

ВОСТОЧНО-СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

На правах рукописи



Балданов Алдар Батомункуевич

**Экспериментально-численное исследование
деформирования и разрушения многослойных композиционных материалов
при локальном ударе**

Специальность 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бохоева Любовь Александровна

Улан-Удэ, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1 Анализ теоретических, численных и экспериментальных исследований динамических процессов многослойных композиционных материалов при локальном ударе.....	12
1.1 Разрушения многослойных композиционных материалов при ударных воздействиях	17
1.1.1 Типы скоростных ударных нагрузок	18
1.1.2 Повреждения многослойных композиционных материалов при ударе ..	24
1.2 Оптимальные схемы армирования многослойных композиционных материалов и их влияние на разрушение элементов конструкций при ударе	26
1.3 Методика моделирования процесса деформирования, повреждения и разрушения образцов при низко- и высокоскоростном ударе	28
1.3.1 Уровни моделирования элементов конструкций из многослойных композиционных материалов	29
1.3.2 Моделирование процесса разрушения при ударе методом конечных элементов	34
1.3.3 Моделирование дефектов типа расслоение при ударе.....	39
1.3.4 Алгоритм моделирования процесса разрушения элементов конструкций из многослойных композиционных материалов при ударе ..	41
1.4 Исследование устойчивости и разрушения тонкостенных элементов конструкций из многослойных композиционных материалов с дефектами типа расслоений после ударного нагружения.....	51
1.5 Методы обнаружения межслойных дефектов после ударной нагрузки ...	57
1.5.1 Акустические методы неразрушающего контроля	59
Выводы по главе 1.....	63

Глава 2 Экспериментальные исследования элементов конструкций из многослойных композиционных материалов при ударном нагружении и разработка виртуальных испытаний на их основе.....	65
2.1 Экспериментальное исследование процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе ..	65
2.1.1. Изготовление образцов из многослойных композиционных материалов	66
2.1.2 Испытания образцов из многослойных композиционных материалов на низко- и высокоскоростной удар.....	69
2.1.3 Результаты испытаний образцов на низко- и высокоскоростной удар....	72
2.2. Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе	76
2.2.1 Моделирование ударника.....	77
2.2.2 Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения 5-слойной пластины из стеклопластика при низко- и высокоскоростном ударе	78
2.2.3 Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения 10-слойной пластины при низко- и высокоскоростном ударе	83
2.2.4 Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения 20-слойной пластины при низко- и высокоскоростном ударе	88
2.3 Виртуальные испытания на низко- и высокоскоростной удар многослойных пластин из ПКМ	95
2.3.1. Результаты виртуальных испытаний и соответствие их натурным испытаниям.....	96
Выводы по главе 2.....	109
Глава 3 Расчетно-экспериментальная методика оптимального армирования многослойных композиционных материалов	111
3.1 Разработка оптимальной конструкции многослойных пластин из ПКМ для снижения скорости ударника.....	112

3.1.1 Результаты решения задачи оптимизации многослойных пластин из полимерного композиционного материала для снижения скорости ударника.....	114
3.2 Разработка оптимальной конструкции многослойной консоли крыла беспилотного летательного аппарата с экспериментальным подтверждением .	122
Выводы по главе 3.....	131
Глава 4 Определение критических и разрушающих нагрузок тонкостенных пластин из многослойных композиционных материалов с дефектами типа расслоений при ударном нагружении	133
4.1 Определение упругих характеристик однонаправленного КМ	134
4.2 Определение упругих характеристик многослойного пакета тонкого расслоения.....	137
4.3 Определение критических нагрузок	139
4.4 Подрастание дефекта	143
Выводы по главе 4.....	145
Глава 5 Неразрушающий контроль многослойных композиционных материалов после скоростного удара	146
5.1 Неразрушающий контроль межслойных дефектов	146
5.1.1 Визуальный и ультразвуковой контроль дефектов после скоростного удара	147
5.2 Численное моделирование межслойных дефектов в пластинах из КМ..	150
Выводы по главе 5.....	155
Выводы и заключение по диссертационной работе.....	157
Литература.....	158
Приложение	180

Введение

Актуальность работы

При эксплуатации композитные конструкции подвергаются случайным локальным ударным нагрузкам. Их можно разделить на несколько типов, между которыми нет четкой границы, – низкоскоростные, высокоскоростные, гиперскоростные удары (град, гравий, удары при изготовлении и эксплуатации и т. д.). Сложность процессов разрушения многослойных композиционных материалов (КМ), нелинейные деформации, быстропротекающие ударные процессы – все это затрудняет анализ результатов экспериментальных исследований. При этом нет возможности регистрировать динамику самого процесса. В связи с этим возрастает потребность в аналитических и численных методах, позволяющих выполнять достоверный анализ динамических процессов деформирования, повреждения и разрушения многослойных элементов конструкций при ударных воздействиях. Наиболее критичным типом разрушения при ударном воздействии является расслоение – нарушение контакта между слоями КМ. Формируемые скрытые повреждения существенно ухудшают остаточную прочность элементов конструкции, в особенности при сжатии вдоль слоев, поэтому методика их предсказания и анализа требует дальнейшей разработки. Одним из путей решения этой проблемы является разработка методов расчета на прочность тонкостенных элементов конструкций, позволяющих прогнозировать появление и последующий рост расслоения, учитывать геометрию зоны дефекта, структуру композита с учетом механических характеристик материала. Отдельной проблемой являются выявление и оперативная диагностика повреждений. Для конструкций из КМ данная проблема остается недостаточно изученной. Применение методов и средств распознавания дефектов может показать реальную картину достоверной оценки размеров и глубины залегания расслоений после ударной нагрузки.

В работе рассмотрены сочетание натурных экспериментов деформирования и разрушения многослойных КМ при ударе с использованием сверхскоростной

камеры и численного моделирования, позволяющих исследовать процесс повреждений.

Таким образом, актуальность данной работы обусловлена необходимостью применения комплексного экспериментального и численного исследования элементов конструкций из многослойных КМ, направленного на выявление физической картины процессов, протекающих как в материале, так и в элементах конструкции при динамических нагрузках.

Цель диссертационной работы – моделирование процессов деформирования, повреждения, разрушения тонкостенных элементов конструкций из слоистых композиционных материалов при ударном нагружении с использованием разработанных численных и экспериментальных методик.

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

1. Провести экспериментальное исследование процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе для разработки виртуальных испытаний элементов конструкций.

2. Разработать расчетно-экспериментальную методику оптимального армирования многослойных КМ для снижения скорости пробития пластины ударником.

3. Разработать методику аналитического расчета критических и разрушающих нагрузок тонкостенных пластин из слоистых КМ с дефектами типа расслоений, полученными в результате ударного нагружения.

4. Провести оценку площади, размеров и глубину залегания расслоений в пластине из многослойных КМ после ударной нагрузки диагностическими и численными методами.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались метод конечных элементов, экспериментальные методы исследования, методы механики разрушения, классические подходы и методы механики деформированного твердого тела, методы механики КМ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведен цикл испытаний пяти-, десяти- и двадцатислойных пластин из КМ с различной ориентацией укладки армирующих слоев при низко- и высокоскоростном ударе и получены новые опытные данные. Разработана методика виртуальных испытаний пластин из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками на основе численного моделирования и экспериментального исследования.

2. Разработана методика оптимального армирования многослойных КМ для снижения скорости пробития пластины ударником. Скорость пробития уменьшается за счет увеличения площади межслойных дефектов в материале. Предложенный подход продемонстрирован на конкретных примерах проектирования пластин.

3. Разработана методика нелинейного расчета критических и разрушающих сил для слоистых КМ с дефектами типа расслоений, образованными после удара. Определены жесткостные характеристики многослойных КМ по известным характеристикам армирующих элементов и связующего.

4. Сделана комплексная оценка площади, размеров и глубины залегания расслоений после ударной нагрузки ультразвуковой дефектоскопией, численным моделированием.

Достоверность результатов в работе подтверждается применением общих подходов и методов механики композиционных материалов, выполнением расчетов методом конечных элементов, а также проведением большого количества вычислительных экспериментов и их сравнением с экспериментальными результатами исследований.

Практическая ценность заключается в возможности использования методики виртуальных испытаний элементов конструкций и изделий из многослойных композиционных материалов при ударных нагрузках в испытательных лабораториях на предприятиях: ОАО «Улан-Удэнский авиационный завод», ЗАО «Улан-Удэнский лопастной завод», ООО

«Предприятие “Аэротех”», ОАО «Улан-Удэнское приборостроительное производственное объединение», ОАО «Улан-Удэнский авиаремонтный завод» и другие. Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Информационные технологии и прикладная механика» ВСГУТУ.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Результаты цикла испытаний 5-, 10- и 20-слойных пластин из КМ с различной ориентацией укладки армирующих слоев при низко- и высокоскоростном ударе, получены новые опытные данные. Методика виртуальных испытаний элементов конструкций из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками, разработанная на основе комплексного экспериментального исследования и численного моделирования.

2. Новый подход к оптимизации армирования многослойных композитных материалов, основанный на автоматизированной процедуре выбора угла укладки волокон в слое. При оптимальном армировании скорость пробития уменьшается за счет увеличения площади межслойных дефектов в материале.

3. Методика решения задачи устойчивости и процесса разрушения для определения критической и разрушающей нагрузок многослойной сжатой пластины из КМ с межслойными дефектами, полученными при взаимодействии пластины с высокоскоростными ударниками.

4. Результаты комплексного исследования внутреннего расслоения образцов с предварительно ударным повреждением и изучение влияния площади внутреннего расслоения на скорость ударника диагностическими и численными методами.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были изложены на научных семинарах кафедр «Информационные технологии и прикладная механика» и «Технологии машиностроения» ВСГУТУ; на научных всероссийских и международных конференциях, выставках и семинарах, таких как международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (ТГАСУ, г. Томск, 2018), XV Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (ОмГТУ, г. Омск, 2019), региональная

конференция «iPolytechConference» (ИрННТУ г. Иркутск, 2022.), XV Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (г. Омск, 2021), XVI Международная научно-практическая конференция «Современные авиационные технологии» (ИрННТУ, г. Иркутск, 2023), VIII Международная конференция «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2022), VI Международная научно-техническая конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение» ЖИВКОМ-2022 (г. Москва), XVIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (МРДМК-2024, ИМАШ УрО РАН г. Екатеринбург), XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения («МИКМУС-2024» ИМАШ РАН г. Москва). В 2020 г. на XVII Международной конференции CADFEM/Ansys признан лучшим в отраслевых и специализированных секциях данный проект с результатами исследования и разработки элементов конструкций из композиционных материалов для беспилотной авиационной системы.

Основные публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 35 научных работ, из них 5 индексируются базами данных Scopus/WOS, 7 статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК Минобрнауки России (из них 4 по специальности 1.1.8.), 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 182 страницах машинописного текста, включая 121 рисунок и 36 таблиц и 3 приложения. Библиография работы содержит 203 наименования.

В первой главе проанализированы теоретические и экспериментальные работы отечественных и зарубежных авторов по следующим направлениям: разрушения многослойных КМ при ударных воздействиях и возможные типы образуемых повреждений; особенности применения методик проведения

виртуальных испытаний и оптимального моделирования многослойных КМ; анализ условий устойчивости и разрушения тонкостенных элементов конструкций из слоистых КМ с дефектами типа расслоений после ударного нагружения; диагностические методы обнаружения межслойных дефектов после ударной нагрузки.

Во второй главе проведены экспериментальные исследования процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе. На основе полученных экспериментальных данных разработана методика виртуальных испытаний. Достоверность результатов виртуальных испытаний определена исходя из результатов экспериментального исследования, методов численного моделирования и высокоскоростной видеосъемки. Объектами для виртуальных испытаний служат цифровые двойники – многослойные пластины при взаимодействии с высокоскоростными ударниками. Проведены экспериментальные исследования для многослойных пластин из 5, 10, 20 слоев с разной укладкой волокон в слое при низко- и высокоскоростном ударе.

В третьей главе разработана расчетно-экспериментальная методика для снижения скорости ударника за счет оптимального армирования многослойных композиционных материалов и определения площади дефектов. Созданы конечно-элементные (КЭ) модели пластины из многослойного КМ и ударника. Для численного моделирования и расчета использована программа Ansys Workbench 19 r3, для расчета на удар — модули Workbench Ls-dyna и для моделирования слоев КМ — Composite prepost. Разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в слое. Для проверки корректности численных моделей были проведены натурные испытания на скоростной удар. Разработанная методика оптимального армирования многослойных КМ рассмотрена на примере многослойной обшивки консоли крыла беспилотного летательного аппарата (БПЛА) из композиционных материалов.

В четвертой главе определены критическая и разрушающая нагрузки локального тонкостенного расслоения, полученного при взаимодействии

композиционной пластины с высокоскоростными ударниками. Для определения упругих характеристик многослойного пакета пластины и локального расслоения получены соотношения для однонаправленного материала, которые отражают вклад каждого компонента пропорционально его объемной доле – так называемое правило смесей. Однонаправленный композитный материал (ОКМ) представлен в виде чередования слоев, обладающих свойствами волокна и матрицы.

В пятой главе сделана оценка разрушения многослойных композитов под действием ударных нагрузок, определены площади внутреннего расслоения образцов и глубина залегания дефектов. Для качественного анализа дефектоскопии образцов после ударного повреждения в работе применяется комплексный контроль, включающий несколько методов неразрушающего контроля: визуальный контроль, ультразвуковую дефектоскопию и численное моделирование.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

Глава 1 Анализ теоретических, численных и экспериментальных исследований динамических процессов многослойных композиционных материалов при локальном ударе

В настоящее время широкое применение получили многослойные композиционные материалы (КМ) в элементах конструкций и изделиях благодаря устойчивости к усталостным нагрузкам, воздействию ударных нагрузок, защите от коррозии [194]. Многослойные КМ сами представляют собой конструкцию, поскольку при моделировании имеется возможность нужным образом сочетать полезные свойства отдельных слоев и получать материал, обеспечивающий высокую удельную жесткость и прочность изделия.

Возможность придавать будущим изделиям из КМ сложные изогнутые формы и снижать вес дает им преимущество в качестве основного конструкционного материала в самолетах нового поколения [107]. Доля КМ, используемых в современных летательных аппаратах, увеличилась до 50% (табл. 1.1), что позволило повысить эффективность использования топлива более чем на 20% [84].

Таблица 1.1 – Статистические данные о динамике объемов применения ПКМ
в самолетах [46]

Модель самолета	Производитель	Дата ввода в эксплуатацию	Доля КМ, %
В747	Боинг	1969	1
В767	Боинг	1981	4
А300	Аэробус	1985	5
А310	Аэробус	1986	10
ИЛ-96	КБ Ильюшина	1988	6
Ту-204С	ОКБ Туполева	1989	14

A320	Аэробус	1989	15
B777	Боинг	1994	11
SSJ100	АО «ГСС»	1998	13,5
A380	Аэробус	2005	22
B787	Боинг	2009	66
A350	Аэробус	2013	52
МС-21	Иркут	2017	33

Однако в процессе эксплуатации летательные аппараты (ЛА) подвергаются ударным воздействиям, которые могут приводить к различным повреждениям в зависимости от скорости удара (рис. 1.1). Чувствительность КМ к ударным нагрузкам является одной из главных проблем при проектировании конструкций из них.

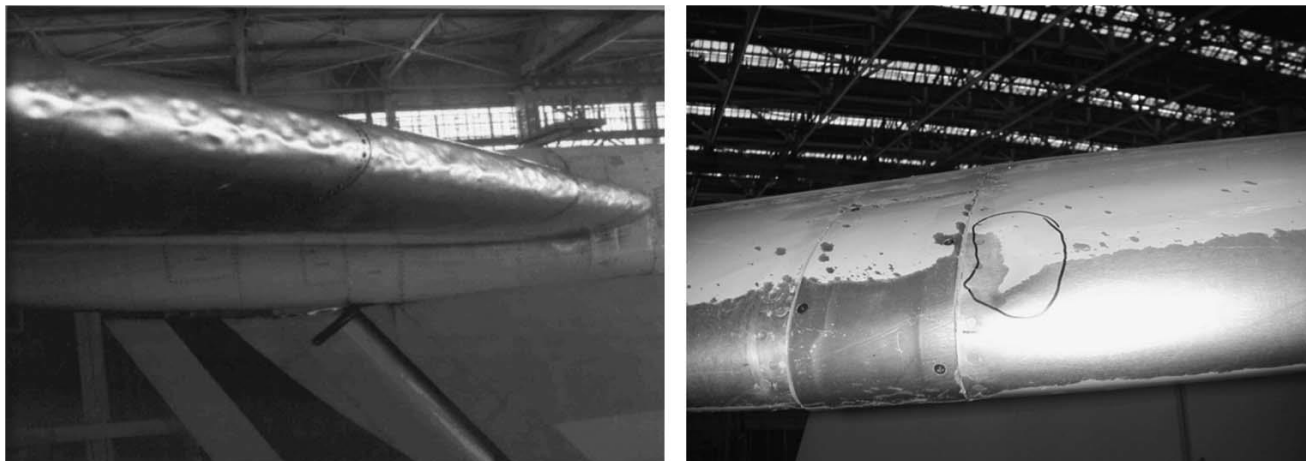


Рисунок 1.1 – Повреждения на крыле ЛА от удара [143]

На рисунке 1.1 представлены результаты ударных нагрузок при эксплуатации ЛА, исследования которых проводят специалисты ЦАГИ, ОКБ, ГосНИИ ГА и других организаций. Статистика ударных нагрузок и их влияние на ЛА представлены в работах [36; 104]. Авторы приводят анализ исследований Ту-134, Ту-154, Як-40, Як-42, Ан-24, Ан-26, Ил-76, Ил-86, Ил-96 и других воздушных

судов, эксплуатируемых в России за период с 2000 по 2012 г. [110]. Повреждения в основном получают фюзеляж – 43%, крыло – 38% [36; 104]. В работе [54] приведены эксплуатационные повреждения элементов конструкций из КМ самолетов Ил-86 и Ту-204, проанализированы причины их возникновения. По результатам осмотра на самолетах Ил-86 выявлено, что основные повреждения (до 61%) получают внутренние (27%) и внешние закрылки (34%).

Основные причины ударных воздействий: случайное падение инструментов во время технического обслуживания или ремонта конструкций из ПКМ; воздействие града, мусора или постороннего предмета; столкновение с птицами; обломки от лопнувших шин; случайное столкновение с оборудованием при погрузочно-разгрузочных работах и другие.

В работе [110] рассмотрены повреждения в элементах конструкций воздушных судов Ан-24, Ан-26, Ан-30 и Ан-32, в результате которых появляются расслоения, растрескивания и трещины, сколы, вмятины, пробоины. Данные представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Эксплуатационные повреждения ЛА [110]

№	Тип повреждения	Причина возникновения
Повреждения обтекателей и законцовок килей		
1	Расслоение между слоями КМ	Удары
2	Расслоение сотового заполнителя	
3	Сквозные пробоины	
4	Размягчение поверхности обтекателя	
5	Выветривание внешнего слоя	Абразивный износ
6	Трещины	Повреждения, усталость
Повреждения элеронов, гребней, триммеров, обтекателей ramпы и стабилизаторов		
7	Пробои с усадкой заполнителя	Удары
8	Расслоение стеклоткани	

Продолжение таблицы 1.2

9	Выветривание внешнего слоя	Абразивный износ
10	Разрушение задней кромки	Абразивный износ
11	Попадание влаги в наполнитель	Нарушение герметичности внешнего слоя
12	Трещины	Повреждения, усталость

Наибольшую опасность представляют трудно обнаруживаемые внутренние расслоения, которые возникают при ударе. При сжимающих нагрузках данные повреждения могут приводить к снижению прочности до 40% [111]. Ю. М. Фейгенбаум, С. В. Дубинский отмечают [143], что требования Авиационных правил АП-25 (п. 25.571(а)) рассматривают только ограниченные повреждения: от столкновения с птицей (25.631, 25.571 (е)(1), 25.775(b)), повреждения при разлете нелокализованных обломков двигателя (25.571.(е)(2-4), 25.903(d)) и повреждения от разлета элементов протектора шин при взрыве пневматики от перегрева (25.729(f)). Однако указания и рекомендации относительно видов и размеров случайных эксплуатационных повреждений не приводятся [104].

В международных правилах проблеме эксплуатационных ударных воздействий на конструкции из КМ уделяется более значительное внимание. Так, в рекомендательном циркуляре FA AAC 20-107В «Авиаконструкции из композиционных материалов» [113] дается 5 категорий повреждений при эксплуатационных ударных воздействиях:

1-я категория: допустимые дефекты, обнаруженные при плановом или полевом осмотре (расслоение, пористость, царапины, выемки и незначительные повреждения от воздействия окружающей среды), которые не влияют на срок службы конструкции ЛА;

2-я категория: повреждения (дефекты), которые могут быть обнаружены во время плановых или полевых осмотров, не увеличивающиеся в течение периода контроля;

3-я категория: повреждения, которые могут быть обнаружены персоналом, не обладающим специальными навыками по осмотру КМ;

4-я категория: повреждения в результате известного инцидента, вследствие которого летные маневры ограничены (разрыв ротора, удары птиц, разрывы шин или сильный град в полете;

5-я категория: серьезные повреждения, возникшие в результате событий на земле или в полете (столкновения служебных автомобилей с ЛА, аномальные перегрузки в полете, аномально жесткие посадки, ошибки при обслуживании, потеря частей самолета в полете, включая возможный последующий высокоэнергетический, широкомасштабный (тупой) удар по прилегающим конструкциям).

Последствием ударных нагрузок является значительное снижение прочности элементов конструкций из КМ. Авторы работ S. Abrate [111], W. J. Cantwell [133] показали максимальный процент снижения прочности в поврежденном КМ от 40 до 60% в отличие от неповрежденного КМ. В работе [203] представлено исследование на прочность изделий из КМ при сжатии после ударных воздействий, процент снижения прочности составляет 46%. В диссертационной работе [96] проведены испытания пространственно-армированных композитов на удар и сжатие после удара. Углепластиковые образцы-панели выдерживают ударную нагрузку при падении груза до 20 Дж, после сжатия они сохраняют несущую способность на 60%, углепластиковые панели с перфорацией – 45%, стеклопластиковые – 35%, стеклопластиковые с перфорацией – 30%. В статьях [72; 87] представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований остаточной прочности композитных панелей после эксплуатационных повреждений.

Чтобы оценить степень снижения прочности конструкции из многослойных КМ после удара, необходимо понимать процесс разрушения, поведение под нагрузкой поврежденного материала и размеры повреждений, в том числе межслойные дефекты типа расслоений для определения остаточной прочности изделий из КМ и их ремонта.

1.1 Разрушения многослойных композиционных материалов при ударных воздействиях

Результатом процессов разрушения КМ при ударе являются: растрескивание матрицы, расслоение, сдвиговые повреждения, разрушения волокон, которые рассмотрены в работах [8; 23; 24; 26–28]. Исследования процесса разрушения КМ при ударном воздействии представлены в работах таких известных ученых, как С. Б. Сапожников [35; 39; 90], Л. А. Медведский [60], Н. А. Абросимов [1] и др. Среди зарубежных исследований следует отметить работы S. Abrate [111], A. Baker [118], Celal Evci [144], W. Cantwell [133], C. Evci [133] и др.

При исследовании процесса разрушения при ударе многослойных КМ необходимо учитывать: скорость удара (энергия) [111], физико-механические характеристики материала ударника и мишени [133], геометрию мишени и ударника [145]; условия закрепления образца [157; 185; 191]. В монографии А. Н. Полилова [81] выделены 4 скоростных режима испытаний в зависимости от скорости нагружения:

- 1) статические скорости, в которых влияние инерционных и динамических эффектов пренебрежимо мало.
- 2) промежуточные скорости. Требуется учет динамических факторов.
- 3) высокие скорости. Необходимо учитывать волновую природу процесса деформирования.
- 4) сверхвысокие скорости. Исследования выполняются на специализированных ударных установках с применением высокочастотной измерительной аппаратуры. Наблюдается переход от одноосного напряженного состояния к одноосному деформированному состоянию. Из-за интерференции продольных и поперечных волн деформации на поверхности и в объеме образца могут существенно различаться [81].

Формы ударника играют ведущую роль и при пробивании КМ, поскольку острые формы вызывают локализованный пробой за счет концентрации

напряжений, тогда как тупые приводят к обширным расслоениям и изгибным трещинам [141]. В работе [176] применение плоских и конических ударников потребовало различных подходов из-за существенных различий в механизмах разрушения. Форма снаряда определяет доминирующий тип нагружения: сдвиг (конические) или сжатие (плоские). Обычно снаряд с тупым (плоским) наконечником сначала инициирует выбоину с последующим срезанием пробки аналогично широкоугольным конусам (рис. 1.2) [195].

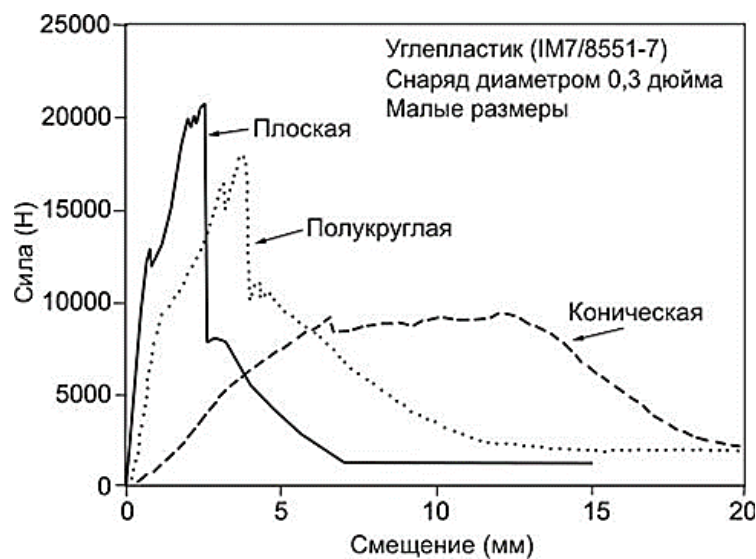


Рисунок 1.2 – Зависимость силы от смещения при различной форме ударника [195]

1.1.1 Типы скоростных ударных нагрузок

В работах [2; 5; 8; 25; 33] при описании разрушения КМ при ударном воздействии традиционно выделяют несколько типов ударов – низкоскоростные, высокоскоростные и гиперскоростные, но четкий переход между данными скоростями отсутствует. Скорость удара не позволяет провести точную границу между баллистическими (динамическими) и статическими (квазистатическими) режимами деформирования материала [110; 115; 131; 149; 167].

Низкоскоростные удары представляют квазистатический процесс со скоростью удара от 1 до 10 м/с [187]. Отмечено, что при таком ударе распространение волны напряжения в образце не является значительным [174]. При контакте между образцом и ударником происходит распространение волн

сжатия и изгиба, которые достигают задней поверхности образца и отражаются от нее, множественно повторяясь до угасания. Однако автор работы [111] отмечает, что удары при скорости до 100 м/с являются низкоскоростными. Низкие скорости удара вызывают растягивающие напряжения в самом нижнем слое КМ из-за возникших изгибающих нагрузок от удара. Эти растягивающие напряжения вызывают трещины в матрице (рис. 1.3а), называемые изгибными трещинами [137], которые расходятся на границе раздела слоев, образуя расслоение (рис. 1.3б). Дальнейшее увеличение изгиба приводит к разрыву волокон на нижнем слое (рис. 1.3с) с постепенным их увеличением.

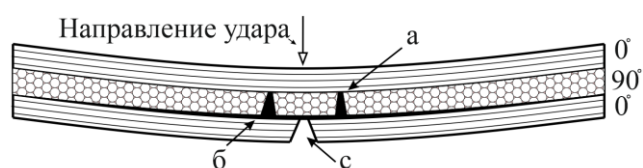
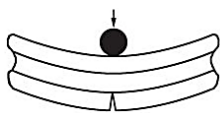


Рисунок 1.3 – Схема, демонстрирующая основные повреждения при ударе:

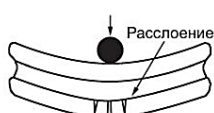
а – растрескивание матрицы; б – расслоение; с – разрушение волокон

В работе [133] рассмотрена поэтапная схема трех основных повреждений при низкоскоростных ударах (рис. 1.4):

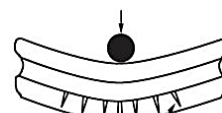
- 1) растрескивание матрицы (растрескивание происходит параллельно волокнам в результате растяжения, сжатия или сдвига);
- 2) расслоение (вызванное межслойными напряжениями); отслоение волокна от матрицы;
- 3) разрушение волокон, как показано на рис. 1.4. (разрушение волокон при растяжении и изгибе волокон при сжатии).



1 – растрескивание
матрицы



2 – расслоение



3 – разрушение волокон

Рисунок 1.4 – Повреждения при ударе

В последнее время появилось понятие «промежуточные низкоскоростные удары». Промежуточные удары являются наиболее вероятными и критическими

событиями, возникающими из-за столкновений с птицами, градом, от удара фрагментом покрышки шасси или дорожного покрытия, также возможны случайные ударные воздействия в ходе штатных эксплуатационных и ремонтных работ. Их вероятность в авиационной практике существенно выше, чем от высокоскоростных ударов. Такие удары редко приводят к внедрению в материал ударника или сквозному пробитию, однако может появиться повреждение внутри КМ или на обратной стороне, которое визуально не обнаруживается. В работе [26] рассмотрены повреждения 20-слойной пластины из стеклопластика при низкоскоростном ударе. Показана схема внутреннего повреждения, результаты экспериментов (рис. 1.5).

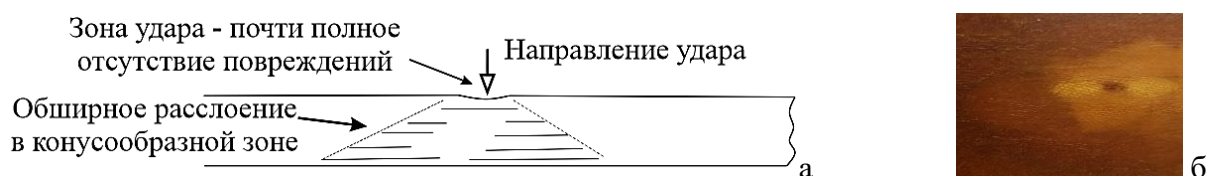


Рисунок 1.5 – Повреждение стеклопластика при низкоскоростном ударе:

а – схематичное изображение повреждения; б – фотография тыльной стороны пластины стеклопластика из 20 слоев

Если ударник имеет небольшую скорость, но при ударе отсутствует сквозное пробитие, то образуются повреждения, показанные на рисунке 1.6. На поверхности пластины в результате удара образуются локальные повреждения, а тыльные слои отслаиваются и изгибаются, наблюдается незначительное разрушение волокон на тыльной стороне.

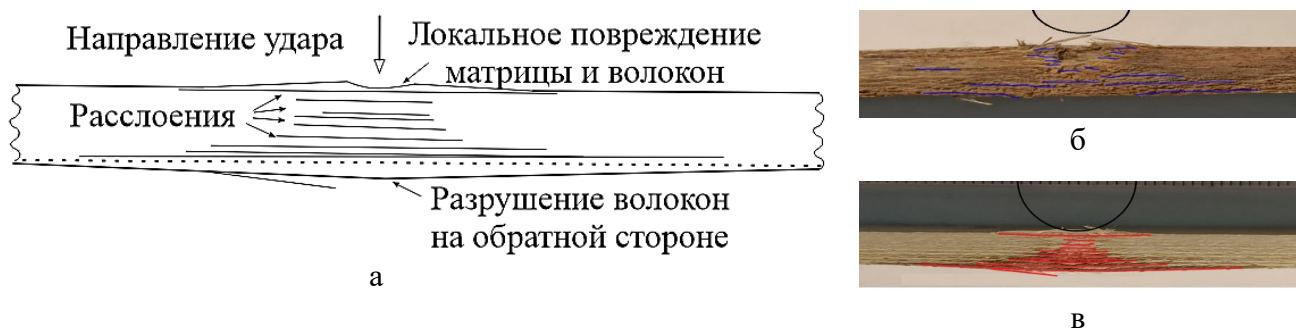


Рисунок 1.6 – Повреждение стеклопластика из 20 слоев при средних скоростях удара: а – схематичное изображение повреждения; б, в – фотографии срезов пластины из стеклопластика (20 слоев) после удара

В зарубежной литературе такие удары называют BVID (Barely Visible Impact Damage), последствием которых могут быть растрескивание матрицы и расслоение [119]. Такие повреждения вызывают локальное снижение жесткости и прочности конструкции, что может привести к развитию повреждений при действии эксплуатационных нагрузок [103]. При промежуточных ударах этапы повреждения КМ можно разделить на три стадии [137] (рис.1.7):

1) вблизи ударной поверхности может образоваться локальное смятие (рис.1.7а);

2) при ударном нагружении в КМ изгибные и сдвиговые напряжения инициируют образование микротрещин в матрице (ориентированных под $\sim 45^\circ$ к плоскости слоя) и межслойных расслоений, причем сдвиговые повреждения локализуются на некотором удалении от точки удара и часто под углом около 45° к плоскости слоя в матрице (рис. 1.7б);

3) распространение микротрещин на близлежащую границу раздела слоев приводит к увеличению расслоений и области микротрещин (рис 1.7в).

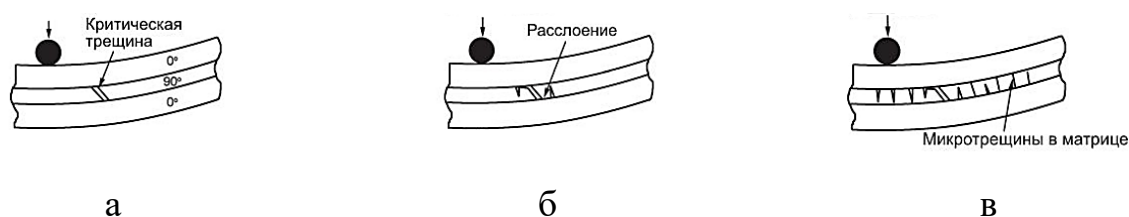
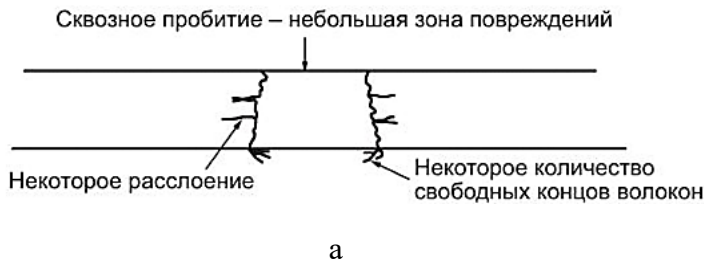


Рисунок 1.7 – Этапы повреждения КМ при средних скоростях удара:

а – локальное смятие; б – расслоение; в – микротрещина

Высокоскоростной (баллистический) удар включает снаряды, движущиеся с высокими скоростями, обычно превышающими скорость звука (более 340 м/с). При таких ударах должна быть небольшая масса ударника и короткий по продолжительности контакт ударника с мишенью. Удар вызывает локализованную форму повреждения [26], при которой большая часть энергии рассеивается в очень маленькой зоне непосредственно в месте удара (рис. 1.8).



б



в

Рисунок 1.8 – Повреждение стеклопластика из 20 слоев
при высокоскоростном ударе:

а – схематичное изображение повреждения (пробитие); б – фотография среза пластины стеклопластика из 20 слоев после удара (пробитие); в – фотография среза пластины стеклопластика из 55 слоев после удара (не пробитие)

В работе [174] отмечено, что при высокоскоростном ударе на распространение волн внутренних напряжений материал не успевает отреагировать, что приводит к очень локализованным повреждениям. Авторы работы [182] отмечают, что при конической или эллиптической форме ударника наблюдается пробитие, характеризующееся постепенным расширением отверстия вдоль канала его движения (рис.1.9). Примеры раздвигания нитей в стеклопластике приведены на рисунках 1.8в и 1.9а, б. В данном случае материал перед ударником вытесняется в стороны по мере его движения, приводя к утолщению образца у отверстия. Диссипация энергии при ударе, общая для различных ударников и материалов, обусловлена трением на контактной поверхности и зависит от площади контакта, сжимающего напряжения, и коэффициента трения между ударником и пластиной [56]. Высокая скорость удара создает повышенные напряжения в материале и тем самым активирует новые процессы деформации и разрушения. Для элементов конструкций из КМ пробитие зависит от отношения толщины КМ к диаметру ударника [23].



Рисунок 1.9 – Образец из стеклопластика, на котором видно расширение отверстия и пробитие коническим ударником весом 13,2 г: а – удар со скоростью 203 м/с под углом 37° в вершине образца; б – удар со скоростью 384 м/с под углом 120° в вершине образца

К гиперскоростным ударам относят удары при столкновении космических аппаратов с элементами метеоритов, космического мусора, скорость которых может достигать более 2 км/с. В этих случаях ударники могут пробивать КМ, поэтому критические скорости, при которых ударники проникают в конструкцию, становятся основным аспектом моделирования. В работе [136] отмечено, что в однонаправленных КМ, подвергшихся воздействию гиперскоростных ударов, пробитие сопровождалось расслаиванием и расслоением верхних слоев. Такое повреждение имеет вид удлиненных полос, выходящих из ударного кратера в направлении оси армирующих волокон. Он был объяснен сдвиговыми нагрузками вдоль границы раздела слоев с разнородной ориентацией, вызванными продольными волнами, распространяющимися от области удара. Характеризуется зоной межслойного повреждения и расслоения, вытянутой в направлении волокон внешнего слоя. На рисунке 1.10 представлено повреждение при гиперскоростном ударе, сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

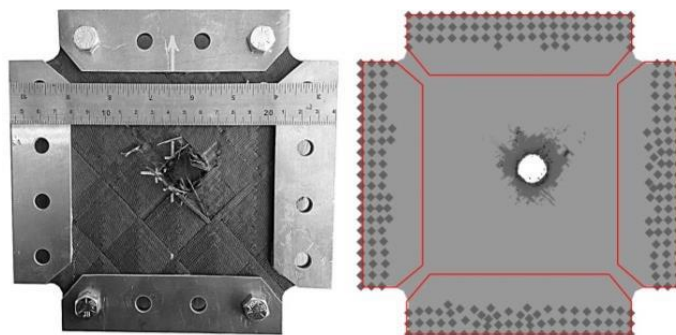


Рис. 1.10 – Повреждение КМ при высокоскоростном ударе: сравнение экспериментальных результатов и численных расчетов [136]

1.1.2 Повреждения многослойных композиционных материалов при ударе

Согласно проведенному анализу можно выделить несколько видов повреждений многослойных элементов конструкций из КМ, таких как трещины, расслоение, разрушение волокон.

При ударном нагружении в толстостенных и тонкостенных многослойных КМ развитие трещины имеет разный вид. Развитие трещины в толстостенных материалах (толщина более одного сантиметра) начинается в матрице первого слоя, образуя картину в виде дерева трещин (рис. 1.11а; рис. 1.12). Обычно для таких трещин характерен угол наклона 45° к плоскости слоя. В тонкостенных КМ (толщиной менее одного сантиметра) изгибающее напряжение в нижних слоях КМ приводит к растрескиванию матрицы в самом нижнем слое и представляет перевернутую картину дерева повреждений, как показано на рисунке 1.11б [111].

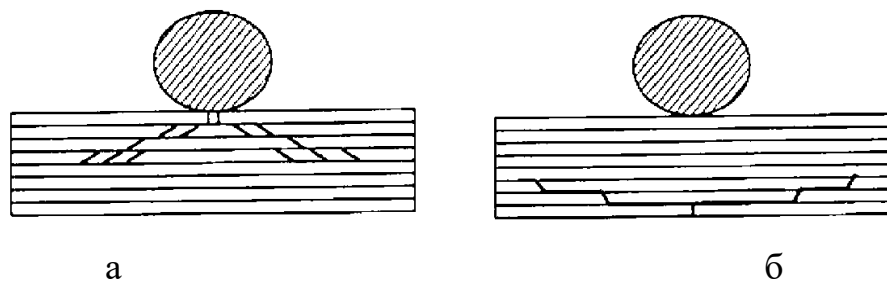


Рисунок 1.11 – Схематичное изображение дерева повреждений для многослойных и тонких КМ: а – дерево повреждений в толстостенном КМ; б – обратное дерево повреждений в тонкостенных КМ

Авторы работ [128; 107; 149] показали, что повреждение в многослойных КМ обычно начинается вблизи поверхности удара из-за высоких локальных контактных напряжений под ударником и продвигается по КМ в форме конуса из-за сдвиговых напряжений по всей толщине (рис. 1.12) [169]. Также при низкоскоростном ударе пластина изгибается и повреждение может иметь сдвиговой или изгибный характер.

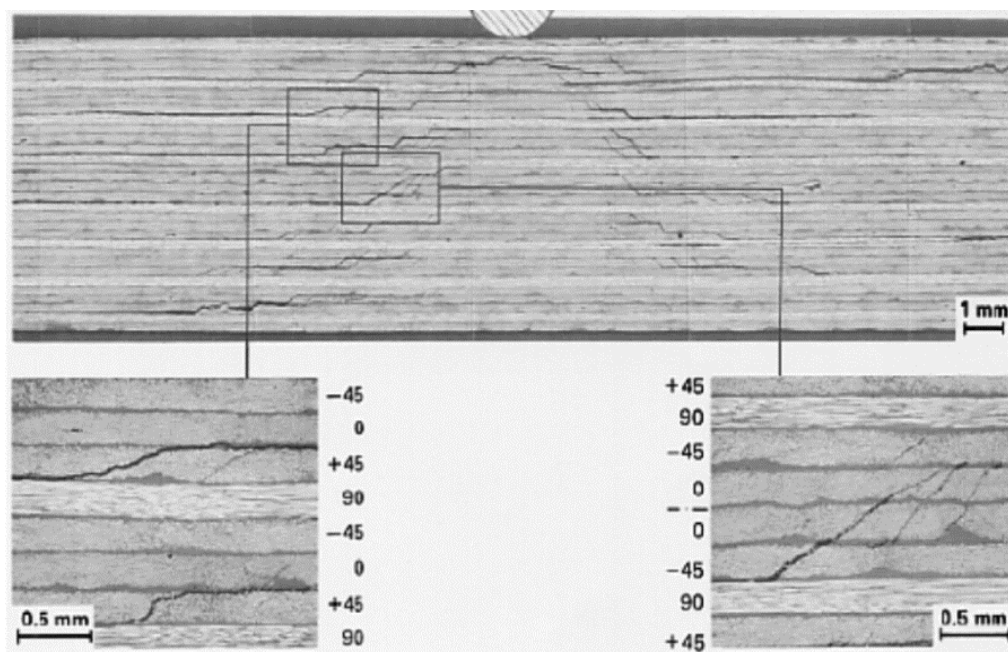


Рисунок 1.12 – Повреждения, образованные при ударе средней скоростью по многослойному КМ

Расслоение – это наиболее часто наблюдаемое повреждение КМ при ударе и одна из основных проблем при проектировании изделий из КМ. Расслоения вызваны высокими межслойными напряжениями, образуемыми при ударе, и относительно низкой межслойной прочностью КМ. Это явление возникает из-за того, что волокна, лежащие в плоскости слоя, не обеспечивают упрочнение по толщине, и поэтому перераспределение нагрузок проходит через относительно слабую матрицу. В работе Choi [137] представлены два основных типа формирования повреждений, которые зависят от свойств матрицы и углов укладки слоев. Основное отличие пластичных и хрупких матриц заключается в динамике расслоения: в хрупких матрицах оно развивается мгновенно с последующим резким торможением, тогда как в пластичных протекает постепенно и предсказуемо [56].

Обработывая поверхности волокон, можно регулировать размеры расслоений [162]. Для повышения адгезии на границе раздела волокно – матрица применяют физические (плазменная обработка), химические (нанесение межфазных покрытий), механические (абразивная обработка) и комбинированные

методы, которые увеличивают шероховатость поверхности [166], также добавление различных порошков и добавок в структуру матрицы позволяет регулировать адгезию [5; 26; 83; 109; 129; 161]. При недостаточной адгезии ударное воздействие вызывает значительное межслоевое расслоение, однако в условиях высокоскоростного удара расслоение становится энергодиссипативным механизмом, способствующим снижению разрушающих нагрузок за счет рассеивания энергии.

Разрушение волокон обычно возникает гораздо позже, чем растрескивание матрицы и расслоение на неударяемой поверхности из-за высоких напряжений, образуемых при изгибе. Оно происходит под ударным элементом из-за локальных высоких напряжений и вдавливания. Разрушение волокон является предшественником проникания ударника в КМ. При превышении изгибом критического уровня, соответствующего инициированию расслоения, на тыльной (растянутой) стороне пластины возникает разрыв волокон с образованием «лепестка разрыва» [155], более характерного для разрушения от удара металлом [33]. Далее происходит проникание ударника в материал. Проникание является макроскопическим способом разрушения и происходит, когда разрушение волокна достигает критической величины, позволяя ударному элементу полностью пробить материал.

1.2 Оптимальные схемы армирования многослойных композиционных материалов и их влияние на разрушение элементов конструкций при ударе

Несущая способность тонкостенных элементов конструкций из многослойных композитных материалов существенно зависит от выбора толщины слоя и ориентации слоев в пакете, а также последовательности (или порядка) укладки слоев, т. е. их относительного расположения в пакете.

В работе [33] были исследованы 4 варианта укладки волокон КМ из углеволокна: однонаправленная, двунаправленная 1:1, двунаправленная 2:1 и

тринаправленная (псевдоизотропная). Распределение по сопротивляемости ударному разрушению получилось следующим (от лучшего к худшему): 1) двунаправленная 1:1; 2) тринаправленная; 3) двунаправленная 2:1; 4) однонаправленная. Известны работы Fuoss [149], Natsumura и других [16; 19; 138; 148], авторы которых провели испытания на удар с падением груза и доказали, что последовательность укладки слоев оказывает сильное влияние на ударные характеристики КМ при низких скоростях удара. Они предложили избегать небольшие углы укладки волокон в слое, так как распространение дефектов типа расслоения происходит на границах слоев с небольшим углом укладки и одинаковой ориентацией волокон в пакете. В работе Hong и др. [160] рассмотрены разные последовательности укладки слоев и доказано, что минимизация энергии удара зависит от угла укладки: чем больше угол, тем меньше минимальная энергия удара.

В работе [13; 15] исследовано напряженно-деформированное состояние композитной слоистой консоли крыла беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в слое. Определена оптимальная конструкция многослойной обшивки консоли крыла БПЛА в системе ANSYS, обеспечивающая максимальную прочность и жесткость при заданных нагрузках.

В работе Н. Wang, Duan Y. и др. [127; 196] был использован генетический метод оптимизации для поиска последовательности укладки КМ, обеспечивающей наилучшую остаточную прочность на сжатие после удара низкими скоростями. Для проверки эффективности метода оптимизации были проведены стендовые испытания на удар низкой скоростью и испытания на сжатие после удара. Результаты экспериментов показывают, что в оптимизированной укладке, равной $[-82/-86/-79/-27/50/30/-45/83/-18/78/-8/10/80/17/-70/-52]_s$, область повреждений КМ уменьшилась на 42,1% по сравнению с базовым образцом, имеющим укладку $[45/0/-45/90]_{4s}$, а остаточная прочность на сжатие увеличилась на 10,79% по сравнению с базовым образцом.

В настоящее время расчетных методик по проблеме армирования многослойных композиционных материалов недостаточно, а число экспериментальных работ по исследованию прочности КМ с повреждениями после высокоскоростного удара ограничено. Сложность процесса разрушения многослойных КМ, нелинейные деформации, быстропротекающие ударные процессы затрудняют разработку расчетных и экспериментальных методик. При этом нет технической возможности регистрировать динамику самого процесса пробивания внутри материала. Для решения данной проблемы требуется проведение большого объема теоретических изысканий и комплексных экспериментальных исследований.

1.3 Методика моделирования процесса деформирования, повреждения и разрушения образцов при низко- и высокоскоростном ударе

Динамику удара регистрировать достаточно сложно, анализ сохранившихся после нагружения образцов не дает достоверной оценки процессов разрушения, поэтому в данной работе рассмотрено сочетание натурных экспериментов и компьютерного моделирования. Анализ работ в открытой печати отечественных и зарубежных авторов показал, что комплексных исследований, которые включают теоретические аспекты, математические модели с экспериментальной апробацией многослойных КМ, закономерностей процесса их деформирования и разрушения при динамическом нагружении, практически нет. Комплексные подходы отсутствуют как по причине сложности проблемы, отсутствия глубоких научных работ, так и в силу ее трудоемкости.

Прогнозирование таких повреждений на этапе проектирования затруднительно при использовании классических теоретических методов, так как размеры и глубина повреждений зависят от множества условий ударного воздействия, в том числе от условия закрепления, скорости удара, укладки слоев, характеристики материалов и т. д. При отсутствии возможности измерения образуемых во время удара внутренних напряжений, деформаций и расслоений

экспериментальными методами, например, тензометрией, отдается предпочтение использованию численных методов расчета, в частности методу конечных элементов (МКЭ).

Известны несколько программных обеспечений (ПО), реализующих расчеты на удар КМ, такие как LS-DYNA, Abaqus, Nastran и др. В данной работе выбор МКЭ программы LS-DYNA был обусловлен наличием в ней более 200 вариантов различных моделей поведения материалов, в том числе композиционных, которые были использованы в работах [125; 140; 150; 152; 159; 181; 188] для прогнозирования их поведения при динамических нагрузках, повреждениях и больших деформациях [125].

С развитием вычислительных мощностей численные методы расчета, основанные на МКЭ, стали эффективным инструментом, позволяющим увидеть распределение внутренних напряжений и деформаций в сложных конструкциях, которые трудно зарегистрировать обычными методами, например, тензометрии, тем самым уменьшив количество экспериментов. Однако результаты численного моделирования нуждаются в экспериментальной верификации, а их применение требует взвешенного подхода. Корректная интерпретация механизма разрушения является ключевым фактором при определении релевантных параметров материала. Численные методы расчета, реализованные в программных комплексах LS-DYNA, ANSYS, ABAQUS, NASTRAN и др., позволяют наиболее эффективно решать множество нелинейных процессов, образуемых при ударе КМ. Точность решения зависит от адекватности используемых уравнений (модели), описывающих поведение материала.

1.3.1 Уровни моделирования элементов конструкций из многослойных композиционных материалов

Численная модель многослойного КМ должна прогнозировать размеры расслоений и последующее разрушение в случае пробивания ударником слоев. Поэтому необходимо учитывать контакты между слоями и ударником,

нелинейности, прогрессирующее разрушение материала, различные типы повреждений и разрушений.

Для моделирования необходимо определиться с уровнем детализации КМ, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения (табл. 1.3). Известны три уровня детализации модели КМ: микромасштабный (на уровне нитей), мезомасштабный (на уровне слоев), макромасштабный (на уровне пластин).

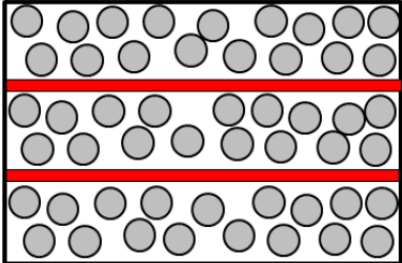
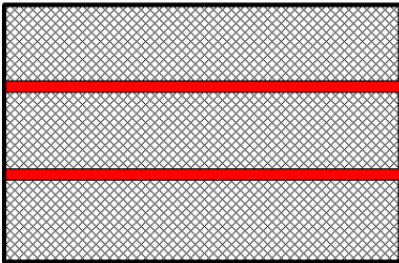
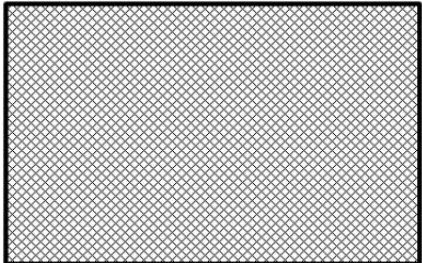
При детализации на микромасштабном уровне в моделях нитей и матрицы используют твердотельные элементы (таблица 1.3а) с заданием им физико-механических характеристик и условий контактов. Известна работа и Cavallaro [183], в которой проведены исследования ударного нагружения КМ данным методом. В работе [49] произведен расчет комбинированного корпуса на динамическую прочность при обрыве лопатки ротора, в трехмерной постановке на базе программного кода LS-DYNA. Результаты расчетов согласуются с экспериментом, что обеспечивает достоверное моделирование многослойных КМ, применяемых в защитных системах двигателей. Иногда для получения геометрии используют микрокомпьютерную томографию и специализированное программное обеспечение (ПО), например, WiseTex, VoxTex, которые с помощью методов обработки трехмерных изображений томографии образцов получают информацию о локальных направлениях волокон [169; 198]. Микромасштабный подход в чистом виде редко используется для практических расчетов, поскольку требуются значительные вычислительные затраты и имеются сложности в построении моделей в случае большого количества элементов. Более распространенной практикой использования микромасштабного моделирования является определение упругих характеристик монослоя с применением репрезентативных ячеек с целью последующего моделирования.

На мезомасштабном уровне каждый отдельный слой КМ (волокна и матрица) моделируется как сплошная однородная среда с ортотропными свойствами, при этом дополнительно моделируются межслойные контакты между слоями (табл. 1.3б). Разрушение межслойного контакта позволяет учесть расслоение КМ и использовать в расчетах как оболочечные, так и объемные

элементы. Авторы работ [39; 90; 102], используя мезомасштабный уровень, представили результаты расчетов размеров повреждений, расслоений, остаточной скорости и др. В работе [53] даны результаты МКЭ расчета удара льда на панель из КМ. Для подтверждения достоверности и применимости разработанной модели проведено сравнение расчетных данных с результатами экспериментальных исследований, показавшее хорошее соответствие между ними. К недостаткам мезомасштабного подхода относятся трудоемкость учета влияния трехмерного армирования на прочность КМ. Также возникают трудности создания расчетных моделей КМ, изготовленных на 3D принтере из непрерывного волокна. Кроме того, для верификации расчетных моделей при ударных нагрузках требуется проведение натурных испытаний и соответствующих расчетов.

На макромасштабном уровне КМ (табл. 1.3в) моделируются сплошной однородной средой с ортотропным или анизотропным характеристиками материала без явного учета слоистой микроструктуры и раздела слоев. При расчете обычно используют классическую теорию слоистых пластин [167; 172], в которой неоднородность механических свойств по толщине материала учитывают с помощью специализированных конечных элементов, задающих каждому слою точку интегрирования, для которой используется соответствующая матрица жесткости. Этот метод широко применяется для задач с масштабными моделями благодаря своей эффективности и скорости. Однако он не учитывает поперечные сдвиги при ударах и нормальные деформации между слоями, что снижает точность при расчете толстых или сильно анизотропных структур, также слабо приспособлена для анализа расслоений, трещин и других дефектов, характерных для КМ. В работах [32; 154] авторы использовали макромасштабный подход при моделировании удара пластин из КМ. В работе [173] использован МКЭ, обеспечивающий высокую точность на грубых сетках и позволяющий эффективно моделировать нестационарный отклик слоистых композитных пластин и оболочек при непроникающем ударе с учетом нелинейного контактного взаимодействия по закону Герца и кинематики фон Кармана для умеренно больших прогибов.

