

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И. И. Ползунова»,
доктор технических наук, профессор

А. М. Марков

12 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**на диссертационную работу 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»**

Актуальность диссертационного исследования. Полимерные композиционные материалы (КМ) стали одним из основных конструкционных материалов в авиационной и космической отраслях благодаря высокой удельной прочности и жесткости. Однако чувствительность слоистых КМ к ударным воздействиям, приводящая к образованию разнообразных повреждений, в том числе скрытых межслойных дефектов (расслоений), существенно снижающих их прочностные и эксплуатационные характеристики, требует разработки комплексных расчетно-экспериментальных методик их анализа и прогноза. Высокая скорость протекания процессов и их локализованный характер делают только экспериментальные методы недостаточными для регистрации полной картины разрушения композиционного материала. Численное моделирование с экспериментальным подтверждением позволяет прогнозировать процессы деформирования, повреждения и разрушения КМ, сократить количество трудоемких и дорогостоящих экспериментов и повысить результативность исследований. Это обуславливает актуальность представленной диссертационной работы.

Цель диссертационного исследования заключается в моделировании процессов деформирования, повреждения, разрушения тонкостенных элементов конструкций из слоистых композиционных материалов при ударном нагружении с использованием разработанных численных и экспериментальных методик.

Научную новизну диссертационной работы составляют следующие полученные автором результаты:

1. Проведен цикл испытаний пяти-, десяти- и двадцатислойных пластин из КМ с различной ориентацией укладки армирующих слоев при низко- и высокоскоростном ударах, 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 композиционных материалов 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.

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.

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.

Во введении сформулированы цель работы, актуальность темы, указаны методы исследования, пояснена достоверность результатов, раскрыта

научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, перечислены выносимые на защиту основные положения, а также приведены сведения об апробациях основных результатов и публикациях.

В первой главе проведен всесторонний аналитический обзор современных отечественных и зарубежных исследований в области ударного воздействия на многослойные композиты. Систематизированы виды повреждений, получаемых при ударе (расслоения, разрушение волокон и матрицы), типы ударных нагрузок (низко-, высоко- и гиперскоростные), методы их моделирования (микро-, мезо- и макромасштабные подходы) с учетом возможности прогнозирования межслойных расслоений. Проанализированы критерии разрушения (Чанг-Чанг, Цай-Бу, Хашин) и методы неразрушающего контроля дефектов, образуемых при ударе.

Во второй главе описана методика проведения натурных экспериментов на удар по пластинам из стекло- и углепластика (5, 10, 20 слоев) с использованием высокоскоростной камеры и изготовленного зажимного приспособления для жесткой фиксации испытываемых образцов. На основе полученных экспериментальных данных разработана методика виртуальных испытаний. Разработана и верифицирована методика виртуальных испытаний (цифровой двойник) в LS-DYNA. Показано высокое соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными по остаточной скорости ударника, геометрии и площади расслоений.

Третья глава посвящена новому подходу к оптимизации ударной стойкости многослойных КМ за счет целенаправленного увеличения площади расслоений, поглощающих энергию. С использованием генетического алгоритма в ANSYS определена оптимальная схема укладки слоев, снижающая остаточную скорость ударника. Разработанная методика оптимального армирования многослойных КМ рассмотрена на примере многослойной обшивки консоли крыла беспилотного летательного аппарата (БПЛА) из композиционных материалов.

В четвертой главе разработана аналитическая методика определения критических нагрузок для слоистых КМ с дефектами типа расслоений, образованных от ударного воздействия. Задача исследования устойчивости тонкостенных расслоений из КМ рассмотрена в нелинейной постановке. Дано описание нелинейного (закритического) поведения тонкостенного расслоения после потери устойчивости.

В пятой главе проведена комплексная оценка разрушения многослойных КМ под действием ударных нагрузок, определены площади,

размеров и глубины залегания расслоений с использованием методов визуального контроля, ультразвуковой дефектоскопии и их сопоставление с результатами численного моделирования.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

Замечания по диссертационной работе.

1. Цель исследования "Моделирование процессов деформирования, повреждения, разрушения тонкостенных элементов конструкций из слоистых КМ при ударном нагружении с использованием разработанных численных и экспериментальных методик" скорее является средством достижения цели, чем собственно целью работы.
2. Непонятно, почему выбраны пластины из 5-ти, 10-ти и 20-ти слоев. Чем обоснован такой выбор – ограничением по толщине пластины или прочностными свойствами?
3. Кривые зависимости скорости ударника от времени (рисунок 2.35), построенные по результатам численного моделирования для 5-ти, 10-ти, 15-ти и 20-ти слоев имеют существенные отличия, особенно отличается кривая для 10-ти слоев – нет второй «ступеньки» как для 15-ти и 20-ти слоев. Чем это вызвано, не объясняется.
4. На рисунке 2.40 область повреждений при эксперименте и численном моделировании имеют явно разную форму. У экспериментального образца явно видно разрушение волокон в обе стороны в месте пробития. В численном расчете этого нет. Чем это можно объяснить?
5. В выводе пятой главы при перечислении проведенных методов неразрушающего контроля композиционных материалов, написан «метод активной термографии», который не использовался. Имеются стилистические и орфографические ошибки. В четвертой главе на рисунке 4.8 - 4.9 в модуле упругости материала E не объяснено, в каком направлении данное значение.
6. В работе представлены результаты численного расчета на удар стеклопластика, однако не даны прочностные характеристики, которые были использованы в численном расчете.
7. В третьей главе при описании генетического алгоритма оптимизации отсутствуют конкретные параметры и критерии работы.
8. В четвертой главе рекомендуется добавить, что рассматриваемая задача устойчивости пластины с расслоением подходит для случаев, в которых нет сквозного пробития.
9. Также следовало бы более тщательно отредактировать текст изложения, например, диссертационная работа избыточна изображениями результатов численного расчета (как, например, в гл. 2.2).

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы и значимость полученных в ней результатов.

Заключение. Рассматриваемая диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, перечисленные выше

замечания не снижают теоретическую и практическую значимость полученных соискателем результатов. Работа выполнена на высоком научном уровне, ее результаты обладают новизной и научно-технической значимостью. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в 35 научных работах, 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.

Содержание диссертации и полученные результаты соответствуют паспорту специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела». Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 16.10.2024) «О порядке присуждения ученых степеней», а его автор, **Балданов Алдар Батомункуевич**, заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. - «Механика деформируемого твёрдого тела».

Диссертация и автореферат обсуждались на заседании кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и получили положительную оценку, протокол № 3__ от _4 декабря__2025 г.

Заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» АлтГТУ,
доктор технических наук, доцент Поддубный Владимир Иванович
Телефон: 8(3852) 29-08-54
E-mail: poddubnyvi@altgtu.ru

Я, Поддубный Владимир Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Балданова Алдара Батомункуевича и их дальнейшую обработку

В.И. Поддубный

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», АлтГТУ

Адрес: 656038, Российская Федерация, г. Барнаул, проспект Ленина, д. 46

Телефон: +7 (3852) 29-07-06

E-mail: altgtu@list.ru. Сайт: <https://www.altgtu.ru/>

Согласен с содержанием
Балданов А.Б.
20.12.2025

ПОДПИСЬ ЗАВЕДУЮЩЕГО
КАДРАМИ И. М. САРГЕНОВА

