, в климатической камере испытательной машины ViSS были проведены дополнительные испытания образцов льда при температуре воздуха в камере  $-20^{\circ}\text{C}$  для подтверждения их механических свойств. С использованием статистической обработки данных были выявлены пять интервалов изменения модуля упругости льда при сжатии, а также рассчитаны их средние значения (таблица 2).

Таблица 2 – Интервальный вариационный ряд модуля упругости образцов льда при испытаниях на одноосное сжатие

Интервалы, МПа	[154; 366)	[366; 578)	[578; 790)	[790;1002)	[1002; 1214)
Относительная интервальная частота, $m_i$	0,471	0,176	0,176	0,118	0,059
Среднее значение, $E_i$	226,75	522,33	685,67	898,00	1214,00

В НГТУ разработана и создана лабораторная баллистическая установка (рисунок 6) для изучения повреждения композитных материалов в результате воздействия ударника. Проведены натурные испытания, в которых изучалось воздействие частиц града на композитные панели, изготовленные из материала Toray T800-24K/UD (схема укладки слоёв  $[\mp 45^{\circ}/\mp 45^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/\mp 45^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}]_s$ ) с целью подтверждения появления внутренних повреждений. Определена зависимость скорости частиц града заданного диаметра от давления в баллоне в экспериментах.

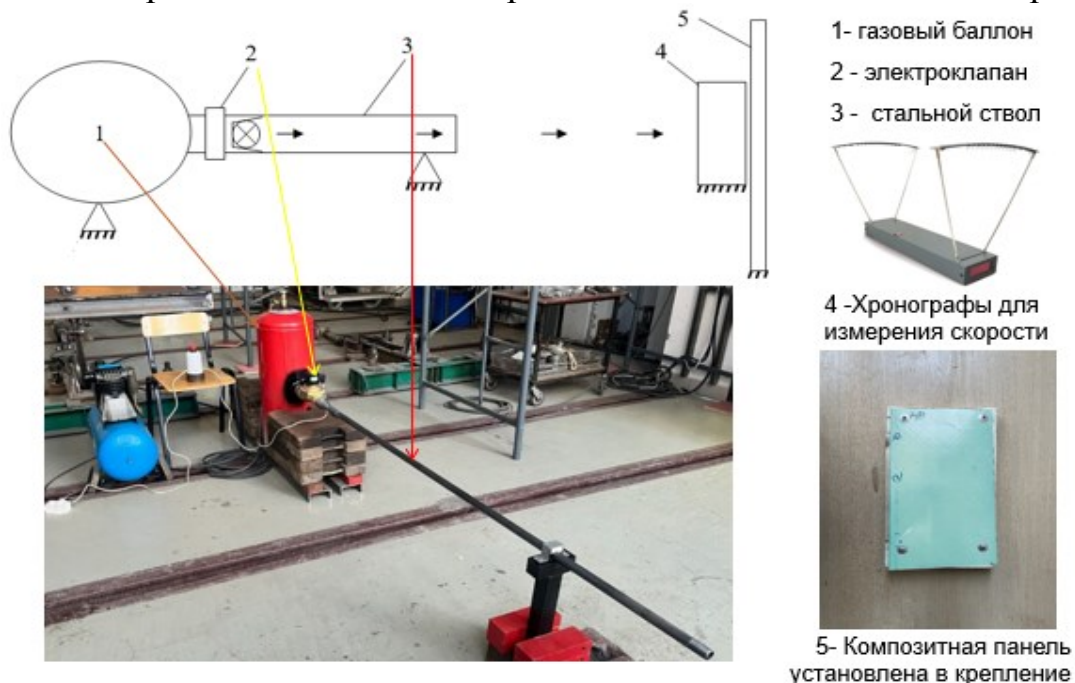


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки

После удара образец панели подвергался ультразвуковому контролю (УЗК) независимо от того, были ли обнаружены визуальные следы повреждения или нет. На рисунке 7 приведены фотографии образца №5 до удара, после удара и зона расслоения образца в месте удара после ударного воздействия, определённая УЗК.