Таблица 1.3 – Уровни моделирования КМ

Слоистый полимерный КМ		
<i>А) Микроуровневая модель</i>	<i>Б) Мезоуровневая модель</i>	<i>В) Макроуровневая модель</i>
		
Отдельные твердотельные элементы волокон и матрицы	Отдельные ортотропные слои. Возможно задание клеевого соединения между слоями	Многослойный КМ представлен одним однородным ортотропным слоем
+ Многообразие типов структур КМ	+ Отображение напряжений в слоях, расслоений. Регулировка укладки слоев	+ Скорость расчета
– Большие вычислительные затраты. – Трудоемкость создания моделей и задания контактов между телами	– Нет отображения НДС компонентов КМ (волокна матрицы)	– Нет возможности отображения внутренних межслойных разрушений, образуемых при ударе

В данном исследовании для моделирования ударов и повреждений КМ с дефектами типа расслоений применен мезоуровневый подход, что подтвердило хорошую сходимость с экспериментальными результатами. Для мезоуровня LS-DYNA включает более 15 различных моделей материала [170], некоторые приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Модели материала в LS-DYNA (2007)

Модель материала	Объемный элемент	Оболочечный элемент	Повреждение	Сдвиг	Критерии разрушения
MAT_022 (Composite Damage)	+	+	+	+	Chang-Chang
MAT_054 (Enhanced Composite Damage)	+	+	+	+	Chang-Chang
MAT_055 (Enhanced Composite Damage)		+	+	+	Tsai-Wu
MAT_058 (Laminated Composite Fabric)		+	+		Hashin
MAT_059 (Composite Failure optional model)	+	+	+		Tsai-Wu Chang-Chang
MAT_161/162 (Composite MSC)	+		+		Hashin Delamination

Среди моделей материалов, широко применяемых при численном моделировании ударных процессов, можно выделить модель MAT_022

(MAT_COMPOSITE_DAMAGE), основанную на критерии разрушения Чанг-Чанга, учитывающем повреждения при растяжении и сжатии волокон, а также разрушение матрицы в плоскости однонаправленного слоя [170]. Модели MAT_054 и MAT_055 (MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE) используют в своей основе как критерий Чанг-Чанга, так и критерий разрушения Цзя-Бу, который может задать критические значения деформаций, разрушения матрицы и волокон. Модель MAT_58 (MAT_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC) основана на критерии Хашина и механике повреждений сплошной среды, которая может уточнять коэффициенты снижения прочности волокон при растяжении и сжатии после разрушения матрицы. Модель MAT_161/162 (MAT_COMPOSITE_MSC) основана на критериях разрушения Хашина и механике сплошных повреждений. Она может моделировать пять режимов разрушения: разрушение волокон, сжатие и растяжение волокон, разрушение матрицы по толщине и расслоение. Недостатком является требование большого количества вводных характеристик материала, которые нелегко получить при стандартных испытаниях материалов, и необходима специальная лицензия от разработчика. Модель MAT_59 (MAT_COMPOSITE_FAILURE_OPTIONAL_MODEL) может использоваться как для оболочечных, так и для твердотельных элементов. Эта модель материала близка к MAT_54. MAT_59 может моделировать прогрессирующее разрушение композитных слоев при ударе, основана на критерии разрушения по максимальному напряжению. В работе [181] проведены исследования использования моделей материала KM MAT22, MAT54, MAT55, MAT58 и MAT59 при ударах на КМ.

В данной работе в связи с ограничениями вычислительных мощностей для оптимального моделирования, определения размеров повреждений от удара, размеров расслоений была выбрана модель материала MAT 054.

1.3.2 Моделирование процесса разрушения при ударе методом конечных элементов

В программе LS-DYNA при расчетах на удар используется метод центральных разностей, когда перемещения, скорости и ускорения на следующем шаге по времени (t_{n+1}) вычисляются через их значения текущего шага (t_n). При этом в пределах одного шага по времени дополнительные итерационные процедуры не проводятся. В этом случае для уравнения динамики пластины из КМ применяется выражение с запаздыванием по времени и имеет вид:

$$[M]\{\ddot{u}\}_t + [C]\{\dot{u}\}_t + [K]\{u\}_t = \{F\}_t,$$

где $[M]$ – матрица масс, $[C]$ – матрица демпфирования (вязкости), $[K]$ – матрица жесткости КМ, $\ddot{u}$ – векторы узловых ускорений (a), $\dot{u}$ – вектор узловых скоростей (v); u – искомый вектор узловых перемещений; $\{F\}$ – эквивалент внешней нагрузки, включающий силу удара [199]. Узловые ускорения a и скорости V вводятся в расчет в качестве неизвестных (в число узловых степеней свободы) и вычисляются напрямую, а не путем численного дифференцирования функций перемещений.

Уравнения движения решаются методом центральных разностей, используя рекуррентные соотношения, которые выражают перемещения, скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предыдущих этапах:

$$a_t = M^{-1}(F_t^{ext} - F_t^{int}),$$

где a_t – ускорение на шаге t ; M – матрица масс, F_t^{ext}, F_t^{int} – внешние и внутренние силы.

Векторы скоростей и перемещений на соответствующем шаге определяются следующим образом (v – скорость, u – перемещение.):

$$v_{t+\Delta t/2} = v_{t-\Delta t/2} + a_t \Delta t$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + v_{t+\Delta t/2} \frac{\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t}}{2}$$

Шаг интегрирования Δt выбирается на основании условий стабильности решения, связанных со скоростью распространения упругой волны в материале и скоростью приложения нагрузки.

В процессе моделирования процесса удара необходимо учитывать напряжения и деформации в КМ, которые приводят к разрушению, анизотропии материала, поэтому необходимо правильно выбрать критерии разрушения при ударе. Конечно-элементные модели для КМ в LS-DYNA используют примерно одинаковые процедуры для расчета напряжений, но отличаются по выбору критерия разрушения. Критерии разрушения предсказывают только момент начала разрушения, но не описывают постепенное изменение несущей способности материала, например, развития микротрещин, так как данный процесс достаточно сложен.

Трехмерная модель КМ рассматривает только ортотропный материал:

$$[c] \cdot \{\sigma\} = \{\varepsilon\}, \text{ где}$$

$$[c] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad - \text{ матрица жесткости 1 и 2 - направления}$$

$$\text{вдоль и поперек волокон; } \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}; \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad - \text{ шесть компонентов напряжений и}$$

деформаций соответственно.

1.3.2.1 Основные критерии разрушения, реализованные в LS-DYNA

Для прогнозирования развития повреждений КМ используют критерии разрушения, реализованные в LS-DYNA; наиболее распространены критерии максимальных напряжений, Чанг-Чанга, Цай-Бу, Хашина, Пака, LaRC.

Согласно критерию максимального напряжения разрушение начинается, когда напряжение в одном из двух направлений материала превышает прочность в этом направлении. Программа вычисляет напряжения по направлениям материалов для каждого слоя. Критерий разрушения по максимальным напряжениям:

а) разрушение волокон при растяжении $\sigma_1 \geq 0$, при разрушении, величины $E_1 = E_2 = G_{12} = \nu_1 = \nu_2 = 0$, индекс разрушения равен

$$F_{fibre} = \left(\frac{\sigma_1}{XX_T} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & failed \\ < 0 & elastic \end{cases},$$

где E_1 – модуль упругости вдоль направления армирования, E_2 – модуль упругости поперек направления армирования, G_{12} – модуль сдвига в плоскости слоя, ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона;

б) разрушение волокон при сжатии $\sigma_1 < 0$, при разрушении $E_1 = \nu_2 = \nu_1 = 0$, индекс разрушения равен

$$F_{fibre} = \left(\frac{\sigma_1}{XX_C} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & failed; \\ < 0 & elastic \end{cases};$$

в) разрушение матрицы при растяжении $\sigma_2 < 0$, при разрушении $E_2 = \nu_1 = G_{12}=0$, индекс разрушения равен

$$F_{matrix} = \left(\frac{\sigma_2}{YY_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{BA}} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & failed; \\ < 0 & elastic \end{cases};$$

г) разрушение матрицы при сжатии, при разрушении $E_2 = \nu_2 = \nu_1 = G_{12}=0$, индекс разрушения равен

$$F_{matrix} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{BA}} \right)^2 + \frac{\sigma_2}{YY_C} \left[\frac{YY_C^2}{4S_{AB}^2} - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{BA}} \right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & failed \\ < 0 & elastic \end{cases},$$

где значение XX_T – прочность при продольном растяжении, XX_C – прочность при продольном сжатии, YY_T – прочность при поперечном растяжении, YY_C – прочность при поперечном сжатии, S_{BA} – прочность при сдвиге в плоскости.

Достаточно много работ, где моделирование процесса разрушения КМ при ударе выполнено на основе критерия Чанг-Чанга [165]. Эта методика использует три критерия разрушения:

а) разрушение волокон, при разрушении $E_1 = E_2 = G_{12} = \nu_1 = \nu_2 = 0$, $\bar{\tau}$ – отношение напряжения сдвига к пределу прочности при сдвиге:

$$F_{fibre} = \left(\frac{\sigma_1}{XX_C} \right)^2 + \bar{\tau} \geq 1; \text{ где } \bar{\tau} = \frac{\frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a\sigma_{12}^4}{\frac{S_{BA}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}aS_{BA}^4},$$

α – параметр нелинейного напряжения сдвига, определяемый по результатам измерений напряжения сдвига в материале;

б) растрескивание матрицы, $E_2 = \nu_2 = \nu_1 = G_{12} = 0$, индекс разрушения равен

$$F_{matrix} = \left(\frac{\sigma_2}{YY_T} \right)^2 + \bar{\tau} \geq 1;$$

в) разрушение при сжатии, $\nu_2 = \nu_1 = G_{12} = 0$, индекс разрушения равен

$$F_{comp} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{BA}} \right)^2 + \left[\left(\frac{YY_C}{2S_{BA}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{YY_C} + \bar{\tau} \geq 1.$$

В критерии Цая-Ву критерии растяжения и сжатия волокон рассматриваются как в критерии Чанг-Чанга. Критерий разрушения матрицы при растяжении и сжатии отличается, при этом индекс разрушения равен

$$F_{matrix} = \frac{\sigma_2^2}{YY_C YY_T} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{BA}} \right)^2 + \frac{(YY_C - YY_T)\sigma_2}{YY_C YY_T} - 1 \begin{cases} \geq 1 & \text{failed} \\ < 1 & \text{elastic} \end{cases}.$$

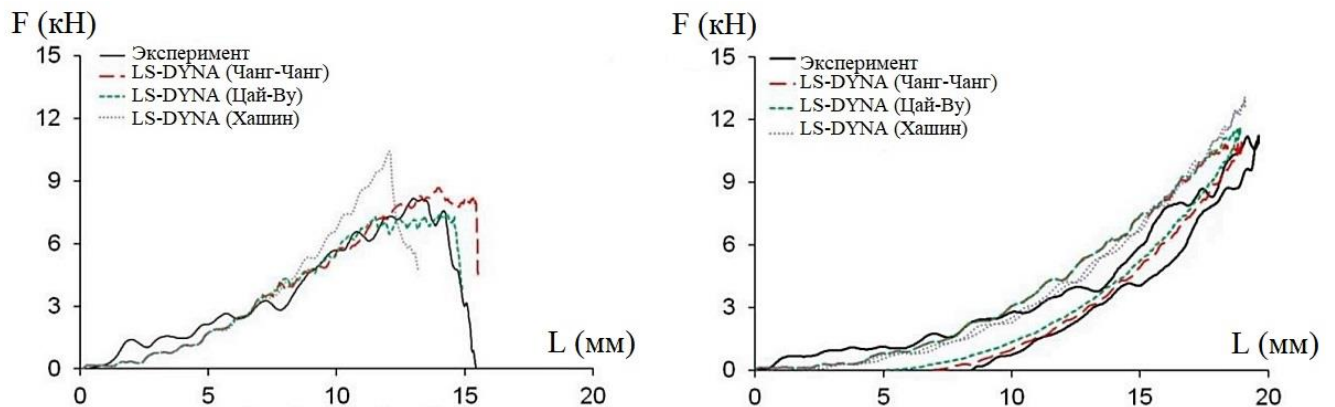


Рисунок 1.13 – Сравнение результатов критериев разрушения с результатами эксперимента

На рисунке 1.13 представлены диаграммы зависимости силы и деформации при испытаниях на удар от падающего груза, графики экспериментальных результатов и графики, полученные по критериям разрушения Чанг-Чанга, Цай-Ву и Хашина. Следует отметить, что критерий разрушения Чанг-Чанга на 4% и 4,7% точнее по сравнению с критерием разрушения Цай-Ву при испытаниях КМ на удар [168].

1.3.3 Моделирование дефектов типа расслоение при ударе

При моделировании на мезоуровне возможно определение нескольких вариантов межслойных контактов между слоями (рис.1.14) в программном комплексе LS-DYNA [34]:

- 1) клеевой контакт (tiebreak/breakable) (рис.1.14а);
- 2) когезионные элементы (CZM) (рис.1.14б);
- 3) стандартные 3D -элементы (рис.1.14в).

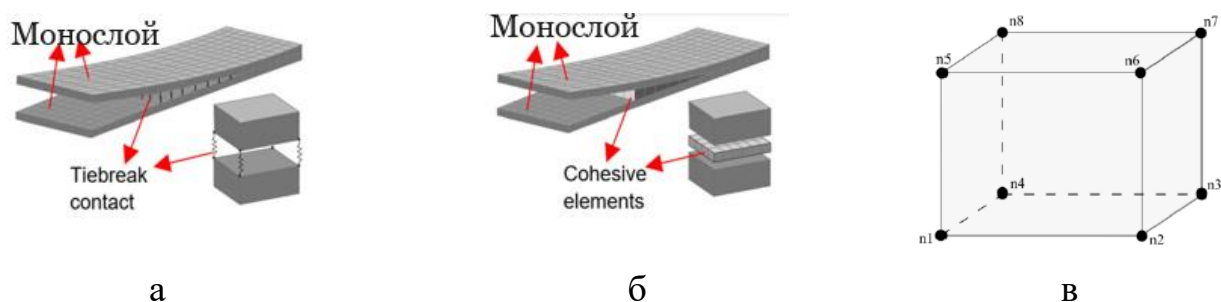


Рисунок 1.14 – Варианты межслойного контакта:

- а – сцепляемые клеевые контакты (пружинные элементы);
 б – когезионные элементы (CHZ); в – сплошные элементы

Наиболее точным подходом при мезоуровневом моделировании многослойных элементов конструкций из КМ является использование специальных клеевых контактов (рис. 1.14а). При клеевом контакте между двумя узлами задается «пружинная связь», причем каждый из этих узлов принадлежит соседнему слою. Вначале определяют предельные значения нормальных и сдвиговых межслойных напряжений. Повреждение начинается, когда напряжение

достигает критерия разрушения. Первый контакт между узлами разрушается, по мере распространения межслойного дефекта разрушаются контакты следующих узлов. Для точного расчета необходимо сравнивать параметры расчетной модели с результатами экспериментальных испытаний на удар. В данной работе для моделирования расслоения была использована команда для сцепляемых клеевых контактов «contact-automatic-one-way-surface-to-surface_tiebreak», основанная на межслойной прочности. При использовании этого подхода каждый слой многослойного КМ моделируется как сплошной слой элементов, но узлы между слоями, первоначально находящиеся в контакте, связываются вместе «пружинными элементами» до достижения критической нагрузки разрушения, соответствующей началу расслаивания. В ходе вычисления каждый раз проверяются напряжения в узлах по критерию:

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS} \right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS} \right)^2 \geq 1,$$

где σ_n и σ_s – нормальные и сдвиговые межслойные напряжения, $NFLS$, $SFLS$ – предельные величины нормальных и сдвиговых межслойных напряжений. Если условие выполняется, то напряжение в контактных узлах линейно уменьшается до нуля, тогда начинается раскрытие трещины (CCRIT). После удаления связующего компонента (матрицы) контакт для этих узлов преобразуется в стандартные поверхности. Энергию, выделяемую при разрушении G_{IC} , можно определить следующим образом:

$$G_{IC} = \frac{1}{2} \cdot NFLS \cdot CCRIT .$$

Значение $NFLS$ ограничено по нижней границе прочности стеклопластика (~30 МПа) и верхней границе прочности эпоксидной смолы (~60 МПа).

При моделировании расслоений с использованием когезионных элементов взаимное перемещение верхних и нижних слоев будет связано виртуальными нелинейными контактами между двумя узлами, принадлежащими разным телам. Стоит отметить, что в случае динамического нагружения элементов конструкций из КМ при использовании когезионных элементов и клеевых контактов

эффективность практически одинакова. По мере распространения трещины первый контакт между узлами разрушается и переходит к следующим узлам (Contact_tibreak_surface_to_surface). Применение когезионных элементов имеет два недостатка:

1. Размер сетки конечных элементов (КЭ). Необходимо иметь не менее 3–4 элементов в зоне раскрытия трещины, иначе в расчетной модели необходимо корректировать свойства материала, которые необходимо определять экспериментально для конкретного размера сетки.

2. Проводить статические испытания элементов конструкций из КМ. Например, испытание двухконсольной балки с дефектами на изгиб [108]. Затем вводить поправки скорости деформации, размер КЭ и т. д.

Эти недостатки не являются показателем того, что использование когезионных элементов неэффективно или дает ложные результаты. Они являются сигналом для калибровки расчетной модели под конкретную задачу на основе экспериментальных результатов, близких к конечно-элементной модели.

Третий подход (сплошные элементы) основан на использовании стандартных трехмерных элементов для моделирования межслойных контактов. Данный подход описывает линейное упруго-пластическое поведение, вязкоупругость и вязкопластическое поведение контактов. Однако требуются достаточно большие вычислительные мощности и время расчета, что важно в задачах оптимизации. Такой подход рассматривает полный процесс распространения трещин. Этот подход дает более реальную формулировку клеевого соединения.

1.3.4 Алгоритм моделирования процесса разрушения элементов конструкций из многослойных композиционных материалов при ударе

Разработан алгоритм моделирования процесса разрушения при ударе пластины из КМ в программном комплексе LS-DYNA на мезоуровневом масштабе с созданием трехмерного тела ударника и пакета многослойного КМ.

Для решения задачи на удар используется метод конечных разностей. Динамическое уравнение жесткого ударника задается с помощью второго закона Ньютона:

$$m_i \ddot{w}_i = -F_c ,$$

где m_i – масса ударника, $\ddot{w}_i$ – ускорение ударника, F_c – контактная сила. Ударник представляет собой жесткое тело по результатам высокоскоростной съемки.

Между жестким ударником и пластиной из КМ задан контакт CONTACT_AUTOMATIC Surface to Surface (ASTS), усилия сопротивления проникновению пропорциональны глубине проникновения. Алгоритм определяет контакт между двумя поверхностями, вычисляя проникновение узлов одной поверхности (ведущей, или «master») через элементы другой поверхности (ведомой, или «slave»).

Для моделирования каждого ортотропного слоя КМ использован объемный шестигранный solid-элемент, позволяющий вычислять напряжения и деформации, основываясь на взаимодействии между восемью узлами, что позволяет учитывать большие и неравномерные деформации. Этот элемент широко применяется в моделях динамической нагрузки [4].

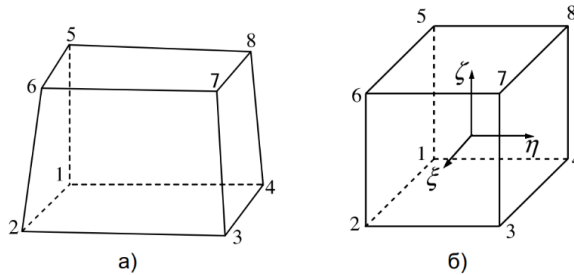


Рисунок 1.15 – 8-узловой solid элемент в (а) физических координатах и (б) в естественных координатах

Для ортотропных слоев КМ применена упругопластическая модель КМ с разрушением (MAT 054), использующая критерий разрушения Чанг-Чанга.

Для учета расслоений КМ между соседними слоями использован контактный алгоритм AUTOMATIC ONE WAY SURFACE TO SURFACE TIEBREAK с механизмом TIEBREAK, который позволяет моделировать

б – задание углов укладки слоя

При создании модели ударника можно воспользоваться двумя способами. Для случая создания сложной модели ударника необходимо воспользоваться программными продуктами из CAD-систем, затем импортировать эту модель в программный комплекс LS-DYNA. Таким образом была создана модель ударника № 3 (глава 2). На рисунке 1.17 для создания модели представлен чертеж ударника, длина тела ударника составляет 12,1 мм, начальная скорость – 250–500 м/с, что соответствует размерам и скорости пули ружья 22-го калибра, выполненного в программном продукте 3D-Компас.

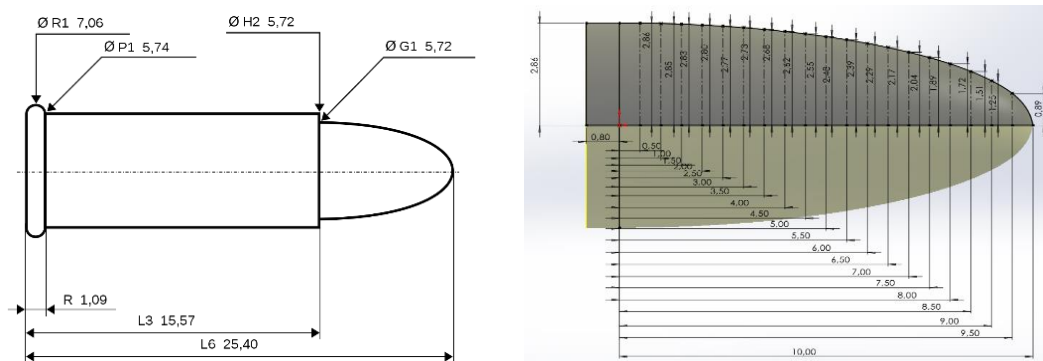


Рисунок 1.17 – Чертеж и модель ударника

Второй способ создание модели ударника – разработка модели в программном комплексе LS-DYNA. Для упрощения модели ударника в программном комплексе LS-DYNA (модели ударников № 1 и 2 рассмотрены во 2-й главе диссертации) эллиптическая часть ударника была вытянута из половины сферы. Для этого была создана объемная сфера с радиусом реального размера ударника (рис. 1.18). С помощью команды «mesh – shape Mesher (Sphere Solid)» создаем модель сферы, затем с помощью команды «element editing – delete» удаляем половину созданной модели сферы (рис. 1.18а). С помощью команды «element tool – transformation» вытягиваем модель сферы на длину эллиптической части ударника (рис. 1.18б). С помощью команды «mesh – element generation» создаем цилиндрическую область ударника (рис. 1.18в). На последнем этапе создания модели ударника с помощью команды «move or copy» объединяем созданные два тела (рис. 1.18г).

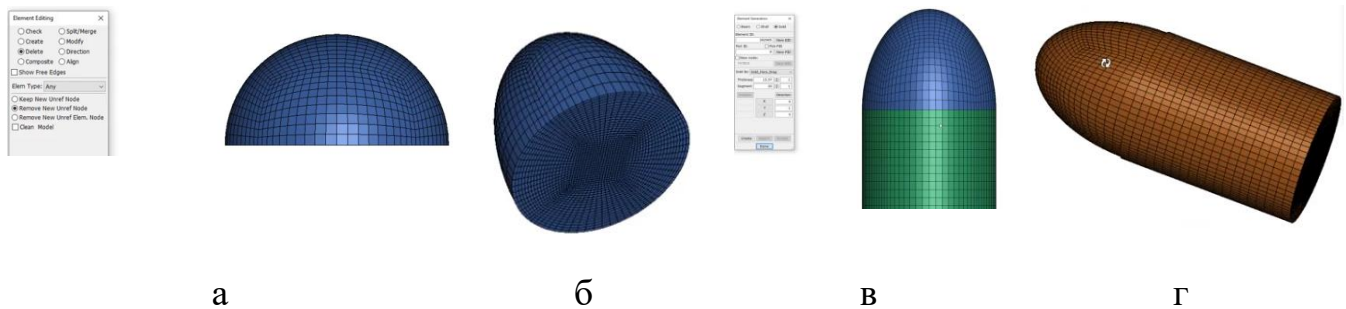


Рисунок 1.18 – Процесс создания модели ударника в LS-DYNA: а – модель сферы; б – вытянутая модель сферы; в – цилиндрическая часть ударника; г – модель ударника

На втором этапе задается сетка конечных элементов для модели многослойной пластины из КМ и модели ударника. Размер сетки конечных элементов (КЭ) при мезомасштабном подходе меняется в зависимости от приложенной нагрузки и влияет на точность расчета элементов конструкций из КМ. Для достижения хорошей сходимости численных результатов с экспериментальными результатами в области удара задают мелкую сетку КЭ (рис. 1.19а). Однако с уменьшением размера КЭ увеличивается время вычислений. При моделировании пластина была разбита на конечные элементы размером от 0,0001 до 0,005 мм для более правильного решения контактной задачи, поскольку высокоскоростной удар сильно локализован. В данной работе была выбрана модель материала MAT 054. Удовлетворительная сходимость численных расчетов с экспериментальными данными достигнута при размере сетки $0,45 \times 0,45 \text{ мм}^2$ в области действия высокоинтенсивных напряжений от ударника; на других участках пластины обычно задают сетку с размерами $45 \times 70 \text{ мм}^2$ (рис. 1.19а). Похожие результаты получены в работах [184; 153; 189]. Для увеличения скорости расчета в данной работе на других участках сетка имеет прямоугольную форму, ячейки сетки длинной стороной направлены в сторону ударника с размерами от 2,12 до 2,9 мм (рис. 1.19б). Задается толщина одного слоя, которая должна соответствовать толщине одного слоя реального образца и зависит от материала (углепластик, стеклопластик, арамидные ткани и др.). В работе толщина слоя равна $0,2 \pm 0,01 \text{ мм}$, что соответствует реальному размеру

образца из стеклопластика и углепластика. Отсчет слоев производится от точки контакта (верхний слой) ударника до тыльной стороны пластины.

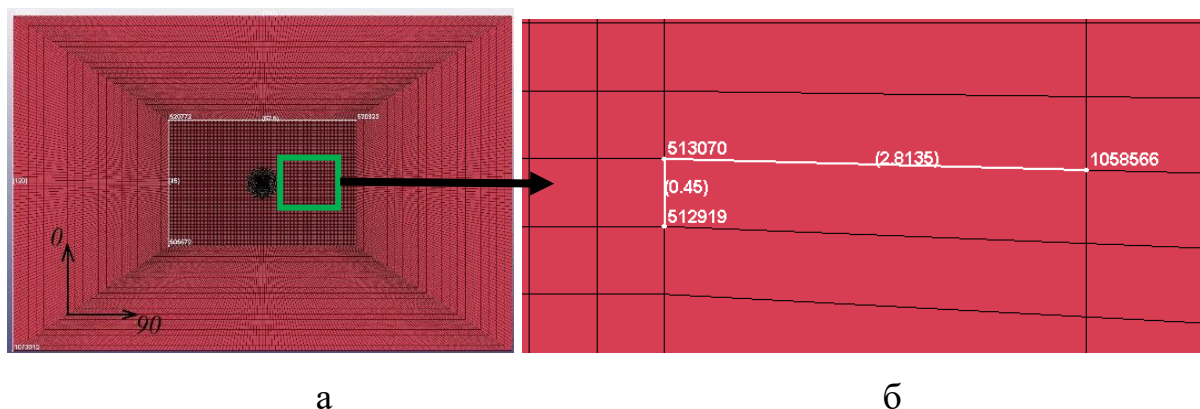


Рисунок 1.19 – Сетка КЭ для ударника и пластины из КМ в LS-DYNA:

а – вид сверху, ударник и пластина из КМ; б – размеры сетки КЭ на КМ

На третьем этапе моделируем связи для пластины (заделка), препятствующие линейным перемещениям и повороту вокруг оси, и скорости ударника. Выделяем торцы пластины и создаем жесткую заделку с помощью команды «Entity Creation» (рис. 1.20а). Скорость ударника задается с помощью команды «Initial velocity generations» (рис. 1.20б) в зависимости от типа скоростных ударных нагрузок (параграф 1.1.1).

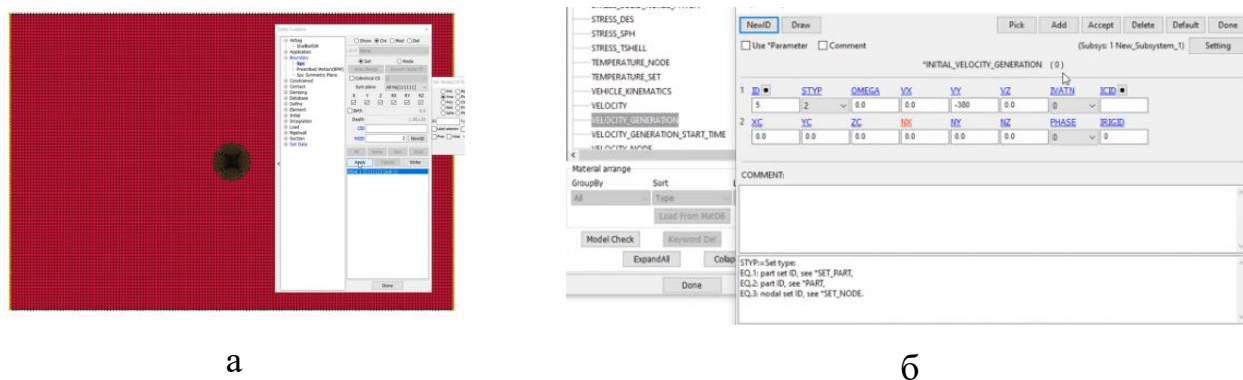


Рисунок 1.20 – Задание заделки пластины и скорости ударника:

а – заделка пластины; б – скорость ударника

На четвертом этапе задаем жесткостные характеристики материала (ударника и пластины) с использованием команды «model – keyword manager».

Задание механических характеристик каждого слоя многослойной пластины задаем с помощью подпрограммы «enhanced composite damage», выделяем слой и с помощью команды «Part» вводим соответствующие жесткостные данные материала для каждого слоя. Ударник моделируем как жесткое тело, механические характеристики для которого задаем командой «Mat Rigid».

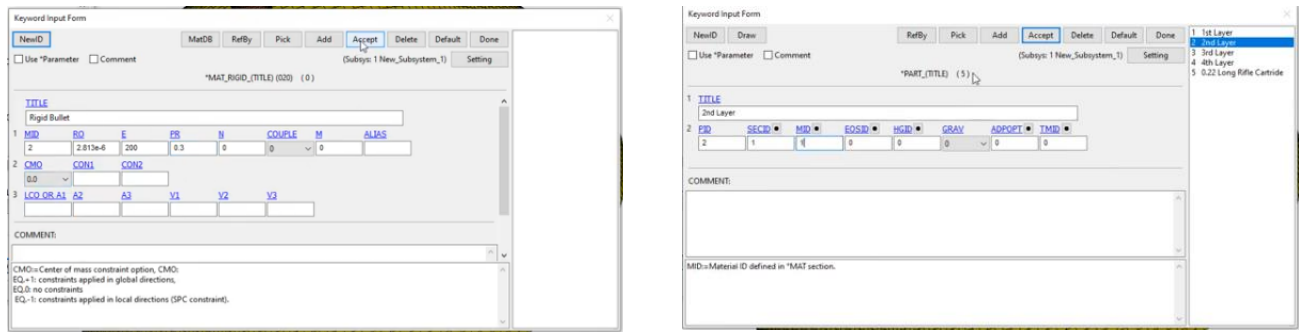


Рисунок 1.21 – Задание жесткостных характеристик материалов моделей с использованием команды «Part»

Пятый этап – решение контактной задачи, создание контактных взаимодействий между слоями пластины и ударником. Для определения клеевых контактов между каждым слоем использована команда «Automatic One Way Surface to Surface Tiebreak», при этом отмечаются поочередно все контактируемые соседние слои (рис. 1.22). Для создания контакта между всеми слоями пакета КМ используют команду «Contact Automatic Single Surface».

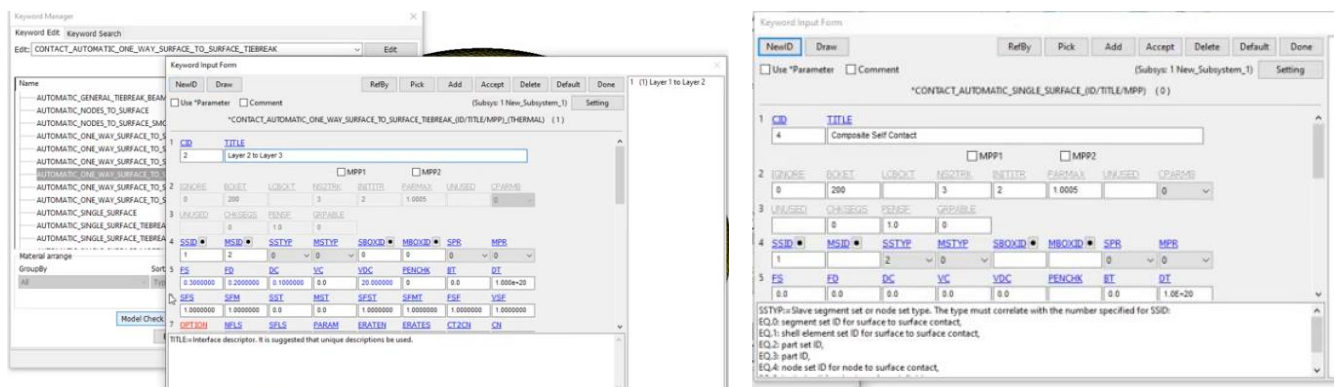


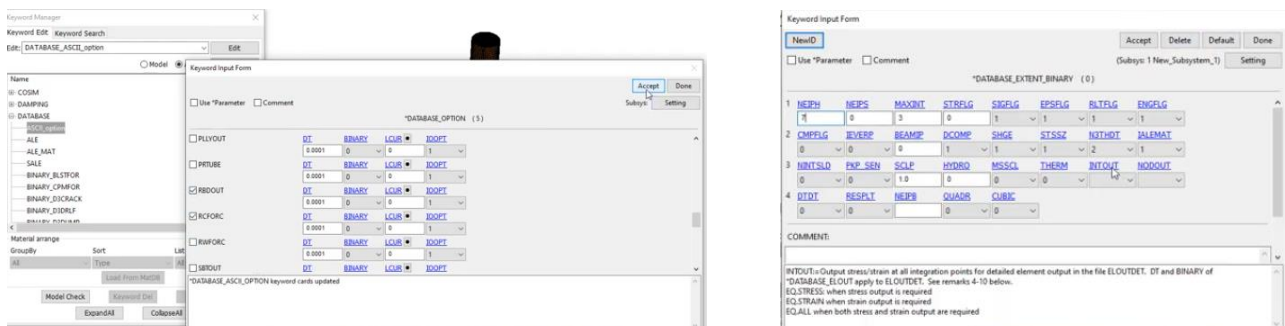
Рисунок 1.22 – Задание клеевых контактов слоев между соседними слоями

Контактная задача при взаимодействии ударника и пластины решена с использованием подпрограммы «Contact Automatic Surface to Surface». Для снижения времени расчета контактной задачи задается область контакта командой «Entity Creation».



Рисунок 1.23 – Задание контакта ударника и многослойной пластины

На шестом этапе сделан расчет и представлены результаты моделирования процесса деформирования и разрушения пластины. Необходимые выходные данные (напряжений, усилий, деформаций и т. п.) можно вывести на экран с помощью команды «DataBase – ASCII options». Частота записи полученных результатов – каждые 0.0001 мс (рис. 1.24а). Для просмотра повреждений и дефектов была использована команда «DataBase Extent Binary» (рис. 1.24б). После сохранения всех команд в k-файле запускается расчет МКЭ в режиме двойной точности.



а

б

Рисунок 1.24 – Задание частоты записи рассчитанных выходных данных образуемых усилий, расслоений

Расчет сделан для каждого момента удара по времени через 0.1 мс. Для стабильности расчета задали понижающий коэффициент масштабирования шага

времени работы 0,67 с помощью команды «Control Time Step». Результаты численного моделирования низкоскоростного удара многослойных КМ с различной толщиной, укладкой слоев представлены на рисунке 1.25.

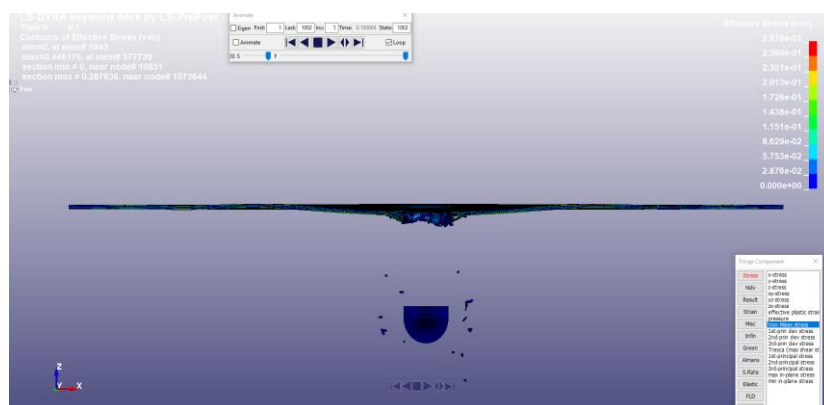


Рисунок 1.25 – Пробивание ударником пятислойной пластины

При низкоскоростном ударе (180–380 м/с) ударно-волновые эффекты значительно меньше, поэтому главную роль играет ударная нагрузка, действующая при внедрении ударника. Например, пластину из углеткани (5 слоев с укладкой волокон $[0,90]_20$) пробивает ударник со скоростью 380 м/с с умеренной зоной расслоения. Процесс разрушения элементов конструкций из многослойных КМ при ударе по времени представлен на рисунке 1.26.

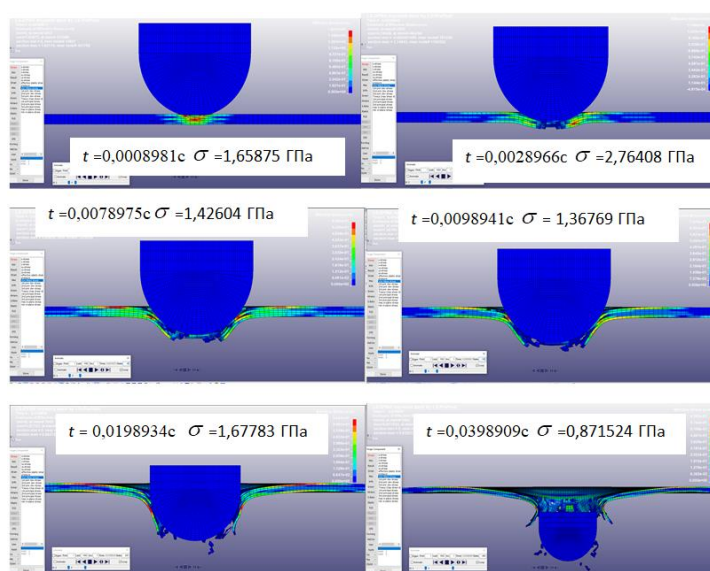


Рисунок 1.26 – Процесс низкоскоростного удара: $t(c)$ – время пробивания пятислойной пластины из стеклоткани с укладкой слоев $[0_3,90_2]$; напряжение σ (ГПа) в каждый момент времени, скорость удара 380 м/с

Результаты численного моделирования низкоскоростного удара многослойных КМ с различной толщиной, укладкой слоев представлены на рисунках 1.27, 1.28.

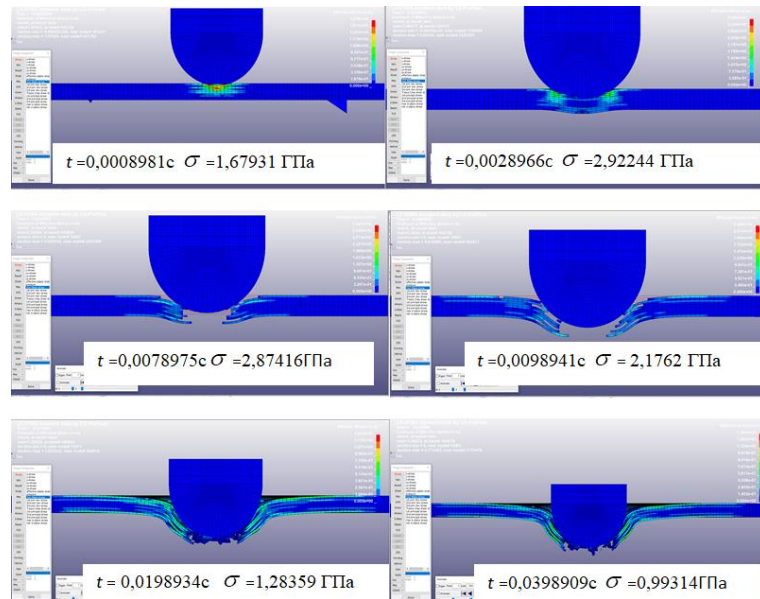


Рисунок 1.27 – Моделирование процесса низкоскоростного удара, $t(c)$ – время пробивания десятислойной пластины из стеклоткани с укладкой слоев $[0_5, 90_5]$, напряжение σ (ГПа) в каждый момент времени, скорость удара 380 м/с

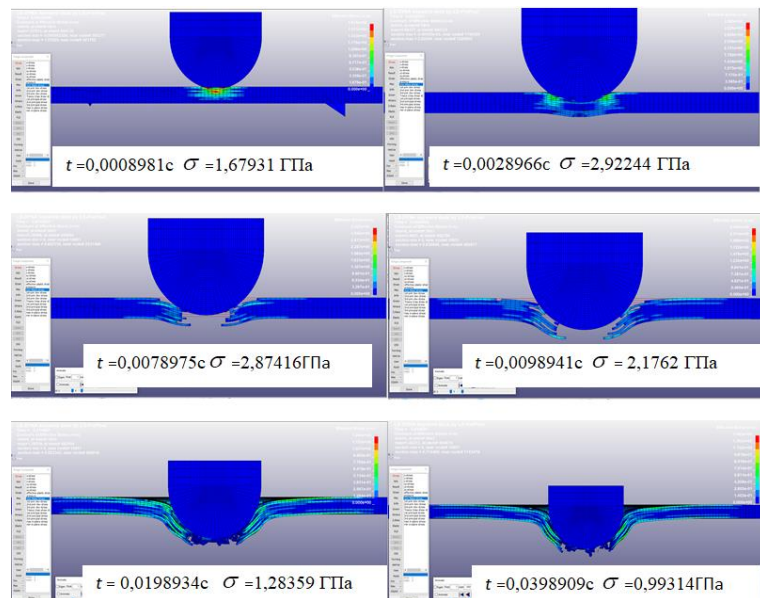


Рисунок 1.28 – Численное моделирование процесса соударения (скорость 380 м/с) ударника с двадцатислойным образцом из стеклоткани с укладкой слоев $[0_{10}, 90_{10}]$; напряжение σ (ГПа) в каждый момент времени $t(c)$

На образцах из углеволокна и стекловолокна, состоящих из 5 слоев с разной укладкой волокон, от удара формируются микротрещины, затем – сквозные повреждения с расслоениями. На образцах из 20 слоев начинается разрушение контакта между слоями композита (расслоение) за счет формирования микротрещин и разрушения первых слоев. На рисунке 1.29 представлен процесс разрушения 5-, 10-, 20-слойных образцов с разной укладкой волокон в слое.

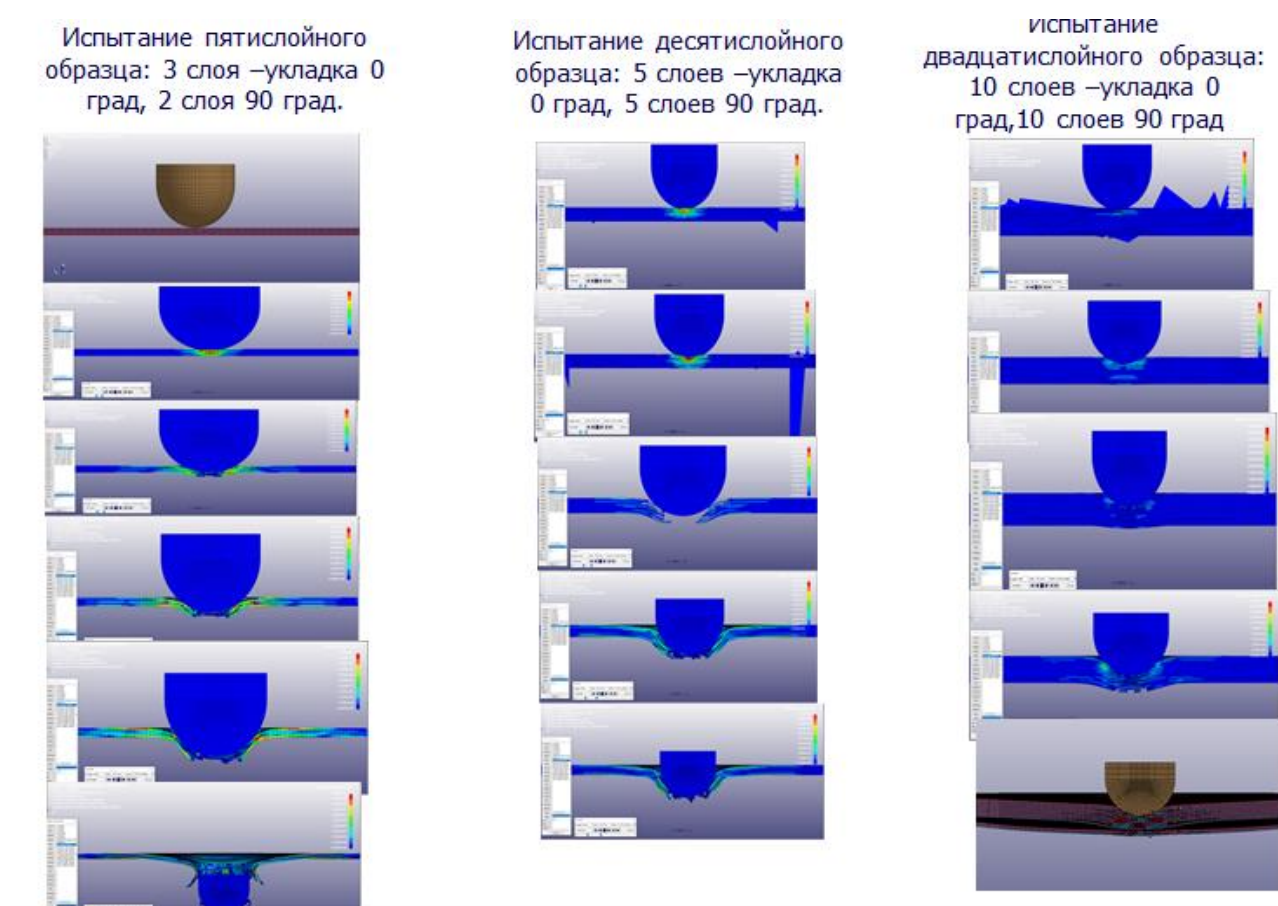


Рисунок 1.29 – Моделирование процесса разрушения образцов из многослойных КМ

1.4 Исследование устойчивости и разрушения тонкостенных элементов конструкций из многослойных композиционных материалов с дефектами типа расслоений после ударного нагружения

В последние годы значительно возрос интерес к теоретическим и экспериментальным исследованиям напряженно-деформированного состояния, а также процессов разрушения конструкций и их элементов, выполненных из

композиционных материалов с внутренними расслоениями. Важными направлениями таких исследований являются разработка критериев разрушения и оценка критических размеров расслоений. Повышенное внимание к этим аспектам обусловлено стремлением более полно использовать несущую способность конструкций при одновременном соблюдении требований надежности и безопасности, а также необходимостью повышения точности прочностных расчетов. Это, в свою очередь, требует глубокого анализа процессов деформирования КМ, связанных не только с физической нелинейностью, но и с разрушением отдельных структурных элементов.

Одной из ключевых задач механики композитов является прогнозирование поведения КМ в качестве анизотропных тел в условиях сложных напряженно-деформированных состояний, характерных для реальной эксплуатации. Решение данной задачи связано с определением эффективных характеристик материалов, что открывает возможности для проектирования КМ с заданными, оптимальными свойствами. Прогнозирование несущей способности композиционных конструкций требует комплексного изучения и описания процессов деформации и разрушения их элементов. Существующие методы и подходы, применяемые при построении математических моделей КМ и конструктивных элементов на их основе, подробно изложены в трудах ведущих исследователей, таких как: D. F. Adams [112], Б. Д. Аннин [115], Н. А. Алфутов [2], М. Беран [124], В. В. Болотин [9, 10], Л. Браутман [21], Г. А. Ванин [22], В. В. Васильев [23, 24], А. А. Ильюшин [40], А. Ф. Креггерс [47], Р. Кристенсен [48], И. А. Кунин [51], П. А. Зиновьев [38], В. М. Левин [55], Ю. Г. Матвиенко [97], К.В. Захаров [97], А.К, Малмейстер [97], М. А. Медведский [60], С. Т. Милейко [61], Ю. В. Немировский [70], И. Ф. Образцов [75], А. С. Овчинский [73], Б. Е. Победря [80], А. Н. Полилов [81], В. Д. Протасов [24], Б. Г. Попов [50], Ю. Н. Работнов [85], Р. Б. Рикардс [88], Б. С. Сарбаев [91], Ю. П. Самарин [178], Л. И. Седов [92], Д. Сендецки [93], А. М. Скудра [189], Ю. В. Соколкин [25], В. П. Ставров [95], В. П. Тамуж [58], Ю. М. Тарнопольский [98], А. Л. Тарлаковский [27],

А. А. Ташкинов [25], Г. А. Тетере [58], С. К. Канаун [42], Д. В. Колтунов [45] и многие другие.

Процессы динамического нагружения слоистых композитов до сих пор мало исследованы. Им посвящено незначительное число как экспериментальных, так и теоретических работ [37; 69; 86; 94; 175; 177]. Наиболее опасным типом разрушения при ударе является расслоение – разрушение контакта между слоями КМ [14; 123]. В работе [118] отмечается, что при относительно низких уровнях кинетической энергии удара повреждение развивается внутри КМ и практически не видно снаружи. Например, при визуальном осмотре обшивки крыла летательного аппарата, поврежденного ударом щебня, на обшивке находятся лишь небольшие царапины, хотя вглубь обшивки уходит дерево расслоений. В этом случае повреждение представляет собой расслоенный объем конической формы с вершиной на оси удара [139]. Существенный вклад в интенсивное развитие механики КМ с учетом дефектов внесли ученые: Б. Д. Аннин [3], Н. А. Алфутов [2], В. В. Болотин [10], Л. Браутман [21], Г. А. Ванин [22], В. В. Васильев [23], Р. Кристенсен [48], И. А. Кунин [51], П. А. Зиновьев [2], Б. Е. Победря [80], В. Д. Протасов [80], Б. Г. Попов [50], Г. Г. Портнов [82], Ю. Н. Работнов [85], В. П. Тамуж [58], Ю. М. Тарнопольский [98] и др. После периода снижения научной активности в данной области в последнее время возобновились исследования, однако количество работ, посвященных изучению тонкостенных многослойных КМ с учетом межслойных дефектов, вызванных ударным воздействием, остается недостаточным.

Дефект типа расслоение появляется в результате действия изгибающих (растяжение на нижних волокнах) и сдвиговых нагрузок после удара. Авторы работы [180] утверждают, что основную роль при появлении расслоений играют напряжения при изгибе, а растягивающими напряжениями можно пренебречь, что трещины появляются только в результате действия нагрузки на изгиб. По данному утверждению нельзя сделать однозначный вывод и требуются дополнительные исследования. Проведенный эксперимент показал, что после удара низкой скоростью в месте повреждения пластины верхние слои сжимаются,

нижние слои растягиваются, пластина прогибается по направлению удара (рис. 1.29а). Изгибающий момент приводит к локализованному изгибу в месте удара, следствием этого появляются дефекты типа расслоение (рис. 1.30б,в). При увеличении прогиба происходит потеря устойчивости пластины и дефекта, затем – рост расслоения в поперечном направлении от нагружения [13; 74]. Разрушения элементов конструкций из КМ за счет расслоения зависят от схемы армирования материала, глубины расположения и формы расслоения, механических характеристик его компонентов, относительных размеров образца, определяющих форму потери устойчивости, направления действия нагрузки относительно армирования.

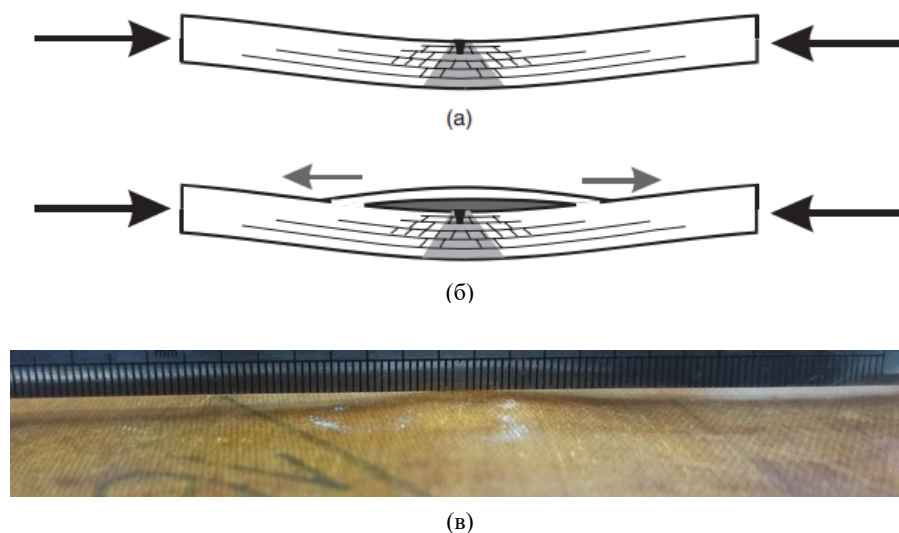


Рисунок 1.30 – Рост расслоений на месте удара: а – прогиб и повреждения в точке удара; б – потеря устойчивости с последующим увеличением расслоения при сжатии; в – прогиб в точке удара (непробитие), стеклопластик после низкоскоростного удара

Проблеме устойчивости дефектов типа расслоение и их последующего развития уделялось значительное внимание со стороны множества исследователей. В литературе представлено большое число работ, посвященных анализу локальной потери устойчивости таких дефектов, в которых определяется критическое значение нагрузки [120; 121; 122; 126; 128; 130; 135; 151; 156; 164; 203]. В то же время вопросы, касающиеся поведения отслоений под действием

нагрузки за пределами устойчивости, то есть при закритических деформациях, сопровождающихся возможным увеличением зоны дефекта и последующим разрушением, получили сравнительно меньшее освещение [7; 8; 98]. Существенные результаты в этом направлении были получены в работах Н. А. Алфутова [2], В. В. Болотина [8; 10] и его учеников, Л. М. Качанова [43], А. Н. Узя, В. В. Парцевского [78], Б. Г. Попова [50], Н. И. Ободана [67], Б. С. Сарбаева [91], Ю. М. Тарнопольского [98]. Экспериментальные исследования глубоко представлены в работах Ю. Г. Матвиенко, И. А. Разумовского [66; 102], А. Н. Полилова [74; 86], О. В. Митрофанова [62], Л. А. Бохоевой [18].

Ключевое направление в моделировании конструктивных элементов из КМ с межслойными дефектами является разработка математических моделей, описывающих поведение дефекта от начала выпучивания расслоения и последующего ее роста. Такие модели учитывают геометрию области дефекта, нелинейный характер деформирования, а также слоистую структуру КМ [193]. При достижении критического уровня нагрузки в тонкостенных элементах конструкций из КМ с дефектами типа отслоений могут проявляться три основных типа потери устойчивости. Первый тип – это глобальное выпучивание всей конструкции, часто наблюдаемое при дефектах малой длины. Второй тип – локальное выпучивание только отслоившейся части элемента, при этом остальная часть сохраняет плоскую форму. Данный механизм является наиболее характерным при сжатии слоистых КМ с дефектами типа тонких расслоений. В данной работе рассмотрен только второй случай потери устойчивости для тонкостенного расслоения в виде эллипса поскольку данная форма соответствует ударному повреждению. Третий тип потери устойчивости классифицируется как «смешанный» – при нем одновременно проявляются признаки как локального, так и глобального выпучивания. Это сопровождается изгибом как отслоившихся верхних, так и нижних, а также основных участков конструкции. Сегодня разработано несколько расчетных моделей, позволяющих оценить поведение дефекта типа расслоения и спрогнозировать его развитие с учетом влияния

различных параметров, таких как геометрия, характеристики материалов и условия нагружения.

В ряде исследований [131; 132; 134; 146; 163; 200] подчеркивается необходимость учета как локальных форм потери устойчивости, так и их сочетания с глобальными при анализе прочностного состояния. С использованием метода малых возмущений [201] получено аналитическое решение, позволяющее определить критическую силу потери устойчивости и прогиб в процессе начального закритического деформирования. В работах [197; 200] с применением методов, учитывающих большие прогибы отслаивающихся участков, описаны закономерности закритических деформаций элементов конструкций с межслойными отслоениями. В [146] были разработаны двумерные модели, направленные на оценку снижения прочности при сжимающих усилиях, вызванного наличием расслоений, возникших в результате поперечного ударного воздействия. Применен метод Релея – Ритца, позволяющий получить приближенное решение при значительных, но конечных отклонениях отслоившейся части. Дефект моделируется эллиптической областью, где изотропный слой отделяется от ортотропного слоя. Решение дается в виде ряда с коэффициентами, определяемыми из условия стационарности полной потенциальной энергии системы с учетом нелинейных деформационных соотношений. Анализ закритического поведения носит ограниченно качественный характер из-за малого числа переменных коэффициентов перемещений. Недостатком метода является высокая вычислительная трудоемкость при увеличении числа неизвестных.

В исследовании [201] на примере сжато-изогнутого стержня с локальным расслоением по толщине была определена величина критической нагрузки. Авторами показано, что в ряде случаев данная величина может использоваться в качестве показателя несущей способности конструкций с отслоениями. Особое внимание в работе уделяется влиянию поперечных сдвиговых эффектов как на значение критической нагрузки, так и на особенности закритического поведения конструкции. Дополнительно в работах [197; 200] рассматриваются

закритические деформации элементов с расслоениями с применением методики, позволяющей учитывать значительные прогибы в области отслоившихся участков, что обеспечивает более точное описание поведения конструкции за пределами предельной нагрузки.

1.5 Методы обнаружения межслойных дефектов после ударной нагрузки

Раннее выявление дефектов в конструкциях из КМ с целью их своевременного устранения является ключевым условием повышения эксплуатационной надежности и обеспечения безопасности изделий различного назначения. Это позволяет существенно увеличить срок их службы. На практике наиболее часто осуществляется восстановление монолитных и трехслойных сотовых конструкций, поврежденных сквозными пробоинами диаметром от 10 до 100 мм, при условии обеспечения одностороннего либо двустороннего доступа к зоне ремонта [77]. Эффективное выполнение ремонтных мероприятий в таких конструкциях требует применения методов неразрушающего контроля (НК), направленных на точное определение границ поврежденной области как по поверхности, так и в глубине материала. В связи с этим в настоящее время ведутся активные исследования, направленные на разработку современных методик НК и соответствующего оборудования, способных обеспечить высокую точность и надежность диагностики.

Если удар привел к поверхностному повреждению КМ, можно произвести соответствующую починку детали. Однако внутреннее расслоение внешним осмотром обнаружить часто не удастся, несмотря на обширное повреждение слоев, поэтому необходимо использовать методы неразрушающей диагностики материала. Обычно наиболее сильно повреждается тыльная сторона КМ, что затрудняет обнаружение дефекта [77].

Дефекты в КМ могут быть обнаружены 9 методами НК, которые подробно описаны в ГОСТ Р 56787 – Композиты полимерные, неразрушающий контроль. Из проведенного обзора литературы следует, что наиболее опасным дефектом в

многослойных изделиях из КМ является расслоение. Для обнаружения таких дефектов применяют 6 методов НК:

- 1) акустическая эмиссия
- 2) компьютерная томография
- 3) шерография
- 4) термография
- 5) ультразвуковой контроль
- 6) визуально-измерительный контроль.

Первые исследования в данной области относятся к середине XX в., когда началось активное внедрение полимерных КМ в ответственные конструкции. основополагающие работы советской научной школы под руководством Г. В. Акимова из ФГУП «ВИАМ» и зарубежных исследователей (F. Firestone, США) заложили методологические основы ультразвукового контроля, первоначально разработанного для металлических материалов [147]. В 1950–1960 гг. Н. Н. Детиновым, В. В. Мурашовым [68] были созданы первые специализированные амплитудно-частотные и импедансно-резонансные дефектоскопы (АЧД-2М, АЧД-3, АД-21Р), что позволило адаптировать существующие технологии для диагностики слоистых структур [77].

Основы применения радиационных методов неразрушающего контроля были заложены А. К. Трапезниковым [100; 101], чьи фундаментальные исследования в 1930–1940-х гг. заложили научные и методические основы рентгеновской дефектоскопии. Его монографии «Просвечивание материалов лучами Рентгена» (1939) и «Рентгенодефектоскопия» (1948) систематизировали принципы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и разработали методологию выявления внутренних дефектов. Параллельно в зарубежных исследованиях (Halmshaw, Berger) развивались методы нейтронной радиографии, расширившие возможности контроля легких материалов [158]. Также в ВИАМ в 1960–1970-х гг. адаптировали радиационные методы для специфики полимерных композитов, разработав специализированные методики контроля слоистых структур и создав соответствующие нормативно-технические документы.

В 1948 г. А. К. Трапезников и С. В. Чернобровов применили гамма-излучение вместо рентгеновских трубок, доказав эффективность мобильного радиационного контроля авиатехники в полевых условиях. Это открыло новые возможности для оперативной диагностики в ангарах и на аэродромах.

Фундаментальные исследования С. В. Чернобровова, Т. Н. Ермаковой, В. А. Гольцева, Е. И. Косариной и В. Ф. Якушева в области физики взаимодействия излучения с веществом позволили разработать методики количественного рентгеновского контроля неравноплотности КМ [28]. На основе этих исследований создан метод рентгеновской вычислительной томографии и специализированный томограф ВТ-300 (ВИАМ), обеспечивающий послойный анализ структур типа «углерод-углерод», «углерод-кремний», а также клееных конструкций из металлических сплавов и КМ сложной геометрии. Экспериментальные данные подтвердили эффективность данного подхода для неразрушающего контроля гетерогенных материалов.

1.5.1 Акустические методы неразрушающего контроля

Первые исследования в этой области относятся к середине XX в., когда началось активное внедрение полимерных КМ в ответственные конструкции. ВИАМ в 1960–1970-х гг. под руководством Ю. В. Ланге разработала базовые принципы низкочастотных акустических методов, включая импедансный с использованием совмещенного преобразователя и велосиметрический подходы, которые позволили выявлять расслоения и непрочности в многослойных материалах [52]. В 1970-х гг. были созданы первые специализированные дефектоскопы для контроля слоистых конструкций, такие как амплитудно-частотные дефектоскопы серии АЧД, разработанные под руководством В. В. Мурашова [68].

Начиная с 2007 г. разработанные методики эхо-импульсного контроля были успешно внедрены на четырех предприятиях авиационной отрасли для диагностики агрегатов перспективных летательных аппаратов. В 2009 г. технология ультразвукового контроля была использована в анализе ключевых несущих элементов ЛА МС-21. Экспериментальные исследования подтвердили,

что разработанная методика обеспечивает надежное выявление дефектов размером от 10 мм. В 2010–2011 гг. была разработана специализированная методика с использованием криволинейных фазированных решеток, позволяющей выявлять в углепластиковых конструкциях дефекты типа расслоений, непроклеев и инородных включений размером 5–10 мм. Данный подход сочетает мобильность ручного контроля с точностью автоматизированных систем, что особенно важно для эксплуатационного мониторинга авиационных конструкций [6; 71; 77].

В 2011 г. была разработана технология диагностики материалов, основанная на применении реверберационно-сквозного метода, позволяющая выявлять накопления микро- и макроповреждений в элементах конструкций из композиционных материалов. Данный метод применяется при диагностике деталей и агрегатов крыла самолета МС-21 [74]. На основании проведенного корреляционно-регрессионного анализа можно был сделан вывод, что существует достаточно тесная корреляционная связь предела прочности при изгибе углепластиков с критерием SWF (stress wave factor), вычисленным способом «интеграл оптимального спектра».

В 2015 г. разработан комплекс «МАК-ПКМ» (рис. 1.31) реализующий эхо-импульсный, теневой и зеркально-теневой методы автоматизированного УЗК для монолитных деталей из КМ.

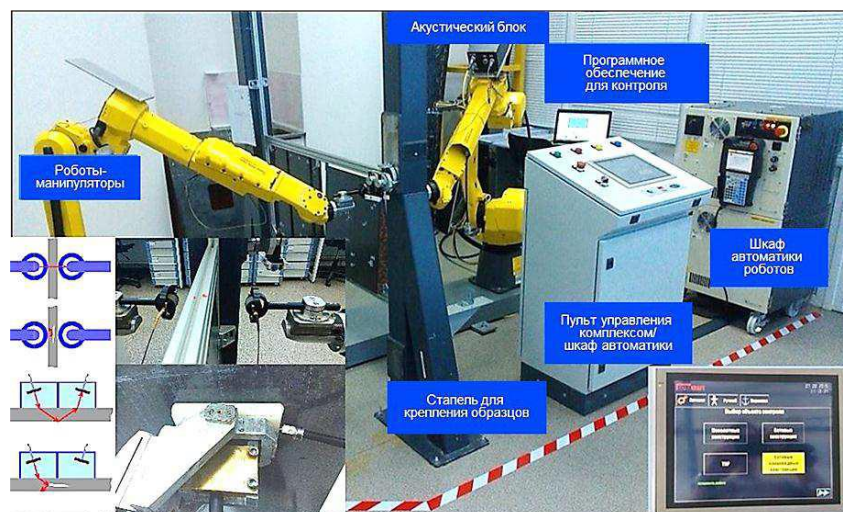


Рис. 1.31 – Автоматизированный комплекс для ультразвукового неразрушающего контроля качества деталей и агрегатов из ПКМ «МАК-ПКМ» [29]

Дефекты в виде пористости или невыявленное расслоение, расположенные в рабочей зоне образца, могут стать причиной выбросов в статистике результатов испытаний. В зарубежной практике методы испытаний КМ регламентированы стандартами, предусматривающими обязательное проведение ультразвуковой дефектоскопии плит, из которых изготавливаются испытательные образцы. Согласно стандарту [117] УЗК должен обеспечивать чувствительность, достаточную для обнаружения дефектов, эквивалентных плоскодонному отверстию диаметром до 3 мм. В РФ был выпущен адаптированный ГОСТ, соответствующий стандартам ASTM, однако в нем отсутствует положение о необходимости ультразвукового контроля заготовок перед испытаниями образцов.

В институте машиноведения им. А. А. Благонравова РАН активно проводятся исследования кинетики повреждений КМ с применением акустической эмиссии (АЭ). Ю. Г. Матвиенко, И. Е. Васильевым, Д. В. Черновым и др. [97] разработана и применена методология АЭ-диагностики при усталостных испытаниях стрингеров опорной стойки МС-21. Сущность методологии заключается в корреляции микро-, мезо- и макроповреждений деформируемого материала с энергетическими кластерами акустической эмиссии (АЭ). Импульсы АЭ, генерируемые при нагружении, классифицируются по уровням энергии (Н, С, В), соответствующим разрушению структурных связей различного масштаба. Текущее парциальное содержание импульсов в кластерах сопоставляется с пороговыми значениями, определенными при разрушении, что позволяет оценить остаточную несущую способность изделия в реальном времени. Структурно-феноменологическая концепция и методология ее реализации с применением АЭ диагностики дает представление о возможностях использования метода акустической эмиссии для мониторинга фактического состояния несущей способности материала образцов и конструкций в условиях их стендовых испытаний.

Также в работах [59; 171] проведено исследование процесса разрушения пакета однонаправленного монослоя при растяжении с помощью акустической

эмиссии и видеорегистрации. Проведено тестирование новых критериальных параметров акустико-эмиссионного мониторинга, включающих частотные и весовые характеристики локационных импульсов в энергетических кластерах, а также методы их спектральной кластеризации. Разработанные параметры обеспечивают количественную оценку деградации структурных связей на всех масштабных уровнях и прогнозирование остаточной прочности. Методика позволяет идентифицировать специфические сигналы АЭ, соответствующие ключевым механизмам разрушения (трещины в матрице, разрыв волокон, их выдергивание, межслойное расслоение, макроразрушению слоев).

В настоящее время разрабатываются методы вероятностной оценки достоверности результатов НК. Конструкторам необходимо иметь численные данные о вероятности обнаружения дефектов заданных размеров, что является неотъемлемым элементом при внедрении современных ресурсных подходов к проектированию, рекомендованных зарубежными стандартами и недавно включенных в отечественные Авиационные правила. Начиная с 2014 г., специалисты лаборатории неразрушающего контроля ВИАМ разработали ряд математических моделей и алгоритмов, предназначенных для расчета отклика систем НК на наличие дефектов различных форм и размеров. Эти разработки применяются, в частности, в области ультразвукового иммерсионного контроля с использованием специализированного программного комплекса CIV4 [57], что позволяет проводить высокоточный анализ эффективности методов контроля на основе моделирования физических процессов взаимодействия ультразвука с дефектами в структуре материалов.

Ультразвуковые дефектоскопы позволяют определить контур поврежденной зоны и могут дать информацию о глубине зоны повреждения, однако осматривать этим методом крупные детали сложной формы весьма трудоемко. Информацию о зоне повреждения можно получить также рентгеновским методом, однако для этого необходимо использовать специальные красители, которые проникают в деталь лишь при наличии поверхностных трещин.

Выводы по главе 1

На основе анализа научных работ отечественных и зарубежных авторов, которые посвящены проблемам, связанным с теоретическими и экспериментальными исследованиями элементов конструкций из КМ, подверженных ударным воздействиям, можно сделать следующие выводы:

1. Ударные воздействия на элементы конструкций из КМ приводят к различным повреждениям, таким как растрескивание матрицы, расслоения, разрушения волокон, которые зависят от скорости удара, характеристик материалов, углов укладки и т. д. Наибольшую опасность представляют низкие скорости удара, которые трудно обнаружить. При таком ударе образуются межслойные расслоения, которые приводят к снижению физико-механических характеристик, особенно при сжимающих нагрузках. Размеры повреждений зависят от скорости ударника, формы, места удара и др. Возникает необходимость в прогнозировании размеров таких повреждений, их способов поиска, а также влияния на остаточную прочность.

2. Изменение углов укладки позволяет изменять прочностные характеристики КМ при ударных воздействиях, однако такие работы мало исследованы, и способы поиска оптимальных укладок в основном выполняются натурным экспериментом.

3. Применение современных программных комплексов основанных МКЭ, таких как LS-DYNA, существенно ускоряет процесс анализа прочности элементов конструкций из ПКМ при их ударном воздействии различными скоростями. Это позволяет создавать математические модели реальных изделий, изменять конструкцию без проведения экспериментов, осуществлять имитационное моделирование исследуемых элементов конструкций с описанием физики процессов, их геометрии, свойств используемых материалов, эксплуатационных и других характеристик, а также производить оптимизацию по различным критериям.

4. Определение размеров расслоений, образуемых от ударных воздействий, является важным фактором повышения безопасности изделий из ПКМ различного назначения, что способствует значительному увеличению их надежности и срока эксплуатации.

5. Неразрушающий контроль элементов конструкций из КМ, подвергнутых удару, не позволяет получить достоверные выводы о причине разрушения. Достоверно оценить несущую способность конструкций после ударных воздействий можно только посредством экспериментальных методов разрушающего контроля путем доведения исследуемой конструкции до разрушения.

6. Динамику удара регистрировать достаточно сложно, анализ сохраненных после нагружения образцов не дает достоверной оценки процессов разрушения, поэтому в данной работе рассмотрено сочетание натурных экспериментов и компьютерного моделирования. Анализ работ в открытой печати отечественных и зарубежных авторов показал, что комплексных исследований, которые включают теоретические аспекты, математические модели с экспериментальной апробацией модифицированных многослойных композиционных материалов, закономерностей процесса их деформирования и разрушения при динамическом нагружении, практически нет. Комплексные подходы отсутствуют как по причине сложности проблемы, отсутствия глубоких научных наработок, так и в силу ее трудоемкости.

Глава 2 Экспериментальные исследования элементов конструкций из многослойных композиционных материалов при ударном нагружении и разработка виртуальных испытаний на их основе

Виртуальные испытания – это новый подход, направленный на повышение качества испытаний, информативности, снижение затрат и др. Они представляют собой цифровое математическое моделирование натурных испытаний с использованием соответствующего программного обеспечения.

В данной работе виртуальные испытания высокоскоростного удара были разработаны на основе следующих результатов:

- 1) экспериментальное исследование процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе;
- 2) высокоскоростная видеосъемка процесса низко- и высокоскоростного удара;
- 3) численное моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе методом конечных элементов.

Объектами для виртуальных испытаний служат многослойные пластины из полимерного композиционного материала (ПКМ) при взаимодействии с высокоскоростными ударниками.

2.1 Экспериментальное исследование процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе

Проведены экспериментальные исследования процессов деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе. Для проведения испытаний на удар были изготовлены многослойные образцы из стеклоткани и углеткани с укладкой по основе в 0 и 90 градусов. Были разработаны и изготовлены многослойные пластины из 5, 10, 20 слоев с разной укладкой волокон в слое.

2.1.1 Изготовление образцов из многослойных композиционных материалов

Были изготовлены образцы, предназначенные для многократного удержания высокоскоростного удара различной интенсивности. Из волокнистого материала (стекловолокно Т-10 и углеволокно ЛУ-П/0.1-А) вырезали слои соответствующих размеров. На формовочную оснастку послойно выложили необходимое число слоев волокнистого материала, предварительно пропитанного смесью эпоксидной смолы и отвердителя. Поверхность формовочной оснастки из стали предварительно покрыли тефлоновой пленкой (антиадгезивом), что предотвращает склеивание с материалом. В качестве матрицы была взята эпоксидно-диановая не отвержденная смола марки ЭД-20 ГОСТ 10587-84 [30]. В качестве отверждающего агента для эпоксидной смолы использовались полиэтиленполиамины ТУ 2413-357-0203447-99. Пропорции связующей матрицы к отвердителю – 100:10. При определении количества компонентов смеси использовались лабораторные весы CAS XE-300.

Формовочная оснастка состоит из неподвижного нижнего основания, четырех направляющих стоек для равномерного распределения давления от гидравлического пресса и для верхней подвижной пластины (рис. 2.1а). Образцы выдерживают под давлением, создаваемым гидравлическим прессом по схеме (рис. 2.1б).

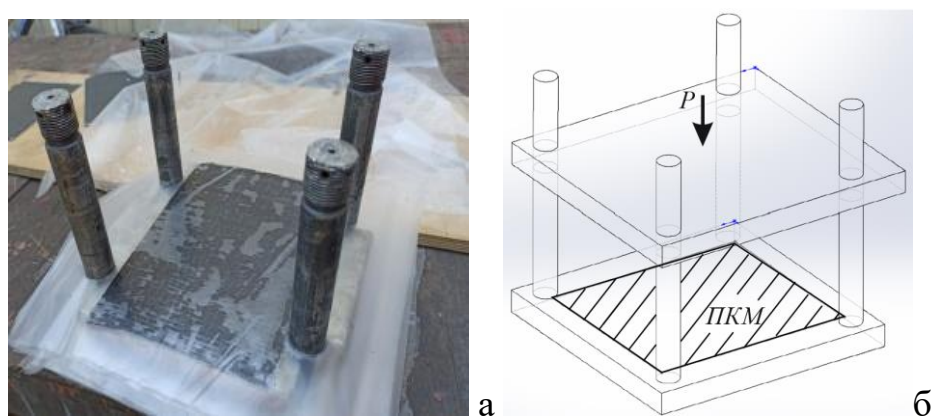
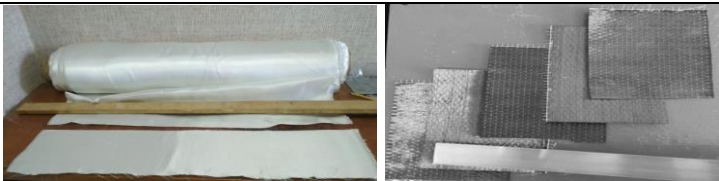
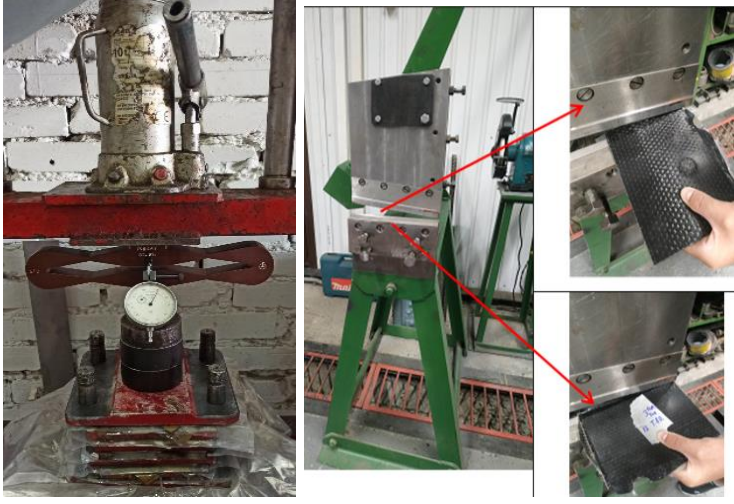


Рисунок 2.1 – Формовочная оснастка для изготовления образцов из КМ

Образцы из ПКМ изготавливали при постоянной температуре 30 °С, давление – 1 047 КПа, время выдержки – 48 часов. После полимеризации связующего образцы вынимали из формовочной оснастки и нарезали алмазным диском на циркулярном станке по необходимому для испытаний размеру. После изготовления образцы должны иметь гладкую наружную поверхность без вздутий, сколов, трещин, расслоений, вмятин, натеков связующего и других дефектов. Бракованные образцы не испытывали. После изготовления образцы измеряют. Для измерения толщины образцов используют микрометр с погрешностью не более $\pm 0,002$ мм по ГОСТу 6507, а для измерения длины и ширины – штангенциркуль с погрешностью не более 0,025 мм по ГОСТу 166. Перепад толщин образца не превышает 0,08 мм по всей площади образца. Толщина одного слоя – 0,21 мм. В таблице 2.1 представлен процесс изготовления образцов.

Таблица 2.1 – Изготовление образцов

Шаг	Фото	Описание
1		Резка стекло-, углеткани на полосы
2		Подготовка раствора. Эпоксидную смолу ЭД-20 смешали с отвердителем ПЭПА в соотношении 100:10.
3		Нанесение смолы на ткань

4		Установка слоев в пресс-форму
5		Изготовление образцов под прессом, обрезка образцов

Для испытания на ударную нагрузку нарезали образцы в виде пластин размером 180 x 120 мм. Затем определяли вес образцов (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Вес пластины из стеклопластика (15 слоев)
и углепластика (10 слоев)

На рисунке 2.3 представлены полученные образцы для проведения испытаний на низко- и высокоскоростной удар в количестве 51 штука.



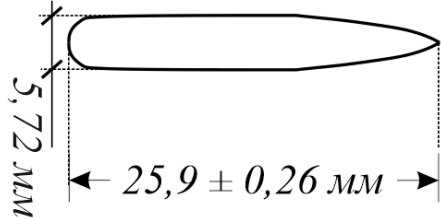
Рисунок 2.3 – Изготовленные образцы для проведения испытаний на низко- и высокоскоростной удар

2.1.2 Испытания образцов из многослойных композиционных материалов на низко- и высокоскоростной удар

Разработана методика проведения испытаний на скоростной удар с образцами из ПКМ. В испытаниях на удар были использованы три типа ударников, обеспечивающих различные скорости удара. В таблице 2.2 представлены ударники и их характеристики, которые были использованы для проведения экспериментальных работ.

Таблица 2.2 – Образцы ударников

	Размеры ударника	Фото ударника
Ударник № 1 22 long rifle. Средняя скорость удара, 220 м/с		
Ударник № 2 пистолетный 9x19. Средняя скорость удара 346 м/с		

Ударник № 3 Калашникова. Высокая скорость удара, 884 м/с			
Характеристики ударников			
Ударник	Вес (гр)	Длина (мм)	Диаметр (мм)
Ударник № 1 22 lr	1,9–2,7	12,1	5,75
Ударник № 2 пистолетный	5,8–10,2	15,5	9,03
Ударник № 3	4,1	25,9±0,26	5,72

Для испытания образцов было разработано, смоделировано и изготовлено зажимное приспособление, состоящее из основания, на котором закреплен каркас из стоек верхних и продольных перемычек (рис. 2.4а, б). Приспособление состоит: 1 – упорная рамка; 2 – первая подвижная прижимная рамка для фиксации образцов; 3 – вторая подвижная прижимная рамка с вкрученными винтами; 4 – прутки, фиксирующие вторую рамку; 5 – винты. Образец для испытаний устанавливается между упорной и подвижной рамкой (рис. 2.4в) и жестко зажимается болтами, обеспечивая жесткую заделку по торцам.

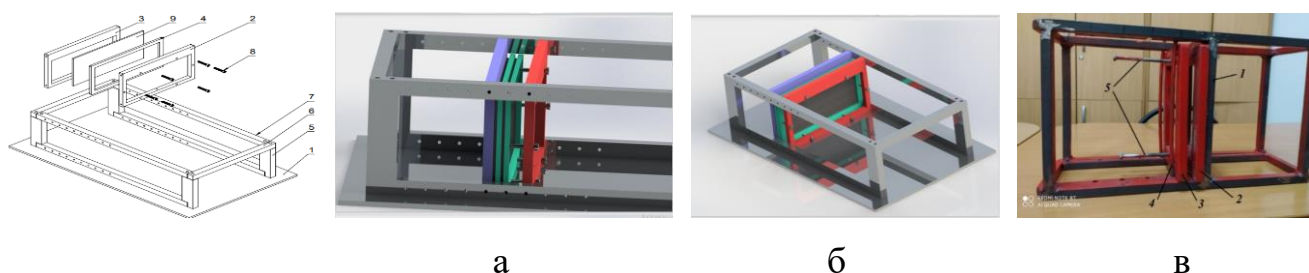


Рисунок 2.4 – Зажимное приспособление для крепления образцов для испытаний на удар: а – чертеж, б – 3d модель, в – готовое изделие

К проведению испытаний подготовлены прозрачные защитные экраны для высокоскоростной камеры, высокоскоростная камера, специальное помещение, источник постоянного света и сопутствующее оборудование [65]. Расстояние от

дула до образца составляет 9,5 м согласно технике безопасности. Для исключения рикошета в стрелка были дополнительно установлены стальные щиты (рис. 2.26).

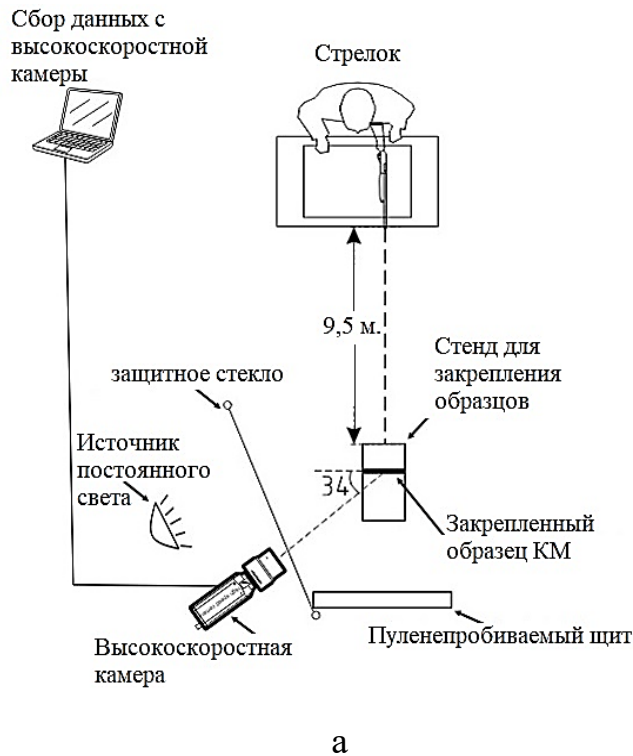


Рисунок 2.5 – Схема (а) и фото (б) проведения испытаний на удар

Запись видеосъемки удара проводилась с частотой 150 110 кадров в секунду.



Рисунок 2.6 – Запись высокоскоростной камерой Ametek vision research v711

Процесс испытания пластин снимали высокоскоростной камерой Ametek Vision Research V711 (рис. 2.3), которая была установлена под углом 90°. Схема проведенного эксперимента на удар приведена на рисунке 2.5а.

2.1.3 Результаты испытаний образцов на низко- и высокоскоростной удар

Проведены натурные испытания образцов на удар при скорости удара от 220–890 м/с. На образцах из углепластика и стеклопластика, состоящих из 5, 10 и 20 слоев с разной укладкой волокон, от удара формируются микротрещины, затем – повреждения насквозь. В образцах из 20 слоев первые 2–3 слоя пробиваются. Повреждения имеют конусообразный вид, затем в момент окончательного взаимодействия пластины и ударника появляются межслойные дефекты (расслоения). На образцах из 20 слоев начинается разрушение контакта между слоями композита (расслоения) за счет формирования микротрещин и разрушения первых слоев. В слоях с различной ориентацией волокон расслоение имеет вытянутую форму – эллипс, большая ось которого направлена вдоль волокон. На рисунке 2.7 представлены результаты испытаний на удар пластин из КМ (стеклопластик, 10 слоев с укладкой слоев $[0,90]_5$). После испытаний все образцы проверяли на повреждения и записывали в протокол испытаний: глубину отпечатка, размеры и площадь зоны повреждения.

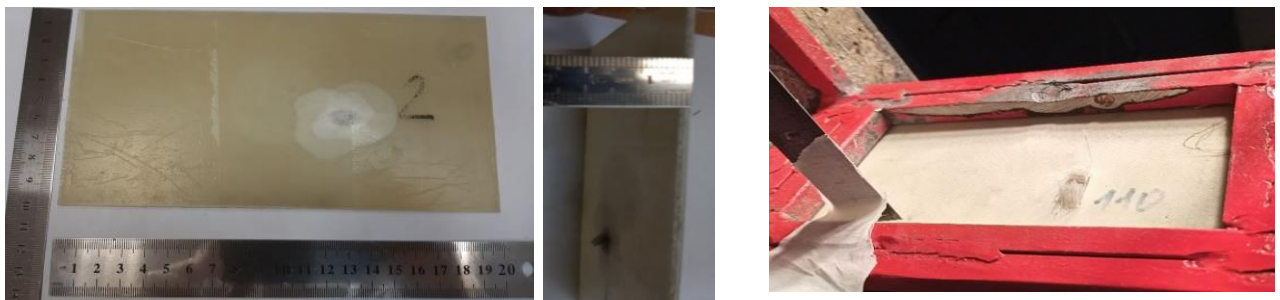
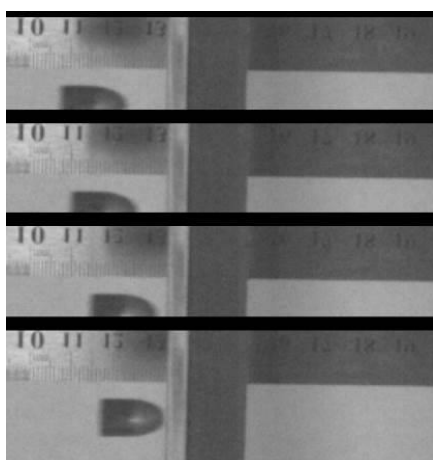


Рисунок 2.7 – Образцы после испытания

Высокоскоростной камерой снимали только 20-слойные образцы из угле-стеклопластика ударниками № 2, 3, так как испытания дорогостоящие. Проведены испытания на удар 10 образцов из стеклопластика из 20 слоев $[0/90]_{10}$ и 5 образцов из углепластика из 20 слоев $[0/90]_{10}$. Для остальных испытаний использовали хронограф рамочного типа XR2000 для определения скоростей до и после пробития. На рисунке 2.8 представлен протокол испытаний пластины из 20 слоев с ударником № 2, материал – углепластик с укладкой $[0/90]_{10}$. Скорость до

пробития – 346 м/с, расстояние до пробития – 3,5 см, что составило 15 кадров. После пробития скорость – 299 м/с, расстояние – 3,6 см, что составило 18 кадров.

До удара



После удара

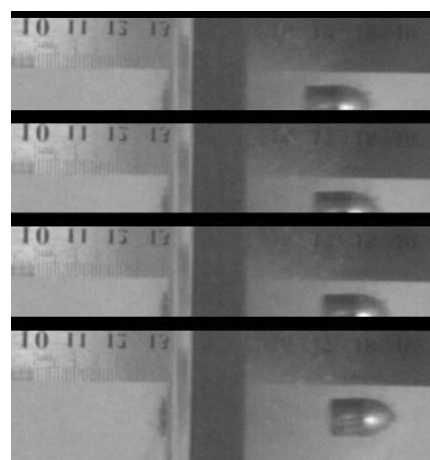
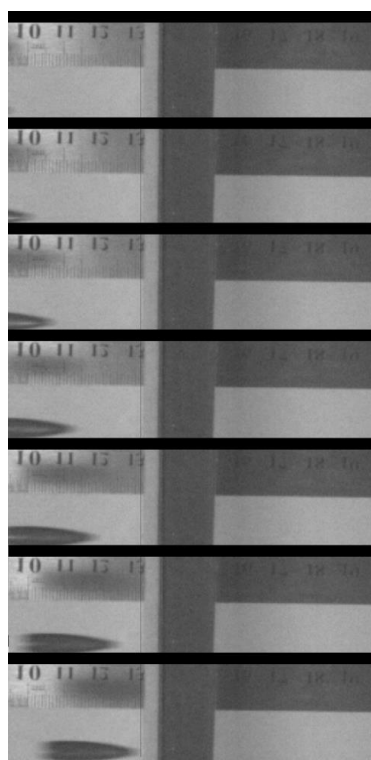


Рисунок 2.8 – Эксперимент с ударником № 1

На рисунке 2.9 представлен протокол испытаний пластины из 20 слоев с ударником № 3, материал – стеклопластик с укладкой $[0/90]_{10}$. Скорость до пробития – 884 м/с, расстояние до пробития – 2,9 см, что составило 5 кадров. После пробития скорость – 832 м/с, расстояние после пробития – 3,3 см, что составило 6 кадров.

До удара



После удара

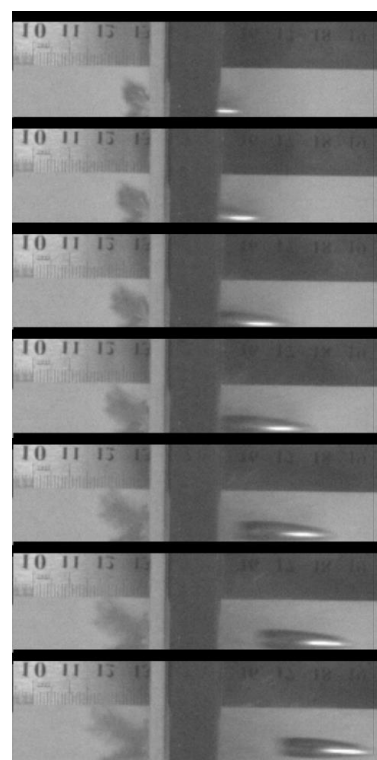


Рисунок 2.9 – Испытание образца из 20 слоев стеклопластик, ударник № 3

Для снятия этапов разрушения и образования расслоения с тыльной стороны образца произведена высокоскоростная съемка удара под углом 34^0 к перпендикуляру пластины. Были получены кинограммы – серия кадров, раскрывающих образование расслоения и пробития образцов (рис. 2.10).

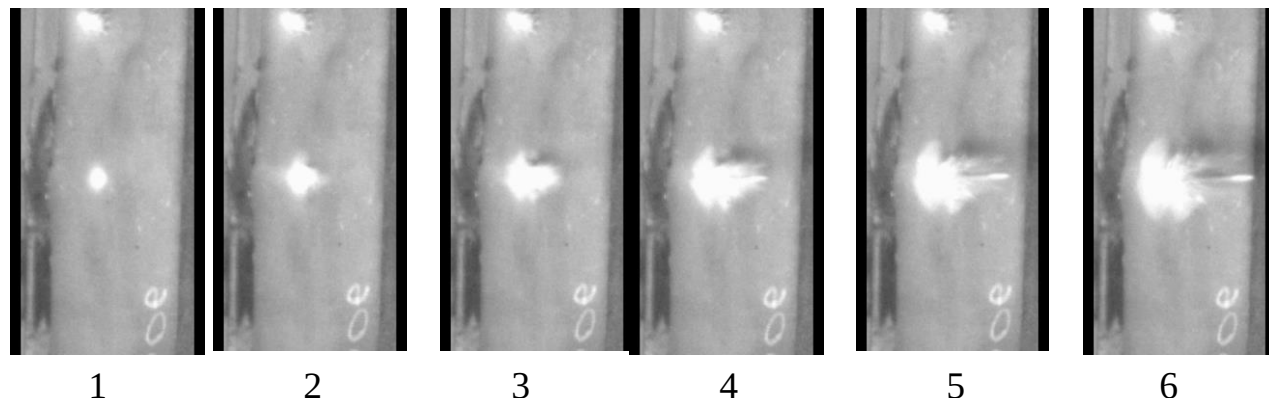


Рисунок 2.10 – Серия кадров, раскрывающих образование расслоения и пробития образцов из стеклопластика 20 слоев $[0/90]_{10}$

С использованием хронографа были проведены полевые испытания на удар (36 образцов). С ударниками № 1–3 было испытано по 2 образца из стеклопластика, с числом слоев в пакете по 5, 10, 20; такие же аналогичные испытания проведены для углепластика. Использование рамочного хронографа позволило ускорить проведение испытаний. Перед проведением эксперимента сделана проверка точности работы хронографа высокоскоростной камерой, определена скорость ударников до и после испытания с погрешностью 1%. Хронографы рамочного типа XR2000 (рис. 2.11), были установлены перед стендом для определения скорости ударника до удара, за стендом для определения остаточной скорости при сквозном пробитии (рис. 2.11, 2.12). Полевые испытания образцов представлены на рисунке 2.12.

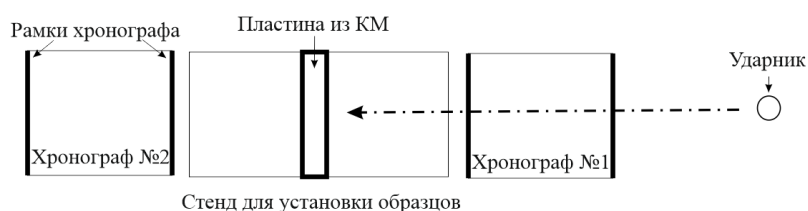


Рисунок 2.11 – Схема испытаний на удар при использовании рамочных хронографов



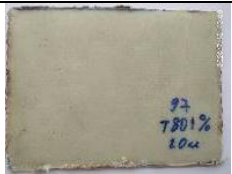
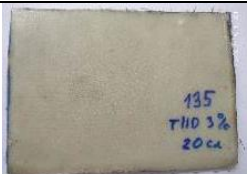
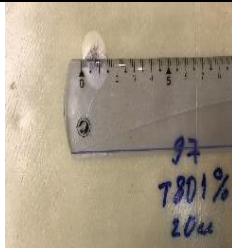
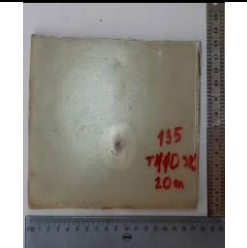
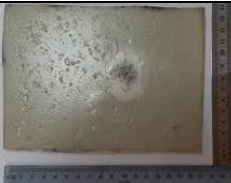
Рисунок 2.12 – Испытание на удар с использованием хронографов

В таблице 2.3 показаны результаты испытаний образцов из ПКМ (стеклопластика) ударниками № 1, 2, 3, скорость до пробития пластины (V_1) и скорость после пробития пластины (V_2), зафиксированные высокоскоростной камерой и хронографом. Получены расчетные значения скоростей после пробития пластины (V_p). Представлено процентное расхождение между экспериментальными и расчетными данными.

Таблица 2.3 – Результаты испытаний

Ударник	Количество слоев КМ	Скорость до удара, V_1 (м/с) средняя		Скорость после пробития, V_2 (м/с) средняя		V_p (м/с) расчетная	Расхождение, %
		камера	хронограф	камера	хронограф		
Ударник № 1	20	-	220	Нет пробития			0
	10			-	181	210	13
	5			-	240	221	8
Ударник № 2	20	346	343	242	230	258	11
	10			-	334	312	7
	5			-	356	343	3
Ударник № 3	20	884	877	832	821	772	6
	10			-	771	754	2
	5			-	794	781	1

Таблица 2.4 – Образцы из ПКМ до и после испытаний на удар

Образец	13	14	15	16
Материал волокна	стеклопластик	стеклопластик	стеклопластик	стеклопластик
Количество слоев	20	20	20	20
Фотография образца до испытаний				
Передняя сторона образцов после испытаний на удар				
Тыльная сторона образцов после испытаний				

В таблице 2.4 представлены фотографии образцов до и после испытаний на удар.

2.2 Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе

В данном параграфе представлено моделирование процесса деформирования, повреждения и разрушения образцов при низко- и высокоскоростном ударе согласно разработанной методике, которая представлена

в 1-й главе. Результативность методики проверена на 5-, 10-, 20-слойных пластинах при испытании на ударную нагрузку со скоростью 220 м/с, 346 м/с, 884 м/с. Пластины из стеклопластика с разной укладкой волокон в слое.

2.2.1 Моделирование ударника

Ударник – оболочка из медного сплава и сердечника из стали [44]. Высокоскоростная камера зафиксировала, что ударник после пробития образца из ПКМ не деформируется (рис. 2.9), поэтому ударник смоделирован в виде полусферического твердого тела с помощью команды MAT-RIGID. Свойства материала ударника представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Свойства материала ударников [44]

Свойства материала ударников	
Плотность, ρ	7 850 кг/м ³
Модуль упругости, E	16,67 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,42

Разработана геометрия модели ударника № 1 (рис. 2.13), согласно экспериментальным данным из таблицы 2.2 скорость в момент удара была 220 м/с.



Рисунок 2.13 – Моделирование ударника № 1:

а – размеры ударника; б – форма ударника; в – модель ударника в LS-DYNA

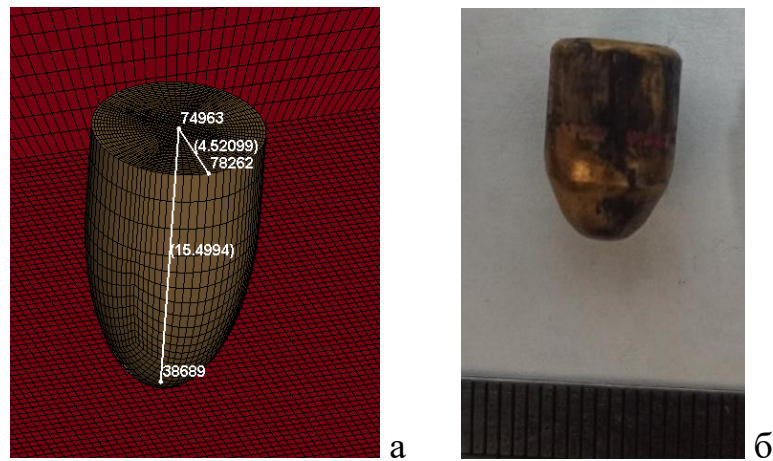


Рисунок 2.14 – Модель ударника № 2 (а), фотография ударника (б)

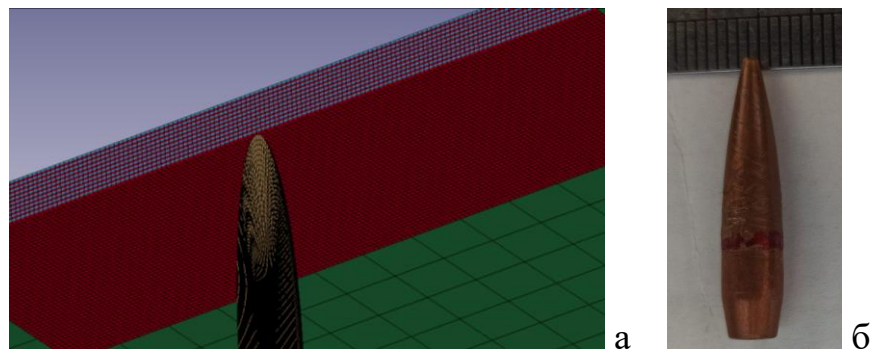


Рисунок 2.15 – Модель ударника № 3 (а), фотография ударника (б)

Разработана модель геометрии ударника № 2 (рис. 2.8) по соответствующим размерам из таблицы 2.2. Скорость до соприкосновения с образцом из ПКМ – 346 м/с.

Для высокоскоростного удара использовалась модель ударника № 3, которая представлена на рисунке 2.15. Скорость определена высокоскоростной камерой в момент удара и равна 884 м/с.

2.2.2 Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения 5-слойной пластины из стеклопластика при низко- и высокоскоростном ударе

В данном параграфе представлено моделирование процесса испытания на ударную нагрузку 5-слойной пластины из стеклопластика с укладкой волокон $[0,90]_2[0]$.

Ударник № 1 со скоростью 220 м/с пробивает 5-слойную пластину (рис. 2.16). В начале контакта ударника с пластиной при скорости 220 м/с ($t=0.001096$ мс) деформация пластины подобна изгибу балок с максимальными растягивающими напряжениями в нижнем слое (рис. 2.16в) и сжатыми в верхнем слое в точке контакта острия ударника (рис. 2.16б). Форма повреждений вытянута в направлении соответствующего волокна.

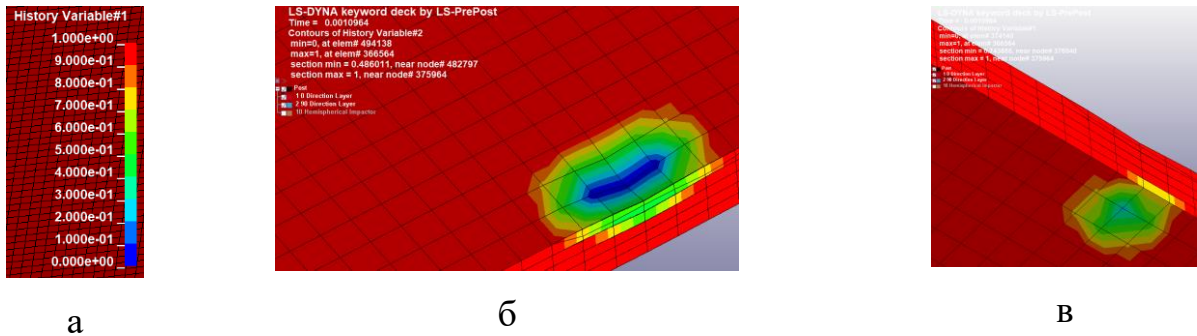


Рисунок 2.16 – Деформация пластины в момент времени $t=0.0010961$ мс

Начало разрушения наступает в момент времени $t=0,0027986$ мс в нижнем слое с постепенным увеличением площади повреждения (рис. 2.17а). В момент времени $t=0,003498$ мс происходит последующее разрушение в направлении снизу-вверх слоев (рис. 2.17б).

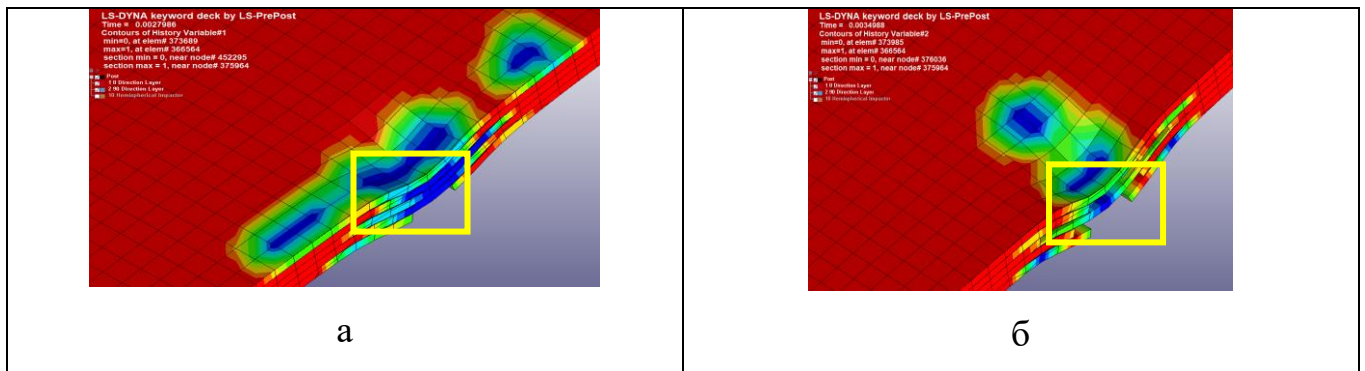
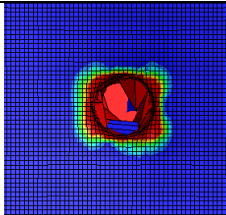
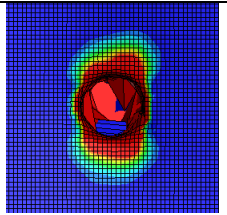
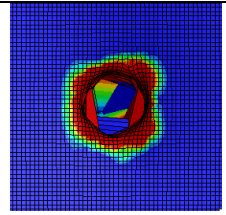
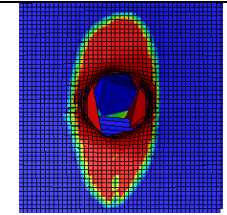


Рисунок 2.17 – Разрушение пластины при ударе: а – разрушение в момент $t=0.001498$ мс; б – разрушение в момент времени $t=0.0015942$ мс

Далее определяем расслоения на каждой границе раздела слоев с помощью идентификатора дефектов: красная область обозначена 1 (100%) – целый контакт; синий – 0 (0%) – полное разрушение межслойного контакта между слоями. Максимальное расслоение образуется между 4–5-м слоями (табл. 2.6).

Таблица 2.6 – Моделирование межслойных дефектов пластины
при ударе со скоростью 220 м/сек

Модели межслойных дефектов 5-слойной пластины из стеклопластика [0,90] ₂ 0, сравнение с результатами эксперимента				
Расслоение между 1–2-м слоями $L_{\max}=10,3$	Расслоение между 2–3-м слоями $L_{\max}=15,7$	Расслоение между 3–4-м слоями $L_{\max}=10,87$	Расслоение между 4–5-м слоями $L_{\max}=18,06$	Эксперимент 5-слойной пластины $L_{\max}=21,4$ мм
				

Общая площадь расслоения $S_{\text{общ}} = 54.93 \text{ мм}^2$, что на 30.37% больше, чем общая площадь расслоения при ударе со скоростью 346 м/с.

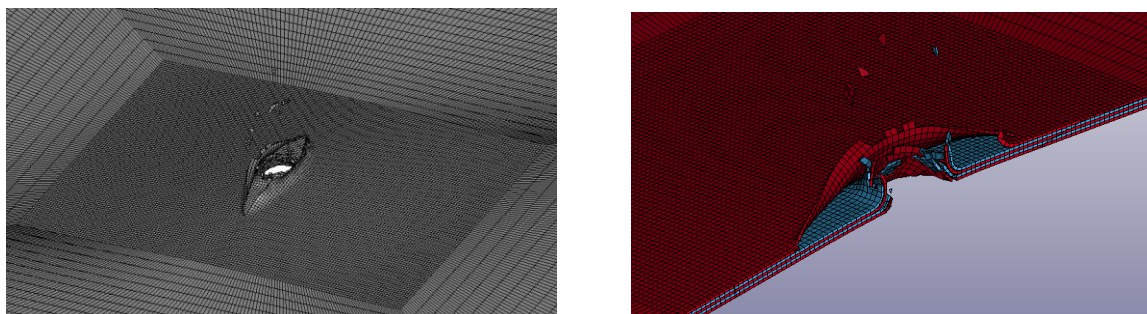


Рисунок 2.18 – Пробитие 5-слойной пластины из ПКМ ударником № 2:

а – тыльная сторона (сторона вылета); б – разрез пластины

Удар скоростью 346 м/с ударником № 2. В начале контакта ударника с пластиной при скорости 346 м/с ($t=0.001096$ мс) деформация пластины подобна удару ударником № 1 (рис. 2.19). Форма повреждений вытянута.