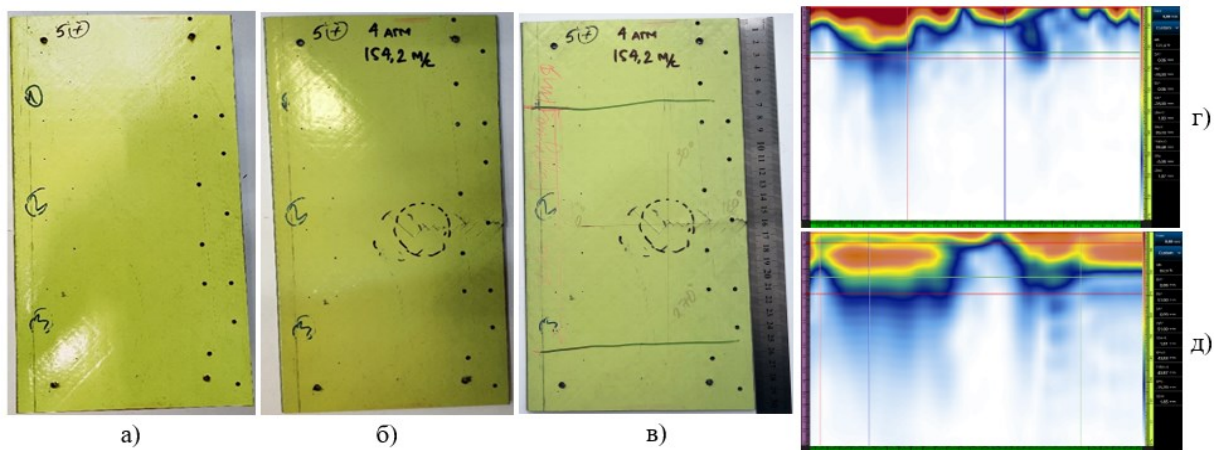


Рисунок 7 – Образец № 5 композитной пластины:  
 а) перед ударом; б) после удара; в) после УЗК;  
 г) УЗК в продольном направлении в месте удара;  
 д) УЗК поперечном направлении в месте удара.

В таблице 3 представлены сводные результаты визуального осмотра композитных пластин после удара и результаты УЗК.

Таблица 3 – Результаты разрушения образцов композитных панелей при воздействии ледяного ударника

№ обр.	V, м/с	Толщина пластины, мм	Повреждения	
			Визуальный осмотр	УЗК
1	170,1	2,46	Слой краски разрушен, волокна порваны, межслойные расслоения	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 185 мм
2	167	2,46	Слой краски разрушен, волокна порваны, межслойные расслоения	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 175 мм
3	167,7	2,46	Слой краски разрушен, волокна порваны, межслойные расслоения	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 170 мм
4	155,5	2,46	Слой краски разрушен	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 220 мм
5	154,2	2,46	Слой краски разрушен	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 187 мм
6	152,5	2,46	Слой краски разрушен	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 215 мм
7	125,4	2,46	Не разрушен	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 180 мм
8	133,3	2,46	Не разрушен	Разрушений нет
9	130,7	2,46	Не разрушен	Разрушений нет
10	136,1	2,46	Не разрушен	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 178 мм
11	112,2	2,37	Не разрушен	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 127 мм
12	109,7	2,46	Не разрушен	Разрушений нет
Пробный 1	109,1	2,37	Слой краски разрушен, волокна порваны, межслойные расслоения	Разрыв волокон. Длина зоны межслойных расслоений 180 мм

Внутренние разрушения пластины происходят при ударе, энергия которого превышает определённый пороговый уровень. Переход из неповреждённого состояния в повреждённое осуществлялся с помощью функции логистической регрессии, зависящей от кинетической энергии удара. Повреждения наиболее чётко проявляются в месте удара и распространяются на прилегающие зоны. Отметим, что развитие зоны расслоения внутри пластины происходит даже тогда, когда поверхность пластины не разрушена (как в образцах № 7, 10 и 11). Чем больше энергия удара, тем легче заметить повреждение на поверхности. Для композитной пластины из материала Toray T800-24K/UD при ударном воздействии градины диаметром 35 мм внешние и внутренние повреждения в пластине возникают при скорости индентора от 130 м/с и выше.