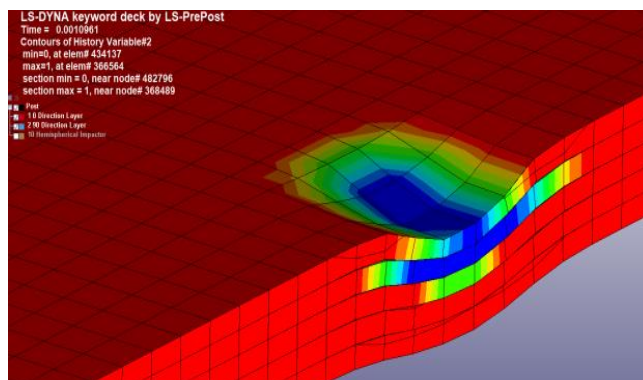
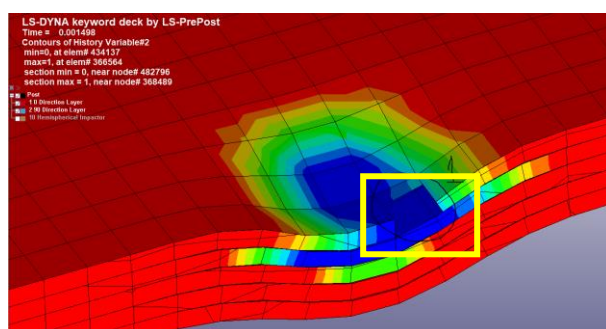
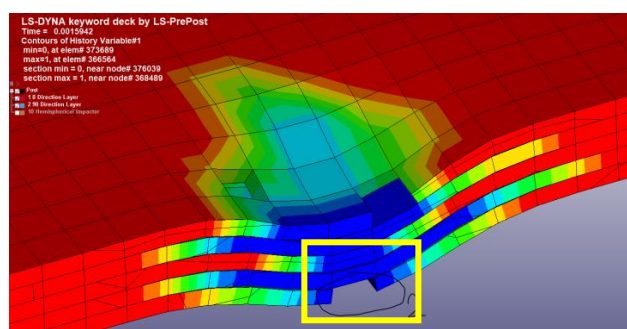


Рисунок 2.19 – Деформация пластины в момент времени $t=0.0010961$ мс

В момент времени $t=0.001498$ мс происходит разрушение от удара в первом слое с постепенным увеличением площади повреждения (рис. 2.20а), в момент времени $t=0.0015942$ мс происходит разрушение нижних слоев (рис. 2.20б).



а



б

Рисунок 2.20 – Разрушение пластины при ударе: а – разрушение в момент $t=0.001498$ мс; б – разрушение в момент времени $t=0.0015942$ мс

Вначале расслоения образуются между 1-м и 2-м слоями в виде «8» или «арахиса» (рис. 2.21б), что соответствует результатам экспериментов. Расслоения появляются до начала первых разрушений в момент времени $t=0.00090324$ мс с постепенным увеличением площади дефекта (рис. 2.21а). Полученные результаты моделирования межслойных дефектов представлены в таблице 2.7. Максимальное расслоение образуется между 2–3-м слоями и между 4–5-м слоями, $L_{\max}$ – максимальная длина дефекта. Приведено сравнение моделирование дефектов с

экспериментом, отличие от которого при моделировании определены размеры дефектов между слоями. При совмещении моделей дефектов по слоям их форма и размеры совпадают с экспериментом.

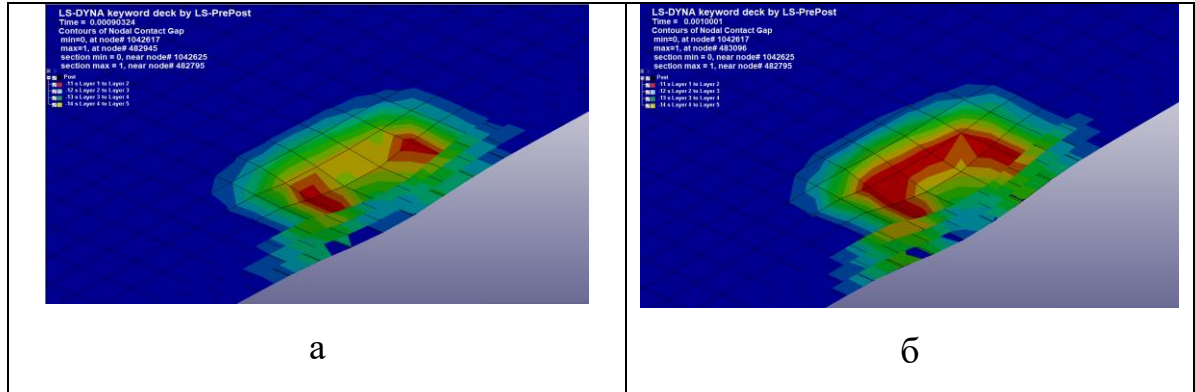
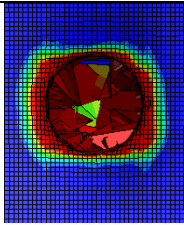
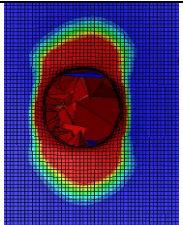
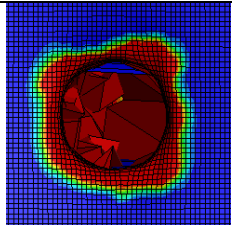
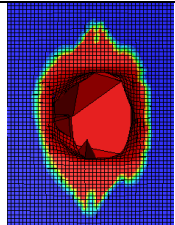


Рисунок 2.21 – Расслоения на границе раздела слоев: а – расслоения в момент времени $t=0.00090324$ мс; б – расслоения в момент времени $t=0.0010001$ мс

Таблица 2.7 – Моделирование межслойных дефектов
при ударе со скоростью 346 м/с

Модели межслойных дефектов 5-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_20$, сравнение с результатами эксперимента				
Расслоение между 1–2-м слоями (мм)	Расслоение между 2–3-м слоями (мм)	Расслоение между 3–4-м слоями (мм)	Расслоение между 4–5-м слоями (мм)	Эксперимент 5-слойной пластины (мм)
$L_{\max}=14,81$ мм	$L_{\max}=22,44$ мм	$L_{\max}=14,49$ мм	$L_{\max}=19,87$ мм	$L_{\max}=22,5$ мм
				

При скорости 346 м/с ударник № 2 пробивает 5-слойную пластину (рис. 2.22).

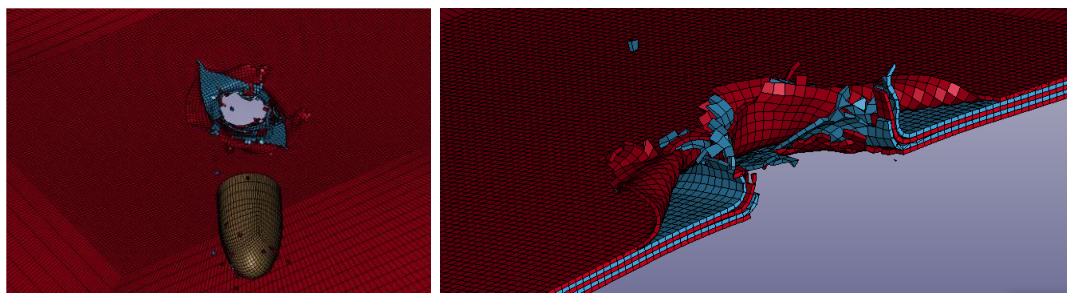
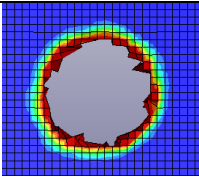
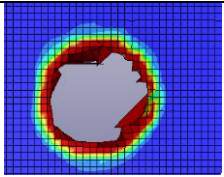
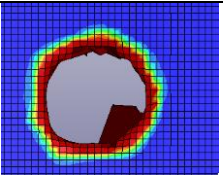
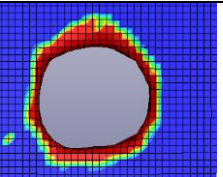
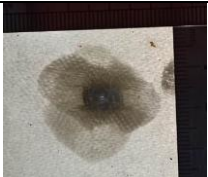


Рисунок 2.22 – Пробитие 5-слойной пластины из ПКМ ударником № 1:

а – тыльная сторона (сторона вылета); б – разрез пластины

Таблица 2.8 – Моделирование межслойных дефектов пластины
при ударе со скоростью 884 м/сек

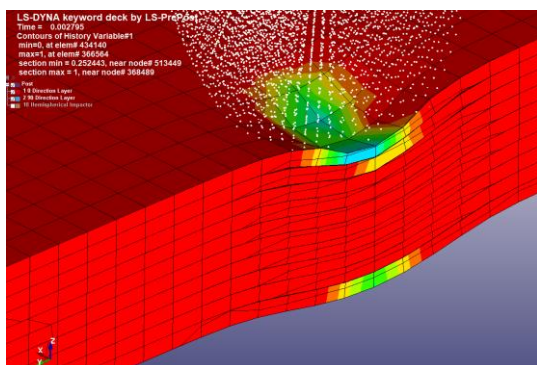
Модели межслойных дефектов 5-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_20$, сравнение с результатами эксперимента (скорость ударника – 884 м/сек)				
1–2-м слоями $L_{\max}=6,81$ (мм)	2–3-м слоями $L_{\max}=7,22$ (мм)	3–4-м слоями $L_{\max}=7,69$ (мм)	4–5-м слоями $L_{\max}=9,47$ (мм)	Эксперимент
				

Процесс разрушения пластины при ударе со скоростью 884 м/с (ударник № 3) представлен в таблице 2.8. При высокоскоростном ударе площадь расслоений в два раза меньше, чем от ударов ударниками № 1 и 2. Результаты моделирования сопоставимы с экспериментом.

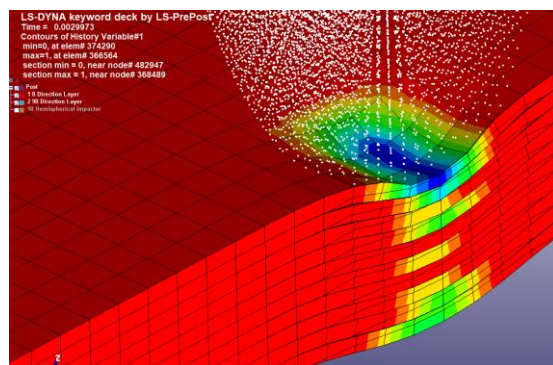
2.2.3 Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения 10-слойной пластины при низко- и высокоскоростном ударе

В данном параграфе представлено моделирование процесса испытания на ударную нагрузку 10-слойной пластины из стеклопластика с укладкой волокон $[0,90]_5$.

При скорости удара 220 м/с (ударник № 1) распределение напряжений в пластине из 10 слоев заметно отличается от распределения напряжений в пластине из 5 слоев. В начале удара в пластине появляются усилия в верхнем слое в точке удара и нижнем слое (рис. 2.23а), срединные слои не испытывают нагрузку до момента времени 0.0029973 мс (рис. 2.23б).



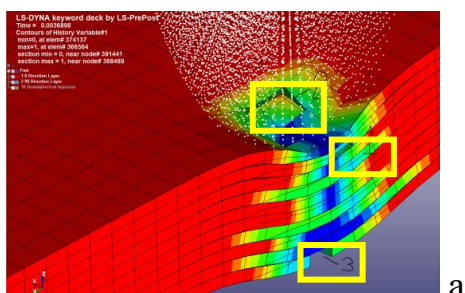
t=0.002795 мс



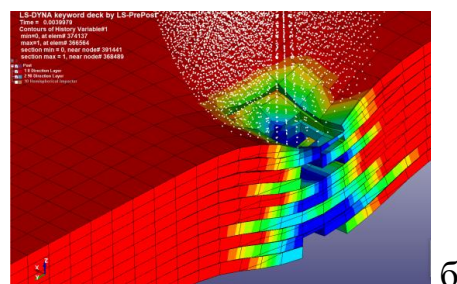
t = 0.0029973 мс

Рисунок 2.23 – Деформация пластины при скорости удара 220 м/с

Разрушение от удара начинается в момент времени $t=0.0036898$ м/с в первом слое (рис. 2.24а), затем вытягивается вдоль и поперек пластины с постепенным увеличением площади повреждения до полного разрушения (рис. 2.24б).



t=0.0036898 мс

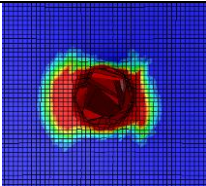
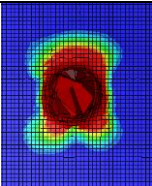
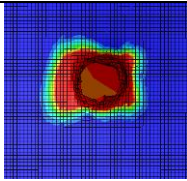
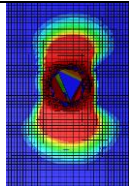
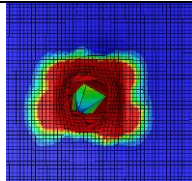
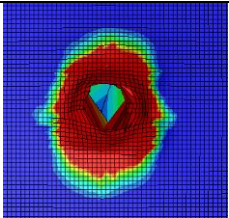
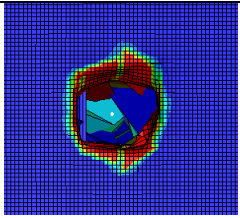
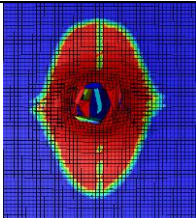
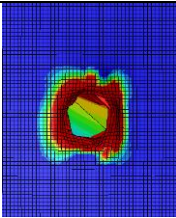


t = 0.0039979 мс

Рисунок 2.24 – Напряжения в пластине при ударе

Результаты моделирования межслойных дефектов представлены в таблице 2.9. Максимальное расслоение образуется между 4–5-м слоями. Приведено сравнение моделирования дефектов с экспериментом, при совмещении всех дефектов по слоям их формы и размеры совпадают с экспериментальными данными. Площадь дефекта в три раза больше, чем при ударе со скоростью 346 м/с.

Таблица 2.9 – Моделирование межслойных дефектов 10-слойной пластины
при скорости удара 220 м/с

Модели межслойных дефектов 10-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_5$, сравнение с результатами эксперимента				
Расслоение между 1–2-м слоями $L_{\max}=12.5$ мм	Расслоение между 2–3-м слоями $L_{\max}=13.4$ мм	Расслоение между 3–4-м слоями $L_{\max}=12.54$ мм	Расслоение между 4–5-м слоями $L_{\max}=21.1$ мм	Расслоение между 5–6-м слоями $L_{\max}=14.86$ мм
				
Расслоение между 6–7-м слоями $L_{\max}=17.12$ мм	Расслоение между 7–8-м слоями $L_{\max}=14.442$ мм	Расслоение между 8–9-м слоями $L_{\max}=17.6$ мм	Расслоение между 9–10-м слоями $L_{\max}=11.26$ мм	Эксперимент с 10-слойной пластиной
				

При скорости 220 м/с ударник № 1 пробивает 10-слойную пластину. На рисунке 2.25 представлено разрушение пластины.

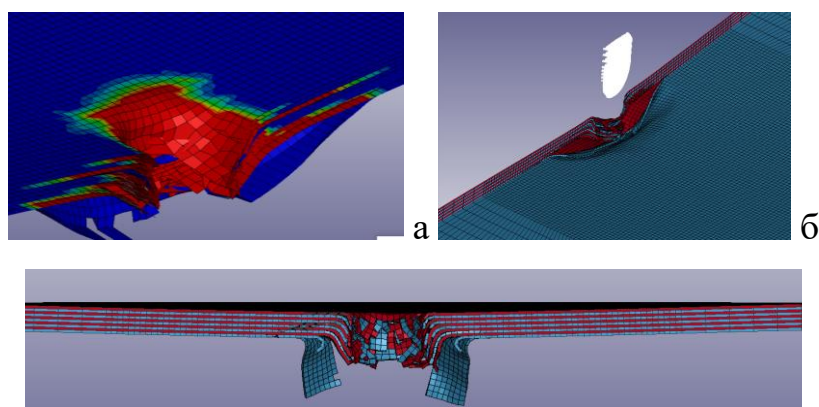


Рисунок 2.25 – Разрушение 10-слойной пластины ударником
со скоростью удара 220 м/с

Скорость удара 346 м/с. На рисунке 2.26 представлен процесс образования расслоений 10-слойной пластины из стеклопластика ударником № 2 от начала деформирования до пробития.

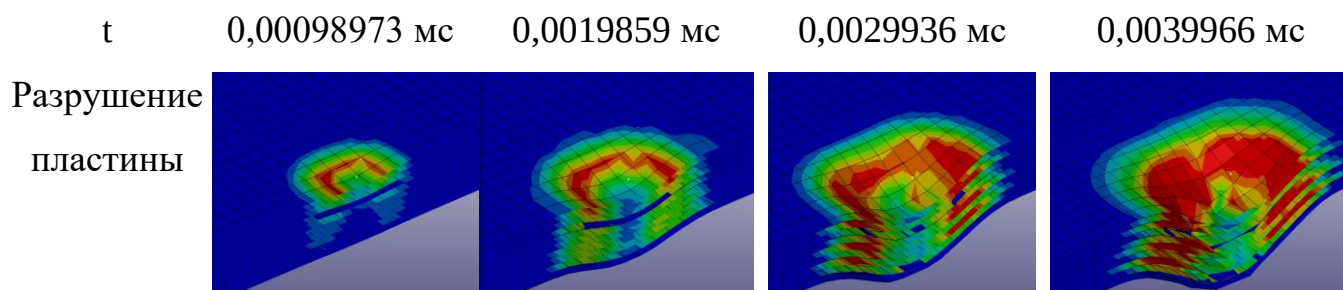
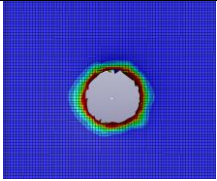
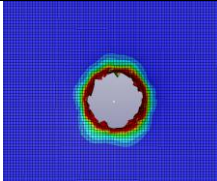
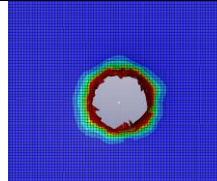
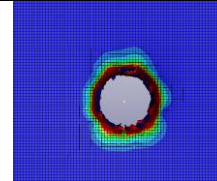
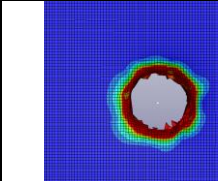


Рисунок 2.26 – Процесс разрушения 10-слойной пластины

Результаты моделирования межслойных дефектов представлены в таблице 2.10. Максимальное расслоение образуется между 7–8-м слоями. Приведено сравнение моделирования дефектов с экспериментом, при совмещении моделей дефектов по слоям их формы и размеры совпадают с экспериментальными данными.

Таблица 2.10 – Моделирование межслойных дефектов 10-слойной пластины при скорости удара 346 м/с

Модели межслойных дефектов 10-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_5$, сравнение с результатами эксперимента				
Расслоение между 1–2-м слоями $L_{\max}=10.3563$ мм	Расслоение между 2–3-м слоями $L_{\max}=10.466$ мм	Расслоение между 3–4-м слоями $L_{\max}=11.7231$ мм	Расслоение между 4–5-м слоями $L_{\max}=11.997$ мм	Расслоение между 5–6-м слоями $L_{\max}=12.8666$
				

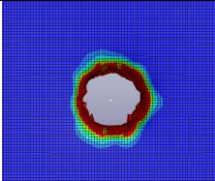
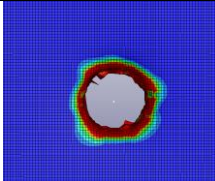
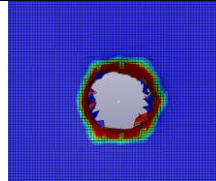
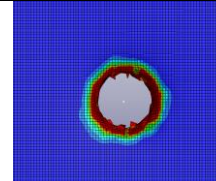
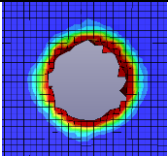
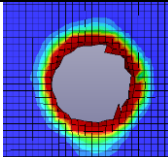
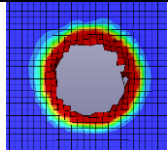
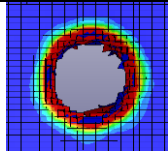
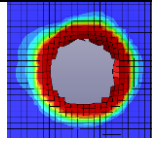
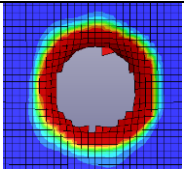
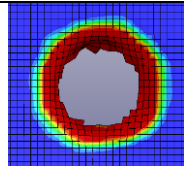
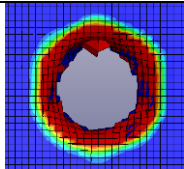
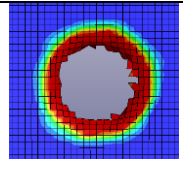
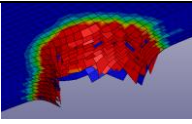
Расслоение между 6–7-м слоями $L_{\max}=12.264$ мм	Расслоение между 7–8-м слоями $L_{\max}=13.4171$ мм	Расслоение между 8–9-м слоями $L_{\max}=12.7573$ мм	Расслоение между 9–10-м слоями $L_{\max}=11.5153$ мм	Эксперимент с 10- слойной пластиной
				

Таблица 2.11 – Моделирование межслойных дефектов 10-слойной пластины
при скорости удара 884 м/с

Модели межслойных дефектов 20-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_{10}$, сравнение с результатами эксперимента между				
1–2-м слоями $L_{\max}=6.3$ мм	2–3-м слоями $L_{\max}=6.8$ мм	3–4-м слоями $L_{\max}=6.81$ мм	4–5-м слоями $L_{\max}=7.2$ мм	5–6-м слоями $L_{\max}=7.26$ мм
				
6–7-м слоями $L_{\max}=7.69$ мм	7–8-м слоями $L_{\max}=8.137$ мм	8–9-м слоями $L_{\max}=8.5$ мм	9–10-м слоями $L_{\max}=7.31$ мм	Общее расслоение
				

Скорость удара 884 м/с. Результаты моделирования межслойных дефектов при скорости 884 м/с ударника № 3 представлены в таблице 2.11. Площадь межслойных дефектов в два раза меньше, чем при скорости ударника 220 м/с и 346 м/с. Результаты моделирования сопоставимы с экспериментом (рис. 2.27).

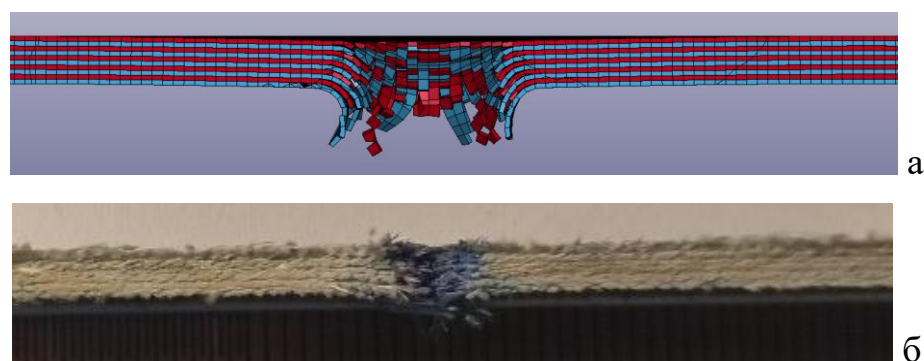


Рисунок 2.27 – Сравнение разрушения численной модели и экспериментального образца при скорости удара 884 м/с: а – разрез численной модели; б – разрез экспериментальной пластины

2.2.4 Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения 20-слойной пластины при низко- и высокоскоростном ударе

В данном параграфе представлено моделирование процесса испытания на ударную нагрузку 20-слойной пластины из стеклопластика с укладкой волокон $[0,90]_{10}$.

При ударе пластины из 20 слоев со скоростью 220 м/с ударником № 1 пробития нет. Ударник деформируется, останавливается на 10-м слое, при этом образуя большие площади расслоения. Этот результат совпадает с экспериментом. Хотя нарушаются тыльные слои, ударник застревает в пластине. На рисунке 2.28а, б представлены результаты моделирования пробития пластины и экспериментальные данные.

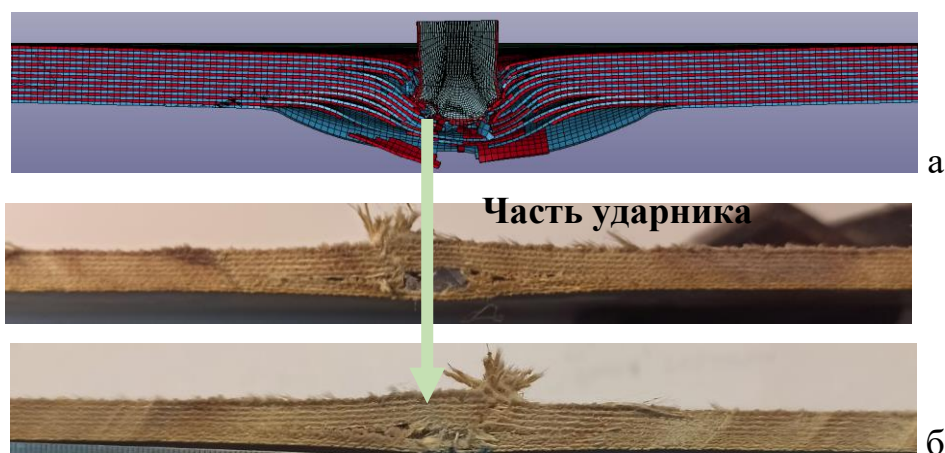
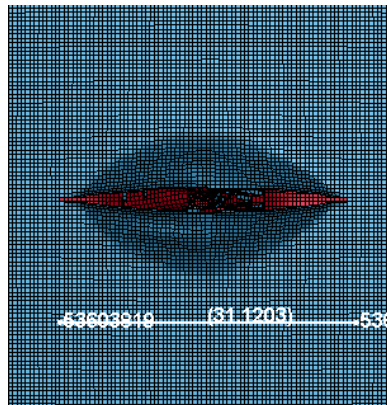
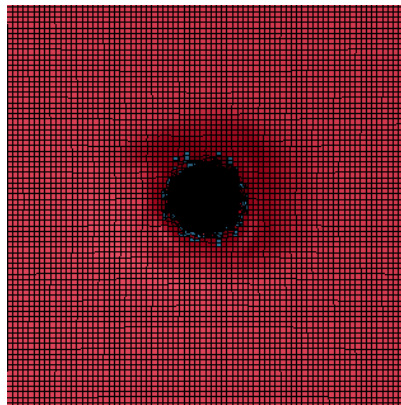


Рисунок 2.28 – Деформирование и разрушение пластины при скорости удара 220 м/с: а – численный расчет; б – срез образцов из ПКМ, результаты эксперимента



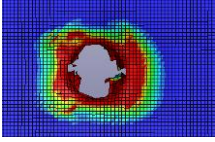
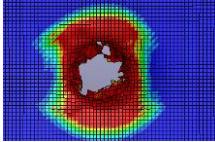
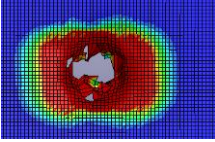
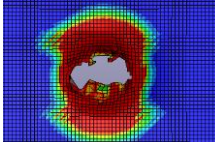
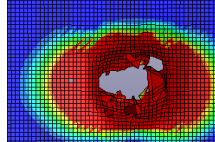
Лицевая сторона

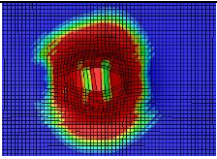
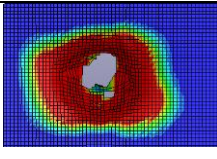
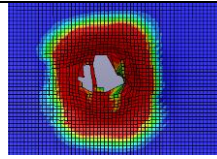
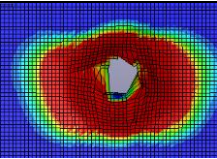
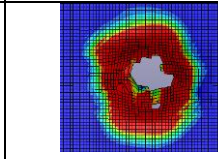
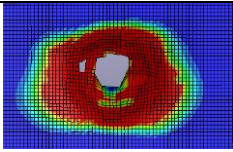
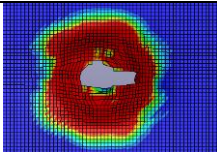
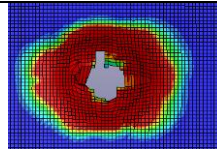
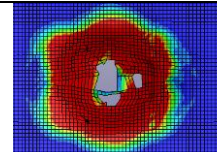
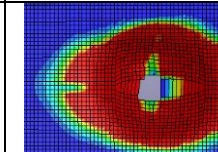
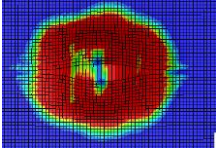
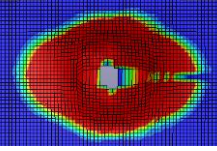
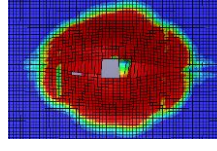
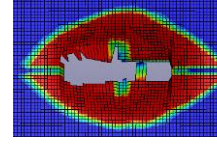
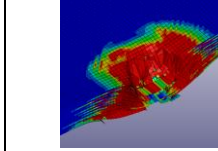
Тыльная сторона

Рисунок 2.29 – Результаты моделирования пробития пластины
и экспериментальные данные со скоростью 220 м/с

В таблице 2.12 представлены результаты моделирования межслойных дефектов при скорости 220 м/с ударника № 1.

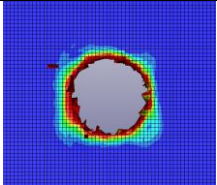
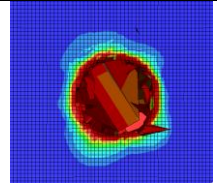
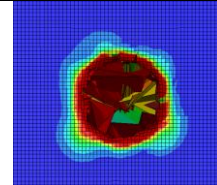
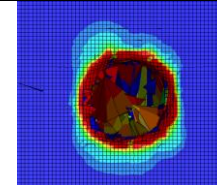
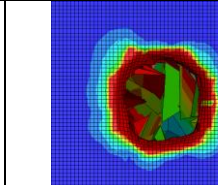
Таблица 2.12 – Моделирование межслойных дефектов 20-слойной пластины
при скорости удара 220 м/с

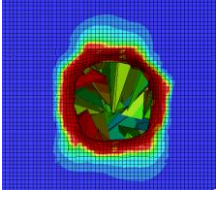
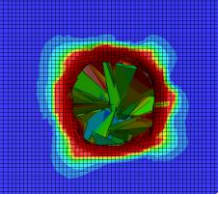
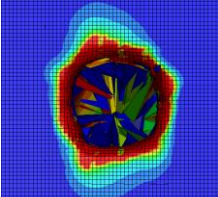
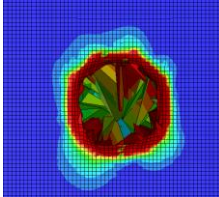
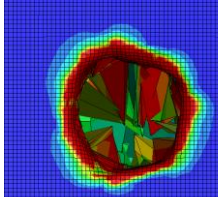
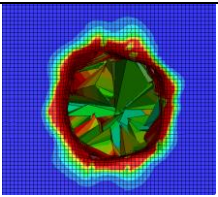
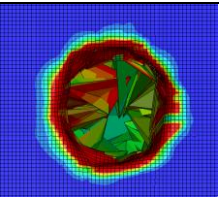
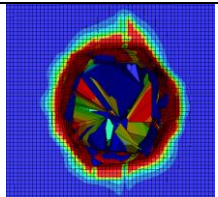
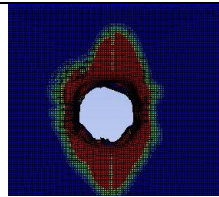
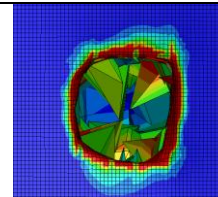
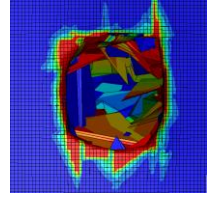
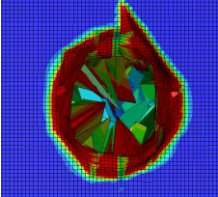
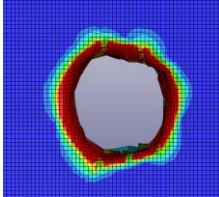
Модели межслойных дефектов 20-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_{10}$, сравнение с результатами эксперимента (скорость ударника 220 м/с) между				
1–2-м слоями	2–3-м слоями	3–4-м слоями	4–5-м слоями	5–6-м слоями
$L_{\max}=11,62$ мм	$L_{\max}=13,87$ мм	$L_{\max}=14,81$ мм	$L_{\max}=14,34$ мм	$L_{\max}=17,96$ мм
				

6–7-м слоями $L_{\max}=15,26$	7–8-м слоями $L_{\max}=16,8$	8–9-м слоями $L_{\max}=15$	9–10-м слоями $L_{\max}=18,45$	10–11-м слоями $L_{\max}=15,31$
				
1–12-м слоями $L_{\max}=18,47$	12–13-м слоями $L_{\max}=18,03$	13–14-м слоями $L_{\max}=14,49$	14–15-м слоями $L_{\max}=17,61$	15–16-м слоями $L_{\max}=21,66$
				
16–17-м слоями $L_{\max}=17,61$	17–18-м слоями $L_{\max}=21,68$	18–19-м слоями $L_{\max}=20,33$	19–20-м слоями $L_{\max}=25,73$	Общая форма расслоений
				

В таблице 2.13 представлены результаты моделирования межслойных дефектов при скорости 346 м/с ударника № 2. Результаты моделирования сопоставимы с экспериментом (рис. 2.30), длина дефекта совпадает. На рисунке 2.30 представлены результаты моделирования пробития пластины и экспериментальные данные.

Таблица 2.13 – Моделирование межслойных дефектов 20-слойной пластины при скорости удара 346 м/с

Модели межслойных дефектов 20-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_{10}$, сравнение с результатами эксперимента (скорость ударника 220 м/с) между				
1–2-м слоями $L_{\max}=13,338$ мм	2–3-м слоями $L_{\max}=11,67$ мм	3–4-м слоями $L_{\max}=11,70$ мм	4–5-м слоями $L_{\max}=12,127$ мм	5–6-м слоями $L_{\max}=13,051$ мм
				

6–7-м слоями $L_{\max}=13,49$	7–8-х слоями $L_{\max}=13,52$	8–9-м слоями $L_{\max}=15,749$	9–10-м слоями $L_{\max}=12,58$	10–11-м слоями $L_{\max}=15,32$
				
11–12-м слоями $L_{\max}=16,273$	12–13-м слоями $L_{\max}=15,797$	13–14-м слоями $L_{\max}=19,3979$	14–15-м слоями $L_{\max}=25,84$	15–16-м слоями $L_{\max}=15,0174$
				
16–17-м слоем $L_{\max}=75,84$	17–18-м слоем $L_{\max}=24,51$	18–19-м слоем $L_{\max}=23,34$	19–20-м слоем $L_{\max}=13,96$	Общая форма расслоений
				

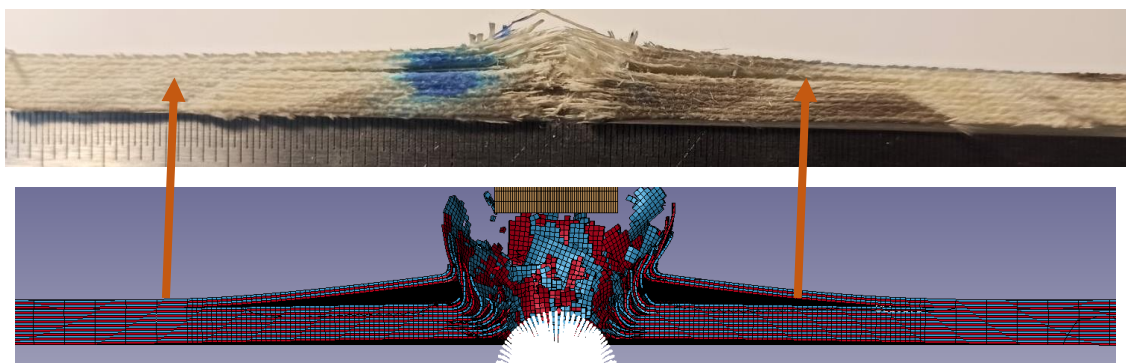


Рисунок 2.30 – Результаты моделирования дефекта и эксперимента

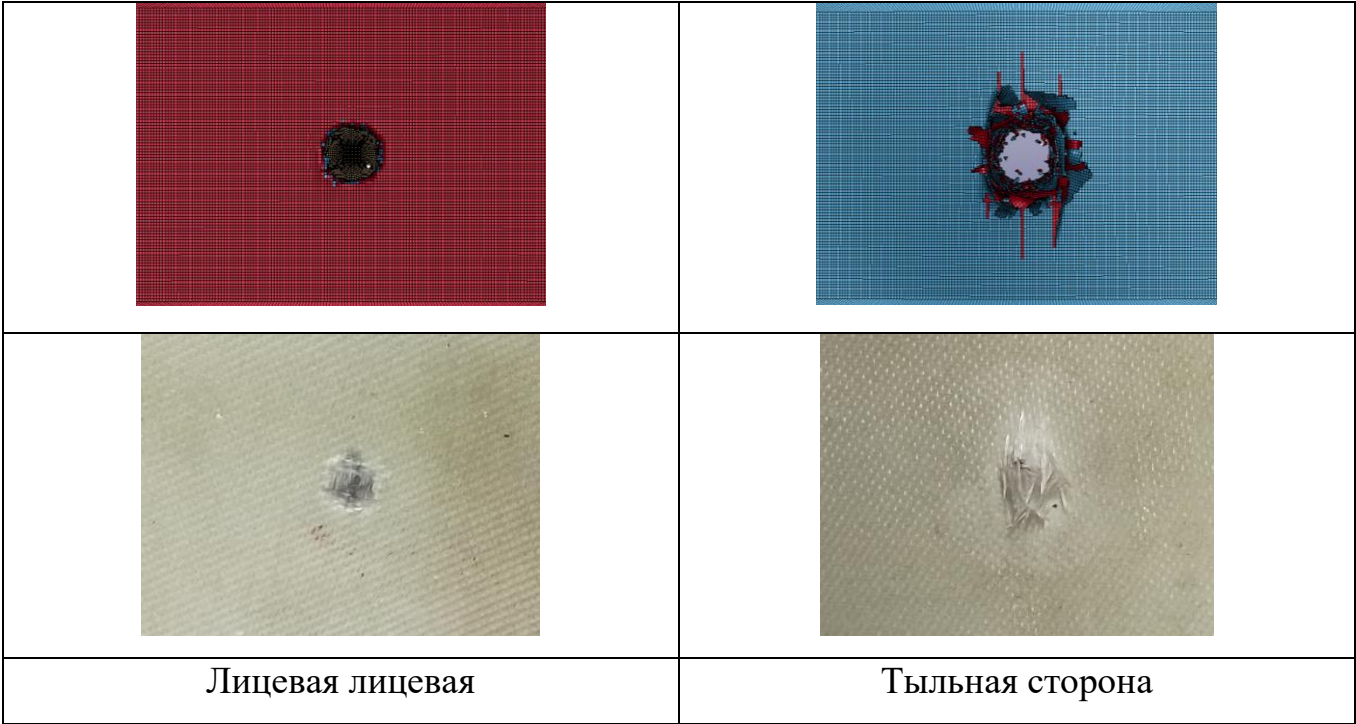
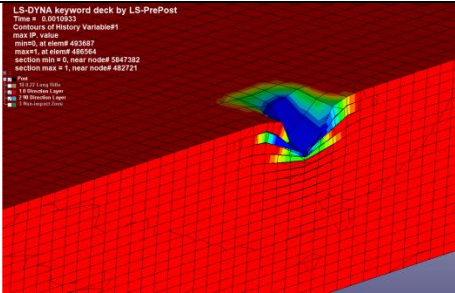
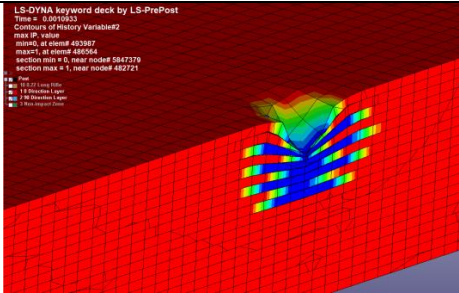
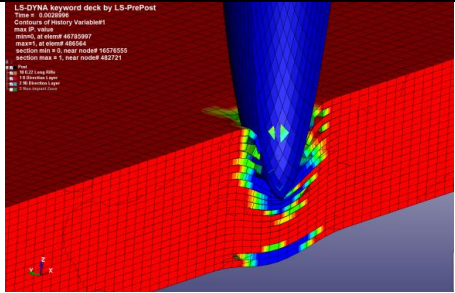
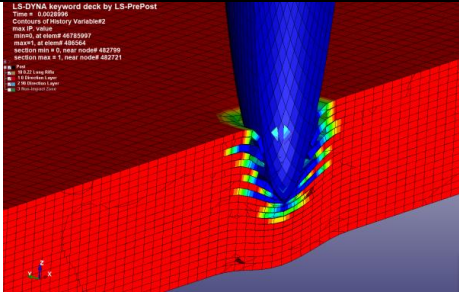
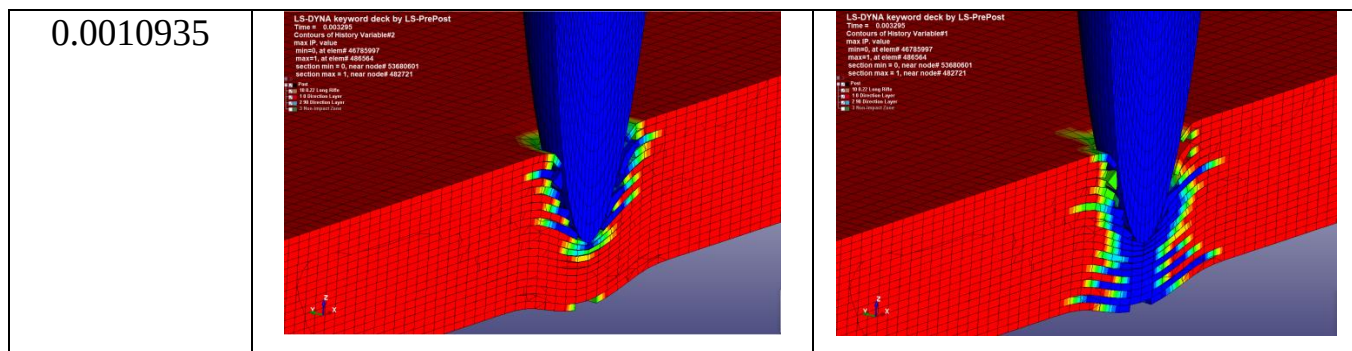


Рисунок 2.31 – Результаты моделирования пробития пластины и эксперимента

Моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения 20-слойной пластины при скорости удара 884 м/с представлено в таблице 2.14. Разрушение пластины начинается с верхнего слоя с последующим разрушением нижних слоев.

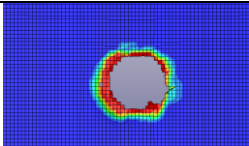
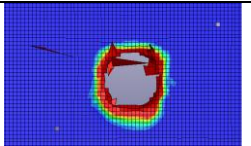
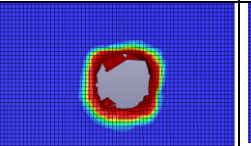
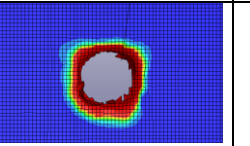
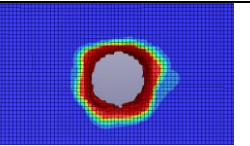
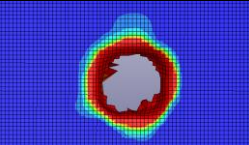
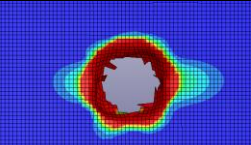
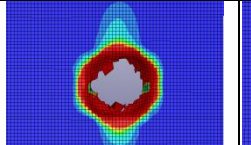
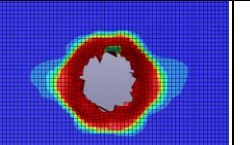
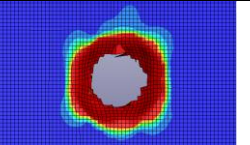
Таблица 2.14 – Процесс деформирования, повреждения, разрушения 20-слойной пластины при скорости удара 884 м/с

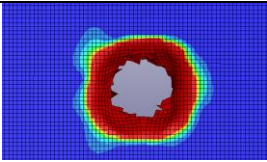
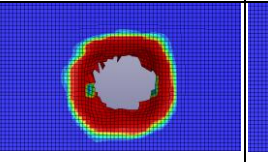
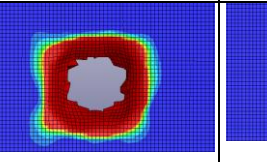
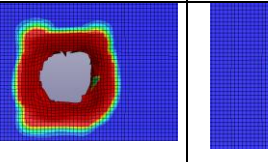
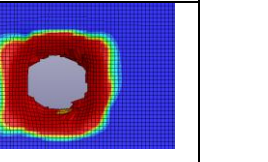
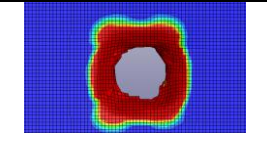
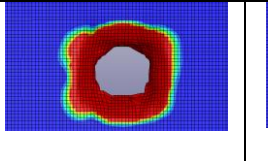
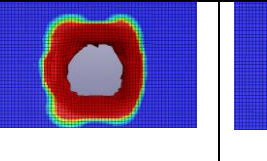
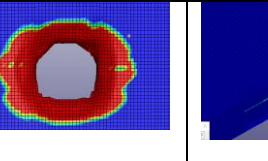
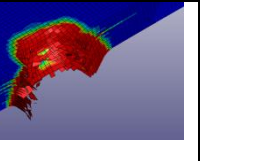
Т (мс)	Процесс	
0.001093		
0.0010933		



В таблице 2.15 представлены результаты моделирования межслойных дефектов при скорости ударника № 3 884 м/с. На рисунке 2.32 представлены результаты моделирования пробития пластины и экспериментальные данные. Представлено сравнение численной модели разрушения с разрушением экспериментального образца. Размеры дефектов совпадают (рис. 2.32).

Таблица 2.15 – Моделирование межслойных дефектов 20-слойной пластины при скорости удара 884 м/с

Модели межслойных дефектов 20-слойной пластины из стеклопластика $[0,90]_{10}$, сравнение с результатами эксперимента (скорость ударника- 884 м/с) между				
1–2-м слоями $L_{\max}=11,656$ мм	2–3-м слоями $L_{\max}=10,7914$	3–4-м слоями $L_{\max}=10,77$	4–5-м слоями $L_{\max}=11,668$	5–6-м слоями $L_{\max}=13,4818$
				
6–7-м слоями $L_{\max}=14,836$	7–8-м слоями $L_{\max}=19,7898$	8–9-м слоями $L_{\max}=21,1631$	9–10-м слоями $L_{\max}=18,002$	10–11-м слоями $L_{\max}=16,2353$
				

11–12-м слоями $L_{\max}=15,766$	12–13-м слоями $L_{\max}=15,2485$	13–14-м слоями $L_{\max}=17,848$	14–15-м слоями $L_{\max}=17,6012$	15–16-м слоями $L_{\max}=18,241$
				
16 и 17 слоев $L_{\max}=18,144$	17 и 18 слоев $L_{\max}=18,9483$	18 и 19 слоев $L_{\max}=16,449$	19 и 20 слоев $L_{\max}=19,8754$	Общая форма расслоений
				

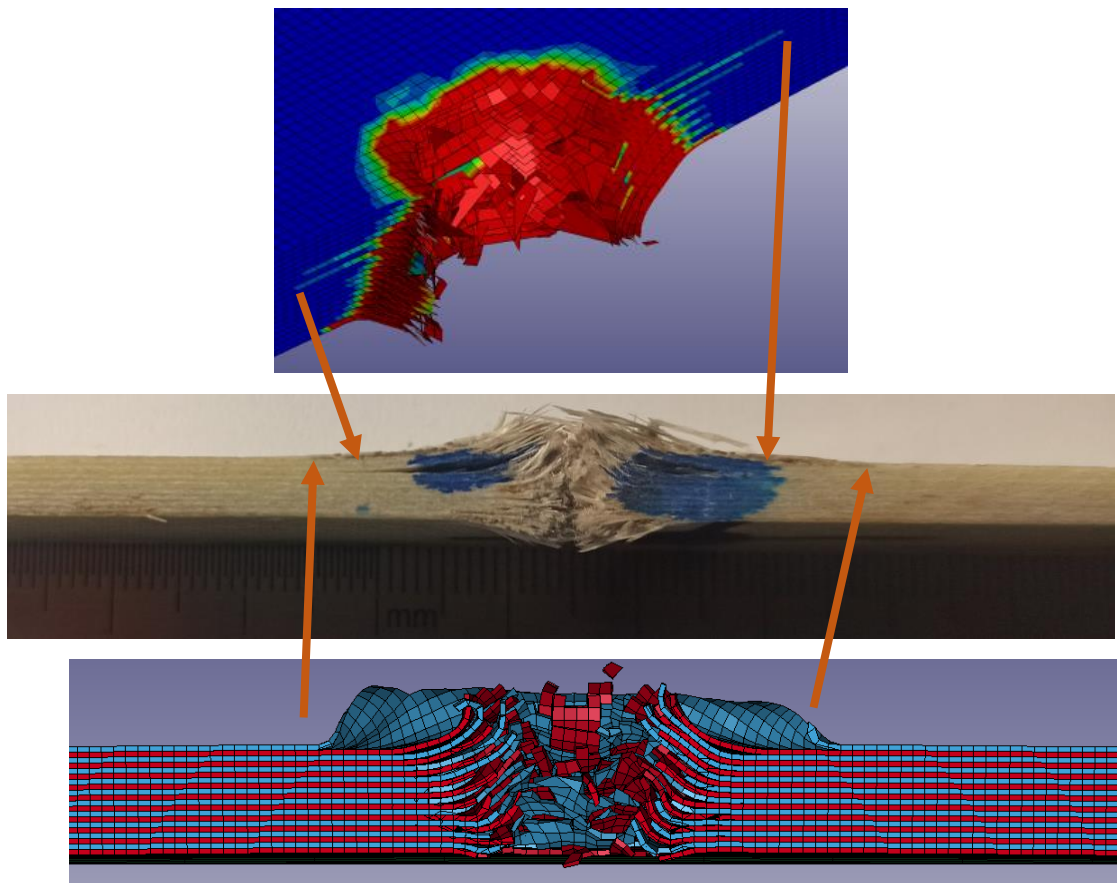


Рисунок 2.32 – Сравнение среза экспериментального образца
с численной моделью пластины

2.3 Виртуальные испытания на низко- и высокоскоростной удар многослойных пластин из ПКМ

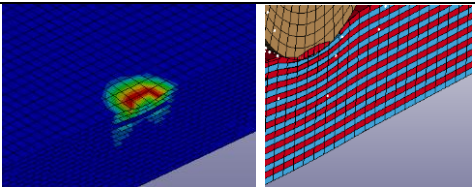
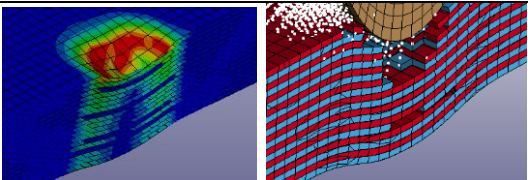
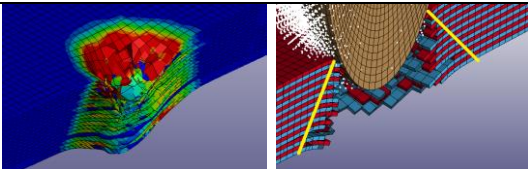
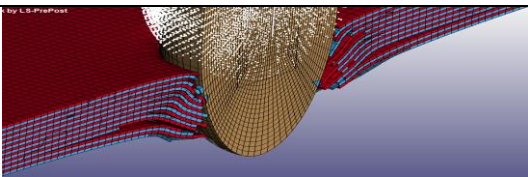
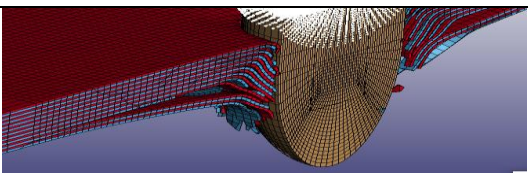
С появлением информационных технологий появилось понятие «цифровые двойники» [31]. Цифровой двойник – это виртуальная модель того или иного изделия. В настоящее время при разработке технологии управления жизненным циклом изделий необходимым условием является включение в нее технологии «виртуальных испытаний» изделия. Виртуальные испытания определяют количественные и качественные характеристики свойств изделия испытаний [186]. Во время виртуальных испытаний должна быть возможность достоверно фиксировать текущие значения характеристик изделия в любой момент времени в течение жизненного цикла изделия.

Апробация виртуальных испытаний производилась на серии многослойных пластин из ПКМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками при различных скоростях удара. Экспериментальное исследование и высокоскоростная видеосъемка процесса низко- и высокоскоростного удара представлены в параграфе 2.1; модели ударника и многослойной пластины, численное моделирование процесса деформирования, повреждения, разрушения пластин при низко- и высокоскоростном ударе методом конечных элементов представлены в параграфе 2.2. Виртуальные испытания высокоскоростного удара – это конструирование изделия, расчеты на прочность, проведение натурных испытаний для того, чтобы убедиться, что созданное изделие полностью соответствует предъявленным требованиям. Для обеспечения всем требованиям прочности многослойной пластины необходима проработка большого количества вариантов укладки волокон в слое, что требует применения специализированных систем для анализа данных, автоматической генерации вариантов расчетных моделей и управления оптимизацией характеристик изделия, что будет представлено в 3-й главе диссертационной работы.

2.3.1 Результаты виртуальных испытаний и соответствие их натурным испытаниям

В таблице 2.16 представлен результат численного расчета процесса удара в течение всего цикла: от начала деформации до разрушения [65] для 20-слойной пластины из ПКМ. Все этапы деформации вплоть до разрушения пластины обозначены буквами А, Б, В, Г.

Таблица 2.16 – Численный процесс удара от начала деформации до разрушения пластины

А	Расслоения в виде «арахиса» в верхних слоях с уменьшением площади к нижним слоям	
А–Б	Разрушение матрицы и волокна под ударником. Распространение повреждений в нижние слои (от верхних к нижним слоям)	
Б–В	Расширение разрушенной области в виде конуса. Увеличение расслоения между 15–16-м слоями	
В–Г	Дальнейшее продвижение эллиптической части ударника в КМ с расширением конической поврежденной области в КМ	
Г	Выход из КМ эллиптической части ударника. Дальнейшее прохождение ударника без сопротивления	

Зависимость скорости ударника от времени при ударе со скоростью 220 м/с представлена на рисунке 2.33, со скоростью 346 м/с – на рисунке 2.34. Согласно таблице 2.16 введем обозначения: А₁, Б₁, В₁, Г₁ – этапы жизненного цикла

5-слойной пластины; A_2 , B_2 , V_2 , Γ_2 – этапы жизненного цикла 10-слойной пластины; A_3 , B_3 , V_3 , Γ_3 – этапы жизненного цикла 20-слойной пластины.

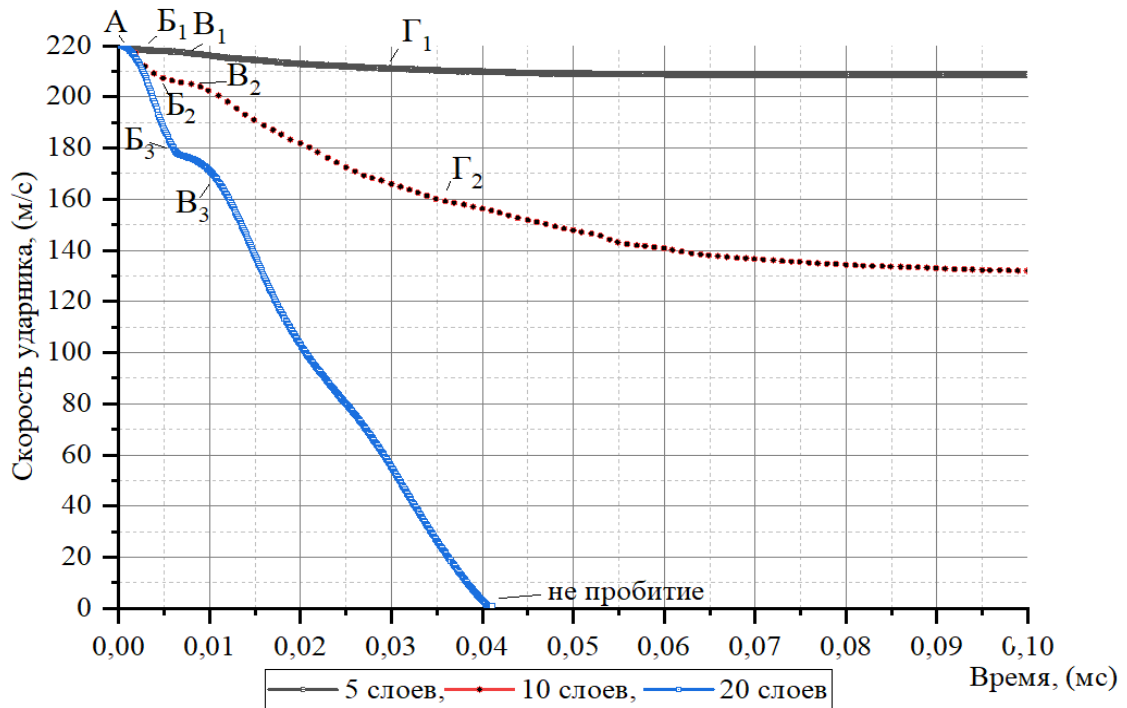


Рисунок 2.33 – Зависимость скорости ударника (м/с) от времени (мс) при ударе со скоростью 220 м/с

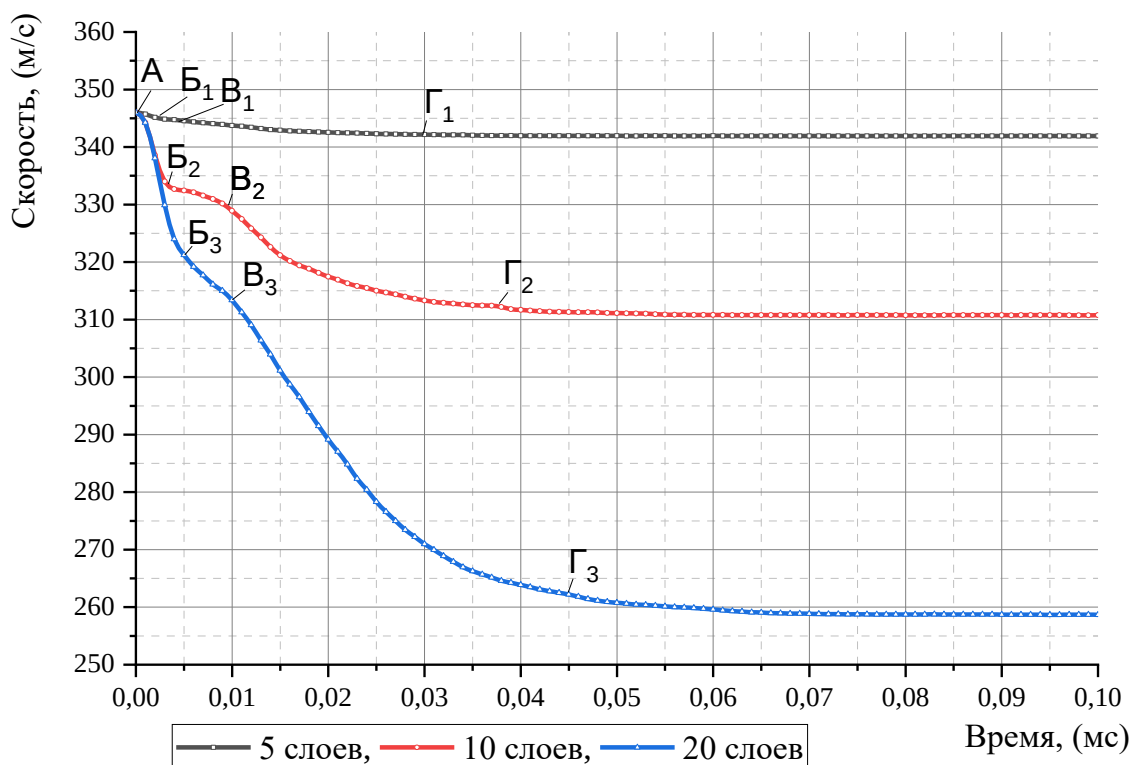


Рисунок 2.34 – Зависимость скорости ударника (м/с) от времени (мс) при ударе со скоростью 346 м/с

В начале графика в точках A_i ($i=1, 2, 3$) скорость зависит от геометрии вхождения ударника. В момент контакта ударника с пластиной в точках A_i ($i=1, 2, 3$), т. е. в верхних слоях пластины, образуются первые расслоения в виде «арахиса» или «8». При этом площадь в нижних слоях пластины уменьшается, начинается разрушение верхних слоев пластины от острия ударника. В периоде $A_i - B_i$ ($i=1, 2, 3$) происходит разрушение матрицы и волокна, в периоде $B_i - V_i$ ($i=1, 2, 3$) дальнейшее разрушение области в виде конуса, начало резкого выпучивания расслоения между слоями (например, для 20-слойной пластины между 16-м и 15-м слоями). В период $V_i - \Gamma_i$ ($i=1, 2, 3$) увеличивается время продвижения эллиптической части ударника и область межслойных дефектов. Γ_i ($i=1, 2, 3$) – полное пробитие или не пробитие ударником пластины.

На рисунке 2.35 представлены результаты численного расчета и экспериментального исследования скорости ударника от времени (сходимость в пределах 10–15%). Получены численные значения скорости ударника до и после пробития пластины, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами [41], представленными в таблице 2.17.

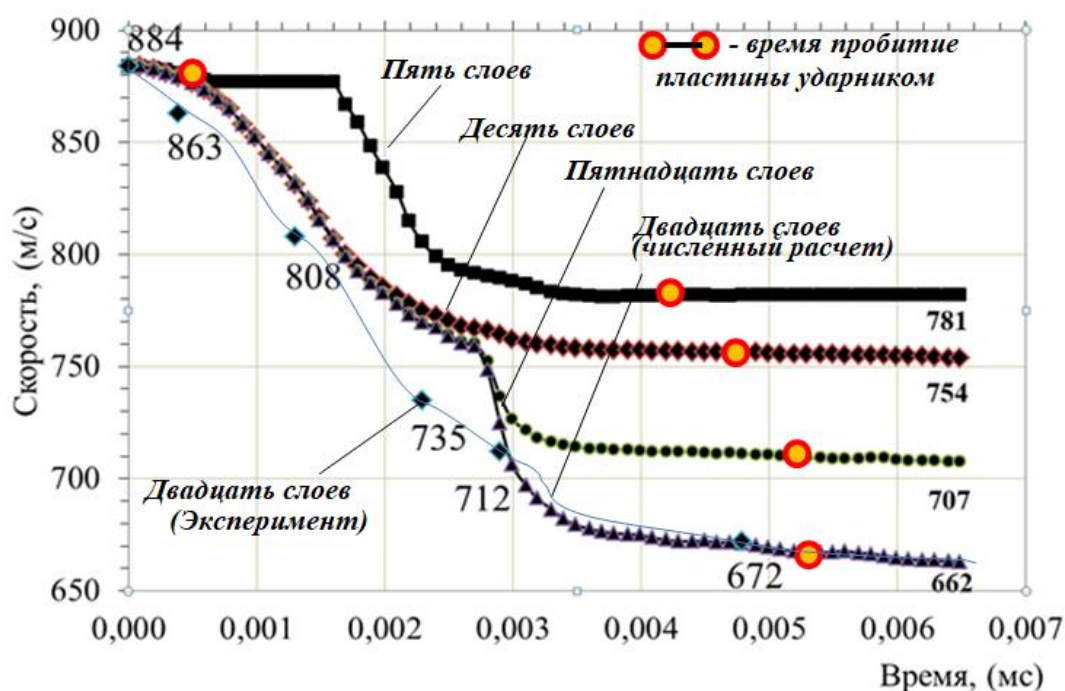


Рисунок 2.35 – Зависимость скорости ударника от времени: 5, 10, 15, 20 слоев стеклопластика, начальная скорость 884 м/с

Таблица 2.17 – Результаты определения скоростей ударников:
численный расчет и экспериментальные данные

Ударник	Скорость до удара, V_1 (м/с) средняя	Количество слоев КМ	Скорость после пробития, V_2 (м/с)			
			Стеклопластик		Углепластик	
			Расчетное	Эксперимент	Расчетное	Эксперимент
Ударник № 1	220	20	Нет проб	Нет пробития	Нет проб.	Нет проб.
		10	210	181	31	40
		5	221	240	165	155
Ударник № 2	346	20	258	230	222	241
		10	312	334	308	333
		5	342	356	342	380
Ударник № 3	884	20	772	821	797	704
		10	754	771	855	865
		5	781	794	871	880

На рисунке 2.36 представлены размеры межслойных дефектов типа расслоения (площадь дефекта, мм^2) по слоям для 20-слойной пластины при скорости удара 884 м/с, 220 м/с, 346 м/с. Длина расслоений равномерно увеличивается между 8–9-м слоями, достигая пика, и увеличивается между 19–20-м слоями.

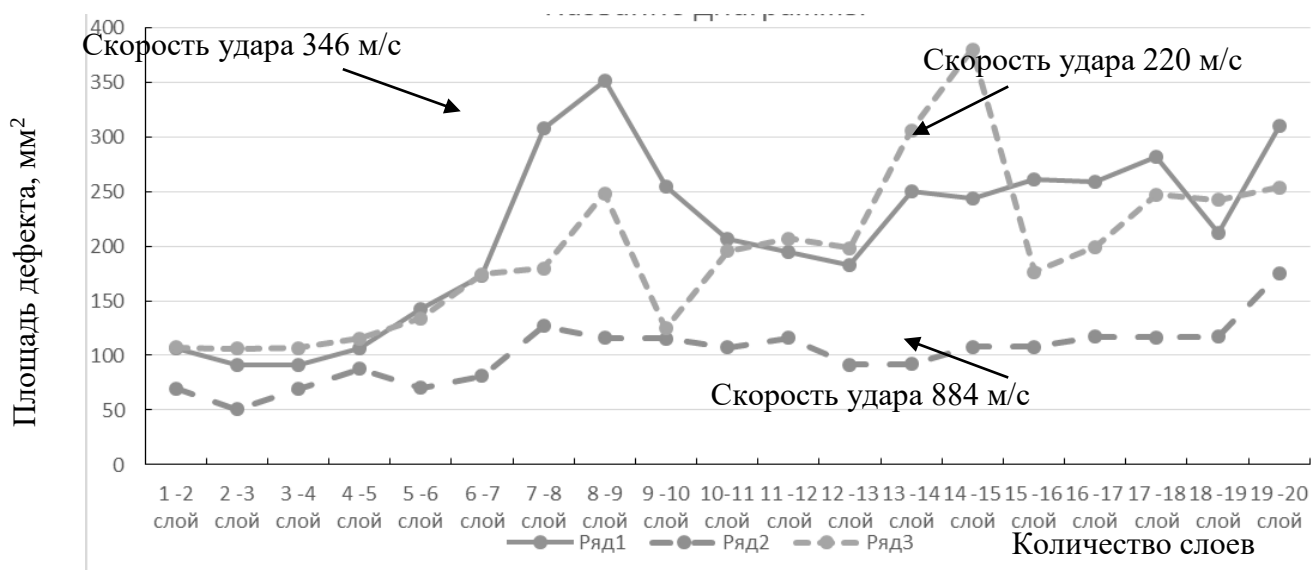
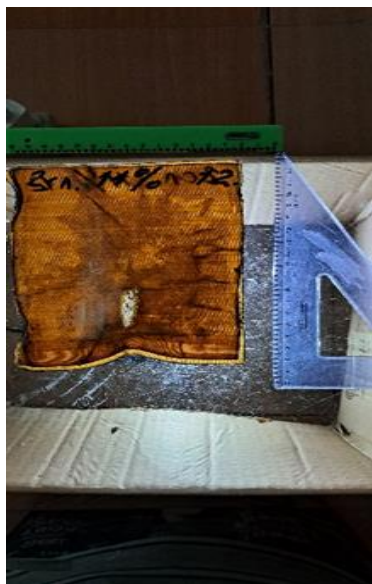


Рисунок 2.36 – Размеры расслоений между каждым слоем (мм^2) при ударе со скоростью 884 м/с (ряд 1), 220 м/с (ряд 2), 346 м/с (ряд 3)

Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных для 20-слойной пластины из стеклопластика:

- при скорости 346 м/с, 220 м/с размеры дефектов практически совпадают;
- при скорости 884 м/с размеры дефектов при численном моделировании на 10% больше, чем размеры, полученные экспериментально, при этом форма дефекта более острая. Сравнение было проведено по общей площади межслойных дефектов. Общая площадь дефектов при скорости 346 м/с при численном моделировании составляет $S_{\text{общ}} = 4\,026 \text{ мм}^2$, при реальных испытаниях $S_{\text{общ}} = 4021 \text{ мм}^2$. Общая площадь дефектов при скорости 884 м/с при численном моделировании составляет $S_{\text{общ}} = 1\,937 \text{ мм}^2$, при реальных испытаниях $S_{\text{общ}} = 2122 \text{ мм}^2$. При обработке реальных испытаний проводили замер площади дефекта вручную по каждому слою, что является трудоемкой работой (рис. 2.37). Результаты фиксировали в протоколе испытаний и некоторые результаты приведены в таблице 2.18.

Пластина № 11 – площадь дефекта между 7–8-м слоями, 120 мм^2 ,
глубина залегания 2,4 мм, скорость удара 884 м/с



Пластина № 11 – площадь дефекта между 11–12-м слоями, 111 мм², глубина залегания 2,35 мм, скорость удара 884 м/с



Рисунок 2.37 – Площадь межслойных дефектов при реальных испытаниях

Таблица 2.18 – Результаты измерений размеров дефектов
численного расчета и эксперимента

Ударник	Скорость до удара, $V_{э.ду}$ (м/с) средняя	Количество слоев КМ	Площадь расслоения, $S_{общ}$ (мм ²)			
			Стеклопластик		Углепластик	
			Расчетная	Эксперимент	Расчетная	Эксперимент
Ударник № 1	220	20	5912.639	5946	5698	6954
		10	2422.739	2485	2209.679	2494
		5	987.087	944	286.025	952
Ударник № 2	346	20	7865.198	7811	7927.24	8461
		10	3045.728	2989	2201.326	2781
		5	1286.825	1478	509.865	1255
Ударник № 3	884	20	5508.043	5446	2065.705	3542
		10	1169.967	1232	797.893	1645
		5	560.4815	612	285.087	352

Необходимо отметить, что впервые была получено значение напряжения в каждом слое, определено напряженно-деформированное состояние в каждом слое, что дает возможность на стадии проектирования изменить количество слоев (материал) для прочности элементов конструкций или деталей из многослойных КМ [4].

Получены следующие результаты численного моделирования: скорость ударника в любой момент времени, зависимость напряжения в слое от времени (рис. 2.38).

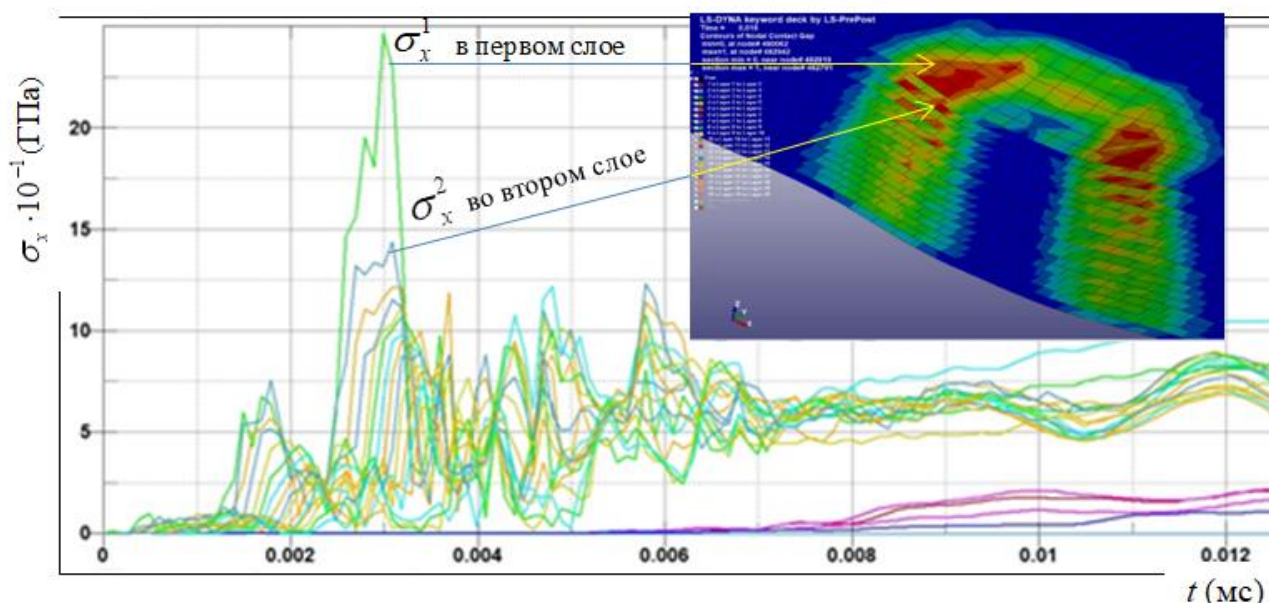


Рисунок 2.38 – Зависимость напряжения (ГПа) от времени (мс)
в 20-слойной пластине из стеклопластика $[0,90]_{10}$ (скорость удара – 884 м/с)

На рисунке 2.39 представлено численное моделирование процесса соударения (скорость 884 м/с) ударника с 20-слойным образцом из стеклопластика с укладкой слоев $[0,90]_{10}$. Напряжения σ (ГПа) определяются в каждый момент времени t (мс), что невозможно получить экспериментально [26].

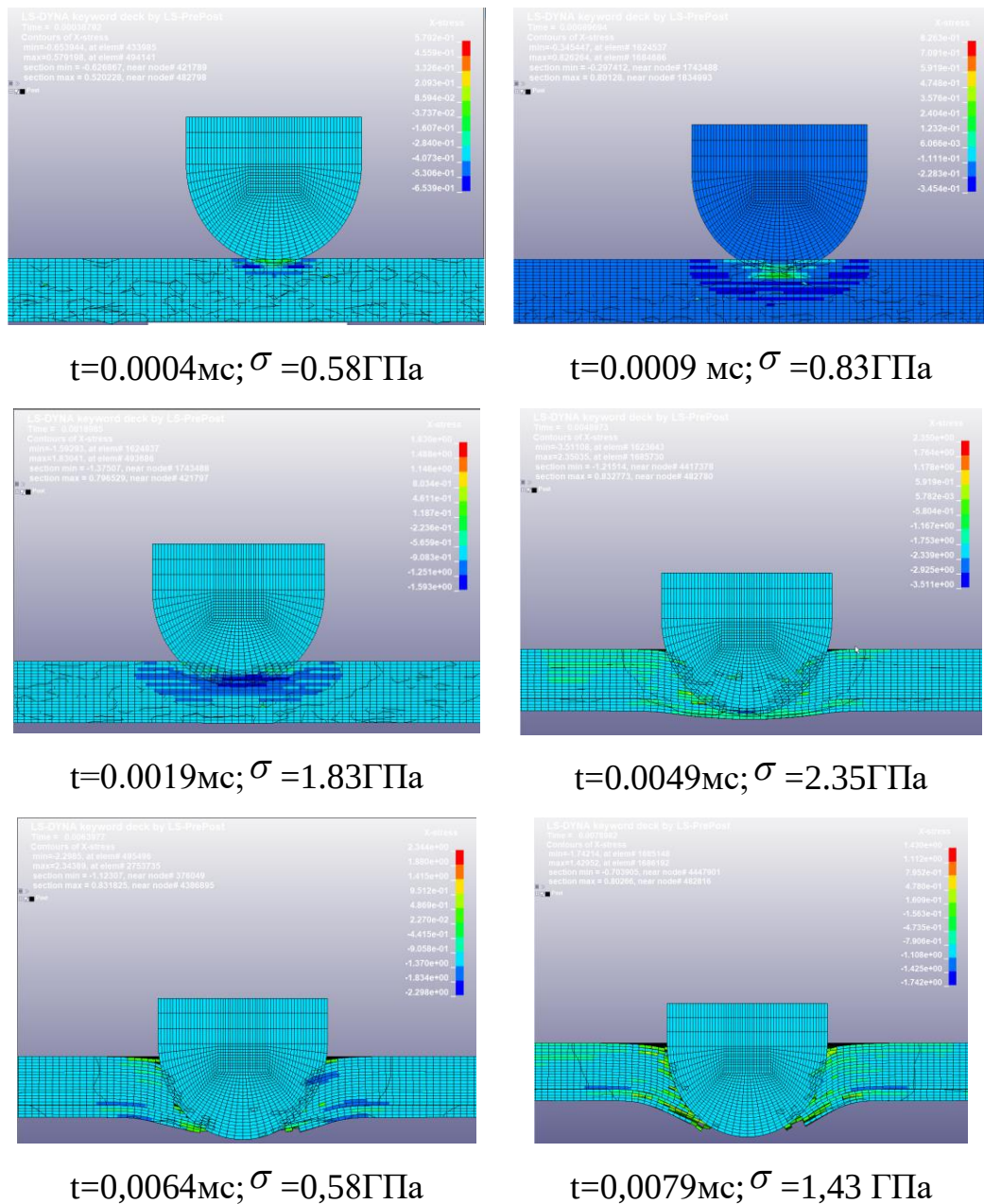


Рисунок 2.39 – Численное моделирование процесса соударения (скорость 884 м/с) ударника с 20-слойным образцом из стеклопластика с укладкой слоев $[0,90]_{10}$, напряжения σ (ГПа) в каждый момент времени t (мс)

Сделан сравнительный анализ области повреждений по длине и ширине образцов после испытаний; определены размеры отверстий и деформация слоев после пробития (рис. 2.40). Сделаны срезы виртуальных и реальных 20-слойных пластин после испытаний на удар, скорость удара 884 м/с. Анализ результатов показал практически полное совпадение размеров дефектов, расхождение до 1–2% (рис. 2.40).

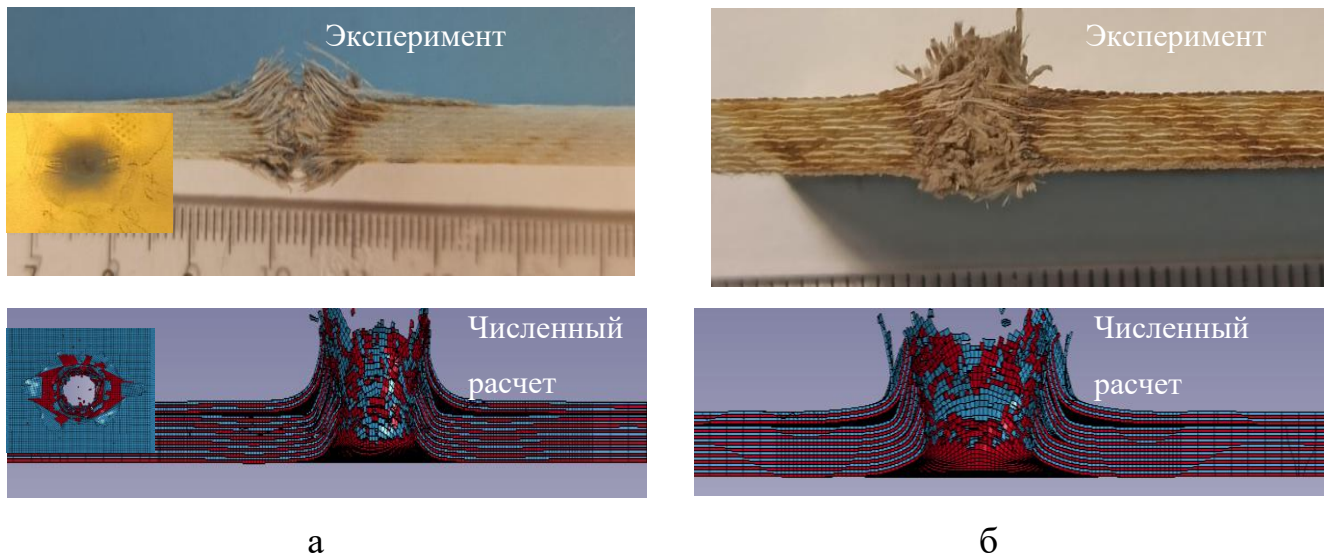


Рисунок 2.40 – Область повреждений образцов после испытаний: а – разрез по длине пластины; б – разрез по ширине пластины

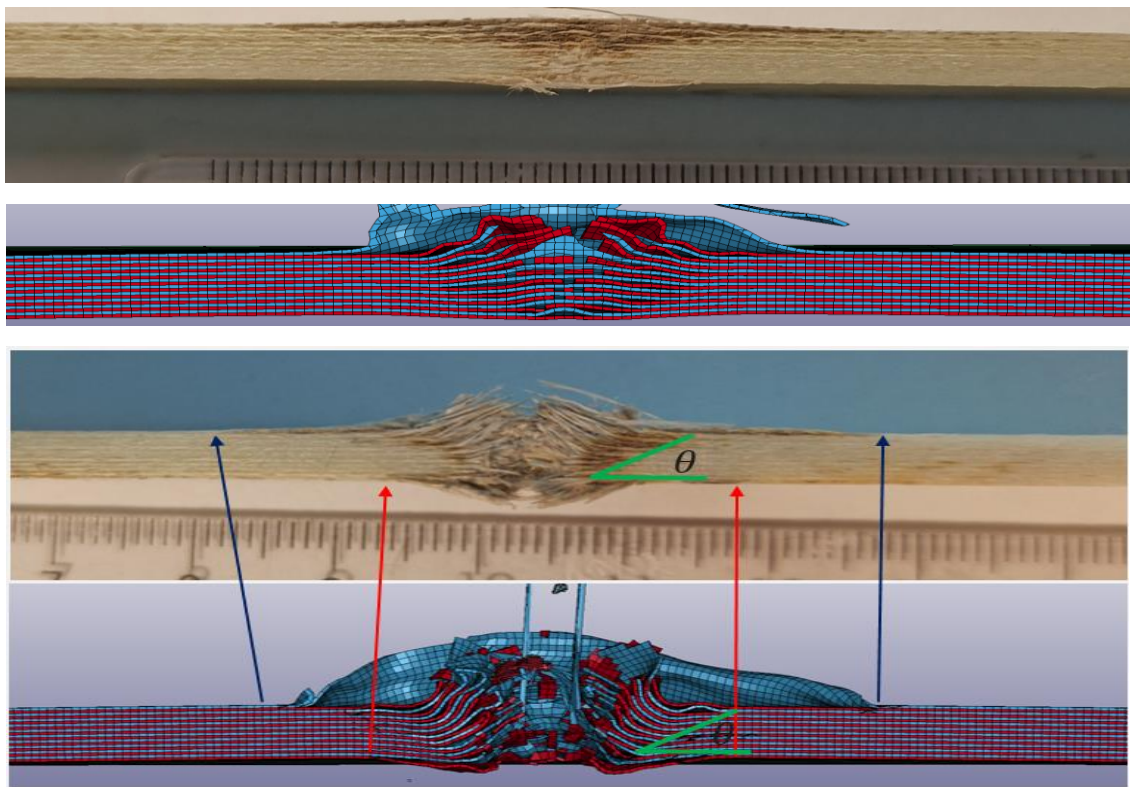


Рисунок 2.41 – Срезы виртуальных и реальных 20-слойных пластин после испытаний на удар, полное совпадение размеров дефектов, расхождение 1–2%

На рисунке 2.42 представлен анализ пробития пластины в каждый момент времени при виртуальном испытании, что невозможно получить при реальных испытаниях (20-слойная пластина, скорость пробития 346 м/с).

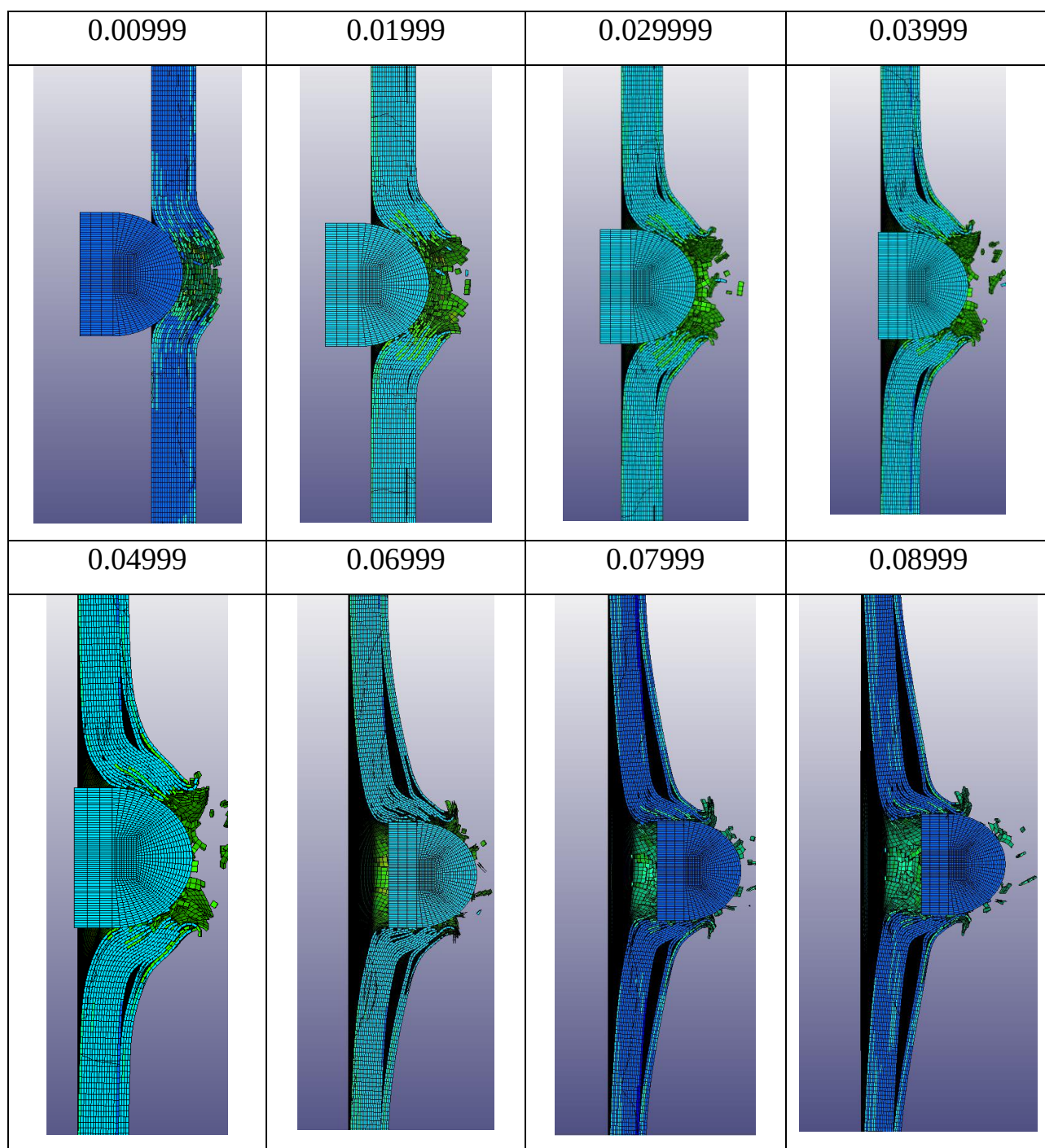
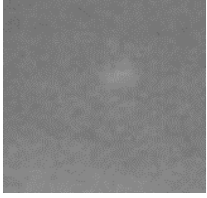
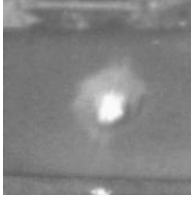
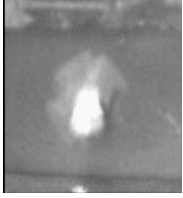
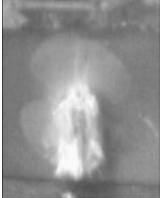
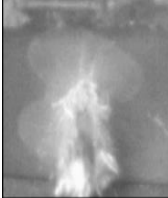
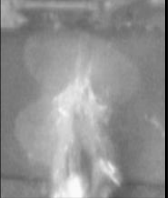
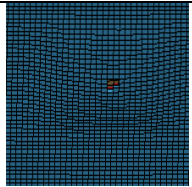
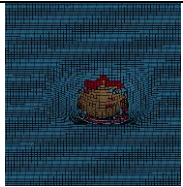
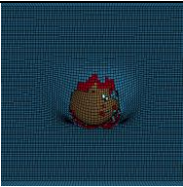
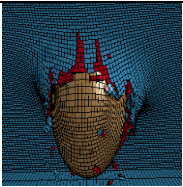
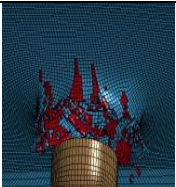
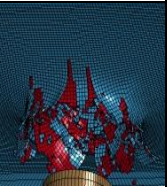


Рисунок 2.42 – Анализ пробития пластины в каждый момент времени

В таблице 2.19 представлен покадровый анализ дефектов с тыльной стороны пластины. Установлено, что размеры внутренних экспериментальных повреждений пластины, снятые высокоскоростной камерой, совпадают на 95–98% с численными моделями.

Таблица 2.19 – Покадровый анализ дефектов

Пластина из стеклопластика 20 слоев $[0,90]_{10}$, при ударе скоростью 884 м/с						
Номер кадра	52	86	103	260	306	357
						
Видеосъемка результатов испытаний						
						
Численная модель						

Впервые получена зависимость нагружения пластины от времени по каждому слою. На рисунке 2.43 представлены графики распределения контактных напряжений между слоями во времени для 5-слойной пластины, показаны численная модель и экспериментальный образец после пробития.

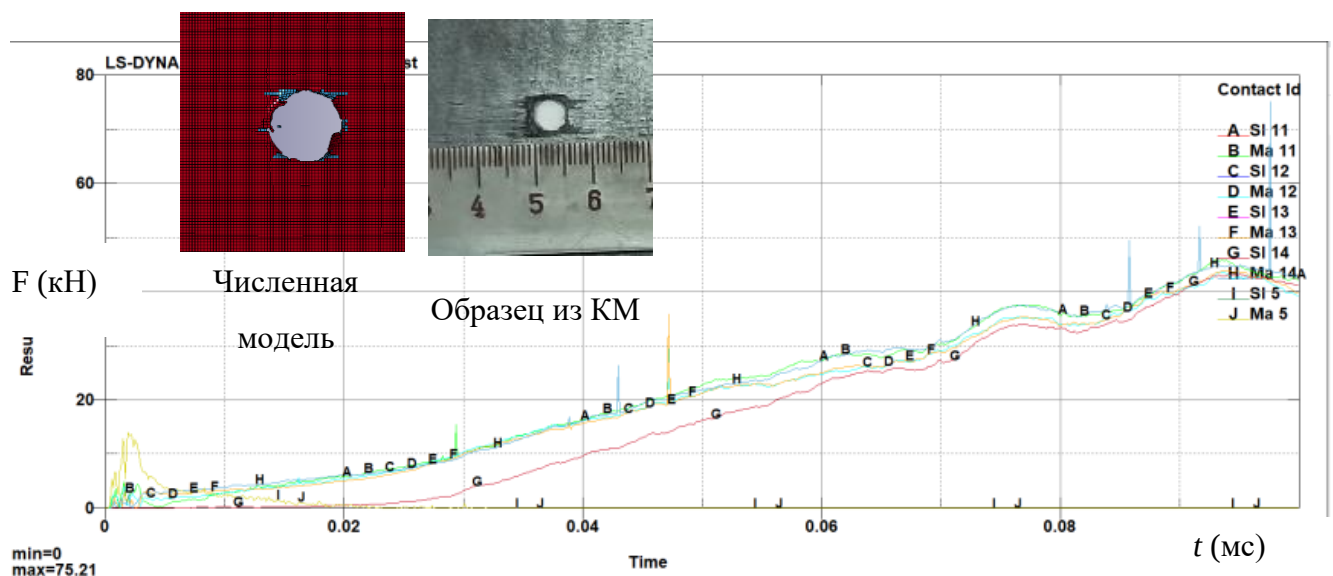


Рисунок 2.43 – Зависимость распределения напряжений на поверхностях раздела-контакта слоев от времени 5-слойной пластины

На рисунке 2.44 представлены графики распределения контактных напряжений между слоями во времени для 10-слойной пластины. На рисунке 2.45 представлены графики распределения контактных напряжений между слоями во времени для 20-слойной пластины.

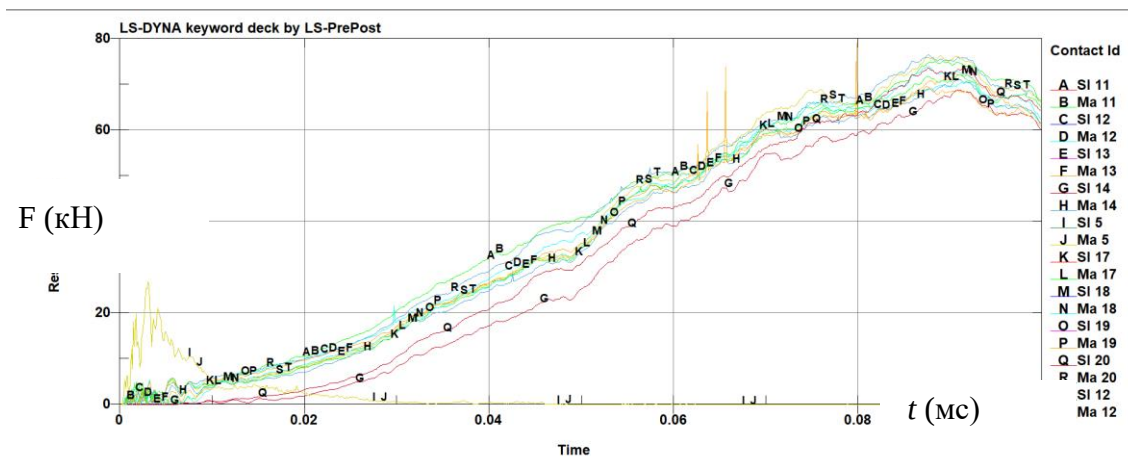


Рисунок 2.44 – Зависимость распределения напряжений на поверхностях раздела-контакта слоев от времени 10-слойной пластины

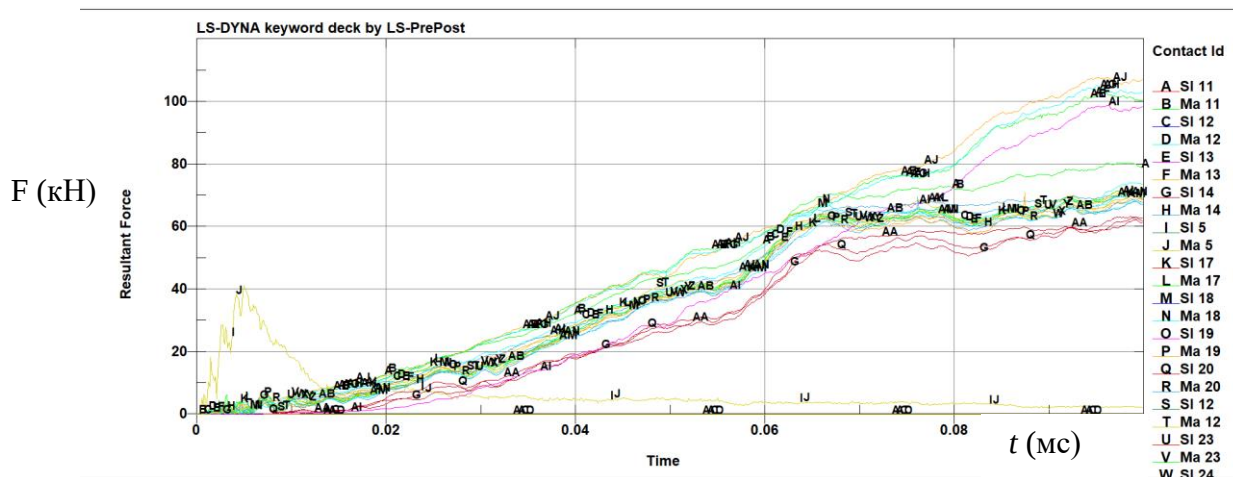


Рисунок 2.45 – Зависимость распределения напряжений на поверхностях раздела-контакта слоев от времени 20-слойной пластины

На рисунке 2.46 представлена зависимость скорости полета ударника от времени. В момент времени, равный 0.0238 мс (10^{-6} с), ударник попадает в пластину. На рисунке 2.47 представлен график кинетической энергии ударника от времени, летящего со скоростью 380 м/с . На рисунке 2.48 представлена зависимость внутренней энергии удара пластины от времени по слоям: А – 1 слой укладка волокон под углом 90° , В – 2 слоя укладки волокон под углом 0° .

На рисунке 2.49 представлена зависимость внутренней энергии удара многослойной пластины в целом от времени.

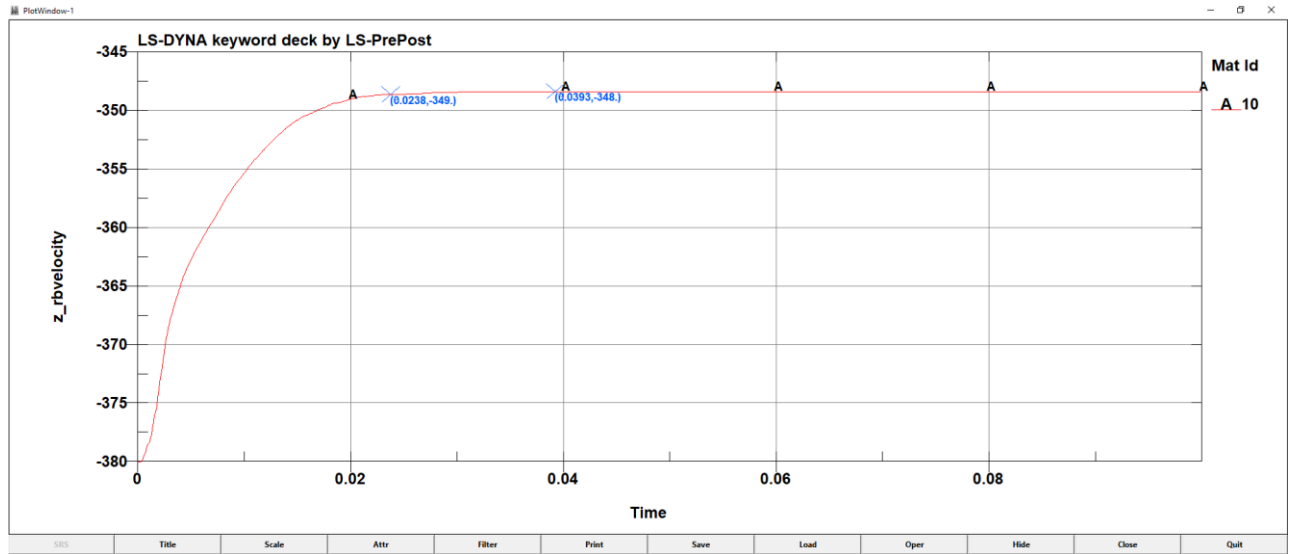


Рисунок 2.46 – Кривая скорости полета ударника от времени

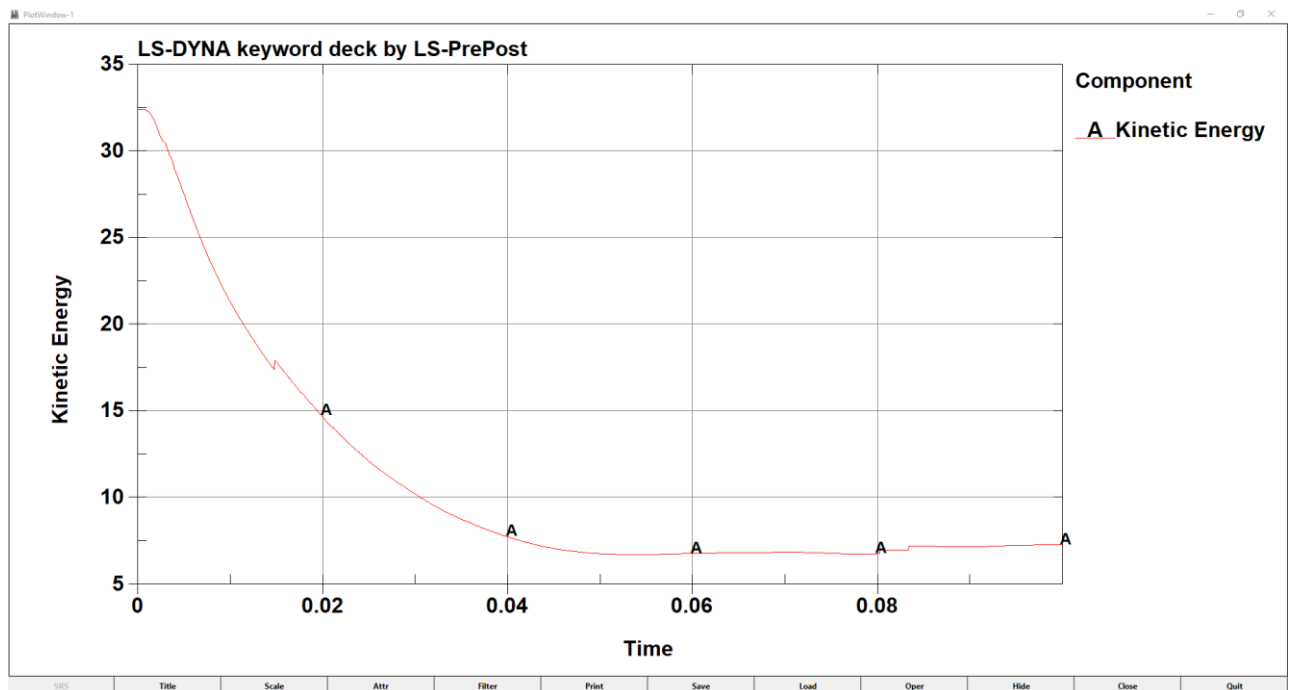


Рисунок 2.47 – Кинетическая энергия полета ударника

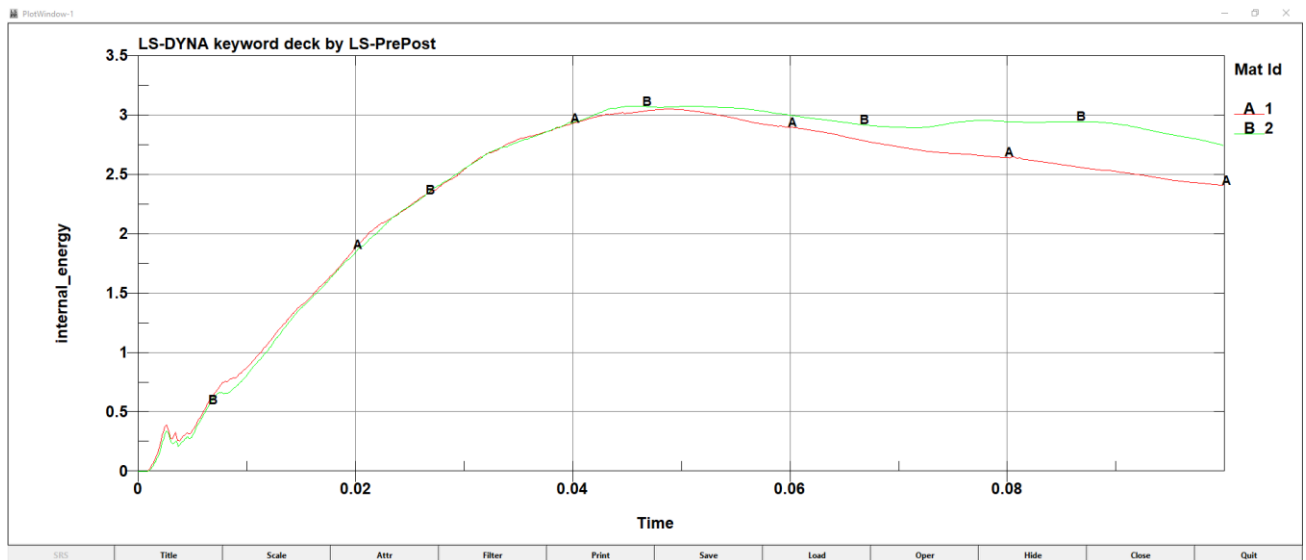


Рисунок 2.48 – Зависимость внутренней энергии удара пластины по слоям от времени

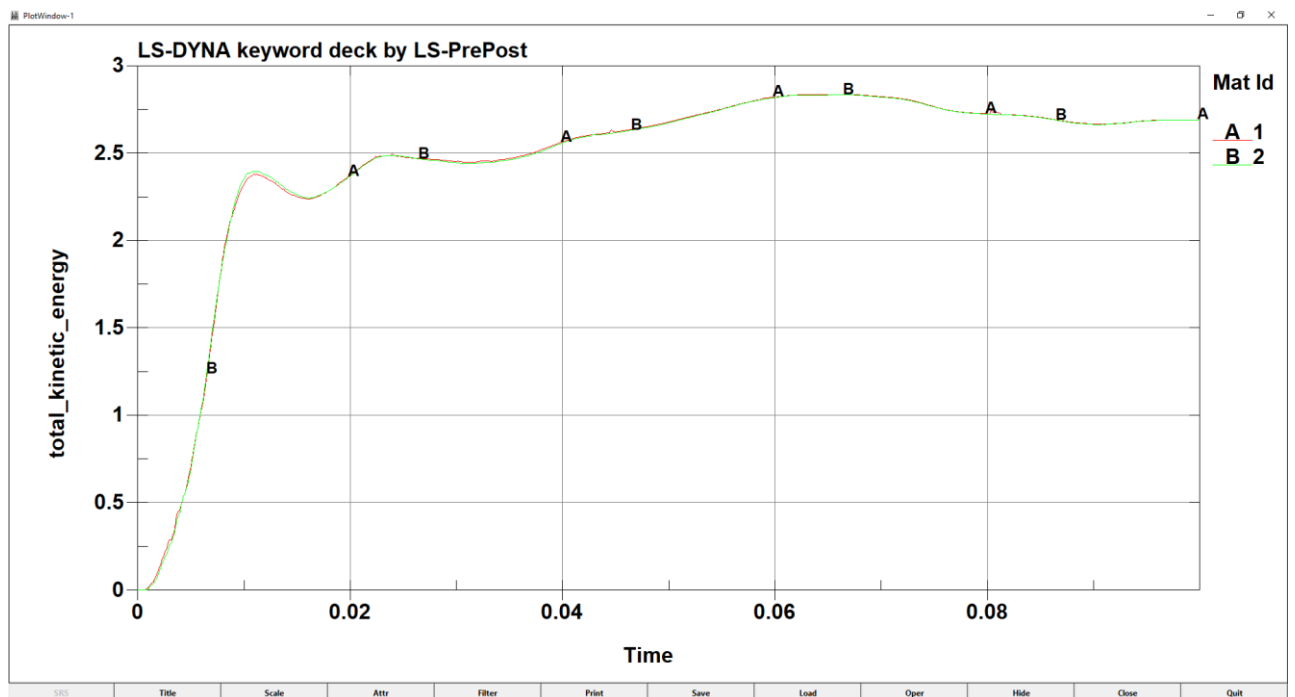


Рисунок 2.49 – Зависимость внутренней энергии удара пластины от времени

Выводы по главе 2

Во второй главе были получены следующие результаты:

1. Изготовлены образцы из стеклопластика и углепластика для проведения экспериментальных работ на низко- и высокоскоростной удар.

Выполнен цикл экспериментальных исследований 5-, 10-, 20-слойных пластин из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками (№ 1 – скорость удара 220 м/с; № 2 – скорость удара 346 м/с; № 3 – скорость удара 884 м/с), получены новые опытные данные. Проведена видеосъемка процесса низко- и высокоскоростного удара.

2. Проведено численное моделирование процесса испытания пластин при низко- и высокоскоростном ударе методом конечных элементов по разработанной в 1-й главе методике. Установлено, что скорость ударника, размеры внутренних экспериментальных повреждений пластины, снятые высокоскоростной камерой, совпадают на 95–98% с численными моделями.

3. Разработана методика виртуальных испытаний пластин из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками на основе численного моделирования и экспериментального исследования. Эксперименты показали, что пробивание или межслойные повреждения полностью соответствуют формам дефектов, полученным численным экспериментом испытаний на скоростной удар (цифровой двойник). Экспериментальная степень повреждаемости многослойных экранов после удара соответствует компьютерным моделям. Разработанные численные модели (цифровой двойник) композитных элементов конструкций могут прогнозировать необходимые свойства по оценке ударной стойкости материала и размеров зон разрушения при различных условиях ударного взаимодействия, что решает проблему дорогих натурных баллистических испытаний.

Глава 3 Расчетно-экспериментальная методика оптимального армирования многослойных композиционных материалов

При разработке изделия рассматривают несколько вариантов элементов конструкции, отличающихся отдельными параметрами (геометрия, применяемые материалы и т. д.), которые зависят от требований к изделию (прочность, тепло, аэрогидродинамика и т. д.), а потом выбирают среди них наилучший по заданным критериям. Однако среди рассматриваемых вариантов элементов конструкций может не оказаться решения с оптимальной конструкцией, что приведет к необходимости использования неоптимальной конструкции или же к повторению цикла конструирования и расчетов на стадии виртуальных испытаний.

Для выполнения оптимизационных расчетов существует два основных класса методов. Градиентные и генетические методы – методы проведения оптимизационного исследования, основанные на построении локальной модели функции по ее производным. Методы суррогатного моделирования – методы построения суррогатной модели на основе аппроксимации относительно небольшой выборки расчетных точек исследуемой функции, полученных в результате предварительных расчетов и натурных экспериментов. В диссертационном исследовании для разработки расчетно-экспериментальной методики оптимального армирования ПКМ использовали генетические методы.

Элементы конструкций, выполненные из слоистых ПКМ, обладают высокими механическими характеристиками. При этом они обладают ярко выраженной анизотропией свойств в отношении как деформации, так и прочности [10; 23]. Поскольку КМ имеет гетерогенную структуру в виде составляющих ее элементов, необходимо, чтобы каждый из элементов обладал оптимальными свойствами в каждом конкретном случае. Известно, что при эксплуатации изделий из КМ нагрузки в основном воспринимаются армирующими волокнами [12; 89; 99]. При этом за счет различных углов укладки слоев возможно получить материал, обеспечивающий высокую удельную жесткость и прочность в направлении действия наибольших сил [2].

Экспериментально определение оптимальных углов укладки слоев с учетом напряженно-деформированного состояния любого изделия трудоемко и требует значительных материальных и временных затрат, поэтому рационально использование компьютерных технологий с современными численными методами механики композиционных материалов [5; 67].