В пятой главе на основе результатов вычислительного эксперимента получены и приведены линейная, квадратическая и кубическая аппроксимирующие зависимости поврежденности (число разрушенных слоёв) композитной панели при ударе градиной диаметром 35 мм от модуля упругости и скорости частицы льда. Наилучшей аппроксимирующей зависимостью числа разрушенных слоёв композитной панели при ударе градиной от варьируемых факторов (модуля упругости и скорости частицы льда) является кубическая зависимость (рисунок 8).

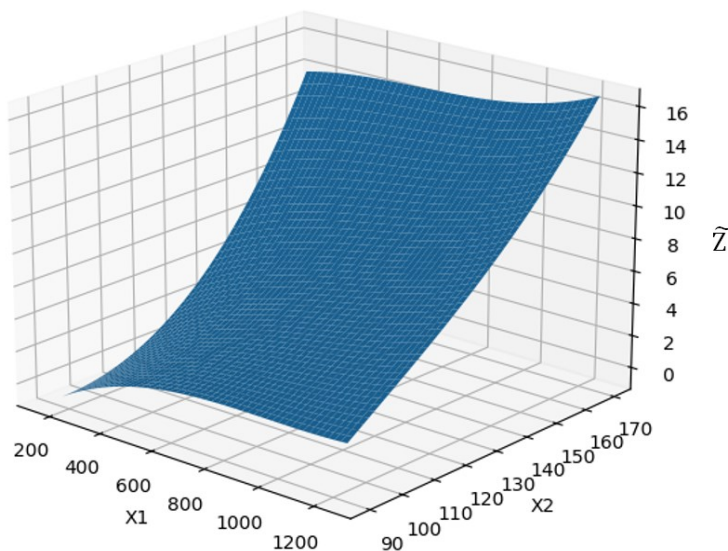


Рисунок 8 – Кубическая зависимость числа разрушенных слоёв  $Z$  (DHV) от модуля упругости  $E$  ( $X_1$ ) и скорости градины  $V$  ( $X_2$ )

Число разрушенных слоёв пластины растёт с увеличением модуля упругости и одновременным ростом скорости градины. В вычислительном эксперименте максимальное число разрушенных слоёв панели равно 16, что составляет 80% от толщины пакета; для этого случая скорость градины равна 170 м/с, модуль упругости льда  $E=1250$  МПа. На число разрушенных слоёв композитной панели сильное влияние оказывает скорость ударника, модуль упругости материала влияет слабее. Показано, что взаимное воздействие факторов способствует значительному росту числа разрушенных слоёв композита.

Представлена методика моделирования множественного удара частицами града по композитной панели на базе разработанной и протестированной модели одиночного низкоскоростного удара градиной по многослойной пластине. Принципиальная схема предлагаемой методики показана на рисунке 9.

Этап Э1 включает в себя разработанную среде ANSYS LS-DYNA расчётную модель низкоскоростного контакта ледяной градины с композитной пластиной, в которой ледяная частица моделируется с помощью метода SPH. Валидация модели одиночного удара частицей града по композитной панели выполнена по

опубликованным экспериментальным данным в главе 3.

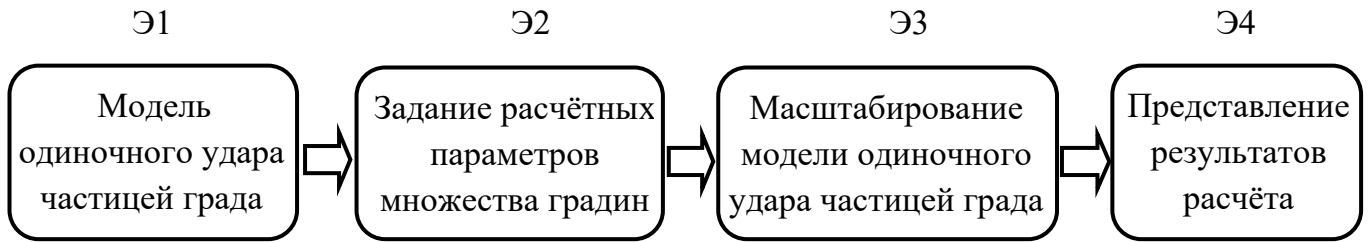


Рисунок 9 – Принципиальная схема методики моделирования множественного удара градиной по композитной панели

Этап Э2 включает определение расчётных параметров отдельных частиц града в модели множественного удара по многослойной пластине. В качестве необходимых параметров выступают: диаметр частиц, скорость удара частицы, модуль упругости льда. Предлагается проводить серию расчётных случаев множественного удара при разных механических характеристиках льда. Скорости считаем малыми (до 220 м/с) и постоянными для всех градин в одном слое, определяющим серию ударов. Необходимо варьировать диаметр частиц послойно, поскольку в реальности выпадение частиц происходит отдельными группами (слоями).

На Этапе 3 для реализации множественного удара разработан макрос на языке Python для случайной генерации координат мест удара о композитную панель и диаметра частиц с помощью функций нормального распределения.

На Этапе 4 обрабатываются результаты численных расчётов моделью множественного удара частицами льда о композитную панель. В качестве количественной оценки повреждаемости пластины выступает число повреждённых слоёв (DHV) композита.

Описаны результаты тестирования предложенной методики при решении модельной задачи оценки повреждаемости композитной пластины при ударе пятью частицами града (рисунок 10).

Частица града 1 имеет диаметр 35 мм и скорость 150 м/с; частица града 2 – 28 мм и 130 м/с; частица града 3 – 24,5 мм и 110 м/с; частица града 4 – 14 мм и 90 м/с; частица града 5 – 10,5 мм и 110 м/с. Композитная пластина из материала Toray T800/3900-2 со схемой укладки слоёв  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_n$ .

Причиной разрушения композитной пластины в тестовом примере при

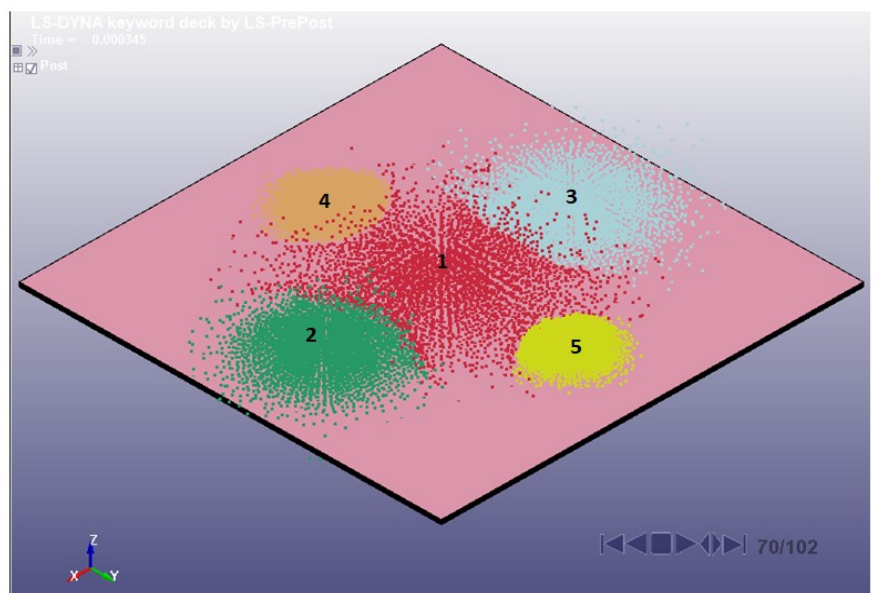
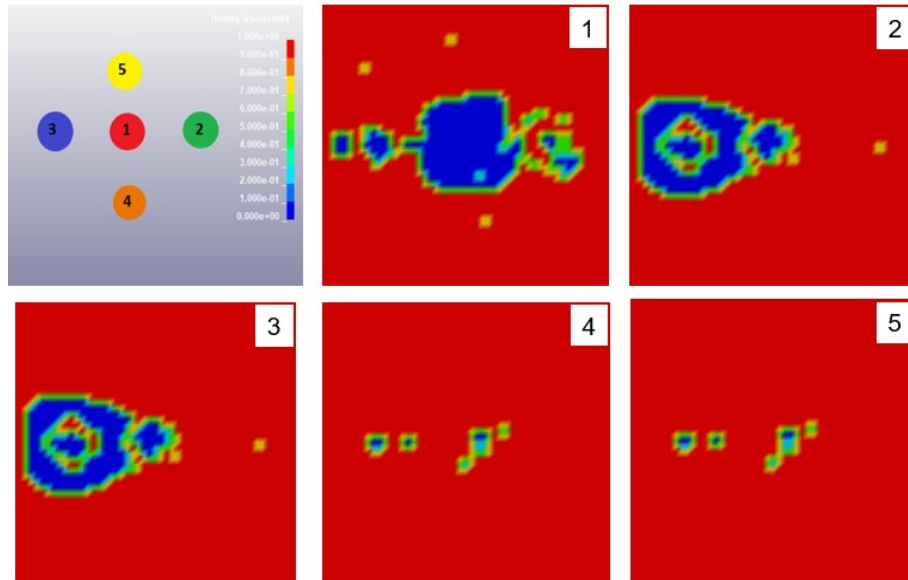