В данном разделе представлена апробация расчетно-экспериментальной методики оптимального армирования ПКМ на примерах: влияние оптимального армирования пластин при ударных нагрузках; улучшение прочностных характеристик тонкостенного крыла БПЛА.

3.1 Разработка оптимальной конструкции многослойных пластин из ПКМ для снижения скорости ударника

Обзор литературы [4; 41; 114; 127; 202] показывает, что изменение ориентации углов укладки слоев позволяет улучшить или ухудшить ударные характеристики ПКМ в зависимости от используемых материалов. В данном параграфе предложена расчетно-экспериментальная методика для снижения скорости ударника за счет оптимального армирования многослойных КМ.

Созданы конечно-элементные (КЭ) модели пластины из многослойного ПКМ и ударника (рис. 3.1). На модели ударника сгущение КЭ сетки выполнено на месте начала контакта с пластиной. На модели пластины в месте контакта с ударником уменьшали шаг КЭ сетки с постепенным увеличением размеров сетки к краям для точности расчета и сокращения времени. Для моделирования многослойного ПКМ использовали от 26 640 до 51 000 элементов. Предполагалось, что между слоями существует идеальное сцепление. Нумерация слоев начинается с тыльной поверхности и последовательно увеличивается по направлению к ударной поверхности. Ударная нагрузка была направлена так, чтобы вызвать смещение образца в отрицательном z-направлении.

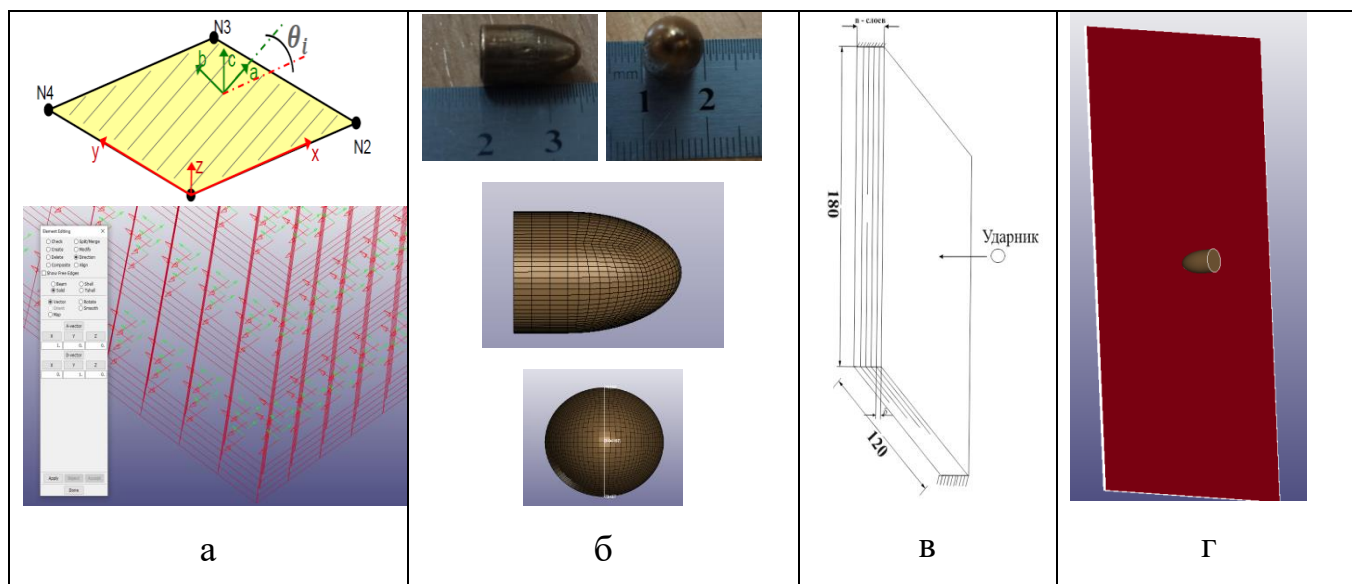


Рисунок 3.1 – Модель пластины и ударника: а – схема армирования пластины;
б – фото и модель ударника; в- схема и модель удара в LS-DYNA

Для численного моделирования и расчета использовали программу Ansys Workbench 19 r3, для расчета на удар – модули Workbench Ls-dyna, для моделирования слоев ПКМ – модуль Composite prepost. Для построения конечно-элементной сетки моделирования многослойного ПКМ был использован оболочечный 4-узловой элемент изопараметрический элемент SHELL181 для моделирования монослоя [116]. Элемент обладает шестью степенями свободы в каждом узле (три линейных перемещения и три угла поворота), что позволяет моделировать сложное деформированное состояние, включая изгиб, кручение и мембранные нагрузки.

При решении задачи на удар в Workbench Ls-dyna КМ в приложении Composite prepost преобразовали в модель материала MAT054 (MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE) [170], где используются четыре критерия разрушения Хашина: разрушение растяжимого волокна, разрушение сжимающего волокна, разрушение растяжимой матрицы и разрушение сжимающей матрицы (рис. 3.2).

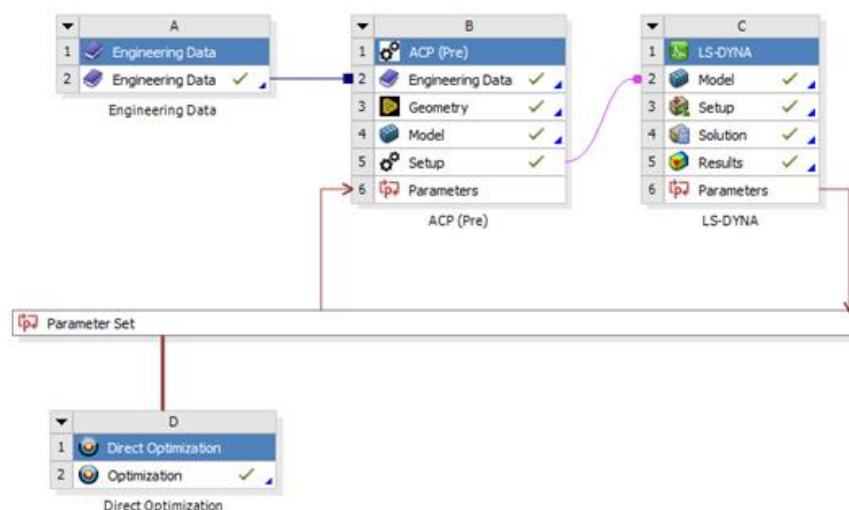


Рисунок 3.2 – Схема передачи данных в ANSYS

Задача оптимизации, обеспечивающая снижение скорости ударника в зависимости от угла укладки волокон в слое, решена с использованием генетического алгоритма. Целевой является функция, которая задает укладку слоев в КМ и определяет минимальную скорость ударника после пробития пластины. Углы укладки волокон в слое рассматриваем как изменяемые параметры. Критерием оптимизации является скорость ударника после пробития пластины. Углы укладки волокон в слое задаются как дискретные переменные со значениями от 10° до 90° с шагом 10° . Задача ограничена квазистатическим условием разрушения, скоростью ударника, прочностными характеристиками многослойного КМ, которые получены в главе 4. Критерием оптимизации является скорость ударника после пробития пластины. Углы укладки волокон в слое задаются как дискретные переменные со значениями от 10° до 180° с шагом 10° . Задача оптимизации решена с использованием модуля Ansys ANSYS Optimization [13; 15; 65; 127].

3.1.1 Результаты решения задачи оптимизации многослойных пластин из полимерного композиционного материала для снижения скорости ударника

Определена оптимальная конструкция многослойной пластины из ПКМ, обеспечивающая снижение скорости ударника в зависимости от угла укладки

волокон в слое. На рисунках 3.3 и 3.4 представлен процесс решения задачи оптимизации ANSYS Workbench.

The image shows two parts of the ANSYS Workbench interface. The top part is the 'Outline of Schematic D2: Optimization' table, and the bottom part is the 'Properties of Outline A18: Raw Optimization Data' table.

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
10	P4 - ModelingPly.4.ply_angle	☒	
11	P5 - ModelingPly.5.ply_angle	☒	
12	P6 - ModelingPly.6.ply_angle	☒	
13	P7 - ModelingPly.7.ply_angle	☒	
14	P8 - ModelingPly.8.ply_angle	☒	
15	P9 - ModelingPly.9.ply_angle	☒	
16	P10 - ModelingPly.10.ply_angle	☒	

	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Number of Columns	11
4	Number of Rows	244

Рисунок 3.3 – Процесс решения задачи

Разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в слое. Например, на рисунке 3.5 представлен график определения оптимального угла укладки волокон десятислойной пластины в каждом слое. Получено 405 вариантов углов укладки волокон. Для каждого слоя пластин из 10 слоев выбраны три варианта оптимального армирования для снижения скорости ударника.

The image shows a large table titled 'Table of Schematic D2: Optimization'. It contains 244 rows of data, each representing an optimization iteration. The columns are labeled A through L. Column A is 'Name', B is 'P1 - Mo...', C is 'P2 - M...', D is 'P3 - M...', E is 'P4 - M...', F is 'P5 - M...', G is 'P6 - M...', H is 'P7 - M...', I is 'P8 - M...', J is 'P9 - M...', K is 'P10 - M...', and L is 'P12 - Rigid Body V... 2 M... (m s ~1)'. The data shows various numerical values for each parameter across the iterations.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Name	P1 - Mo... .1 .P...	P2 - M... .2	P3 - M... .3 .P...	P4 - M... .4 .P...	P5 - M... .5	P6 - M... .6	P7 - M... .7 .P...	P8 - M... .8	P9 - M... .9	P10 - M... .10 .P...	P12 - Rigid Body V... 2 M... (m s ~1)
218	140	160	40	30	160	20	130	100	180	80	120	-837,45
219	53	100	40	120	80	80	140	10	20	140	50	-837,36
220	17	30	10	110	60	60	90	50	180	160	130	-837,24
221	215	30	10	110	60	60	90	50	180	160	130	-837,24
222	195	70	140	170	20	20	40	130	20	10	90	-837,02
223	113	180	170	10	80	170	90	20	110	80	40	-836,97
224	50	90	100	100	180	10	90	150	170	110	30	-836,94
225	115	80	20	90	30	180	110	80	170	70	120	-836,85
226	28	50	160	10	80	170	90	20	110	80	40	-836,83
227	172	180	90	160	20	20	40	130	20	160	90	-836,81
228	153	150	10	170	20	20	30	40	140	50	90	-836,78
229	194	80	20	90	30	150	120	50	90	40	150	-836,71
230	197	150	180	170	20	20	40	130	20	160	100	-836,68
231	234	100	100	10	80	170	90	20	110	80	40	-836,68
232	36	70	140	170	20	20	40	130	20	160	100	-836,57
233	160	70	140	170	20	20	40	130	20	160	100	-836,57
234	240	70	140	170	20	20	40	130	20	80	40	-836,05
235	206	160	40	30	160	20	130	100	180	10	90	-835,93
236	233	50	160	100	100	100	100	100	100	100	100	-835,84
237	219	90	90	100	50	170	180	160	90	10	60	-834,89
238	77	140	40	100	50	170	180	160	90	10	60	-834,77
239	133	70	140	170	20	20	30	40	140	50	90	-834,15
240	201	70	140	170	20	20	30	40	140	50	90	-834,15
241	105	70	140	170	20	20	40	130	20	160	90	-833,97

Рисунок 3.4 – Результаты решения задачи оптимизации в программе ANSYS Workbench:

P1-P10 – углы укладки волокон в слое, P11 – скорость после пробития пластины

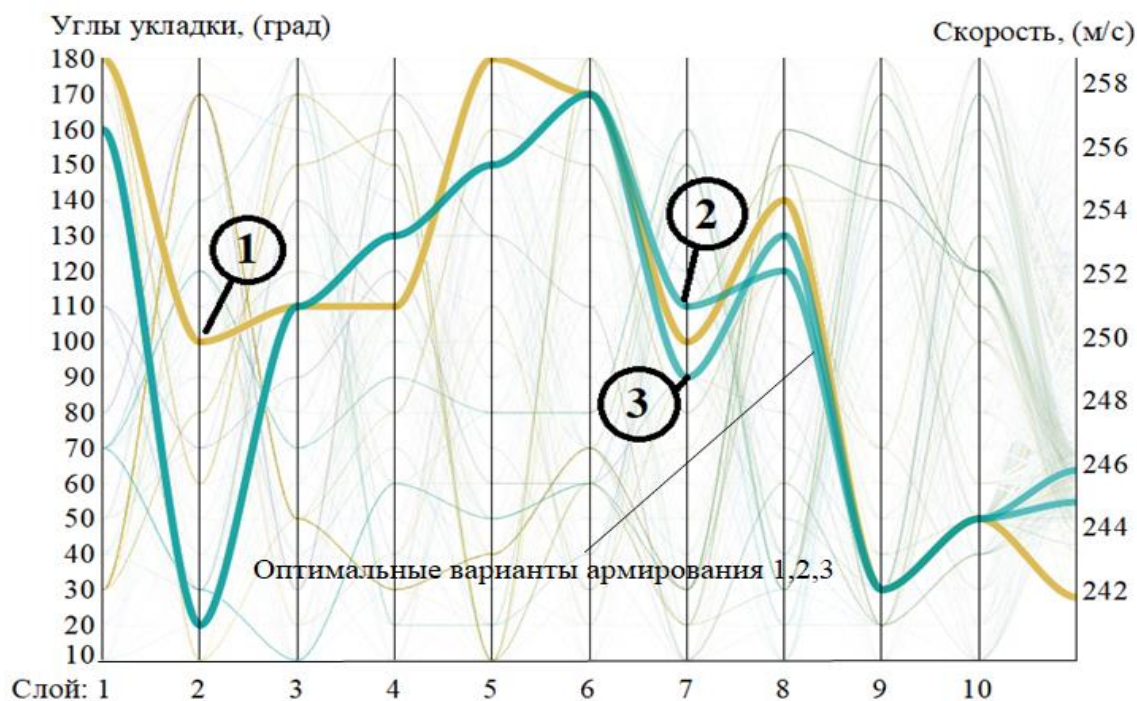


Рисунок 3.5 – График оптимизации углов укладки слоев пластины:

вертикальные линии – углы укладки от 10° до 180° для каждого из 10 слоев;
 вертикальная линия 11 – скорость (м/с); горизонтальная линия – номер слоя КМ;
 варианты 1–3 – максимально снижающие скорость ударника

Скорость ударника до удара составляет 346 м/с. Скорость ударника после удара 10 слоев стеклопластика (остаточная скорость) меняется в пределах от 311 до 301 м/с, что составляет снижение в среднем на 10–13% в зависимости от армирования многослойных КМ. Выбраны три варианта, максимально снижающие скорость ударника (рис. 3.6):

№ 1 – укладка слоев [180/100/110/110/180/170/100/140/30/50], скорость ударника $v_{\text{ост}} = 301$ м/с;

№ 2 – укладка слоев [160/20/110/130/150/170/110/120/30/50], скорость ударника $v_{\text{ост}} = 301$ м/с;

№ 3 – укладка слоев [160/20/110/130/150/170/90/130/30/50], скорость ударника $v_{\text{ост}} = 302,8$ м/с.

В таблице 3.1 представлены результаты моделирования многослойной пластины из КМ с оптимальной укладкой волокон в слое (вариант № 1) и

стандартной укладкой волокон ($[90]_{10}$ и $[90]_{20}$) для снижения скорости после удара.

Таблица 3.1 – Результаты моделирования многослойной пластины

Скорость ударника до пробития – 346 м/с				
Укладка волокон в слое	10 слоев стеклопластика		20 слоев стеклопластика	
	Остаточная скорость (м/с)	Снижение скорости (%)	Остаточная скорость (м/с)	Снижение скорости (%)
Стандартная	310	10	258	25
Оптимальная	301	13	209	40
Скорость ударника до пробития 884 м/с				
Укладка волокон в слое	10 слоев стеклопластика		20 слоев стеклопластика	
	Остаточная скорость (м/с)	Снижение скорости (%)	Остаточная скорость (м/с)	Снижение скорости (%)
Стандартная	754	15	662	25
Оптимальная	725	18	575	35

Сделан анализ повреждения пластины (рис. 3.6) на примере пластины из 10 слоев, скорость ударника 346 м/с: индикатор синего цвета – отсутствие повреждений; индикаторы желтый, зеленый – межслойные дефекты; красный индикатор – полное разрушение. Рассмотрена пластина 1 с укладкой волокон по варианту 1 (рис. 3.6а) и пластина 2 со стандартной укладкой слоев $[90]_{10}$ (рис. 3.6б). Площадь повреждения пластины 1 составляет 76% всей площади пластины, скорость после пробития $v_{ост} = 301$ м/с; площадь повреждения пластины 2 составляет 45%, скорость после пробития $v_{ост} = 310$ м/с. Каждый слой снижает удар, при этом увеличивается зона межслойного дефекта, что соответствует результатам экспериментальных исследований. Площадь полного разрушения пластины 2 на 14% больше, чем площадь полного разрушения пластины 1.

Разрушение пластины 2 со стандартной укладкой волокон в слое сильно локализовано, что подтверждает ограниченную работу пластины для снижения скорости ударника.

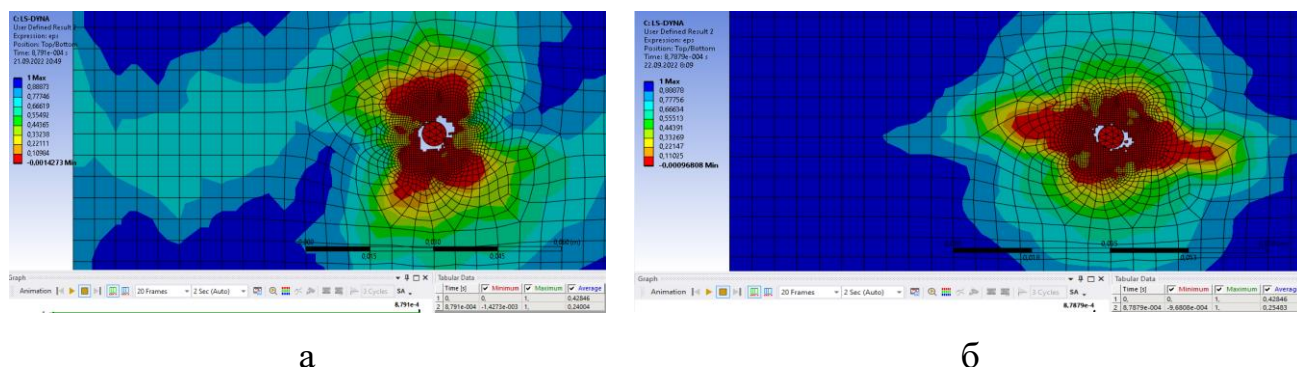


Рисунок 3.6 – Площадь повреждений пластин: а – вариант 1, оптимальная укладка слоев пластины; б – вариант 2, стандартная укладка слоев пластины $[90]_{10}$

Для проверки корректности численных моделей были проведены натурные испытания образцов 20-слойной пластины со скоростью удара 346 м/с, материал – стеклопластик. Были определены площадь повреждений и скорость ударника после пробития. Процесс пробивания пластины снимали высокоскоростной камерой. Для проведения испытаний подготовлены защитные экраны для камеры, специальное помещение, сверхскоростная камера и сопутствующее оборудование (рис. 3.7).

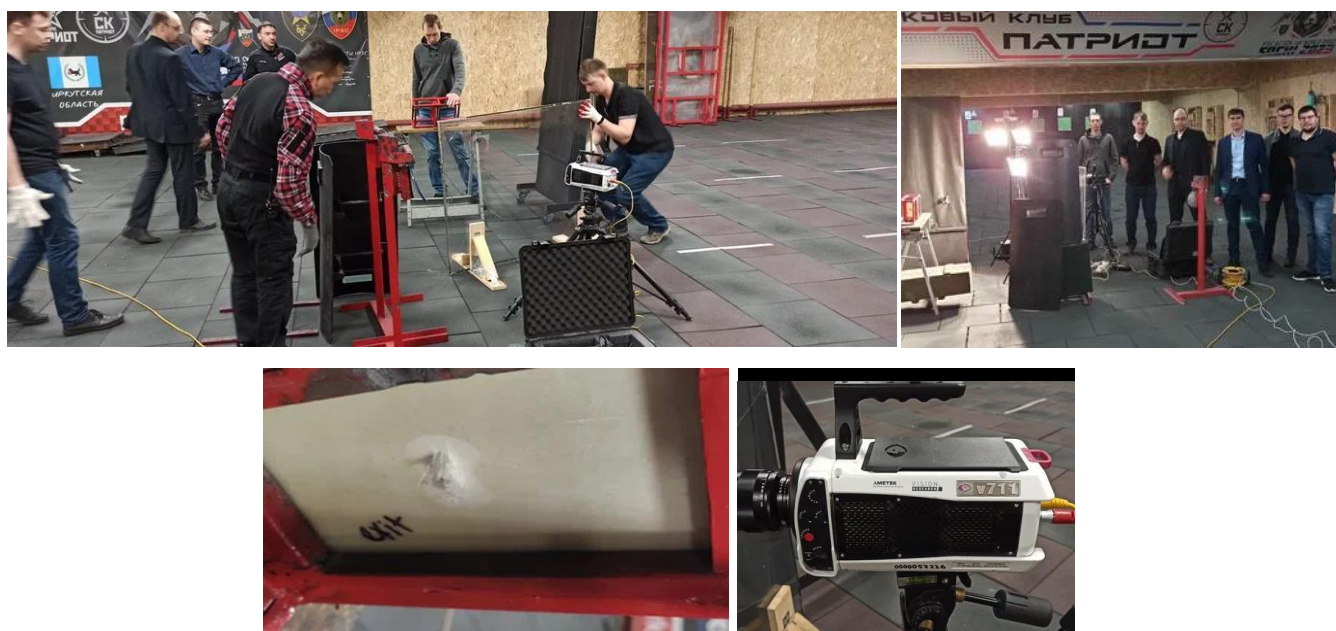
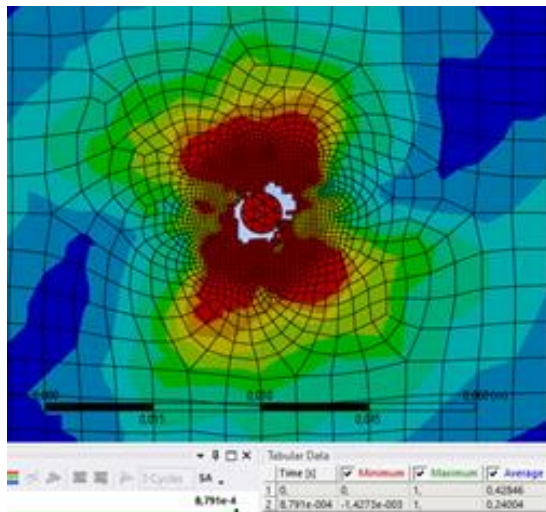


Рисунок 3.7 – Проведение испытаний

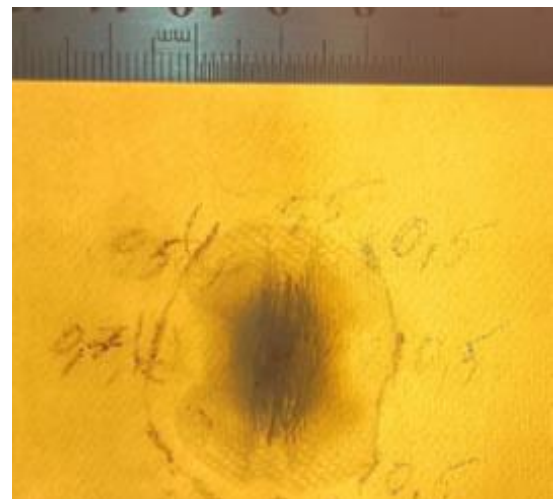
Образцы из стеклопластика, состоящие из 10 слоев с разной укладкой волокон пробиваются насквозь. Результаты экспериментов показали, что скорость до удара 346 м/с снижается в среднем до скорости 334 м/с после пробития пластины. По численному расчету скорость после пробития снижается до 311 м/с (например, пластины с оптимальной укладкой волокон), сходимость результатов составляет 5–7% (табл. 3.2). Повреждения пластин при численном расчете на прочность и натурных испытаниях практически совпадают по форме, размерам и площади разрушения пластины (рис. 3.8).

Таблица 3.2 – Сравнение экспериментальных результатов и численных

Укладка волокон в слое	10 слоев стеклопластика		
	Остаточная скорость (м/с)	Остаточная скорость (м/с)	Расхождение (%)
	Эксперимент	Численный расчет	
Стандартная	334	310	7,2
Оптимальная	319	301	5,6



а



б

Рисунок 3.8 – Повреждения, полученные при ударе:

а – расчетная модель; б – пластина после испытания

Проведение ряда реальных испытаний и численных расчетов многослойной пластины из ПКМ показало, что чем больше площадь межслойных дефектов, тем больше задерживается ударник. Получены площади расслоений между слоями ПКМ для 6 вариантов укладок волокон слоя в программном продукте Ls-Dyna. Рассмотрена 10-слойная пластина из стеклопластика, скорость удара 346 м/с, с укладкой волокон в слое, используемых в производстве (квазиизотропные, однонаправленные и др.): $[0]_{10}$; $[\pm 45]_5$; $[0_2/\pm 45_2/90_2]/0_2$; $[0/90/\pm 45]_2/0_2$; $[\pm 30/90]_3/30$ и $[0/90]_5$. Результаты представлены в таблице 3.3, $S_{\text{общ}}$ (мм²) – общая площадь расслоения всей пластины, S_{max} (мм²) в слое – максимальная площадь расслоения между слоями в пластине, $v_{\text{ост}}$ (м/с) – остаточная скорость после удара. В общую площадь $S_{\text{общ}}$ (мм²) входят повреждения с учетом образованного отверстия и начала расслоений.

Таблица 3.3 – Площадь повреждения от скорости удара

№	Укладка волокон слой	$S_{\text{общ}}$ (мм ²)	S_{max} (мм ²) в слое	$v_{\text{ост}}$ (м/с)
1	$[0_2/90_8]$	2011.7	268.3 между 4–5-м слоями	311
2	$[0_5/90_5]$	1917.4	283.6 между 5–6-м слоями	308
3	$[0_8/90_2]$	1901.2	225.2 между 8–9-м слоями	311
4	$[0]_{10}$	1732.9	208.7 между 7–8-м слоями	310
5	$[\pm 45]_5$	1589.1	204.0 между 7–8-м слоями	315
6	$[0_2/\pm 45_2/90_2]/0_2$	1620.5	205.1 между 5–6-м слоями	309
7	$[0/90/\pm 45]_2/0_2$	1546.7	199.8 между 5–6-м слоями	312
8	$[\pm 30/90]_3/30$	1835.3	235.0 между 5–6-м слоями	313
9	$[0/90]_5$	1839.6	246.1 между 6–7-м слоями	309

Результаты повреждений всей пластины представлены на рисунке 3.9, между слоями для каждого варианта укладки — на рисунке 3.10.

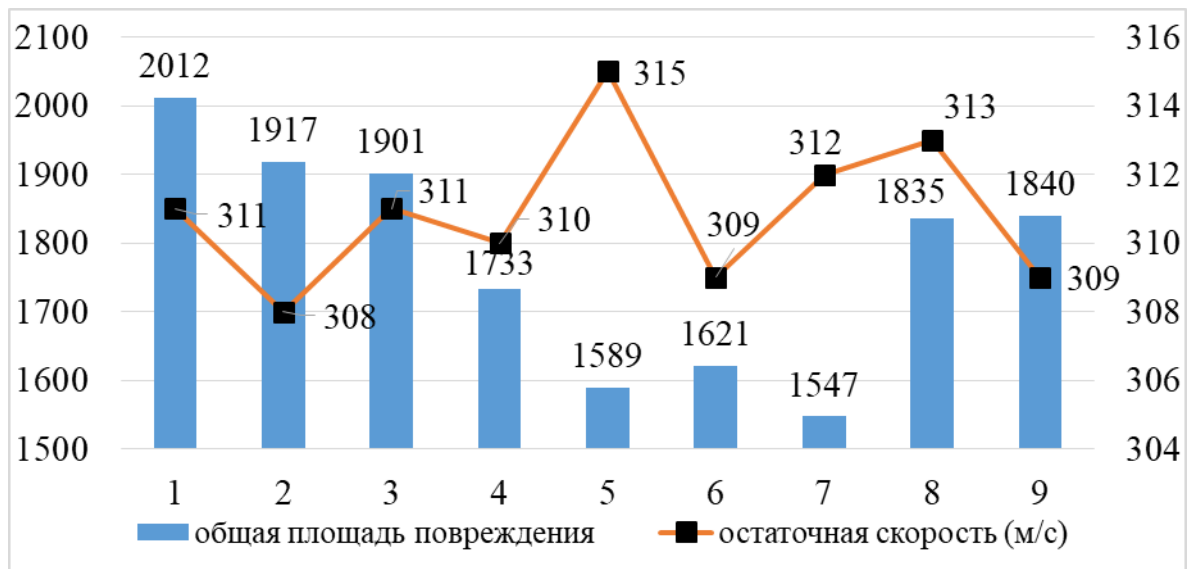


Рисунок 3.9 – Зависимость площади дефектов от остаточной скорости

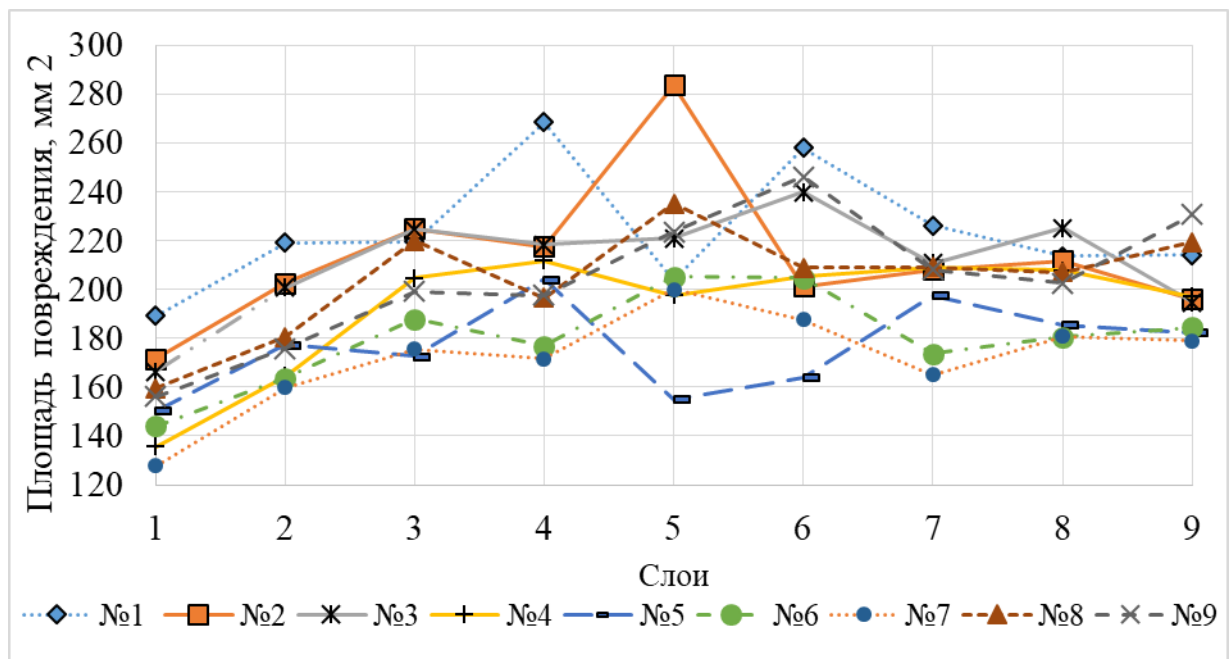


Рисунок 3.10 – Площади повреждений между слоями

Образование обширного расслоения приводит к наибольшему снижению скорости ударника после пробития. Пластина $[\pm 45]_5$ имеет минимальное как межслойное, так и общее повреждение, скорость пробития пластины – самая максимальная.

3.2 Разработка оптимальной конструкции многослойной консоли крыла беспилотного летательного аппарата с экспериментальным подтверждением

В настоящее время резко повысился интерес к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), что вызвано расширением сферы их использования. В связи с применением на БПЛА дорогостоящего специального оборудования актуальны беспилотники с увеличенным сроком службы, надежной конструкцией за счет стабильности прочностных характеристик, с максимально полезной нагрузкой при минимальной массе самого аппарата. В данном разделе исследовано напряженно-деформированное состояние композитной слоистой консоли крыла БПЛА. Определена оптимальная конструкция многослойной обшивки консоли крыла БПЛА из КМ в системе ANSYS, обеспечивающая максимальную прочность и жесткость при заданных нагрузках [13; 15; 142].

На примере расчета основных параметров крыла БПЛА аэродинамической схемы «летающее крыло» проведен анализ НДС и решены следующие задачи:

- 1) разработана автоматизированная процедура выбора угла укладки волокон в слое в системе ANSYS;
- 2) определена оптимальная конструкция многослойной обшивки консоли крыла БПЛА в системе ANSYS, обеспечивающая максимальную прочность и жесткость при заданных нагрузках.

Согласно расчетам изготовлена экспериментальная консоль крыла. В качестве объекта исследования выбрана консоль крыла БПЛА аэродинамической схемы «летающее крыло», полуразмах крыла равен 1 285 мм, корневая и концевая хорды – 500 и 137 мм, усредненный угол стреловидности по передней кромке составляет $18,86^\circ$ со спрямленным участком и несимметричным аэродинамическим профилем (рис. 3.11). Крейсерская скорость полета летательного аппарата составляет 90 км/ч. Размеры консоли крыла представлены на рисунке 3.11.

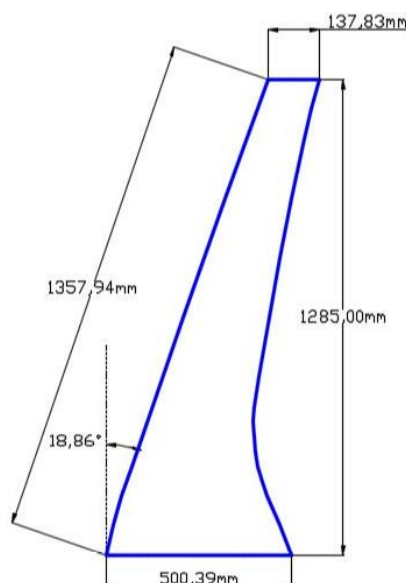


Рисунок 3.11 – Размеры консоли крыла БПЛА аэродинамической схемы «летающее крыло»

Модель консоли крыла БПЛА изготовлена на основе стеклянных однонаправленных волокон и эпоксидной смолы. Упругие характеристики одного слоя волокон представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Упругие характеристики одного слоя стеклянных волокон

Плотность	2.5 г/см ³
Толщина i -го слоя	0.5 мм
E_1 (x – directions)	5.4*10 ⁴ МПа
E_2 (y- directions)	1.2*10 ⁴ МПа
μ_{12} (XYratio)	0.28
μ_{21} (YZratio)	0.062
G_{12} (XY)	5000 МПа
G_{12} (YZ)	5000 МПа

Установлено, что максимальная критическая нагрузка возникает при скорости 180 км/ч = 50 м/с, угол атаки $\alpha=15^\circ$. Конечно-элементная (КЭ) сетка модели была сгенерирована в автоматическом режиме, тип элементов –

треугольный, количество элементов – 647 895, количество узлов – 59 259. Моделирование аэродинамического обтекания крыла проведено с переменным временным шагом. Схема приложения нагрузок соответствует реальному нагружению. На рисунке 3.12а представлена максимальная распределенная нагрузка по передней части крыла, равная $1.528\text{e}+03$ Па (рис. 3.12б).

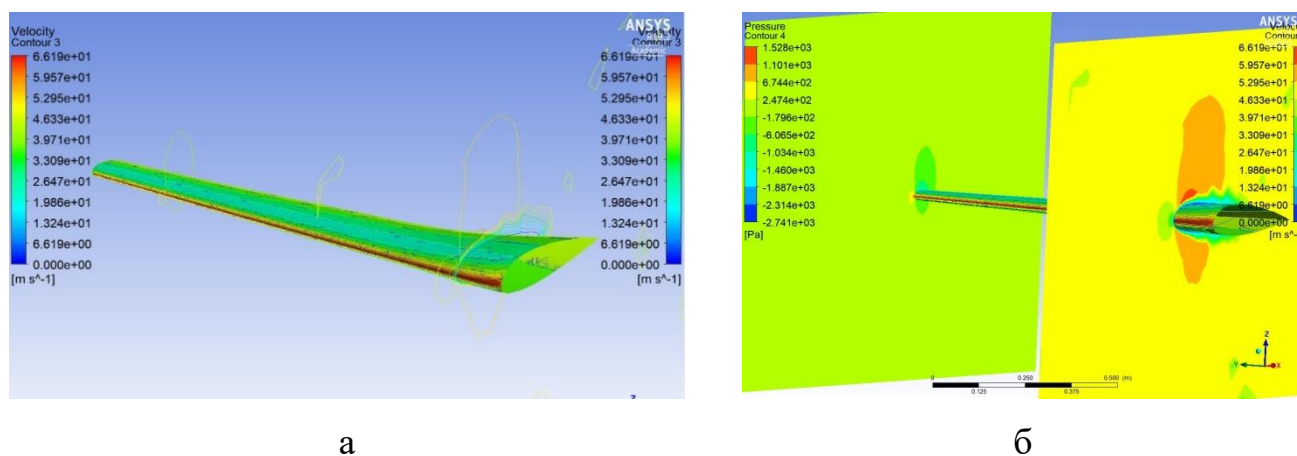


Рисунок 3.12 – Схема приложения нагрузок: а – изолинии статического давления на поверхности крыла; б – поле векторов скорости по поверхности крыла, угол атаки $\alpha=15^\circ$

Значения нагрузок передавали в систему ANSYS Coupling через модуль System Coupling. Расчет модели из КМ произведен в модуле Composite PrepPost. КЭ сетка модели сгенерирована автоматически, с использованием 38 527 конечных элементов (рис. 3.13).

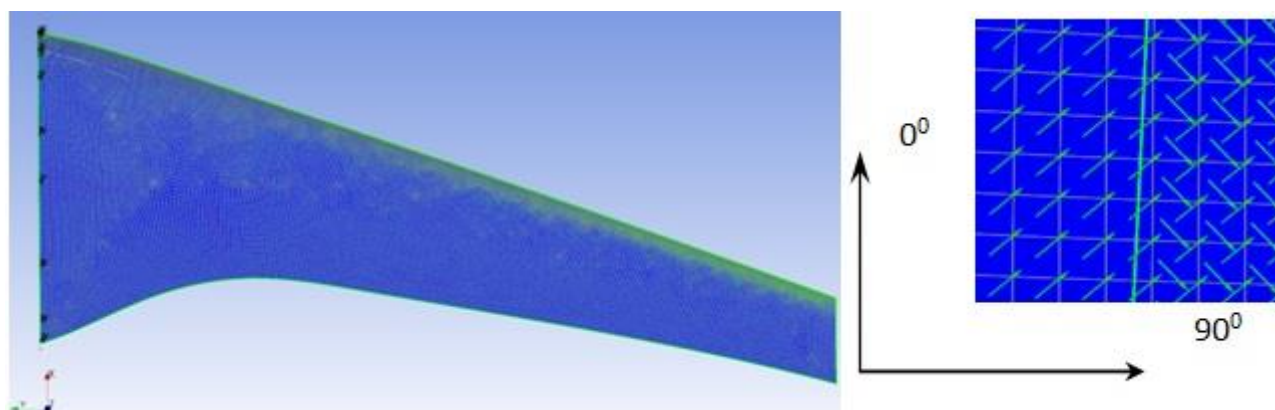


Рисунок 3.13 – КЭ-сетка модели крыла, угол укладки волокон 45°

Известно, что изменение угла укладки волокон слоистых композитов позволяет регулировать механические свойства материала в тех направлениях, в которых действуют наибольшие нагрузки [13]. Однако при этом трудоемкость расчета возрастает в несколько раз, так как количество возможных комбинаций углов волокон даже при небольшом числе слоев достаточно велико. Например, для трехслойного композита с типовой схемой укладки (0 , $\pm 45^\circ$ и 90°) и различным порядком расположения слоев число возможных вариантов составляет более 470 млн комбинаций. Для нахождения оптимальной по массе, стоимости и жесткости конструкции крыла из КМ предложена автоматизированная процедура оптимизации выбора угла укладки волокон в слое.

Для оптимального выбора укладки слоев, обеспечивающей прочность и жесткость крыла от внешних максимальных нагрузок, выбран критерий для расчета на жесткость – максимальная деформация крыла не должна превышать 2,5 мм. В модуле Direct Optimization проведена оптимизация углов укладки слоев из КМ с использованием модуля Adaptive Single – Objective Optimization. Создана модель крыла, состоящая из одного слоя. Задача оптимизации решена для первого слоя при условии: определена минимальная деформация слоя в пакете при заданных нагрузках.

На рисунке 3.14 представлено напряженно-деформированное состояние однослойной модели консоли крыла из КМ. Максимальный прогиб составляет 13,86 мм (рис. 3.14а). Максимальное нормальное напряжение вдоль волокон $\sigma_1 = 57,3$ МПа в заделке крыла (рис. 3.14б). Максимальное нормальное напряжение поперек волокон $\sigma_2 = 1,7$ МПа (на порядок меньше по сравнению с нормальным напряжением вдоль волокон), касательные напряжения $\tau_{12} = 0,91$ МПа и $\tau_{21} = 0,92$ МПа. Получено 17 вариантов углов укладки волокон в слое в зависимости от жесткости крыла, из которых выбрано три варианта армирования с минимальными прогибами: 95° (перемещение 13, 861 мм); 85° (перемещение 13, 924 мм); 74° (перемещение 13, 965 мм).

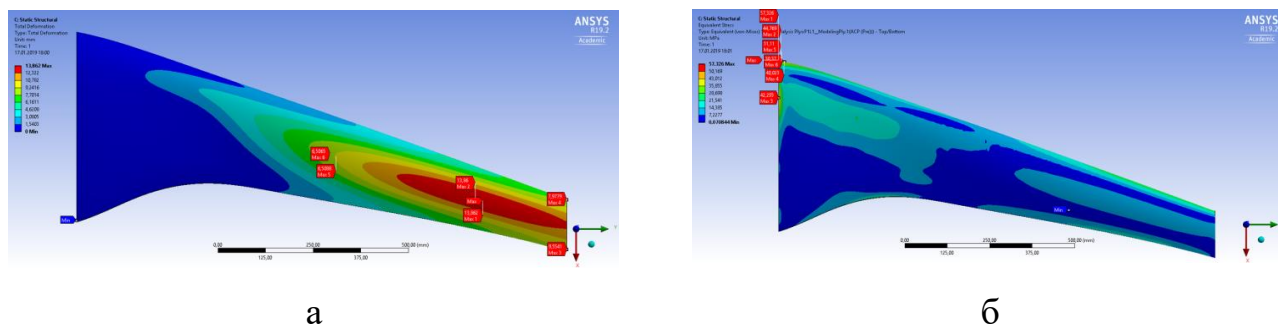


Рисунок 3.14 – Напряженно-деформированное состояние однослойного крыла, укладка волокон под углом 95° : а – распределение нормальных напряжений в слое; б – деформация

Для снижения прогиба крыла добавили дополнительный второй слой по всей поверхности крыла. На рисунке 3.15 представлено НДС двухслойной модели консоли крыла, при этом максимальный прогиб снизился до 3,75 мм.

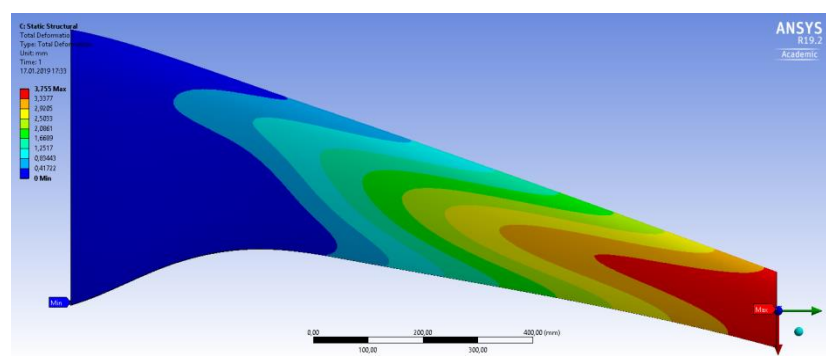


Рисунок 3.15 – Деформирование двухслойного крыла

Максимальное нормальное напряжение первого слоя – 17,04 МПа (рис. 3.16а), второго слоя – 15,16 МПа (рис. 3.16б). При расчете модели крыла из двух слоев рассмотрены 33 варианта укладки волокон 1-го и 2-го слоев. Оптимальные варианты угла укладки волокон в 2-слойном КМ в зависимости прогиба:

- 1) первый слой 107° , второй слой 66° (перемещение 3, 75 мм);
- 2) первый слой 113° , второй слой 81° (перемещение 4, 03 мм);
- 3) первый слой 78° , второй слой 101° (перемещение 4, 07 мм).

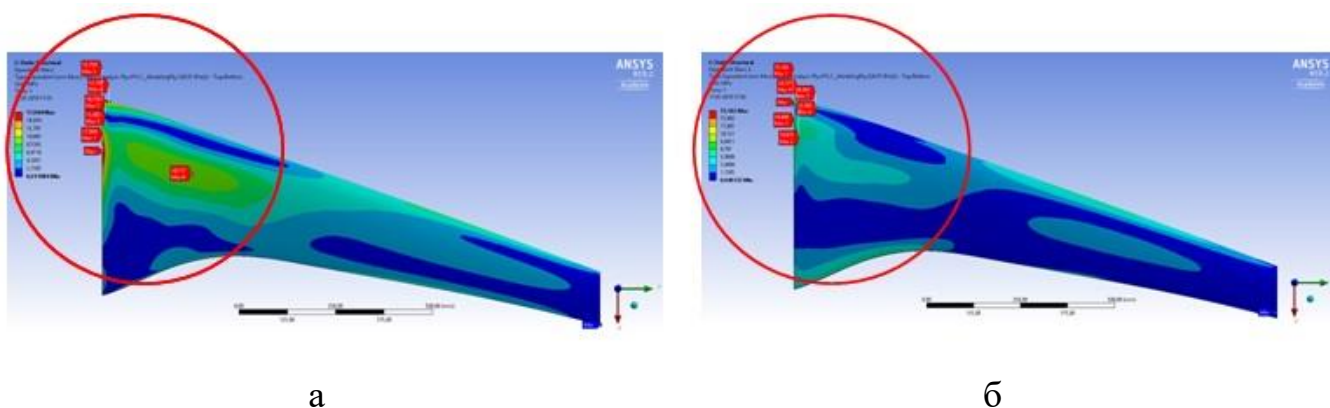


Рисунок 3.16 – Распределения напряжений: а – первый слой; б – второй слой

Анализ двухслойного крыла показал, что наиболее опасные сечения находятся на конце консоли крыла. В связи с этим следующий внутренний слой был добавлен не на всю поверхность, а на половину крыла. На рисунке 3.17 представлен добавочный третий слой и показано изменение толщины конструкции.

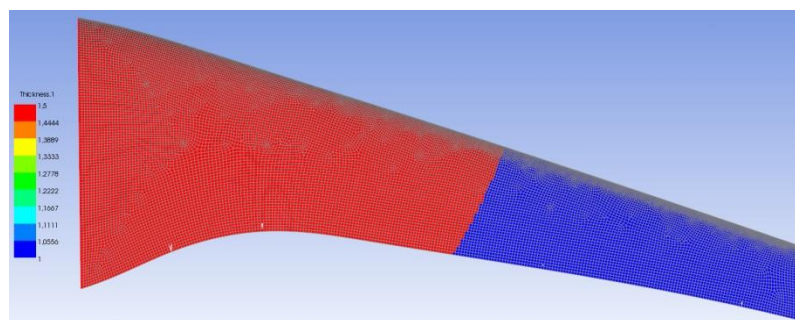


Рисунок 3.17 – Геометрия 3-го слоя, изменение толщины конструкции крыла

На рисунках 3.18 и 3.19 представлено НДС трехслойной модели крыла из КМ с максимальным прогибом 2,73 мм (рис. 3.18). Максимальное нормальное напряжение первого слоя – 9,44 МПа (рис. 3.19а), второго слоя – 7,81 МПа (рис. 3.19б), третьего неполного слоя – 6,94 МПа (рис. 3.19в). При расчете трех слоев рассмотрены 47 вариантов укладки волокон в слое. Оптимальные варианты угла укладки волокон трехслойного КМ в зависимости от прогиба:

- 1) первый слой 58° , второй слой 93° , третий слой 108° (перемещение 2,736 мм);
- 2) первый слой 54° , второй слой 102° , третий слой 92° (перемещение 2,737 мм);
- 3) первый слой 84° , второй слой 111° , третий слой 71° (перемещение 2,83 мм).

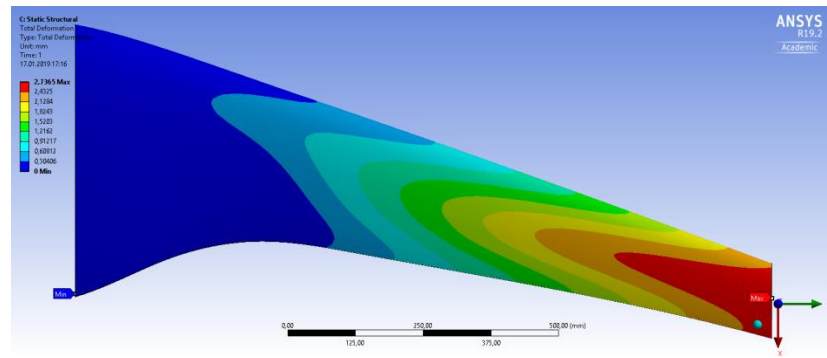


Рисунок 3.18 – Деформация трехслойного крыла

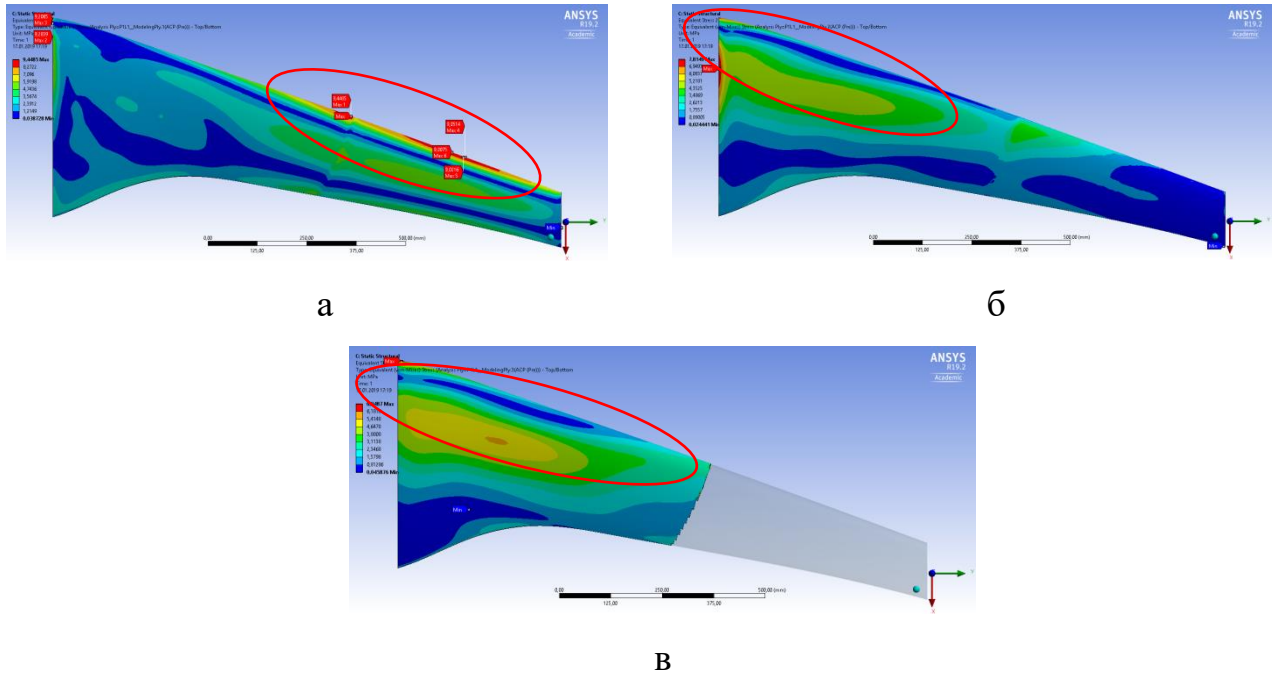


Рисунок 3.19 – Распределение напряжений по слоям:
а – первый слой; б – второй слой; в – третий слой

На рисунке 3.19 видно, что в трехслойной модели наиболее опасным участком является ребро крыла, поэтому четвертый внутренний слой представлен в виде полосы вдоль ребра (рис. 3.20).

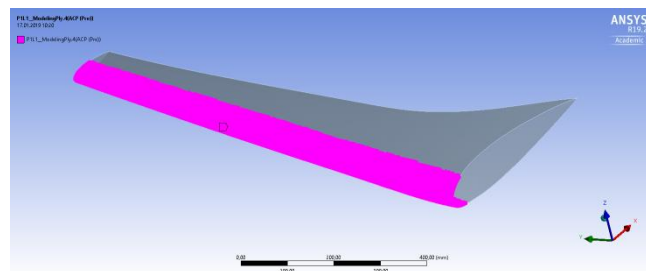


Рисунок 3.20 – Геометрия четвертого слоя

На рисунках 3.21 и 3.22 представлено НДС четырехслойной модели крыла с максимальным прогибом 2,34 мм. Максимальное нормальное напряжение первого слоя – 9,55 МПа (рис. 3.22а), второго слоя – 6,99 МПа (рис. 3.22б), третьего слоя – 5,97 МПа (рис. 3.22в), четвертого слоя – 6,23 МПа (рис. 3.22г). При расчете крыла из двух полных и двух неполных слоев рассмотрены 64 варианта укладки волокон. Оптимальные варианты угла укладки волокон 4-слойной модели в зависимости прогиба:

- 1) первый слой 102 °, второй слой 69 °, третий слой 104 °, четвертый слой 71 ° (перемещение 2,34 мм);
- 2) первый слой 82 °, второй слой 111 °, третий слой 87 °, четвертый слой 62 ° (перемещение 2,36 мм);
- 3) первый слой 89 °, второй слой 116 °, третий слой 58 °, четвертый слой 59 ° (перемещение 2,38 мм).