Рисунок 10 – Разрушение частиц града о композитную пластину при моделировании удара в LS-DYNA

множественном ударе пятью частицами льда выступает расслоение. Максимальное значение эквивалентные напряжения по Мизесу достигают 67,82 МПа в первом слое по направлению удара. Разрушение волокна зафиксировано в первом слое перпендикулярно направлению волокна.

На рисунке 11 представлена картина распространения разрушения в пластине по слоям композита при воздействии пяти градин.



Рисунке 11 – Верхние пять слоёв расслоения композитной пластины при моделировании удара пятью градинами

После удара частицами града расслоение возникает в верхней части композита (1–3 слой), площадь пятна контакта покрывает всю зону поражения пятью инденторами. В четвёртом и пятом слое чётко прослеживаются три зоны расслоения от удара 1, 2 и 3 градиной, они определяют корни разрушения материала на уровне отдельных слоёв. Прослеживается тенденция к уменьшению зоны разрушения по мере проникновения в глубь материала (слои 4–20), что говорит о формировании области разрушения по конусу. Более сильное разрушение слоёв возникает от градин с большей скоростью (1, 2 и 3 частицы).

Для расчёта множественного удара частицами града по передней кромке крыла регионального самолёта была выбрана часть крыла между двумя нервюрами,

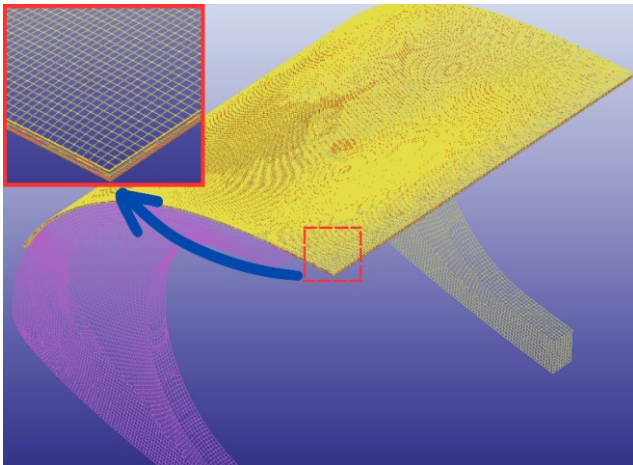


Рисунок 12 – Конечно-элементная модель элемента крыла регионального самолёта

потому что наибольшее перемещение и изгибные напряжения возникают в наиболее податливой части панели.

Расчётная модель состоит из многослойной обшивки размером 332 x 400 мм, подкреплённой нервюрами для увеличения ее несущей способности (рисунок 12). Обшивка состоит из 7–13 слоёв углеволокнутого материала Toray T800 толщиной слоя 0,2 мм с укладкой  $[45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ]_n$ . Нервюра крыла изготовлена из материала пенопласт ПСБ–С 50.



Рассмотрено 13 расчётных случаев последовательного воздействия града на поверхность крыла. Каждый случай включает 10 ударов градинами разного размера, выбранных случайным образом. Модуль упругости материала частиц льда  $E$  составляет 400 МПа и 1 ГПа, а скорости удара  $v$  – 130 м/с и 170 м/с. Для моделирования выбраны три группы града малого (5–18 мм), среднего (18–30 мм) и большого (30–45 мм) диаметра.