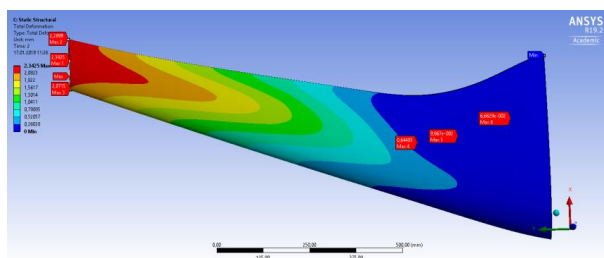
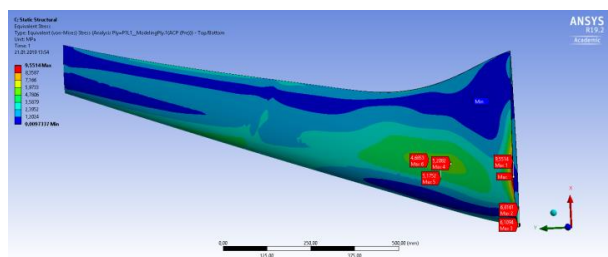
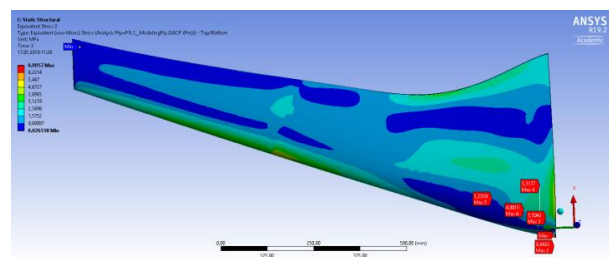


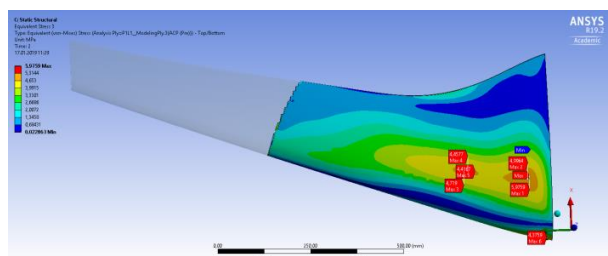
Рисунок 3.21 – Деформация



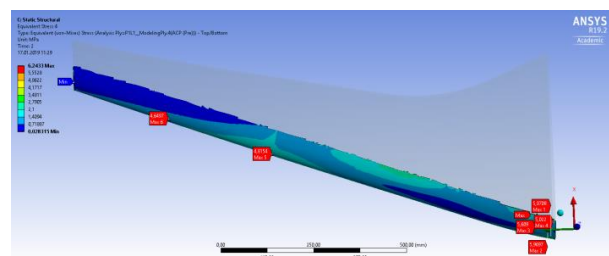
а



б



в

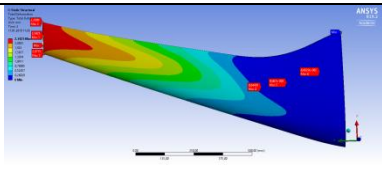
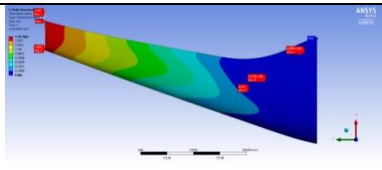


г

Рисунок 3.22 – Распределение напряжений по слоям: а – первый слой;
б – второй слой; в – третий слой; г – четвертый слой

В таблице 3.5 приведены сравнительные данные различных моделей крыла (деформация, расход материала и вес) при одинаковом максимальном нагружении: а) состоящей из двух полных слоев и двух укороченных (крыло 1); в) выполненной из четырех полных слоев (крыло 2); с) изготовленной из пенопласта (крыло 3).

Таблица 3.5 – Сравнительные данные различных моделей крыла

	Крыло 1	Крыло 2	Крыло 3
Деформация (мм)	 2.342 мм	 1,797 мм	Разрушилось
Расход материала	$S_{\text{крыло1}} = 2.036 \text{ м}^2$	$S_{\text{крыло2}} = 2.936 \text{ м}^2$	—
Вес модели	$m_{\text{крыло1}} = 1,4349 \text{ кг}$	$m_{\text{крыло2}} = 2,599 \text{ кг}$	$m_{\text{крыло3}} = 1,24 \text{ кг}$

Из данных таблицы 3.5 видно, что модель консоли крыла, состоящая из 4 полных слоев, более чем на 1 кг тяжелее, чем консоль крыла, состоящая из двух полных слоев и двух укороченных при одинаковой жесткости и прочности. Максимальная деформация консоли крыла в обоих случаях не превышает 2,5 мм.

Для экспериментального изготовления консоли крыла методом холодного формования выполнены рабочие чертежи оснастки. На рисунке 3.23 представлена оснастка для изготовления консоли крыла, выполненная из дельта-древеси́ны, получен патент № 192733 [15; 64; 79]. Консоль крыла изготавливали из стеклоткани марки Т-25 (ВМ) ТУ 6-11-380-76 выкладкой слоев вручную. Послойная укладка слоев производилась в строгом соответствии с расчетной моделью при соблюдении размеров выкроек и углов армирования по основе в каждом слое. Поверхность каждого слоя пропитывали эпоксидной смолой ЭД-20

с отвердителем. Готовое изделие из слоистого стеклопластика представлено на рисунке 3.23. Полученная полая консоль крыла имеет вес 1,46 кг, что на 3% больше расчетной модели.

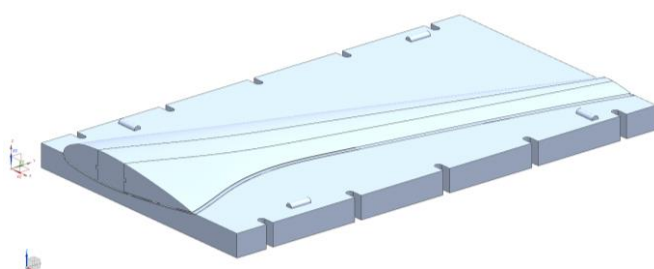


Рисунок 3.23 – Оснастка для изготовления консоли крыла

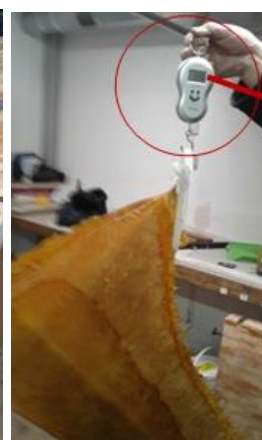


Рисунок 3.23 – Консоль крыла из стеклопластика

Выводы по главе 3

1. Разработана новая методика определения оптимального изменения углов армирования в слое многослойного КМ для снижения скорости пробития пластины ударником, кинетической энергии (энергия удара) и ограничения площади полного разрушения. Впервые разработаны численные динамические модели разрушения многослойных образцов из КМ. Определена оптимальная конструкция 10-слойной пластины из КМ, обеспечивающая снижение скорости ударника в зависимости от угла укладки волокон в слое для повышения ударной прочности конструкций. Проведена серия натурных экспериментов на удар. Установлено, что численные расчеты на прочность и экспериментальные результаты согласуются удовлетворительно. Применение разработанной

методики позволит сократить количество натурных испытаний на скоростной удар для определения прочности элементов конструкций из многослойных КМ в десятки раз.

2. Проведено исследование НДС консоли крыла беспилотного летательного аппарата. Разработана автоматизированная процедура выбора укладки волокон в слое в системе ANSYS, получена оптимальная конструкция многослойной обшивки консоли крыла БПЛА в системе ANSYS с точки обеспечения максимальной прочности и жесткости при заданных нагрузках. Согласно проведенным расчетам, изготовлена 4-слойная консоль крыла из слоистого стеклопластика. Разработана новая оснастка из дельта-древеси́ны для изготовления полый консоли крыла, на которую получен патент № 192733. Вес спроектированной и изготовленной консоли крыла (крыло № 1) на 43% меньше, чем консоль, выполненная из полных слоев (крыло № 2). На изготовление спроектированной консоли крыла (крыло № 1) требуется на 25-30% меньше материала. Данный подход может быть широко использован при проектировании и изготовлении элементов конструкций и изделий из КМ.

Глава 4 Определение критических и разрушающих нагрузок тонкостенных пластин из многослойных композиционных материалов с дефектами типа расслоений при ударном нагружении

При эксплуатации многослойные композитные конструкции подвергаются локальным ударным нагрузкам, в результате которых развиваются процессы деформирования и разрушения как всего элемента конструкции, так и локально, вблизи места удара. Повреждения многослойных композитных пластин зависят от многих параметров, таких как скорость удара, размеры пластины, характеристики материалов и др. При низкоскоростном ударе (до 100 м/с) с ростом начальной скорости ударника под действием ударно-волновой разгрузки за счет формирования макротрещин происходит расслоение композитной пластины (рис. 4.1). При увеличении начальной скорости удара (от 100 до 350 м/с) степень расслоения увеличивается (рис. 4.2). При высокоскоростном ударе (от 350 до 1 000 м/с и более) наблюдается сквозное пробитие с зоной расслоения в верхних и средних слоях пластины (рис. 4.3).



Рисунок 4.1 – Повреждение стеклопластика из 20 слоев
при низкоскоростном ударе

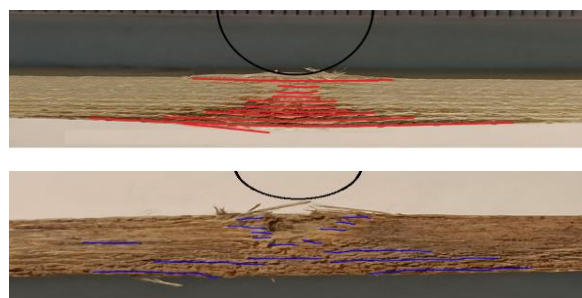


Рисунок 4.2 – Повреждение стеклопластика из 20 слоев
при среднескоростном ударе

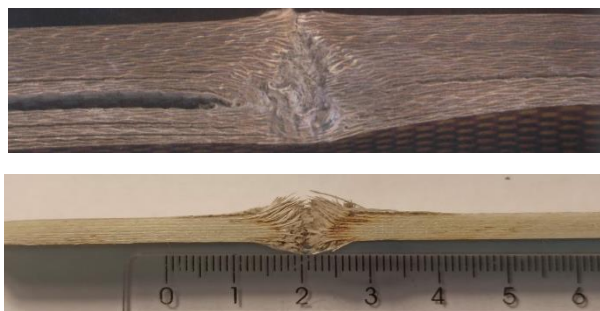


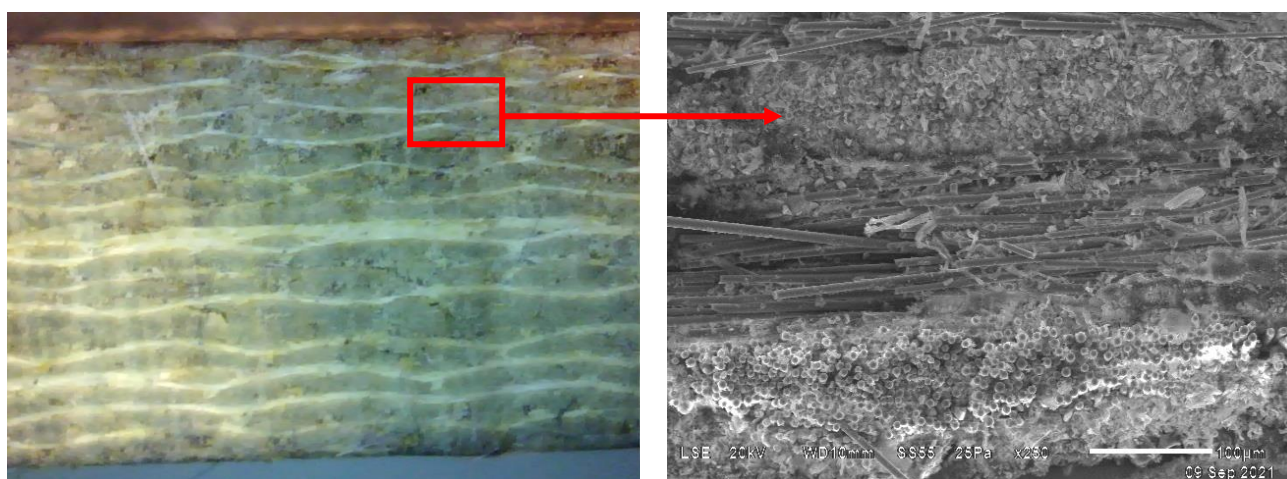
Рисунок 4.3 – Повреждение стеклопластика из 20 слоев
при высокоскоростном ударе

При ударе с ростом начальной скорости ударника под действием ударно-волновой разгрузки за счет формирования макротрещин происходит расслоение композита. В данном параграфе получены аналитические выражения для величин, характеризующих критическую нагрузку и описывающих нелинейное деформирование расслоения, полученное в результате удара. Определены упругие характеристики многослойного пакета тонкого расслоения, упругие характеристики входящих в него отдельных слоев, зависящие от модулей упругости, модуля сдвига, коэффициентов Пуассона и угла ориентации волокон однонаправленного слоя. Получены соотношения для однонаправленного КМ, которые отражают вклад каждого компонента (волокна, матрицы) пропорционально его объемной доле, так называемое «правило смесей».

4.1 Определение упругих характеристик однонаправленного КМ

Поведение многослойных КМ под нагрузкой, даже при линейной зависимости деформаций от напряжений, принципиально отличается от поведения изотропных элементов конструкций [10; 23]. Для определения упругих характеристик многослойного пакета пластины и локального расслоения воспользуемся соотношениями для однонаправленного материала, которые отражают вклад каждого компонента пропорционально его объемной доле, так называемое «правило смесей» [20]. Представим однонаправленный КМ (ОКМ) в виде чередования слоев, обладающих свойствами матрицы и волокна. Тогда

$f_v + f_m = 1$, где f_v – относительное объемное содержание волокна в ОКМ, f_m – относительное объемное содержание матрицы в ОКМ. Для определения объемного содержания волокна в ОКМ сделаны срезы с полученных образцов (рис. 4.4). Экспериментально определена объемная доля волокон на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL (рис. 4.4). Объемное содержание стеклонити составляет 70%, диаметр $d = 6$ мкм (рис. 4.5).



а

б

Рисунок 4.4 – Микрофотографии поперечного среза стеклопластикового образца: а – срез стеклопластика из 20 слоев; б – срез участка стеклопластика при 250-кратном увеличении

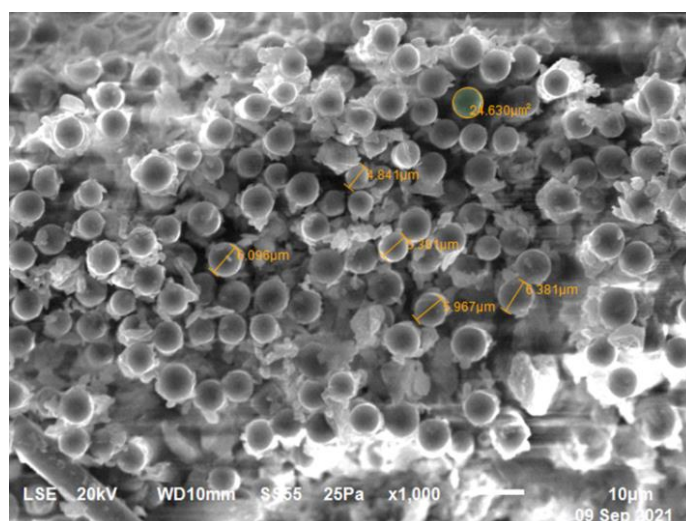


Рисунок 4.5 – Процентное содержание волокна равно 70%

Упругие характеристики волокна и матрицы для ОКМ представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Упругие характеристики волокна и матрицы

Упругие характеристики стекловолокна	Упругие характеристики эпоксидной матрицы
$E_6=7.3 \cdot 10^4$ МПа	$E_m=3.78 \cdot 10^3$ МПа
$G_6=2.9 \cdot 10^4$ МПа	$G_m=1.4 \cdot 10^3$ МПа
$\mu_6=0.22$ МПа	$\mu_m=0.35$

Находим значения упругих постоянных ОКМ через упругие постоянные и объемные доли компонентов по следующим выражениям [65]:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= f_6 E_6 + f_m E_m; \\
 E_2 &= \frac{E_6 E_m E_1}{E_1 [f_6 E_m + f_m E_6] - f_6 f_m (\mu_m E_6 - \mu_6 E_m)^2}; \\
 G_{12} &= \frac{G_6 G_m}{f_6 G_m + f_m G_6}; \\
 \mu_{12} &= f_6 \mu_6 + f_m \mu_m; \\
 \mu_{21} &= \frac{\mu_{12} E_2}{E_1},
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

где E_1 – модуль упругости вдоль направления армирования, E_2 – модуль упругости поперек направления армирования, G_{12} – модуль сдвига в плоскости слоя, μ_{12} , μ_{21} – коэффициенты поперечных деформаций. Разработана численная методика расчета упругих постоянных ОКМ в программном комплексе ANSYS Mechanical с использованием модулей Material Designer и JIMAGE. В качестве исходных данных для создания модели в Material Designer заданы упругие характеристики матрицы и волокна (табл. 4.1). На рисунке 4.6 представлено изображение среза образца стеклопластика в модуле JIMAGE, что соответствует реальному изображению поперечного разреза стеклоткани при 1 000-кратном увеличении (рис. 4.6).

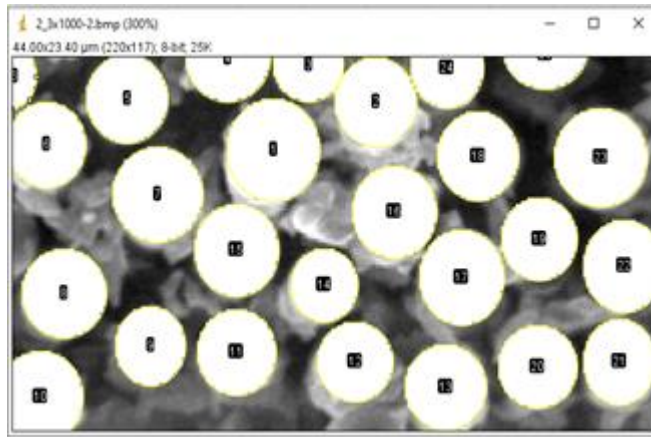


Рисунок 4.6 – Изображение среза образца стеклопластика в модуле JIMAGE

Упругие постоянные для ОКМ представлены в таблице 4.2. Результаты показали хорошую сходимость между численными и аналитическими расчетами [20].

Таблица 4.2 – Упругие характеристики ОКМ [20]

Упругие характеристики ОКМ (стеклопластик) получены по соотношениям (1)	Упругие характеристики ОКМ (стеклопластик) получены в программном комплексе ANSYS Mechanical
$E_1 = 5,223 \cdot 10^4$ МПа	$E_1 = 5,225 \cdot 10^4$ МПа
$E_2 = 1,124 \cdot 10^4$ МПа	$E_2 = 1,759 \cdot 10^4$ МПа
$G_{12} = 4,207 \cdot 10^3$ МПа	$G_{12} = 4,459 \cdot 10^4$ МПа
$\mu_{21} = 0,259$	$\mu_{21} = 0,253$

4.2 Определение упругих характеристик многослойного пакета тонкого расслоения

Определены упругие характеристики многослойного пакета, если известны характеристики жесткости входящих в него отдельных слоев: $C_{j,s}^m$ – жесткостные

характеристики m -го слоя, зависящие от модулей упругости, модуля сдвига, коэффициентов Пуассона и угла ориентации волокон однонаправленного слоя (φ – угол ориентации волокон слоя). Выражения для жесткостных характеристик m -го слоя получены на основании работ [17, 23]

$$C_{11}^m = \lambda(E_1 \cos^4 \varphi + E_2 \sin^4 \varphi + \frac{1}{2} \mu_{21} E_1 \sin^2 2\varphi) + G_{12} \sin^2 2\varphi ;$$

$$C_{22}^m = \lambda(E_1 \sin^4 \varphi + E_2 \cos^4 \varphi + \frac{1}{2} \mu_{21} E_1 \sin^2 2\varphi) + G_{12} \sin^2 2\varphi ;$$

$$C_{12}^m = C_{21}^m = \lambda[(E_1 + E_2) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \mu_{21} E_1 (\cos^4 \varphi + \sin^4 \varphi)] - G_{12} \sin^2 2\varphi ;$$

$$C_{13}^m = C_{31}^m = [\frac{\lambda}{2} (-E_2 \sin^2 \varphi + E_1 \cos^2 \varphi - \mu_{21} E_1 \cos 2\varphi) - G_{12} \cos 2\varphi] \sin 2\varphi ;$$

$$C_{23}^m = C_{32}^m = [\frac{\lambda}{2} (-E_2 \cos^2 \varphi + E_1 \sin^2 \varphi + \mu_{21} E_1 \cos 2\varphi) + G_{12} \cos 2\varphi] \sin 2\varphi ;$$

$$C_{33}^m = \frac{\lambda \sin^2 2\varphi}{4} (E_1 + E_2 - 2\mu_{12} E_1) + G_{12} \cos^2 2\varphi ;$$

$$\lambda = \frac{1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} ; E_1 \mu_{21} = E_2 \mu_{12} .$$

Рассмотрим случай локальной потери устойчивости, которая начинается с выпучивания тонкого расслоения. Приблизительно, но с достаточной для инженерных расчетов точностью, расчет упругих характеристик многослойного КМ для расслоения (верхняя часть) можно рассчитать по формулам:

$$A_{11} = \frac{1}{h} \sum_{m=1}^t \delta_m C_{11}^m ; A_{12} = \frac{1}{h} \sum_{m=1}^t \delta_m C_{12}^m ; A_{22} = \frac{1}{h} \sum_{m=1}^t \delta_m C_{22}^m ;$$

$$E_x = A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} ; E_y = A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} ; \mu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}} ; \mu_{yx} = \mu_{xy} \frac{E_y}{E_x} ,$$

где E_x – модуль упругости вдоль направления армирования для пакета многослойного КМ, толщиной h ; E_y – модуль упругости поперек направления армирования для пакета многослойного композиционного материала толщиной h ; μ_{xy}, μ_{yx} – коэффициенты поперечной деформации для пакета многослойного КМ толщиной h . В таблице 4.3 представлены значения упругих характеристик

многослойного КМ для расслоения (верхняя часть) для двух $[0/90]$, трех $[0/90/0]$, четырех $[0/90]_2$ слоев стеклопластика ($t=2; 3; 4$).

Таблица 4.3 – Упругие характеристики многослойного КМ

Угол армиро- вания слоя	Жесткостные характеристики m -слоя, МПа					
	C_{11}^m	C_{22}^m	C_{12}^m	C_{13}^m	C_{23}^m	C_{33}^m
$m=1$ $\varphi=0$	$5.223 \cdot 10^4$	$1.124 \cdot 10^4$	$3.148 \cdot 10^3$	0	0	$4.207 \cdot 10^3$
$m=2$ $\varphi=90^0$	$1.124 \cdot 10^4$	$5.223 \cdot 10^4$	$3.148 \cdot 10^3$	$3.906 \cdot 10^{-12}$	$1.962 \cdot 10^{-14}$	$4.207 \cdot 10^3$
Упругие характеристики двухслойного расслоения [0/90]						
E_x , МПа		E_y , МПа		μ_{xy}		μ_{yx}
$2.095 \cdot 10^4$		$2.095 \cdot 10^4$		0,099		0,099
Упругие характеристики трехслойного расслоения [0/90/0]						
$3.817 \cdot 10^4$		$2.465 \cdot 10^4$		0,126		0,082
Упругие характеристики четырехслойного расслоения [0/90] ₂						
$4.19 \cdot 10^4$		$4.19 \cdot 10^4$		0.099		0.099

4.3 Определение критических нагрузок

В общем цикле прочностных расчетов существенную роль играют расчеты на устойчивость, так как выход из строя тонкостенных элементов конструкций при сжатии обычно связан с потерей общей или локальной устойчивости [17; 63]. В работе для исследования тонкостенного локального расслоения, полученного в результате низкоскоростного удара, имеется аналитическое и численное решение задач потери устойчивости тонкостенного дефекта, определена критическая нагрузка.

Рассмотрим композитную пластину с расслоением, нагруженную сжимающими деформациями по торцам $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ (рис. 4.7). Центр дефекта совпадает с началом координат oxy . Будем рассматривать расслоение как тонкую осесимметричную пластину, защемленную по контуру и подверженную равномерно распределенной нагрузке с интенсивностью q_x, q_y , соответствующей основной нагрузке элемента конструкции (рис. 4.7).

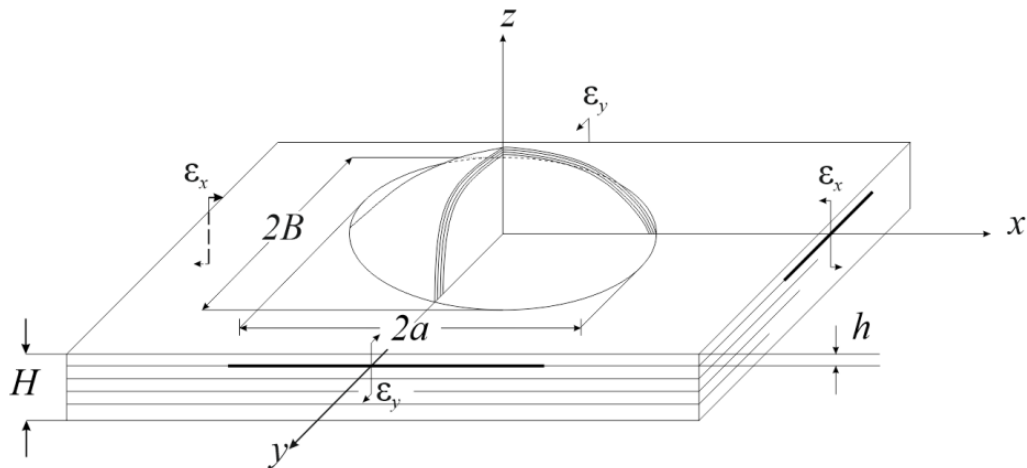


Рисунок 4.7 – Локальное расслоение

Для тонкостенных многослойных элементов конструкций типично плоское напряженное состояние и изгиб [2; 24; 53]. Границы локального расслоения заданы уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

полуосями расслоения являются a и b , h – толщина расслоения. Кроме того, h удовлетворяет условию $h \ll a, b$. В области расслоения многослойная пластина состоит из двух частей (рис. 3): расслоившегося слоя (верхняя часть) и расположенного ниже расслоения слоя (нижняя часть толщиной $H-h$). За пределами дефекта расположена основная часть слоистой пластины толщиной H , n – количество слоев в пакете, δ_m – толщина m -го слоя, t – количество слоев расслоения.

По контуру дефекта заданы усилия, соответствующие деформациям основы $\varepsilon_x, \varepsilon_y$

$$q_x = \frac{\varepsilon_x E_x h}{1 - \mu_{xy}}; \quad q_y = \frac{\varepsilon_y E_y h}{1 - \mu_{yx}}.$$

Перемещения, которые описывают переход пластины в новое отклоненное состояние от начального состояния равновесия, представим в виде:

$$\begin{aligned} w(x, y) &= \eta w_1(x, y); \\ u(x, y) &= \eta^2 u_2(x, y); \\ v(x, y) &= \eta^2 v_2(x, y). \end{aligned}$$

где η – параметр, зависящий от уровня нагружения пластины, компоненты перемещений u, v, w соответствуют направлению осей x, y, z .

Функцию поперечного прогиба $w_1(x, y)$ возьмем в виде:

$$w_1(x, y) = \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right).$$

Для определения перемещения $u_2(x, y)$, $v_2(x, y)$ необходимо решить вспомогательную задачу. Введем функцию напряжений $\phi_2(x, y)$, связанную с прогибом $w_1(x, y)$ уравнением Кармана,

$$\nabla^2 \nabla^2 \phi_2 = Eh \left[\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \right].$$

Граничные условия для $\phi_2(x, y)$ возьмем в виде:

$$\text{при } x = \pm \frac{a}{2} \quad \phi_2 = 0, \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = 0;$$

$$\text{при } y = \pm \frac{b}{2} \quad \phi_2 = 0, \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial y} = 0.$$

Учитывая эти условия, функцию $\phi_2(x, y)$ зададим рядом

$$\phi_2(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \theta_{ij} \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^2 \left(\frac{x}{a} \right)^{2i} \left(\frac{y}{b} \right)^{2j},$$

где θ_{ij} – неизвестные коэффициенты. Для определения необходимо уравнение Кармана проинтегрировать по методу Галеркина. При этом получаем систему линейных уравнений, для решения которой используем метод Гаусса. Для определения u_2, v_2 используем зависимости:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_2}{\partial x} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_1}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{E_x h} \left(\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial y^2} - \mu_{xy} \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2} \right); \\ \frac{\partial v_2}{\partial y} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_1}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{E_y h} \left(\frac{\partial^2 \phi_2}{\partial x^2} - \mu_{yx} \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial y^2} \right).\end{aligned}\quad (4.2)$$

Аппроксимация узловых точек выполнена с помощью полиномиальной регрессии в системе MathCAD. Для вычисления коэффициентов полинома регрессии используется функция submatrix.

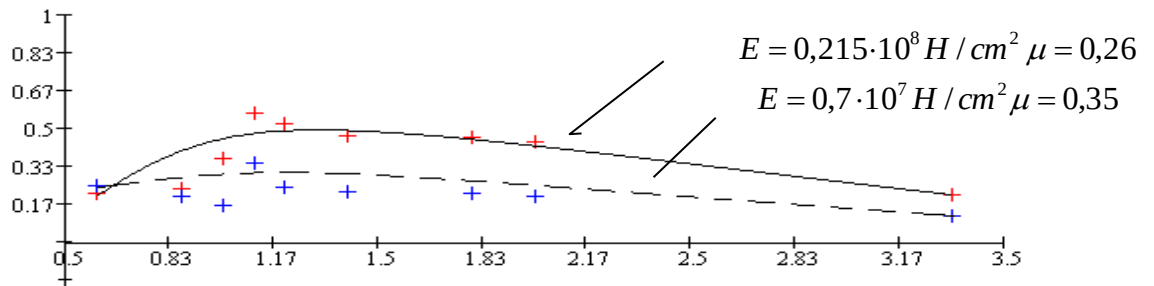


Рисунок 4.8 – Значение функции перемещения u_2 при различных размерах дефекта

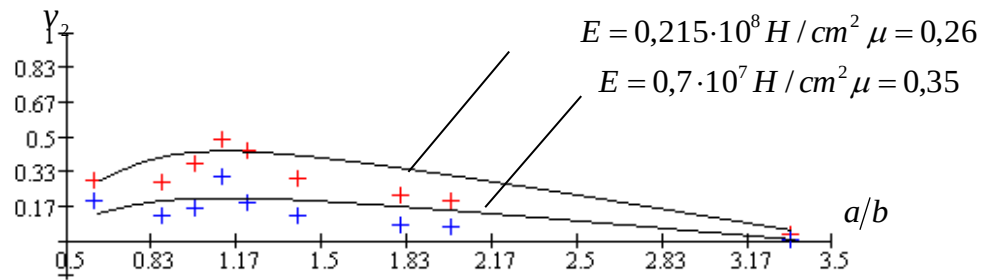


Рисунок 4.9 – Значение функции перемещения v_2 при различных размерах дефекта

Изменение полной потенциальной энергии $\Delta \mathcal{E}$ для тонких расслоений при отклонении от начального плоского состояния определяется выражением

$$\begin{aligned}\Delta \mathcal{E} &= \eta^2 \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} D \left\{ \left(\frac{d^2 w_1}{dx^2} + \frac{d^2 w_1}{dy^2} \right)^2 + \eta^2 2(1 - \mu_{xy}) \left[\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \right] \right\} dy dx - \\ &- \eta^2 \oint_{S_2} (u_2 q_x + v_2 q_y) dS_2,\end{aligned}$$

где S_2 – граница отслоения, $D = \frac{E_x h^3}{12(1 - \mu_{xy} \mu_{yx})}$ – цилиндрическая жесткость многослойного расслоения.

Из условия $\Delta\mathfrak{E}=0$ находим критическую нагрузку, которую для удобства можно представить в виде:

$$\varepsilon_{кр} = \frac{\frac{1}{2} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} D \left\{ \left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1-\mu_{xy}) \left[\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^2 \partial y^2} \right] \right\} dy dx}{\frac{E_x h}{1-\mu_{xy}} \left[\oint_{S_2} u_2 dS_2 + \mu \oint_{S_2} v_2 dS_2 \right]}.$$

4.4 Подрастание дефекта

Для определения разрушающей нагрузки области образования и подрастания расслоений требуется определить обобщенные силы, продвигающие отслоения G_a , G_b . Элементарная работа сил сопротивления продвижению фронта расслоения равна $dA_\gamma = \pi(a\Delta\mathfrak{e} + \mathfrak{e}\Delta a + \Delta a\Delta\mathfrak{e})2\gamma$. Поверхностные слои получили деформацию $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$, $\varepsilon_x = \varepsilon$, $\varepsilon_y = \mu_{xy}\varepsilon_x$.

Для рассматриваемого случая определим потенциальную энергию деформации элемента конструкции с расслоением как функцию размеров расслоения

$$U = U_c + V,$$

где $U_c = \frac{E_x h}{2(1-\mu_{xy}^2)} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} \varepsilon_{кр}^2 (1+3\mu_{xy}^2) dy dx$ – потенциальная энергия сжатия;

$V = \frac{E_x h}{2(1-\mu_{xy}^2)} - \frac{F}{T} (\varepsilon_{кр}\varepsilon - \varepsilon_{кр}^2)$, – потенциальная энергия изгиба,

где $F = \left[\oint_{S_1} (u_2 + \mu v_2) dS_1 \right]^2$

$$T = \frac{1}{4(1+\mu_{xy})^2} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} \left\{ \left[\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_1}{\partial x} \right)^2 \right]^2 + \left[\frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_1}{\partial y} \right)^2 \right]^2 + 2\mu_{yx} \left[\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_1}{\partial x} \right)^2 \right] \left[\frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_1}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dy dx.$$

Окончательно получаем

$$U = \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(x/a)^2}} (1+3\mu^2)(\varepsilon_{кр}^2 - \varepsilon^2) dy dx + \frac{F}{T} (\varepsilon_{кр} \varepsilon - \varepsilon_{кр}^2).$$

Определим обобщенные силы, продвигающие отслоения G_a , G_b , с помощью численного дифференцирования потенциальной энергии по размерам отслоения при бесконечно малых приращениях Δa , Δb .

Вводя $dU = \frac{\partial U}{\partial a} da + \frac{\partial U}{\partial b} db$; $dA = \pi(adb + bda)$, где ΔA – площадь отслоения и

получаем $G = \frac{G_a + G_b \frac{a}{b} \frac{db}{da}}{1 + \frac{a}{b} \frac{db}{da}}$, где $G_a = -\frac{\partial U}{\partial a}$; $G_b = -\frac{\partial U}{\partial b}$;

$$G_a = \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial a} \left\{ \frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} \varepsilon^2 - \left[\frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} - \frac{F}{T} \right] \varepsilon_{кр}^2 - \frac{F}{T} \varepsilon_{кр} \varepsilon \right\};$$

$$G_b = \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial b} \left\{ \frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} \varepsilon^2 - \left[\frac{\pi ab(1+3\mu^2)}{4} - \frac{F}{T} \right] \varepsilon_{кр}^2 - \frac{F}{T} \varepsilon_{кр} \varepsilon \right\}.$$

Исследуем характерные особенности роста дефектов при сжатии основной пластины: $\varepsilon_{кр}$ – критическое значение нагружения, ε_γ – кривая разрушения (рис. 4.10).

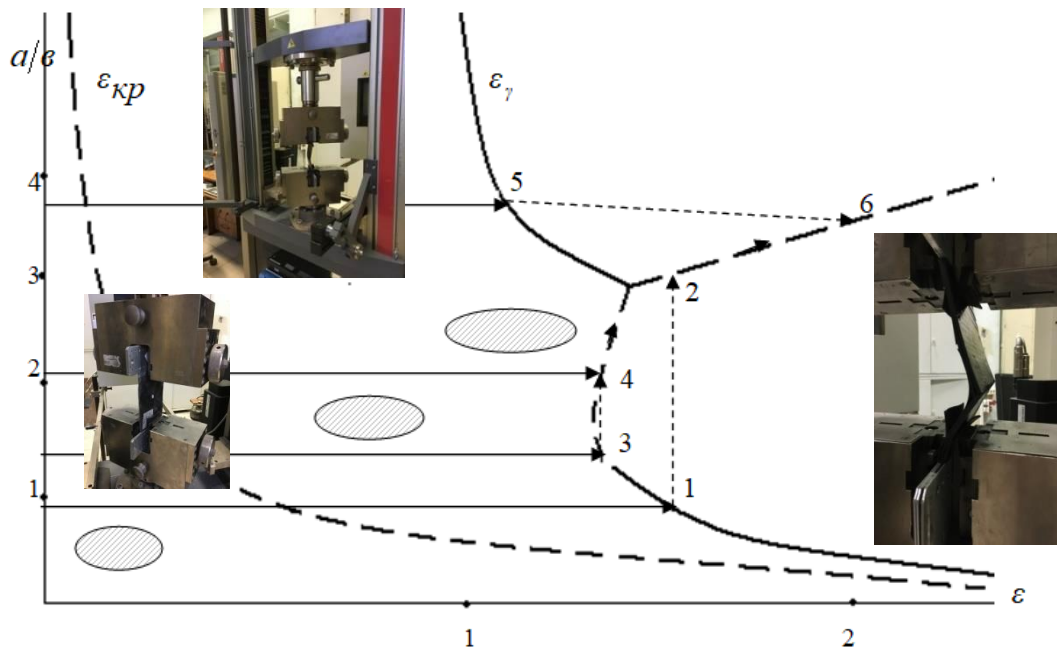


Рисунок 4.10 – Характерные особенности роста дефектов при сжатии

Между критической кривой и кривой разрушения – область появления и подрастания дефектов. Допустим, что нагрузка достигает точки 1 ($a=v$), отслоение неустойчиво растет по оси a (до точки 2), далее следует устойчивый рост как по оси a , так и по оси v . От точки 3 до 4 возможен неустойчивый рост по оси a с последующей остановкой, далее – устойчивый рост по оси a . От точки 5 до точки 6 имеет место неустойчивый рост по оси v , далее следует устойчивый рост по осям a и v .

Выводы по главе 4

1. Рассмотрены условия появления дефектов типа расслоений при действии ударных нагрузок. Задача исследования устойчивости тонкостенных расслоений из КМ рассмотрена в нелинейной постановке. Представлен уточненный подход для решения такого класса задач. Получена в явном виде критическая нагрузка, исследовано нелинейное (закритическое) поведение тонкостенного расслоения.

2. Определены упругие характеристики многослойного пакета тонкого расслоения, упругие характеристики входящих в него отдельных слоев, зависящие от модулей упругости, модуля сдвига, коэффициентов Пуассона и угла ориентации волокон однонаправленного слоя. Получены соотношения для однонаправленного КМ, которые отражают вклад каждого компонента (волокна, матрицы) пропорционально его объемной доле, так называемое «правило смесей».

3. Разработана методика численного моделирования элементов конструкций КМ с допустимыми дефектами типа расслоений в системе ANSYS. Результаты аналитического решения сопоставимы с численными данными. Обсуждаемые методы оценки прочности и численные расчеты также можно применять к большому разнообразию КМ.

Глава 5 Неразрушающий контроль многослойных композиционных материалов после скоростного удара

Изделия из многослойных КМ обладают характеристиками, которые позволяют применять их в сложных условиях эксплуатации, поэтому необходимо получить информацию о контролируемом изделии, прогнозировать его свойства и влиять в сторону совершенствования и обеспечения необходимых параметров, что требует разработки диагностических средств. Задачей диагностики в настоящее время является не только выявление дефектов, но и прогнозирование сроков безаварийного функционирования композитных конструкций на основе тщательного изучения их поведения под эксплуатационными нагрузками при наличии тех или иных дефектов. При ударе в зависимости от его силы происходит несколько основных видов повреждений многослойных КМ: в виде образования расслоений, разрыва волокон и др. Выявление таких дефектов на изготовление и эксплуатацию изделий из КМ осуществляется методами неразрушающего контроля (НК) и методами разрушающего контроля (РК). В главе 2 представлен метод РК повреждений многослойных пластин при скоростном ударе. Главная задача НК – определить тип дефекта: непрочность, расслоение, инородное включение, подмятие сотового заполнителя, пористость и т. д. [105; 106]. Повреждения в виде расслоений, образуемые от удара, могут быть обнаружены методами НК: акустической эмиссии, компьютерной томографии, шерографии, термографии, ультразвукового контроля и визуально-измерительным контролем.

5.1 Неразрушающий контроль межслойных дефектов

В диссертационной работе для анализа межслойных дефектов в образцах из КМ после ударного повреждения применяется комплексный контроль, включающий несколько методов неразрушающего контроля: визуальный контроль, ультразвуковую дефектоскопию и сопоставление результатов с численным моделированием.

5.1.1 Визуальный и ультразвуковой контроль межслойных дефектов после скоростного удара

Проведен визуальный анализ 5 пластин из 20 слоев стеклопластика с лицевой и тыльной стороны после удара скоростью 884 м/с и 3 пластин из 20 слоев стеклопластика с лицевой и тыльной стороны после удара скоростью 346 м/с. Определены размеры повреждений визуальным контролем тыльной и лицевой стороны. При визуальном контроле использовали яркий источник света. Для оценки внутренних повреждений использовали прибор для ультразвуковой дефектоскопии КМ ELISA GMIUC002-14 (рис. 5.1). Прибор определил границы повреждения и глубину дефекта с точностью до слоя, при этом были использованы два ультразвуковых датчика, работающих на частоте 10 МГц диаметром 6,35 мм и 9,5 мм. Прибор обнаружил расслоения, начиная с глубины от 0,15 мм (толщина одного слоя – 0,2 мм). Контроль образца проводился с тыльной и лицевой сторон многослойной пластины.

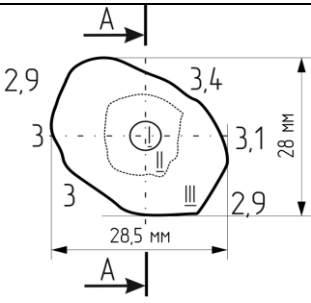
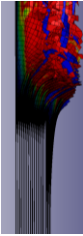


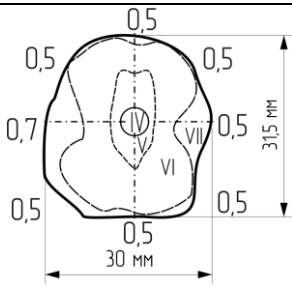
Рисунок 5.1 – Комплекс для ультразвуковой дефектоскопии КМ ELISA GMIUC002-14

В таблице 5.1 представлены результаты НР образца № 1 20-слойной пластины из стеклопластика, скорость удара 884 м/с: визуальный контроль (таблица 5.1а, в); ультразвуковой метод (таблица 5.1б, г); численное моделирование (таблица 5.1д). Представлены дефекты со стороны лицевой и тыльной сторон, границы дефекта, обнаруженные ультразвуковым методом,

отмечены пунктирной линией по глубине залегания. С лицевой стороны глубина залегания дефекта определяется на глубине 2,9–3,4 мм, между 13-м и 16-м слоями многослойной пластины из КМ, площадь максимального расслоения выделена толстой линией и равна 5,7 см². С тыльной стороны глубина залегания дефекта определяется на 0,5 мм, что соответствует расположению дефекта между 18-м и 19-м слоями, площадь максимального расслоения выделена толстой линией и равна 8,2 см². С лицевой стороны пластины можно выделить три зоны межслойного дефекта (б): I – сквозное отверстие, равное диаметру ударника; II – область множественного расщепления нитей; III – область расслоения, которую можно обнаружить только ультразвуковым методом, визуально невозможно обнаружить. С тыльной стороны можно выделить четыре зоны: зона IV – сквозное отверстие; V – область множественного расщепления нитей; VI – видимая область расслоения, можно обнаружить визуально; VII – область расслоения, обнаруженная ультразвуком.

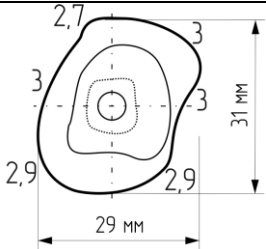
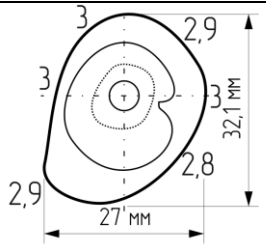
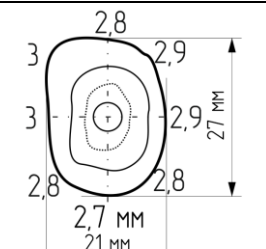
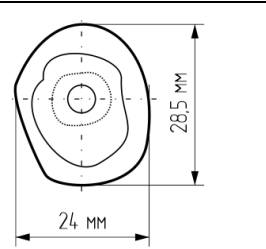
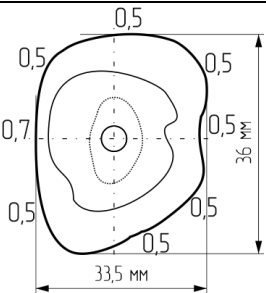
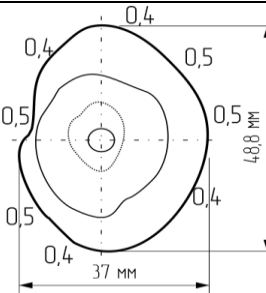
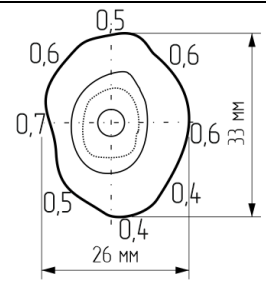
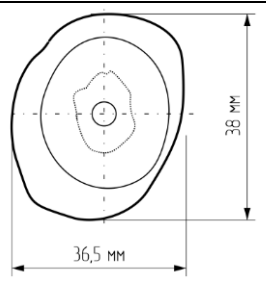
Таблица 5.1 – Результаты определения площади расслоения при ударе скоростью 884 м/с визуально и ультразвуковым методом

Образец №26	Визуальный контроль	Глубина залегания дефекта (мм) после обработки изображений (образец №1)	LS-DYNA
Лицевая сторона	 а	 б	A-A  д

Тыльная сторона			
Площадь расслоения, $S_{\max}$, (см ²)	—	8,2 см ² (с тыльной стороны)	7,8 см ²

В таблице 5.2 представлены схемы повреждений пластин при скорости удара 884 м/с для четырех образцов № 2–5. Максимальный диаметр сквозного пробития ($d_{\text{проб}}$) пластины при скорости ударника 884 м/с равен $d_{\text{проб}}=5,72$ мм, максимальный диаметр расслоения ($d_{\text{рассл}}$) равен $d_{\text{рассл}}= 48,8$ мм, что на 88% превышает диаметр пробития.

Таблица 5.2 – Глубина и размеры повреждений, образованных при ударе 884 м/с, выявленные ультразвуковым методом и визуальным контролем

№ образца	2	3	4	5
Лицевая сторона				
Тыльная сторона				

В таблице 5.3 представлены схемы повреждений пластины при ударе 346 м/с трех образцов № 6–8. Максимальный диаметр сквозного пробития пластины при скорости ударника 346 м/с равен $d_{\text{проб}}=9$ мм, максимальный диаметр расслоения равен $d_{\text{рассл}}=93,6$ мм, что на 90% превышает диаметр пробития. Площадь расслоения значительно превышает площадь пробития пластины.

Таблица 5.3 – Глубина и размеры повреждений, образованных при ударе 346 м/с, выявленных ультразвуковым методом и визуальным контролем

№ образца	6	7	8
Лицевая сторона			
Тыльная сторона			

5.2 Численное моделирование межслойных дефектов в пластинах из КМ

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 5.2–5.6. На рисунке 5.2 показаны размеры расслоений, полученных численным моделированием и экспериментально при ударе со скоростью 884 м/с. Размеры дефектов: максимальный диаметр расслоения $d_{\text{рассл}} = 48,8$ мм (метод ультразвуковой дефектоскопии, таблица 2, образец № 3); диаметр дефекта,

полученного численно $d_{\text{рассл.ч.}}=45$ мм. Расхождение составляет 7% (рис. 5.2а). Площадь дефекта и сквозное повреждение (рис. 5.2б) практически совпадают (1–2% расхождения). На рисунке 5.3 представлено разрушение 5-слойной пластины. При численном моделировании возможно представить дефекты между слоями, при совмещении которых форма дефекта численного моделирования (рис. 5.3б) практически совпадает с дефектом, полученным экспериментально (рис. 5.3а).

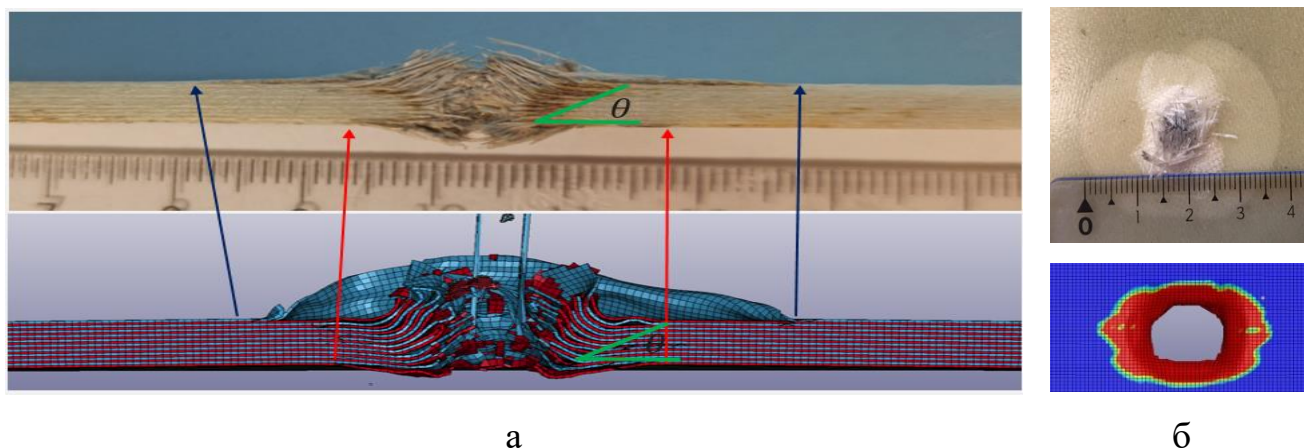


Рисунок 5.2 – Размеры расслоений в многослойных КМ, полученные экспериментально и численно: а – длина дефекта, б – площадь дефекта

Эксперимент 1–2-м слоями 2–3-м слоями 3–4-м слоями 4–5-м слоями
между:

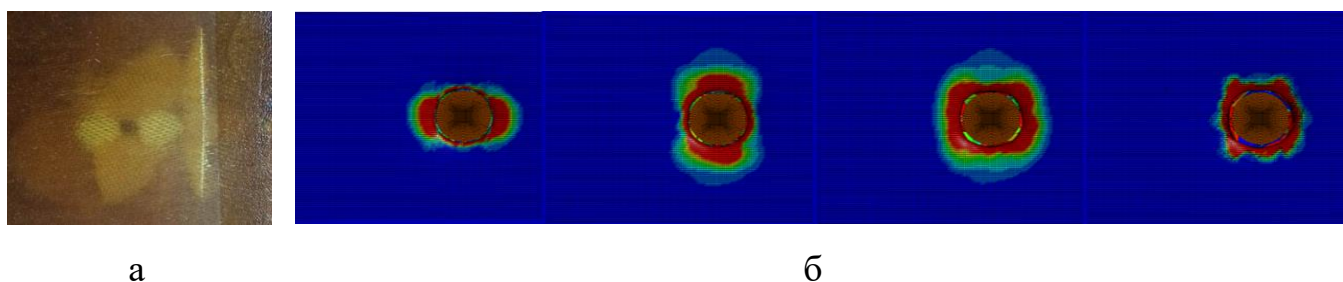


Рисунок 5.3 – Послойное разрушение КМ: а – результат экспериментального пробития 5-слойной пластины; б – моделирование расслоения между слоями

На рисунке 5.4 представлена пластина из 20 слоев, на рисунке 5.5 – пластина из 10 слоев и схемы их повреждения от удара. Для 20-слойных пластин повреждения схематично показаны на рисунке 5.4а, которые первоначально

параллельны поверхности пластины из КМ. Для тонких пластин (до 10 слоев) форма повреждения имеет упрощенный вид конуса (рис. 5.5а). Красным цветом отмечены зоны разрушения (рис. 5.4б и рис. 5.5б), зеленым цветом показаны зоны снижения прочности клеевого соединения. Расслоения имеют эллиптическую форму, вытянутую вдоль направления армирования нижнего слоя от точки удара. Во время удара вблизи стенок повреждения пластины направление слоев меняется: ближе к лицевой поверхности удара они поворачиваются в сторону, противоположную направлению удара за счет действия волны разгрузки, что соответствует покадровой съемке эксперимента (глава 2, рис. 2.9). Вблизи тыльной поверхности слои поворачиваются в направлении удара.