На рисунке 13 представлена схема множественного удара частиц льда о композитную обшивку, которая соответствует пятому расчётному случаю. Местоположение и диаметр частицы градины до удара автоматически рассчитываются с помощью функции нормального распределения.

На рисунке 14 представлена картина распространения расслоения (синее) во втором слое композитной пластины во времени при 10 ударах градинами в этом случае.

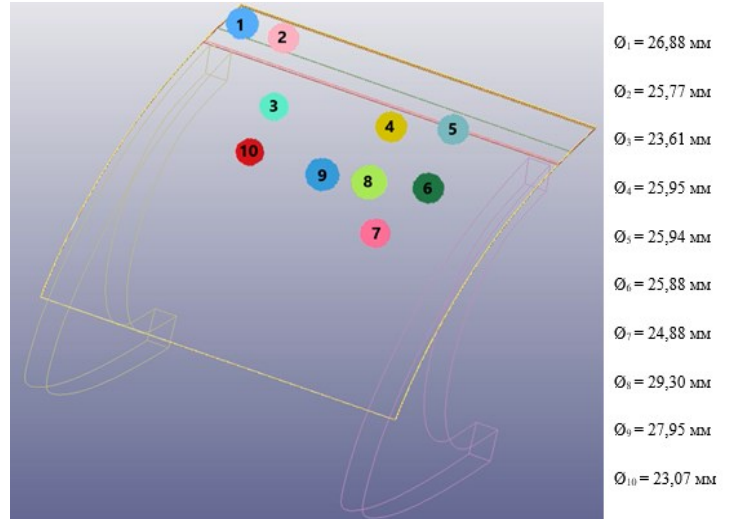


Рисунок 13 – Схема множественного удара в пятом расчётном случае

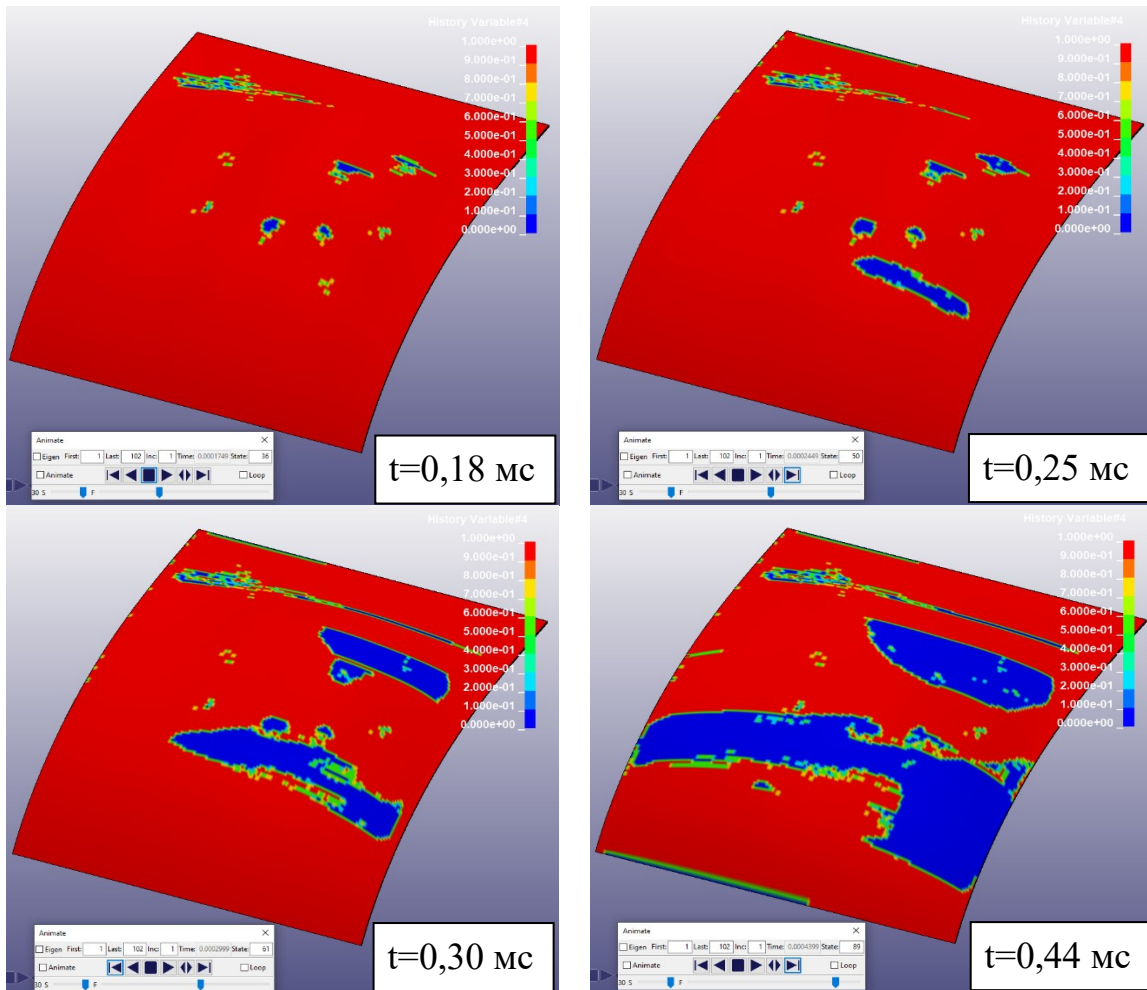


Рисунок 14 – Развитие расслоения во втором слое обшивки во времени

В первоначальный момент времени видны отдельные места удара льдинами диаметром более 24 мм по обшивке. Затем, начинается процесс расслоения, которое затрагивает зоны с множественными ударами (нижний правый угол панели и верхний левый). Эти локальные зоны объединяются в единые участки расслоения по мере развития процесса удара и разрушения самих градин.

Анализ результатов расчёта множественного удара градинами по участку обшивки крыла показал:

- частицы льда малого диаметра (до 18 мм) не приводят к разрушению более, чем двух слоёв композита,

- группа частиц среднего диаметра (интервал от 18 до 30 мм) способна разрушить 8 слоёв панели при меньшей скорости и пробить всю обшивку в случае большей скорости,

- частицы льда наибольшего размера (диаметр более 30 мм) разрушают все слои композитной панели крыла при любом рассмотренном сочетании модуля упругости  $E$  и скорости удара  $v$ .

Показано, что продольное разрушение волокна зафиксировано во внешних слоях композитного материала, в то время как поперечное разрушение волокон и последующее расслоение развиваются в большем числе слоёв.

### **Основные выводы и результаты по квалификационной работе**

1. Разработана расчётная модель для решения задачи контакта жёсткого индентора в виде шара и многослойной композитной пластины в ANSYS Workbench. С помощью критериев разрушения получены представления о механизме и видах разрушений связующего и волокон в слоях композитных пластин из углеродного волокна и тканевого стекловолоконного композита при вдавливании жёстких инденторов различного радиуса. Показано согласование результатов численных расчётов поврежденности углеволокнистого композита и композита из стекловолокна при вдавливании жёсткого индентора, а также выявлено согласование результатов вычислительного эксперимента и реальных испытаний для тканевого стекловолоконного композита.

2. В среде LS-DYNA разработана расчётная модель низкоскоростного контакта ледяной градины с композитной пластиной, в которой ледяная частица моделируется с помощью метода SPH. Выбрана модель деформирования льда, экспериментальным путём определены параметры материала льда для численных расчётов. Подтверждена корректность разработанной расчётной модели единичного удара путём сопоставления численных расчётов: с результатами испытаний и расчётов пиковой нагрузки по опубликованным данным, с результатами натуральных испытаний, проведённых экспериментальной лабораторией ИТПМ СО РАН.

3. Методика формирования образца льда с помощью силиконовой формы с отводом воздуха позволяет получить образцы с малой долей дефектов. На испытательных машинах Instron и BiSS проведены испытания на одноосное сжатие образцов льда при температуре замерзания  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ . Механическое поведение льда является пластичным. Значение модулей упругости образцов льда при одноосном сжатии варьируются от 154 МПа до 1214 МПа. Определены пять интервалов варьирования модуля упругости льда при одноосном сжатии,

температура льда составила  $-20^{\circ}\text{C}$ , рассчитано среднее значение модуля упругости льда для каждого интервала.