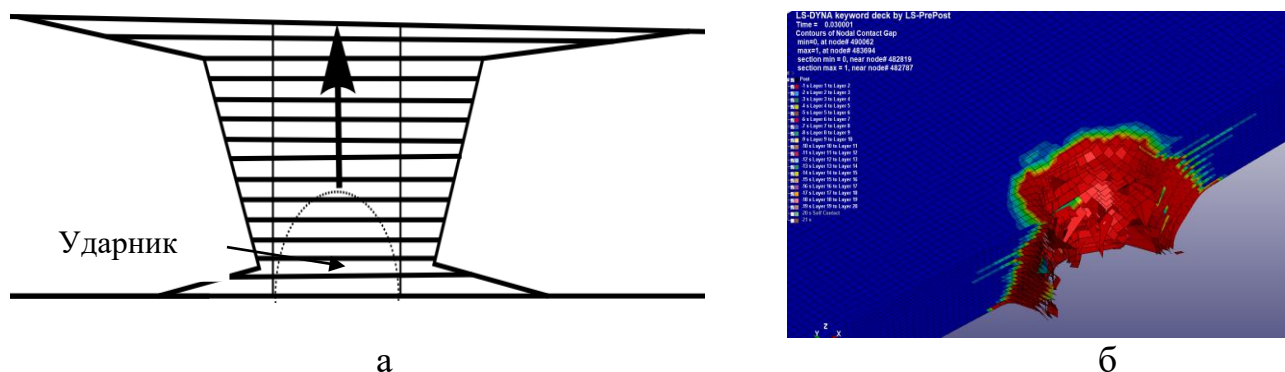


Рисунок 5.4 – Форма повреждения пакета КМ с 20 слоями при пробитии ударником: а – схема повреждения; б – модель повреждения

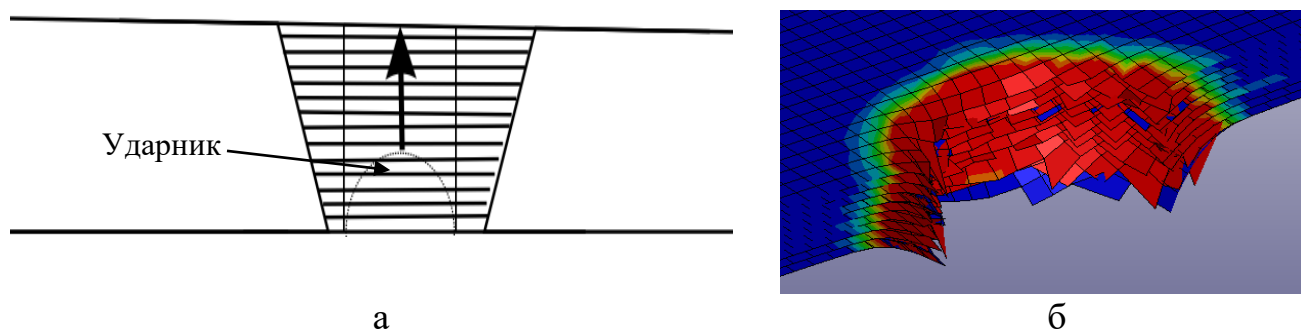


Рисунок 5.5 – Форма повреждения пакета из КМ до 10 слоев при пробитии ударником: а – схема повреждения; б – модель повреждения

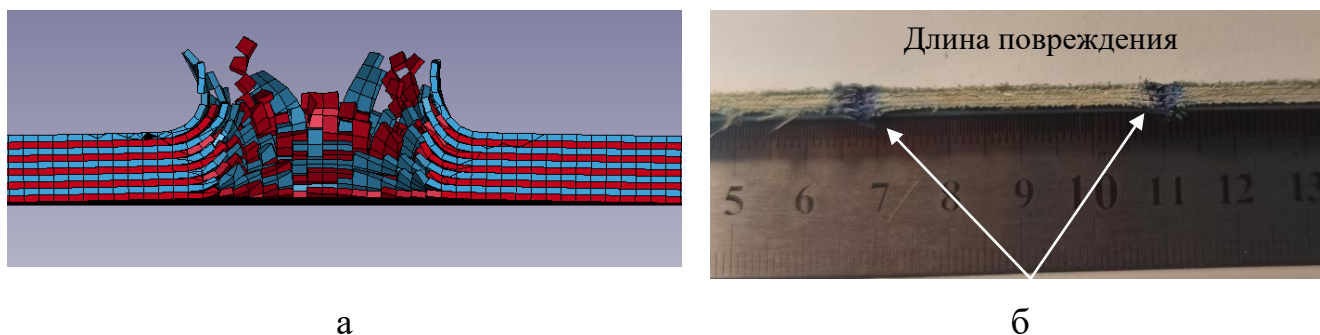


Рисунок 5.6 – Повреждение пластины: а – моделирование послойного повреждения, б – эксперимент

В таблице 5.4 представлены результаты численного расчета размеров повреждений для различных вариантов укладки слоев 10-слойной пластины из КМ и остаточная скорость после удара. Начальная скорость удара – 346 м/с. Наблюдается зависимость между площадью расслоения и остаточной скоростью ударника: чем больше площадь расслоения, тем меньше остаточная скорость, а площадь расслоения зависит от угла укладки волокон в слое [16]. Площадь повреждений между каждым слоем от угла укладки волокон в слое КМ представлена на рисунке 5.7.

Таблица 5.4 – Результаты численного расчета размеров повреждений и остаточной скорости после удара

№ укладка	№ 1 [0] ₁₀	№ 2 [±45] ₅	№ 3 [0 ₂ /±45 ₂ /90 ₂]0 ₂	№ 4 [0/90/±45] ₂ 0 ₂	№ 5 [±30/90] ₃ 30	№ 6 [0/90] ₁₀
Общая площадь повреж- дения (мм ²)	1 732,9	1 589,1	1 620,5	1 546,7	1 835,4	1 839,6
Остаточ- ная скорость (м/с)	310	315	312	316	309	307

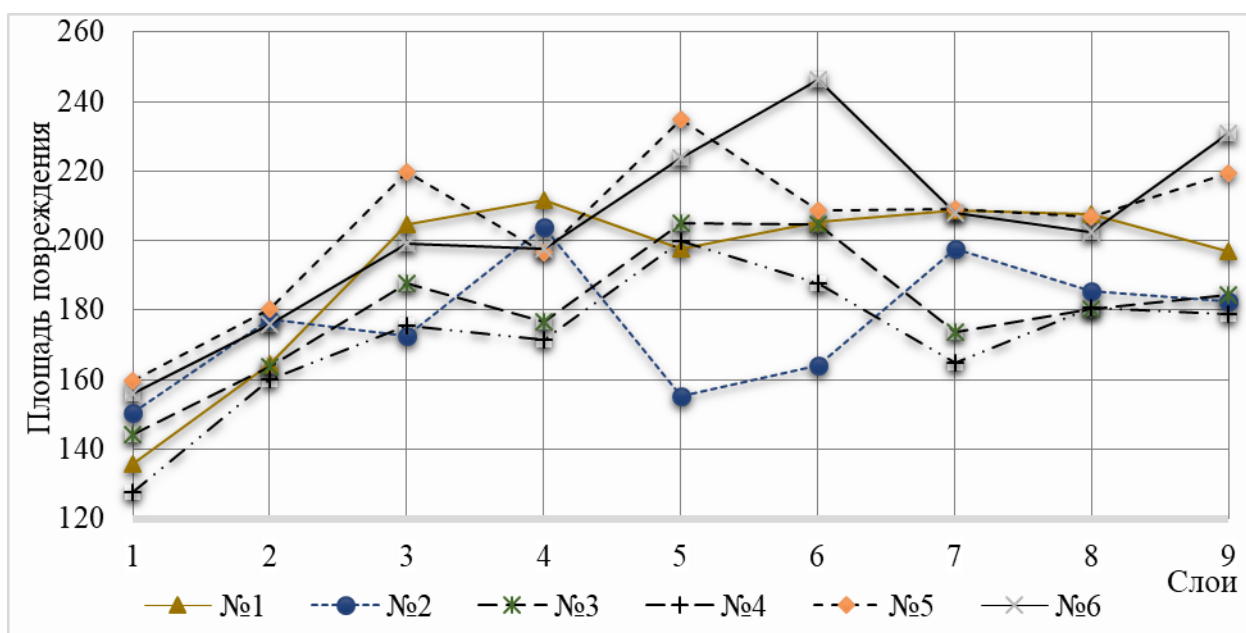


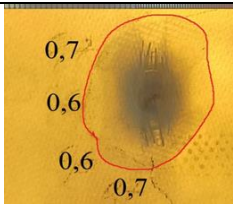
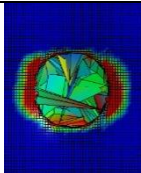
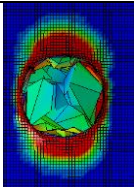
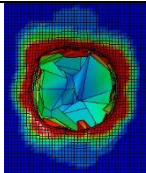
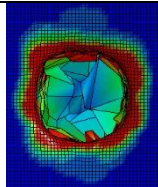
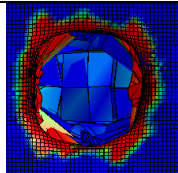
Рисунок 5.7 – Размеры повреждений между каждым слоем (мм²) для КМ из 10 слоев, 6 вариантов укладки слоев: № 1 – $[0]_{10}$; № 2 – $[\pm 45]_5$; № 3 – $[0_2/\pm 45_2/90_2]_{0_2}$; № 4 – $[0/90/\pm 45]_2 0_2$; № 5 – $[\pm 30/90]$; № 6 – $[0/90]_{10}$.

В таблице 5.5 представлены результаты определения площади расслоения (красная линия – границы дефекта) и глубина залегания дефекта (числовое обозначение вокруг линии), полученные ультразвуковым методом и визуальным контролем при ударе скоростью 884 м/с (сквозное пробитие), приведено сравнение с численным моделированием.

Таблица 5.5 – Результаты определения площади расслоения и глубины залегания дефекта

Пластина из 20 слоев, скорость удара 882 м/с				
Образец № 1	Ультразвуковой метод		Визуальный контроль	
Глубина залегания дефекта (мм)	Входное отверстие	Выходное отверстие	Входное отверстие	Выходное отверстие

Продолжение таблицы 5.5

Площадь расслоения, $S(\text{см}^2)$	5,7	8,2	4,97	7,98
Пластина из 5 слоев, скорость удара 346 м/с				
Образец № 2	Ультразвуковой метод		Визуальный контроль	
Глубина залегания дефекта (мм)	Входное отверстие	Выходное отверстие	Входное отверстие	Выходное отверстие
				
Площадь расслоения, $S(\text{см}^2)$	1,27	6,0	1,63	5,78
Численное моделирование по слоям, $S=6\text{ см}^2$, межслойные дефекты				
1-2	2-3	3-4	4-5	Выходное отверстие
				

Выводы по главе 5

Получены результаты комплексного исследования внутренних дефектов в образцах после ударных повреждений диагностическими и численными методами. Определены площади расслоения и глубина залегания дефектов различными способами. Для анализа межслойных дефектов в образцах из КМ после ударного повреждения применяется комплексный контроль, включающий несколько методов неразрушающего контроля: визуальный контроль,

ультразвуковую дефектоскопию, метод активной термографии и сопоставление результатов с численным моделированием. Установлено, что результаты, полученные численным моделированием межслойных дефектов и результаты неразрушающего контроля дефектов типа расслоений, полученные разными методами, согласуются удовлетворительно.

Неразрушающие методы контроля имеют исключительно широкие возможности при решении задач обеспечения качества, надежности и стойкости элементов конструкций из многослойных КМ, так как обладают высокой информативностью, а будучи неразрушающими методами, позволяют осуществить контроль материалов и изделий на всех этапах изготовления. Несмотря на успешное применение методов неразрушающего контроля следует отметить, что каждый из них в отдельности не всегда обеспечивает получение исчерпывающей и абсолютно достоверной информации о наличии межслойных дефектов. В связи с этим целесообразно использовать комплексный подход, предусматривающий одновременное применение нескольких различных методов неразрушающего и разрушающего контроля в сочетании с численными методами. Такой подход позволяет зафиксировать все выявленные дефекты, сопоставить результаты исследований с предварительной оценкой качества изделий и принять обоснованное решение о возможности их дальнейшего использования или необходимости отбраковки.

Выводы и заключение по диссертационной работе

В диссертационной работе решена задача, связанная с численным моделированием динамических процессов многослойных КМ при локальном ударе и получены следующие результаты:

1. Выполнен цикл экспериментальных исследований пластин из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками. Предложена методика виртуальных испытаний на основе комплексного экспериментального исследования и численного моделирования. Установлено, что скорость ударника, размеры внутренних экспериментальных повреждений пластины, снятые высокоскоростной камерой, совпадают на 95–98% с численными моделями.

2. Разработана расчетно-экспериментальная методика оптимального армирования многослойных КМ. Установлено, что при оптимальном армировании скорость пробития уменьшается за счет увеличения площади межслойных дефектов в материале. Результаты экспериментов и численных расчетов показали, что скорость ударника снижается от 31 до 56% после пробития пластины, при этом наблюдается увеличение площади межслойных дефектов до 45%.

3. Предложено аналитическое решение задачи устойчивости и разрушения тонкостенной сжатой пластины из многослойных КМ с межслойными сквозными дефектами, полученными в результате высокоскоростного удара. Определены жесткостные характеристики многослойных КМ по экспериментально полученным объемным долям армирующих элементов и связующего.

4. Получены результаты комплексного исследования внутренних дефектов в образцах после ударных повреждений диагностическими и численными методами. Определены площади расслоения и глубина залегания дефектов различными способами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абросимов Н. А. Моделирование нелинейного деформирования и потери устойчивости композитных оболочечных конструкций при импульсных воздействиях: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 01.02.06. / Н. А. Абросимов. Нижний Новгород, 1999. 385 с.
2. Алфутов Н. А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н. А. Алфутов, П. А. Зиновьев, В. Г. Попов // Библиотека расчетчика. Москва: Машиностроение, 1984. 262 с.
3. Аннин Б. Д. Проектирование слоистых и волокнистых композитов с заданными характеристиками / Б. Д. Аннин, А. Г. Колпаков // Прикладная механика и техническая физика. 1990. № 31:2. С. 136–150.
4. Балданов А. Б. Моделирование процессов деформирования и разрушения слоистых композиционных материалов при локальном ударе / А. Б. Балданов, Л. А. Бохоева, А. С. Бочектуева // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 1. С. 2–7.
5. Биодобавки на основе коллагена в полимерных композиционных материалах / Л. А. Бохоева, Д. В. Шалбуев, А. Б. Балданов, Т. Б. Тумурова // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2022. Т. 14, № 2.
6. Бойчук А. С. Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ / А. С. Бойчук, А. В. Степанов, Е. И. Косарина // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 41–46.
7. Болотин В. В. Дефекты типа расслоений в конструкциях из композиционных материалов / В. В. Болотин // Механика композиционных материалов. 1984. Т. 2. С. 239–256.
8. Болотин В. В. Устойчивость сжатых элементов с дефектами типа расслоений / В. В. Болотин, З. Х. Зебельян, Л. А. Курзин // Проблемы прочности. 1980. № 7. С. 3–8.

9. Болотин В. В. Механика зарождения и начального развития усталостных трещин / В. В. Болотин // Физико-химическая механика материалов. 1986. Т. 22, № 1. С. 18–23.
10. Болотин В. В. Механика многослойных конструкций / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. Москва, 1980. 375 с.
11. Бохоева Л. А. Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами: монография / Л. А. Бохоева. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2007. 192 с.
12. Бохоева Л. А. Моделирование лопасти ветрогенератора из композиционных материалов / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, В. А. Зайцев // Вестник ВСГУТУ. 2013. Т. 2, № 41. С. 24–29.
13. Бохоева Л. А. Обеспечение жесткости консоли крыла беспилотного летательного аппарата за счет оптимального угла укладки волокон / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, В. Е. Рогов // III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций: сборник статей / ответственный редактор А. А. Бохоева (Улан-Удэ, 24–28 августа 2018 г.). Улан-Удэ, 2019. С. 277–281.
14. Бохоева Л. А. Прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, В. Е. Рогов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 87–92.
15. Бохоева Л. А. Разработка оптимальной конструкции многослойной консоли крыла беспилотного летательного аппарата с экспериментальным подтверждением / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, А. С. Чермошенцева // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 1. С. 65–75.
16. Бохоева Л. А. Особенности межслойного разрушения при ударном нагружении композиционных материалов с переменным углом укладки слоев / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, В. Е. Рогов // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024. № 2. С. 50–60.

17. Бохоева Л. А. Особенности расчета на прочность элементов конструкции из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами: Монография / Л. А. Бохоева. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2007. № 1. 192 с..
18. Бохоева Л. А. Теоретическая оценка максимальных размеров безопасных дефектов типа отслоений / Л. А. Бохоева, В. Б. Антохонов, Б. И. Зангеев // Проблемы механики современных машин: материалы международной научной конференции. Улан-Удэ, 2000. С. 14–15..
19. Бохоева Л. А. Влияние угла укладки волокон в слое многослойных пластин на размеры повреждений, полученных при ударных воздействиях / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, В. А. Титов // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: материалы XVI Международной научно-практической конференции / ответственный редактор Д. А. Стародубцева (г. Иркутск, 3–7 июля 2023 г.). Иркутск, 2023. С. 121–124.
20. Бохоева Л. А. Математическое моделирование потери устойчивости локальных расслоений, полученных в результате скоростного удара / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, В. Е. Рогов // Наука и инновации. 2022. № 12(132). С. 1–16.
21. Браутман Л. Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость: перевод с английского / Л. Браутман; под редакцией Г. П. Черепанова. Москва: Мир, 1978. 483 с.
22. Ванин Г. А. Устойчивость оболочек из армированных материалов / Г. А. Ванин, Н. П. Семенюк, Р. Ф. Емельянов. Киев: Наукова думка, 1978. 212 с.
23. Васильев В. В. Механика конструкций из композитных материалов / В. В. Васильев. Москва: Машиностроение, 1988. 269 с.
24. Васильев В. В. Композиционные материалы: справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин. Москва: Машиностроение, 1990. 512 с.

25. Вильдеман В. Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В. Э. Вильдеман, Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов; под редакцией Ю. В. Соколкина. Москва: Наука, 1997. 288 с.
26. Влияние добавления нанопорошков на прочность многослойных композитных материалов / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, В. Е. Рогов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87(8). С. 42–50.
27. Волны в сплошных средах: учебное пособие / А. Г. Горшков, А. Л. Медведский, Л. Н. Рабинский, Д. В. Тарлаковский. Москва: Физматлит, 2011. 468 с.
28. Гагин Е. Н. Количественное определение неравноплотности пористых неметаллических материалов / Е. Н. Гагин, В. А. Гольцев, Т. Н. Ермакова // Сборник докладов пятой отраслевой научно-технической конференции по НМК. Андропов, 1986. С. 19–20.
29. Генералов А. С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом / А. С. Генералов, В. В. Мурашов, М. А. Далин // Авиационные материалы и технологии: научно-технический сборник. Москва: ВИАМ, 2012. Вып. 1. С. 42–47.
30. ГОСТ. 56211 – 2014. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия. Москва, 2015.
31. ГОСТ. Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ИЗДЕЛИЙ. 2021.
32. Димитриенко Ю. И. Моделирование процессов пробивания композитных текстильных преград / Ю. И. Димитриенко, И. Д. Димитриенко // Инженерный журнал: Наука и Инновации. 2014. № 4. С. 1–23.
33. Динамика удара: перевод с английского / Д. А. Зукас, Т. Николас, Х. Ф. Свифт [и др.]. Москва: Мир, 1985. С. 296.
34. Жихарев М. В. Оценка прочности высоконагруженных пластин из композитных материалов при локальном ударном воздействии: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.02.04 / М. В. Жихарев. Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. ун-та, 2019. 125 с.

35. Жихарев М. В. Баллистические повреждения слоистого стеклопластика и их ремонт методом ультразвуковой пропитки / М. В. Жихарев, С. Б. Сапожников // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 4. С. 94–109.

36. Закономерности реализации случайных ударных воздействий на конструкцию крыла коммерческого самолета / С. В. Дубинский, Ю. М. Фейгенбаум, А. А. Селихов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4–3. С. 604–611.

37. Зелепугин А. С. Численное моделирование разрушения многослойных композитов «титан – титановый титана» при высокоскоростном ударе / А. С. Зелепугин, Зелепугин А. С. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 11–2. С. 194–198.

38. Зиновьев П. А. Предельные возможности композитных структур / П. А. Зиновьев, А. А. Смердов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2005. № S2. С. 106–128.

39. Игнатова А. В. Экспериментальное исследование и численное моделирование упругих характеристик и прочности пористой керамики / А. В. Игнатова, О. А. Кудрявцев, С. Б. Сапожников // PNRPU Mechanics Bulletin. 2015. № 4. С. 121–137.

40. Ильюшин А. А. Пластичность. Упруго-пластические деформации / А. А. Ильюшин. Москва: УРСС, 2018. 392 с.

41. Испытание на удар многослойных композиционных образцов / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, А. В. Перевалов [и др.] // VIII Международная конференция проблемы механики современных машин: сборник статей конференции. Улан-Удэ, 2022. С. 412–416.

42. Канаун С. К. Метод самосогласованного поля в задаче об эффективных свойствах упругого композита / С. К. Канаун // Прикладная механика и техническая физика. 1975. № 16(4). С. 194–203.

43. Качанов Л. М. Разрушение композитных материалов путем расслоения / Л. М. Качанов // Механика полимеров. 1976. № 5. С. 918–922.

44. Кириллов В. М. Патроны стрелкового оружия / В. М. Кириллов, В. М. Сабельников, Кл. Рипол. Москва: ЦНИИ информации, 1980. 372 с.
45. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация / М. А. Колтунов. Москва: Высшая школа, 1976. 276 с.
46. Коцюба О. А. Методология прогнозирования объемов применения полимерных композиционных материалов в отечественных гражданских самолетах на долгосрочные периоды / О. А. Коцюба, А. В. Кондратьев, В. В. Кириченко // Технологические системы. 2017. № 80/3.
47. Крегерс А. Ф. Определение деформативных свойств композитного материала, армированного пространственно-криволинейной арматурой / А. Ф. Крегерс // Механика композиционных материалов. 1979. № 5. С. 790–793.
48. Кристенсен Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. Москва: Мир, 1974. 338 с.
49. Крундаева А. Н. Разработка конструкции комбинированного корпуса и расчет его динамической прочности в случае обрыва лопадки ротора / А. Н. Крундаева, Ю. Н. Шмотин // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 73. С. 1–20.
50. Кузьмин М. А. Расчеты на прочность элементов многослойных композитных конструкций / М. А. Кузьмин, Д. Л. Лебедев, Б. Г. Попов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.
51. Кунин И. А. Теория упругих сред с микроструктурой / И. А. Кунин. Москва: Наука, 1975. 416 с.
52. Ланге Ю. В. Импульсный вариант акустического импедансного метода неразрушающего контроля / Ю. В. Ланге // Дефектоскопия. 1987. № 6. С. 13–19.
53. Ле В. Т. Численное моделирование ударных повреждений льдом композитных панелей самолета / В. Т. Ле // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30, № 4. С. 120–129.
54. Лебедев И. К. Эксплуатационная долговечность элементов авиаконструкций из композиционных материалов: диссертация на соискание

ученой степени кандидата технических наук: 05.22.14 / И. К. Лебедев. Москва: МГТУ ГА, 2011. 212 с.

55. Левин В. М. К определению эффективных упругих модулей композитных материалов / В. М. Левин // Доклады Академии наук. 1975. Т. 220, № 5. С. 1042–1045.

56. Легкие баллистические материалы / под редакцией А. Бхатнагара. Москва: Техносфера, 2011. 392 с.

57. Ложкова Д. С. Экспериментальные исследования по оценке дефектности сварных соединений основных деталей ГТД / Д. С. Ложкова, И. С. Краснов // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 10–16.

58. Малмейстер А. К. Сопротивление полимерных и композитных материалов / А. К. Малмейстер, В. П. Тамуж, Г. А. Тетере. Рига: Зинатне, 1980. 572 с.

59. Матвиенко Ю. Г. Исследование кинетики разрушения однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии и видеорегистрации / Ю. Г. Матвиенко, И. Е. Васильев, Д. В. Чернов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 11. С. 45–61.

60. Медведский А. Л. Поведение слоистых элементов конструкций из полимерного композита с внутренними дефектами при нестационарных воздействиях / А. Л. Медведский, М. И. Мартыросов, А. В. Хомченко // Механика композиционных материалов и конструкций. 2020. Т. 26, № 2. С. 259–268.

61. Милейко С. Т. Углеметаллические волоконные композиты / С. Т. Милейко // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сборник докладов XIII Международного симпозиума. Минск, 2023. С. 387–404.

62. Митрофанов О. В. Оценка распространения поверхностных дефектов типа расслоения несимметричной структуры в обшивке из композитных материалов при сжатии / О. В. Митрофанов, Т. С. Огнянова // Актуальные вопросы науки. 2016. № 26. С. 63–73.

63. Митрофанов О. В. Оценка геометрически нелинейного поведения коротких поверхностных дефектов анизотропной структуры в композитных панелях при сжатии / О. В. Митрофанов, М. В. Шкурин, А. А. Дудченко // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. Т. 4. С. 1–14.

64. Моделирование и изготовление пресс-форм для объемных деталей из композиционных материалов / Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов, А. В. Перевалов, А. С. Чермошенцева // Образование и наука: сборник статей национальной научно-практической конференции / ответственный редактор Л. А. Бохоева (Улан-Удэ, 13–17 апреля 2020 г.). Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2020. С. 19–27.

65. Моделирование оптимальной многослойной пластины из композиционных материалов для снижения скорости после удара / Л. А. Бохоева, В. Е. Рогов, А. Б. Балданов, Ю. Н. Иванов // Машиностроение и инженерное образование. 2022. Т. 3–4, № 70. С. 3–11.

66. Моделирование трещиноподобных дефектов в слоистой композитной конструкции / А. С. Урнев, А. С. Чернятин, Ю. Г. Матвиенко, И. А. Разумовский // Машиностроение и инженерное образование. 2017. Т. 3(52). С. 64–72.

67. Моссаковский В. И. Нелинейная модель деформирования оболочек с расслоениями / В. И. Моссаковский, Н. И. Ободан, И. П. Железко // Доклады Академии наук. 1985. Т. 282, № 5. С. 1070–1073.

68. Мурашов В. В. Акустический дефектоскоп для контроля многослойных конструкций / В. В. Мурашов, Н. Н. Детинов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1982. № 11. С. 68–70.

69. Мягков Н. Н. Экспериментальное и численное исследование высокоскоростного взаимодействия ударника с дискретными экранами / Н. Н. Мягков, Т. А. Шумихин // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4(4). С. 1648–1650.

70. Немировский Ю. В. Прочность элементов конструкций из композитных материалов / Ю. В. Немировский, Б. С. Резников. Новосибирск: Наука, 1986. 165 с.

71. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток / А. С. Бойчук, А. С. Генералов, М. А. Далин, А. В. Степанов // Все материалы. Энциклопедический справочник. Москва, 2012. №10. С. 38–43.

72. Несущая способность панелей из композиционных материалов при наличии эксплуатационных повреждений / В. И. Голован, Ю. И. Дударьков, Е. А. Левченко, М. В. Лимонин // Труды МАИ. 2020. Т. 110. С. 1–26.

73. Овчинский А. С. Процессы разрушения композиционных материалов. Имитация микро-и макромеханизмов на ЭВМ / А. С. Овчинский. Москва: Наука, 1988. 278 с.

74. Основные тенденции развития акустических методов неразрушающего контроля / М. А. Далин, А. С. Генералов, А. С. Бойчук, Д. С. Ложкова // Авиационные материалы и технологии. 2013. Т. 1. С. 64–69.

75. Основы теории межфазного слоя / И. Ф. Образцов, С. А. Лурье, П. А. Белов [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. 2004. Т. 10(4). С. 596–612.

76. Особенности применения метода конечных элементов для расчета судовых валопроводов из полимерных композиционных материалов / В. А. Коршунов, Р. С. Мудрик, Д. А. Пономарев, А. А. Родионов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Т. S-I, № 2. С. 113–118.

77. Особенности ультразвукового контроля ремонта монолитных зон вертолетных лопастей из полимерных композиционных материалов / А. С. Бойчук, В. Ю. Чертищев, И. А. Диков, А. С. Генералов // Труды ВИАМ. 2023. Т. 12(130). С. 115–124.

78. Парцевский В. В. Расслоение в полимерных композитах. Обзор / В. В. Парцевский // Известия Академии наук. Механика твердого тела. 2003. № 5. С. 62–95.

79. Патент на полезную модель № RU 192733 U1. Разборная оснастка для изготовления консоли крыла беспилотного летательного аппарата: заявл.

12.03.2019: опубл. 27.09.2019 / Л. А. Бохоева, В. Е. Рогов; заявитель и патентообладатель ООО «Малое инновационное предприятие "Байкальский центр прочности"».

80. Победря Б. Е. Механика композиционных материалов / Б. Е. Победря. Москва: Моск. ун-та, 1984. 336 с.

81. Полилов А. Н. Этюды по механике композитов / А. Н. Полилов. Москва: Физико-математическая литература, 2015. 308 с.

82. Портнов Г. Г. Особенности испытания высокопрочных однонаправленных композитов при одноосном растяжении / Г. Г. Портнов, В. Л. Кулаков, А. К. Арнаутков // Пластические массы. 2008. № 4. С. 40–45.

83. Применение наноразмерных компонентов в многослойных композиционных материалах / Л. А. Бохоева, В. Е. Рогов, Е. Б. Бочектуева [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16, № 2. С. 180–188.

84. Проектирование самолетов / С. М. Егер, В. Ф. Мишин, Н. К. Лисейцев [и др.]. Москва: Машиностроение, 1983. 616 с.

85. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю. Н. Работнов. Москва: Наука, 1977. 384 с.

86. Расчет прочности слоистых плоских экранов при ударе с использованием CAD/CAE-систем / Л. А. Бохоева, Е. Б. Бочектуева, А. Б. Балданов, В. Ю. Курохтин // III Международная конференция молодых ученых по современным проблемам материалов и конструкций: материалы конференции (Улан-Удэ, 2019 г.). Улан-Удэ, 2019. С. 281–287.

87. Расчетные исследования влияния некоторых видов эксплуатационно-технологических повреждений на несущую способность стрингерных панелей из ПКМ / Ю. И. Дударьков, Е. А. Левченко, М. В. Лимонин, А. В. Шевченко // Труды МАИ. 2019. Т. 106. С. 1–24.

88. Рикардс Р. Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин / Р. Б. Рикардс. Рига: Зинатне, 1988. 284 с.

89. Рогов В. Е. Компьютерное моделирование несущих стержневых элементов мобильных зданий из полимерных композиционных материалов / В. Е. Рогов, А. Б. Балданов, В. Ю. Курохтин // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9, № 2. С. 1–7.
90. Сапожников С. Б. Разрушение тканевых композитов с концентраторами напряжений: учет неупругого деформирования в численном моделировании / С. Б. Сапожников // COMPOSITES and NANOSTRUCTURES. 2020.
91. Сарбаев Б. С. Численный анализ напряжений и деформаций оболочки вращения из слоистого композиционного материала с учетом дефектов структуры в виде расслоений / Б. С. Сарбаев, А. В. Коновалов, Ю. Ю. Ширшов // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 4(164). С. 3–9.
92. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. Москва: Наука, 1986. Т. 1. 503 с.
93. Сендецки Д. Механика композиционных материалов / Д. Сендецки; под редакцией Дж. Сендецки; перевод с английского. Москва: Мир, 1978. 569 с.
94. Синельников Э. Г. Результаты экспериментальных исследований высокоскоростного удара по разнесенной экранной защите / Э. Г. Синельников, М. В. Житный, П. С. Гончаров // Известия Тульского государственного университета. 2019. № 6. С. 144–150.
95. Ставров В. П. Механика композиционных материалов: учебное пособие / В. П. Ставров. Минск: Изд-во БГТУ, 2008. 260 с.
96. Староверов О. А. Деформирование и разрушение полимерных композитов в условиях комплексных механических воздействий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.02.04 / О. А. Староверов. Пермь, 2020. 140 с.
97. Структурно-феноменологическая концепция и акустико-эмиссионная диагностика композитных стрингеров в условиях трехточечного изгиба / Ю. Г. Матвиенко, И. Е. Васильев, И. Е. Чернов [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2024. Т. 1. С. 48–56.

98. Тарнопольский Ю. М. Расслоение сжимающих стержней из композитов / Ю. М. Тарнопольский // Разрушение композитных материалов. Рига, 1979. С. 160–166.

99. Титов В. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024661132. Определения жесткостных характеристик многослойного композиционного материала / В. А. Титов, Л. А. Бохоева, А. Б. Балданов [и др.]. Россия: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2024.

100. Трапезников А.К. Просвечивание материалов лучами Рентгена / А. К. Трапезников. Москва; Ленинград: Оборонгиз, 1939. 347 с.

101. Трапезников А. К. Рентгено-дефектоскопия / А. К. Трапезников. Москва: Изд. и 1-я тип. Машгиза в Л., 1948. 424 с.

102. Урнев А. С. Экспериментально-численное определение размеров дефектов типа расслоения в слоистых композитных материалах / А. С. Урнев, А. С. Чернятин, Ю. Г. Матвиенко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84(10). С. 59–66.

103. Ушаков А. Е. Методологические основы конструктивно-технологического обеспечения живучести авиаконструкций, выполненных из полимерных композитных материалов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.07.04 / А. Е. Ушаков. Москва, 1992. 418 с.

104. Фейгенбаум Ю. М. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов / Ю. М. Фейгенбаум, С. В. Дубинский // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. Т. 1, № 187. С. 83–91.

105. Фейгенбаум Ю. М. Место и роль неразрушающего контроля в системе поддержания летной годности композитных конструкций / Ю. М. Фейгенбаум, Ю. А. Миколайчук, Е. С. Метелкин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9(320). С. 71–83.

106. Чернушин В. А. Особенности неразрушающего контроля многослойных композиционных деталей авиационных двигателей /

В. А. Чернушин, Д. Ю. Русаков, А. А. Курятин // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. 2021. Т. 1. С. 180–186.

107. Чернышев С. Л. Новый этап применения композиционных материалов в авиастроении / С. Л. Чернышев // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2013. № 1. С. 3–10.

108. Чернякин С. А. Разработка методик расчетно-экспериментальной оценки прочности и надежности композитных элементов конструкций с учетом расслоений: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.02.06 / С. А. Чернякин. Самара, 2020. 231 с.

109. Экспериментальное исследование образцов из слоистых композиционных материалов на прочность при добавлении нанопорошков / Л. А. Бохоева, В. Е. Рогов, А. С. Чермошенцева, А. Б. Балданов // *Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ-2020): сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате*. 2020. С. 53–56.

110. Эксплуатационная несущая способность конструкций отечественных и зарубежных воздушных судов транспортной категории из полимерных композиционных материалов. Ч. 1. Общая постановка проблемы / А. В. Андреев, А. С. Андреев, А. С. Бычков, А. В. Кондратьев // *Вісник ОНМУ*. 2016. Т. 1(47).

111. Abrate S. Impact on laminated composite materials / S. Abrate. *Applied Mechanics Reviews*. 1991; 44(4).

112. Adams D. F. Transverse Normal Loading of a Unidirectional Composite / D. F. Adams, D. R. Doner. *Journal of Composite Materials*. 1967; 1(2): 152–164.

113. Advisory Circular – Composite Aircraft Structure. U.S. Department of Transportation – Federal Aviation Administration (FAA) / Advisory Circular – Composite Aircraft Structure. 2009. Vol. AC-107B. № FAA.

114. Ali M. Palliatives for Low Velocity Impact Damage in Composite Laminates / M. Ali, S. C. Joshi, M. T. H. Sultan. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017: 1–16.

115. Annin B. D. Nonclassical models of the theory of plates and shells / B. D. Annin, Y. M. Volchkov. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016; 57(5): 769–776.
116. ANSYS, I. ANSYS Inc. PDF Documentation for Release 15.0 / I. ANSYS. 2014. URL: http://www.ansys.com/es_es p. (accessed: 20.03.2023).
117. ASTM. ASTM D5687/D5687M-95. Standard Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation / ASTM. 2007. 16 p.
118. Backer A. Composite Materials for Aircraft Structures / A. Backer, S. Dutton, D. Kelly. Reston, VA : American Institute of Aeronautic and Astronautic. 2004. P. 1–400.
119. Baker A. A. Composite materials for aircraft structures. Vol. AIAA / A. A. Baker, A. Alan. 2004. 604 p.
120. Banat D. Failure assessment of thin-walled FML profiles during buckling and postbuckling response / D. Banat, R. J. Mania. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 112: 278–289.
121. Barbero E. J. Ultimate bending strength of composite beams / E. J. Barbero, S. H. Fu, I. Raftoyiannis. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1991; 3(4): 292–306.
122. Barbero E. Buckling testing of composite columns / E. Barbero, J. Tomblin. *AIAA Journal*. 1992; 30(11): 2798–2800.
123. Batra R. C. Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates / R. C. Batra, G. Gopinath, J. Q. Zheng. *Composite Structures*. 2012; 94(2): 540–547.
124. Beran M. J. Statistical Continuum Theories / M. J. Beran, A. Pytte. *American Journal of Physics*. 1968; 36(10): 923–923.
125. Berk B. An experimental and numerical investigation on low velocity impact behavior of composite plates / B. Berk, R. Karakuzu, A. Murat Icten. *Journal of Composite Materials*. 2016; 50(25): 3551–3559.

126. Beznea E.-F. Buckling and Post-buckling Analysis of Composite Plates / E.-F. Beznea, I. Chiric // *InTech*. 2011.
127. Bilalis E. P. Structural design optimization of composite materials drive shafts / E. P. Bilalis, M. S. Keramidis, N. G. Tsouvalis. *Marine Structures*. 2022; 84: 103–194.
128. Bisagni, C. Numerical analysis and experimental correlation of composite shell buckling and post-buckling / C. Bisagni. *Composites Part B: Engineering*. 2000; 31(8): 655–667.
129. Bokhoeva L. A. The features of interlayer fracture of composite materials with a variable layup angle under impact loading / L. A. Bokhoeva, A. B. Baldanov, V. E. Rogov. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2024; 2: 50–60.
130. Bottega W. J. Delamination buckling and growth in lamination / W. J. Bottega, A. Maewal. *Journal Applied Mechanics*. 1983; 50(1): 184–189.
131. Buchanan G. R. Nonlinear analysis for a champed bar / G. R. Buchanan, Y. K. Hung, H. J. Chin. *Transactions of the American society of Mechanical Engineers*. 1969; 36(2): 355–357.
132. Budiaushy B. Theory of buckling and post buckling of elastic structures / B. Budiaushy. 1974. Vol. 14. P. 1–65.
133. Cantwell W. J. The impact resistance of composite materials – a review / W. J. Cantwell, J. Morton. *Composites*. 1991; 22(5).
134. Chen H. P. Shear deformation theory for compressive delamination buckling and growth / H. P. Chen. *AIAA Journal*. 1991; 29(5): 813–819.
135. Chen N. Z. Progressive failure analysis for prediction of post-buckling compressive strength of laminated composite plates and stiffened panels / N. Z. Chen, C. Guedes Soares. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2007; 26(10): 1021–1042.
136. Cherniaev A. Weight-Efficiency of Conventional Shielding Systems in Protecting Unmanned Spacecraft from Orbital Debris / A. Cherniaev, I. Telichev. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2017; 54(1): 75–89.

137. Choi H. Y. A New Approach toward Understanding Damage Mechanisms and Mechanics of Laminated Composites Due to Low-Velocity Impact: Part II – Analysis / H. Y. Choi, H.-Y. T. Wu, F.-K. Chang. *Journal of Composite Materials*. 1991; 25(8): 1012–1038.
138. Choi I.-H. Analytical and experimental studies on the low-velocity impact response and damage of composite laminates under in-plane loads with structural damping effects / I.-H. Choi, I.-G. Kim, C.-H. Ahn. *Composites Science and Technology*. 2010; 70(10): 1513–1522.
139. Clark G. Morphology of impact damage growth by fatigue in carbon fibre composite laminates / G. Clark, D. S. Saunders. *Materials Forum. Pergamon Press*. 1991; 15(4): 333–342.
140. Delamination of impacted composite structures by cohesive zone interface elements and tiebreak contact / F. Dogan, H. Hadavinia, T. Donchev, P. Bhonge. *Open Engineering*. 2012; 2(4): 612–626.
141. Delfosse D. Non-Penetrating Impact Behavior of CFRP at Low and Intermediate Velocities / D. Delfosse, A. Poursartip, D. E. Coxon. ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1995. 333–350 p.
142. Determination of the Optimal Structure of a Layered Composite Material for Maximum Strength Characteristics / L. A. Bokhoeva, I. O. Bobarika, A. B. Baldanov [et al.]. *Materials Science Forum*. 2021; 1040: 124–131.
143. Dubinskii S. A study of accidental impact scenarios for composite wing damage tolerance evaluation / S. Dubinskii, Y. Feygenbaum, M. E. Senik. *The Aeronautical Journal*. 2019; 123(1268): 1724–1739.
144. Evci C. An experimental investigation on the impact response of composite materials / C. Evci, M. Gülgeç. *International Journal of Impact Engineering*. 2012; 43: 40–51.
145. Faivre V. Damage tolerant composite fuselage sizing, characterization of accidental damage threat / V. Faivre, E. Morteau. *Airbus Tech. Mag. FAST*. 2011; 48: 10–16.

146. Fei Z. Post Buckling growth of a circular delamination in a laminate under compression and bending / Z. Fei, W. L. Yin. SECTAM XII: 12 th lontheast. Conf.Thear, and Appl. Mech., Callaway Gardens, Ga, May, 10–11. 1984; 2: 130–134.
147. Firestone F. A. Refinements in Supersonic Reflectoscopy. Polarized Sound / F. A. Firestone, J. R. Frederick. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1946; 18(1): 200–211.
148. Fuoss E. Effects of Stacking Sequence on the Impact Resistance in Composite Laminates-Part 1: Parametric Study[J]. / E. Fuoss, P. V. Straznicky, C. Poon. *Compos. Struct.* 1998; 41: 67–77.
149. Fuoss E. Effects of Stacking Sequence on the Impact Resistance in Composite Laminates Part 2: Prediction Method[J] / E. Fuoss, P. V. Straznicky, C. Poon. *Compos. Struct.* 1998: 177–186.
150. Ghasemnejad H. Off-axis Crashworthiness Characteristic of Woven Glass/Epoxy Composite Box Structures / H. Ghasemnejad, H. Hadavinia. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2010; 29(15): 2306–2330.
151. Ghasemnejad H. Post-buckling failure in multi-delaminated composite wind turbine blade materials / H. Ghasemnejad, L. Occhineri, D. T. Swift-Hook. *Materials and Design*. 2011; 32(10). 5106–5112.
152. Graf T. Adhesives modeling with LS-DYNA: Recent developments and future wor / T. Graf, A. Haufe, F. Andrade. *Proceedings of the Nordic LS-DYNA Forum; DYNAmore GmbH, Stuttgart*. 2014.
153. Greenhalgh E. The assessment of novel materials and processes for the impact tolerant design of stiffened composite aerospace structures / E. Greenhalgh, M. Hiley. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2003; 34(2): 151–161.
154. Grujicic M. Multi-scale ballistic material modeling of cross-plyed compliant composites / M. Grujicic, G. Arakere, T. He [et. al]. *Composites Part B: Engineering*. 2009; 40(6): 468–482.
155. Guoqi Z. Penetration of laminated Kevlar by projectiles – II. Analytical model / Z. Guoqi, W. Goldsmith, C. K. H. Dharan. *International Journal of Solids and Structures*. 1992; 29(4): 421–436.

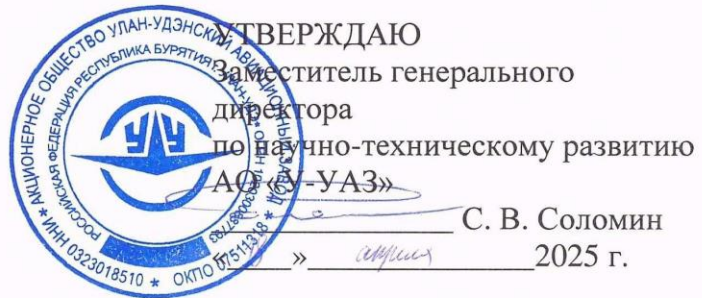
156. Gupta A. K. Postbuckling response of composite laminated plates with evolving damage / A. K. Gupta, B. P. Patel, Y. Nath. *International Journal of Damage Mechanics*. 2014; 23(2): 222–244.
157. Hall Z. E. C. The effectiveness of patch repairs to restore the impact properties of carbon-fibre reinforced-plastic composites / Z. E. C. Hall, J. Liu, R. A. [et al.]. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022; 270: 108–570.
158. Hardt P. Von Der. Principles and Practice of Neutron Radiography / P. Von Der Hardt, H. Röttger. *Neutron Radiography Handbook*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1981. P. 1–90.
159. Heimbs, S. Simulation of Low Velocity Impact on Composite Plates with Compressive Preload / S. Heimbs, S. Heller, P. Middendorf. *LS-DYNA Anwenderforum*. 2008.
160. Hong S. On the Relationship between Impact Energy and Delamination Area[J]. / Hong S, Liu D. // *Exp. Mech*. 1989; 29: 115–120.
161. Influence of modification by nanodispersed powders on layered composite aerospace hulls and protective shields / A. S. Chermoshentseva, A. M. Pokrovskiy, L. A. Bokhoeva [et al.]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 560(1): 012178.
162. Kessler A. Correlation between interphase-relevant tests and the impact-damage resistance of glass/epoxy laminates with different fibre surface treatments / A. Kessler, A. Bledzki. *Composites Science and Technology*. 2000; 60(1): 125–130.
163. Kim S. Postbuckling of delaminated composites under compressive loads using global-local approach / S. Kim, M. Cho. *AIAA Journal*. 1999; 37(6): 774–778.
164. Kollár, L. P. Local buckling of fiber reinforced plastic composite structural members with open and closed cross sections / L. P. Kollár. *Journal of Structural Engineering*. 2003; 129(11): 1503–1513.
165. Kumar Y. Comparison of two progressive damage models for predicting low-velocity impact behavior of woven composites / Y. Kumar, M. Rezasefat, S. C. [et al.]. *Thin-Walled Structures*. 2024; 197: 111–611.

166. Lee C. H. Importance of Interfacial Adhesion Condition on Characterization of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review / C. H. Lee, A. Khalina, S. H. Lee. *Polymers*. 2021; 13(3): 438.
167. Lee S. J. Non-linear response of laminated composite plates under thermomechanical loading / S. J. Lee, J. N. Reddy. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2005; 40(7): 971–985.
168. Li X. Assessment of failure criteria and damage evolution methods for composite laminates under low-velocity impact / X. Li, D. Ma [et al.]. *Composite Structures*. 2019; 207: 727–739.
169. Lin S. Experimental and Numerical Study on Low Velocity Impact Damage of a Shear Dominated Composite Laminate / S. Lin, A. M. Waas. *AIAA Scitech*. 2019 Forum. 2019.
170. LSTC. LS-DYNA: Keyword User's Manual: Material Models. Vol. II / LSTC. 2016.
171. Matvienko Y. G. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording / Y. G. Matvienko. *Acta Mechanica*. 2021; 232: 1889–1900.
172. Ojo S. O. A new analytical critical thrust force model for delamination analysis of laminated composites during drilling operation / S. O. Ojo, S. O. Ismail, H. N. Paggi. *Composites Part B: Engineering*. 2017; 124: 207–217.
173. Olsson R. Impact response of orthotropic composite plates predicted from a one-parameter differential equation / R. Olsson. *AIAA Journal*. 1992; 30(6): 1587–1596.
174. Olsson R. Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates / R. Olsson. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000; 31(8): 879–887.
175. Opiela J. N. Micrometeoroid and Orbital Debris Impact Feature Size and Position Data Collected During the Post-Flight Survey of the Hubble Wide Field Planetary Camera 2 / J. N. Opiela, J.-C. Liou, P. D. Anz-Meador // NASA/TP-2012-217359. 2012.

176. Pierson M. O. Modelling the impact behaviour of fibre reinforced composite materials / M. O. Pierson. Vancouver: The Universitet of British Columbia, 1994. 1–142 p.
177. Putzar R. Experimental space debris simulation at EMI's calibre 4 mm two-stage light gas gun / R. Putzar, F. K. Schäfer. 5th European Conference on Space Debris : conference proceedings (Darmstadt, 2009) Darmstadt, Germany, ESA SP-672. 2009.
178. Radchenko V. P. Effect of creep on the elastic deformation of a laminar composite / V. P. Radchenko, Y. P. Samarin. *Mechanics of Composite Materials*. 1983; 19(2): 162–168.
179. Rahul V. Structural health monitoring of aerospace composites / V. Rahul, S. Alokita, K. Jayakrishna [et. al.]. *Elsevier*. 2019: 33–52 p.
180. Razi H. Delamination in cross-ply laminated composite subjected to low-velocity impact / H. Razi, A. S. Kobayashi. *AIAA Journal*. 1993; 31(8): 1498–1502.
181. Rossi T. A. Application of LS-DYNA Constitutive Material Model Laws to Simulate Low Velocity Impact Damage to Composite Plates / T. A. Rossi, K. Fayazbakhsh, Z. Fawaz. *Journal of Aerospace Engineering*. 2020; 33(6).
182. Sanders T. A. Penetration of composite laminates by conical indenters and projectiles (T) / T. A. Sanders. University of British Columbia, 1997. 1–148 p.
183. Segala D. B. Numerical investigation of energy absorption mechanisms in unidirectional composites subjected to dynamic loading events / D. B. Segala, P. V. Cavallaro. *Computational Materials Science*. 2014; 81: 303–312.
184. Sevkatev E. A combined experimental and numerical approach to study ballistic impact response of S2-glass fiber/toughened epoxy composite beams / E. Sevkatev, B. Liaw, F. Delale, B. B. Raju. *Composites Science and Technology*. 2009; 69(7–8): 965–982.
185. Shen Y. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Projectile Nose Shape on the Deformation and Energy Dissipation Mechanisms of the Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite / Y. Shen, Y. Wang, Z. Yan [et al.]. *Materials*. 2021; 14(15): 4208.

186. Shevchenko D. V. Methodology for constructing digital twins in railway transport / D. V. Shevchenko. *VNIIZHT Scientific Journal*. 2021; 80(2): 91–99.
187. Shivakumar K. N. Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates / K. N. Shivakumar, W. Elber, W. Illg. *AIAA Journal*. 1985; 23(3): 442–449.
188. Singh N. K. Review on impact analysis of FRP composites validated by LS-DYNA / N. K. Singh, K. K. Singh. *Polymer Composites*. 2015; 36(10): 1786–1798.
189. Skudra A. M. Creep and long-time strength of unidirectional reinforced plastics in compression / A. M. Skudra, Y. V. Auzukalns. *Polymer Mechanics*. 1973; 6(5): 718–722.
190. Sy B. L. Numerical simulation correlating the low velocity impact behaviour of flax/epoxy laminates / B. L. Sy, Z. Fawaz, H. Bougherara. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019; 126: 105582.
191. Talreja R. Assessment of damage tolerance approaches for composite aircraft with focus on barely visible impact damage / R. Talreja, N. Phan. *Composite Structures*. 2019; 219: 1–7.
192. Tanabe Y. Stress and strain measurements in carbon-related materials impacted by a high-velocity steel sphere / Y. Tanabe, M. Aoki. *International Journal of Impact Engineering*. 2003; 28(10). 1045–1059.
193. Timonin A. M. Finite-layer method: a unified approach to a numerical analysis of interlaminar stresses, large deflections, and delamination stability of composites. Part 1. Linear behavior / A. M. Timonin. *Mech. Compos. Mater.* 2013; 49(3): 231–244.
194. Timoshkov P. N. Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review) / P. N. Timoshkov, V. A. Goncharov, M. N. Usacheva. *Proceedings of VIAM*. 2022; 1: 66–75.
195. Vaziri R. Impact analysis of laminated composite plates and shells by super finite elements / R. Vaziri, X. Quan, M. D. Olson. *International Journal of Impact Engineering*. 1996; 18(7–8): 765–782.

196. Wang H. Design optimization of CFRP stacking sequence using a multi-island genetic algorithms under low-velocity impact loads / H. Wang, Y. Duan, Z. X. Abulizi. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2017; 32(3): 720-725.
197. Whitcomb J. D. Strain-energy release rate analysis of a laminate with a postbuckled delamination / J. D. Whitcomb, K. N. Shiriakumar. *Numer. Meth Fract. Mech. Proc. 4th. Ant. Conf.-San Antonio.* 1987; 581–605.
198. Wielhorski Y. Numerical modeling of 3D woven composite reinforcements: A review / Y. Wielhorski, A. Mendoza, R. S. Rubino. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2022; 154: 106729.
199. Yankovskii A. P. Using of explicit time-central difference method for numerical simulation of dynamic behavior of elasto-plastic flexible reinforced plates / A. P. Yankovskii. *Computational Continuum Mechanics.* 2016; 9(3): 279–297.
200. Yin W.-L. Delamination buckling and growth in a clamped circular plate / W.-L. Yin, Z. Fei. *AIAA Journal.* 1988; 26(4): 438–445.
201. Yin Wo-L. Ultimate axial load capacity of a delaminated beam-plate / Wo-L. Yin, S. N. Sallam, C. J. Simitse. *AIAA Journal.* 1986; 1: 123–128.
202. Zhang X. Impact on Composite Structures. S. Abrate. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK. 1998. 289 p. Illustrated. £45. ISBN 0-521-47389-6 / X. Zhang. *The Aeronautical Journal.* 1999; 103; 1029.
203. Zhang X. Impact damage with compressive preload and post-impact compression of carbon composite plates / X. Zhang, G. A. O. Davies, D. Hitchings. *International Journal of Impact Engineering.* 1999; 22: № 5.



АКТ
о применении результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертации Балданова Алдара Батомункуевича по теме «Экспериментально-численное исследование деформирования и разрушения многослойных композиционных материалов при локальном ударе» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. - «Механика деформируемого твердого тела» применены в АО «Улан-Удэнский авиационный завод».

Исследования, проводимые А. Б. Балдановым в рамках сотрудничества с АО «Улан-Удэнский авиационный завод», по моделированию процессов деформирования, повреждения, разрушения тонкостенных элементов конструкций из слоистых КМ при ударном нагружении с использованием разработанных численных и экспериментальных методик, позволят прогнозировать размеры внутренних повреждений и расслоений, образуемых при различных ударных воздействиях (удары элементами взлетно-посадочной полосы при взлете и посадке, град, птицы, случайное падение инструмента при производстве и пр.). Это обеспечит возможность их эксплуатации в необходимом режиме в течение назначенного ресурса.

Методика виртуальных испытаний элементов конструкций из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками, изложенная в диссертационной работе, позволяет эффективно провести анализ конструктивного решения конструкции из ПКМ на этапе проектирования. Экономический эффект от внедрения разработок не подсчитывался как отдельный фактор, однако ожидается положительный эффект, так как возможность обеспечения и поддержания безопасной эксплуатации элементов конструкций из КМ способствует увеличению их ресурса, тем самым снижая стоимость эксплуатации вертолета.

Начальник отдела 190

Еранская Татьяна
Григорьевна



**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«АЭРОКОМ»**

Россия, 670009, г. Улан-Удэ, ул. Любви Шевцовой, 3Б
Телефон/phone: 8-983-451-00-05
e-mail: vvv333777@yandex.ru
ИНН/ОГРН: 0326568462/1190327006781

№

от « » 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор ООО

«Аэроком»

Федоров А. В.

2025 г.



АКТ

о применении результатов диссертационной работы

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертации Балданова Алдара Батомункуевича «Экспериментально-численное исследование деформирования и разрушения многослойных композиционных материалов при локальном ударе» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. - «Механика деформируемого твердого тела» применены в ООО «Аэроком».

Использование результатов, полученных Балдановым А. Б., в частности, методика виртуальных испытаний элементов конструкций из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками наиболее перспективно использовать на этапе проектирования, с использованием статистических данных повреждений, образуемых от удара во время эксплуатации изделий из ПКМ, что позволит обеспечить уменьшение или исключение таких повреждений путем изменения конструктивной схемы, углов укладки слоев КМ будущего изделия. Экономический эффект от внедрения разработок не подсчитывался как отдельный фактор, однако ожидается положительный эффект, так как возможность обеспечения и поддержания безопасной эксплуатации элементов конструкций из КМ способствует увеличению их ресурса, тем самым снижая стоимость эксплуатации изделий.

ООО «Аэроком» начальник КТО

Карпов Станислав Юрьевич

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ВСГУТУ, кандидат технических
наук, доцент
Грешилов Анатолий Дмитриевич



2025 г.

СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационной работы Балданова Алдара Батомункуевича «Экспериментально-численное исследование деформирования и разрушения многослойных композиционных материалов при локальном ударе» в учебном процессе

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы Балданова Алдара Батомункуевича «Экспериментально-численное исследование деформирования и разрушения многослойных композиционных материалов при локальном ударе» используются в учебном процессе программы бакалавриата по направлению подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»

И.О. зав. кафедрой «Информационные технологии и
прикладная механика» ВСГУТУ,
канд. техн. наук, доцент

Е.Б. Бочектуева