4. Проведены натурные испытания воздействия частиц града диаметром 35 мм на композитные панели из материала Toray T800-24K/UD с целью подтверждения возникновения повреждений внутри панелей. Определено, что внешние и внутренние повреждения в пластинах возникают при скорости индентора от 130 м/с и выше.

5. Предложена методика моделирования множественного удара частицами града по композитной пластине на базе разработанной и протестированной модели одиночного низкоскоростного удара градиной по многослойной панели.

Апробация предложенной методики моделирования множественного удара частицами града выполнена при оценке повреждаемости композитной пластины при ударе пятью частицами града и исследовании поврежденности передней кромки крыла регионального самолёта при высыпании града на запаркованный летательный аппарат на аэродроме. Для пластины определено, что значительное разрушение волокна происходит в первом слое перпендикулярно его направлению. Область разрушения вглубь слоёв формируется в виде конуса и затрагивает все последующие слои композита.

6. Для обшивки передней кромки крыла регионального самолёта показано, что сочетание градин меньшего диаметра и скорости до 130 м/с не способно нанести существенные повреждения. Рост диаметра частиц льда приводит к росту поврежденности панели: происходит увеличение числа разрушенных слоёв. Характер разрушения соответствует рассмотренной ранее тестовой задаче: продольное разрушение волокна фиксируется в меньшем числе поверхностных слоёв, чем поперечное разрушение или расслоение.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Перспективным направлением дальнейших исследований являются:

- разработка моделей для расчёта высокоскоростных столкновений множества частиц града с конструкциями крыла из композитных материалов;
- тестирование защитных решений от ударов града по композитной конструкции самолёта в реальных условиях;
- создание базы данных о случаях столкновения самолётов с градом и анализ этих данных для оценки повреждений в композитной конструкции.

## Список публикации по теме диссертации

### *Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Ле. В.Т. Деформирование слоистых композитных пластин при низкоскоростном контакте с жестким индентором // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. вып. 10. С. 1-13. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-10-2312.

2. Ле. В.Т. Численное моделирование ударных повреждений льдом композитных панелей самолета // Вестник московского авиационного института. 2023. Т.30, №.4. С.120-129.

### *Публикации в других изданиях*

3. Ле В.Т. Моделирование разрушения композитной пластины при низкоскоростном контакте с жестким телом / В.Т. Ле ; [науч. рук. Т. В. Бурнышева] // Наука. Технологии. Инновации // Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. А.В. Гадюкиной, 30 нояб.–4 дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 9. – С. 27–28. ISBN 978-5-7782-4297-5.

4. Ле. В.Т. Численное моделирование разрушения слоев тканевого композита при низкоскоростном контакте // XLI Всероссийскую конференцию по проблемам науки и технологий, посвященную 60-летию полета Ю.А. Гагарина в космос, 8-10 июня 2021 г. – Миасс, 2021 . – Т.1. – С. 84–89.

5. Ле В.Т., Бурнышева Т.В. О моделировании разрушения тканевого композита при точечном воздействии // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 22 Все рос. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию со дня первого полета человека в космос, Новосибирск, 21–23 апр. 2021 г. В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – Т. 1. – С. 116–120. ISBN 978-5-7782-4412-2.

6. Ле. В.Т. Численное моделирование воздействия града на композитную пластину // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 19 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 19–21 апр. 2023 г. В 4 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – Т. 1. – С. 63–67.

7. Ле. В.Т. Модель с высокой скоростью деформации с разрушением для льда // Наука. Технологии. Инновации // Сборник научных трудов в 11 ч. / Под ред. Соколовой Д.О., 4–8 дек. 2023 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2024. – Ч.10. – С. 61–64.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Тел. / факс: (383) 346-08-57

Подписано в печать 06.05.2024 г. Заказ № Р-03254.

Формат 60×84 1/16. Объем 1.25 п.л. Тираж 120 экз.