

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Балданова Алдара Батомункуевича «Экспериментально-численное исследование деформирования и разрушения многослойных композиционных материалов при локальном ударе», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»

1. Актуальность диссертационного исследования. Диссертационная работа Балданова Алдара Батомункуевича посвящена экспериментально-численному исследованию деформирования и разрушения многослойных композиционных материалов (КМ) при локальном ударе. Актуальность темы не вызывает сомнений, поскольку для проектирования конструкций из КМ с высокой удельной прочностью необходим инструментарий для оценки уровня повреждений в случае динамического нагружения. Трудоемкость экспериментального анализа быстропротекающих процессов разрушения КМ сопряжена со значительными материальными затратами. Разработка численных моделей, которые адекватно описывают деформирование и разрушение КМ при ударном нагружении, имеет важное прикладное значение. Предложенный метод поиска оптимальной укладки слоев КМ, который позволяет снизить скорость (энергию) ударника, не изменяя толщину пакета КМ, является важным инструментом при проектировании элементов защиты. Многократное увеличение числа различных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) из КМ, которые подвергаются различным ударным воздействиям, подчеркивает важность данной работы. Задача исследования деформирования и разрушения многослойных КМ при ударе в сочетании натурных экспериментальных работ и численного моделирования является полезной и актуальной.

2. Структура и оформление диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 203 наименований и содержит 182 страницы текста, включая 121 рисунок.

Во введении раскрыты все основные составляющие диссертации: актуальность, цели и научная новизна исследования, его практическая значимость, методы исследования, обоснованность и достоверность результатов, личный вклад автора в исследование, основные положения, выносимые на защиту, апробация работы и публикации, структура и объем работы.

В первой главе, состоящей из пяти разделов, проанализировано современное состояние исследований по теме диссертации, проведен обзор отечественных и зарубежных литературных источников по типам повреждений многослойных КМ, образуемых при ударе различными скоростями, и характерные получаемые повреждения. Также проведен анализ подходов, применяемых при моделировании процессов деформирования и разрушения КМ. Отмечена недостаточная глубина исследования в вопросах выявления и оперативной диагностики повреждений для конструкций из КМ; недостаточное количество экспериментальных работ по исследованию прочности КМ с повреждениями после высокоскоростного удара; также исследований, посвященных изучению прочности тонкостенных многослойных КМ с учетом межслойных дефектов, вызванных ударным воздействием.

Во второй главе диссертации приведены результаты экспериментального исследования процессов деформирования, повреждения, разрушения изготовленных автором пластин из стеклопластика и углепластика при низко- и высокоскоростном ударе с использованием ружья, стенда для зажима пластин, хронографа, высокоскоростной камеры с дальнейшей разработкой виртуальных испытаний на их основе. 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. Во всех случаях численным моделированием найдены моменты начала повреждения и дальнейшего процесса разрушения с экспериментальным подтверждением по размерам расслоений и остаточной

скорости ударника при сквозном пробитии. Установлено согласование расчетных и экспериментальных результатов.

Третья глава посвящена расчетно-экспериментальной методике оптимального армирования многослойных КМ. Дана апробация расчетно-экспериментальной методики оптимального армирования ПКМ на двух примерах: влияние оптимального армирования пластин при ударных нагрузках; улучшение прочностных характеристик тонкостенного крыла БПЛА.

Для первого случая определены оптимальные конструкции многослойной пластины из ПКМ, обеспечивающие снижение скорости ударника в зависимости от угла укладки волокон в слое. Отмечено, что образование обширного расслоения приводит к наибольшему снижению скорости ударника после пробития.

Для второго случая определена оптимальная конструкция многослойной обшивки консоли крыла БПЛА из КМ в системе ANSYS, обеспечивающая максимальную прочность и жесткость при заданных нагрузках. Согласно проведенным расчетам, изготовлена 4-слойная консоль крыла из слоистого стеклопластика.

В четвертой главе дано определение критических и разрушающих нагрузок тонкостенных пластин из многослойных ПКМ с дефектами типа расслоений при ударном нагружении. 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».

В пятой главе проведен неразрушающий контроль многослойных КМ после удара. Определение размеров повреждений проводилось путем неразрушающих

методов контроля: визуального и ультразвукового контроля. Для проверки полученных размеров образцы нарезались вдоль и поперек пластины, позволяя получить действительные размеры расслоений и повреждений. В результате получена картина, сочетающая отображение повреждений ультразвуковым, визуальным методами.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна

Разработана методика виртуальных испытаний элементов конструкций из многослойных КМ при взаимодействии с высокоскоростными ударниками, разработанная на основе комплексного экспериментального исследования и численного моделирования испытаний пластин из 5, 10 и 20 слоев.

Разработан новый подход к оптимизации армирования многослойных КМ, основанный на автоматизированной процедуре выбора угла укладки волокон в слое. При оптимальном армировании скорость после пробития пластины уменьшается за счет увеличения площади межслойных дефектов в КМ.

Представлена 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.

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

Данные результаты являются главными достижениями в работе, указаны в диссертации и автореферате в качестве основных положений, выносимых на защиту.

4. Практическая значимость результатов диссертации

Полученные результаты имеют большой прикладной характер; в частности, предложенная методика виртуальных испытаний может быть использована при разработке конструкций БПЛА из композитных материалов, о чем получена соответствующая справка о внедрении с ООО «Предприятие «Аэротех» (г. Улан-

Удэ). Методика виртуальных испытаний так же может быть использована при проектировании деталей транспортной техники, о чем получена справка о внедрении с ОАО «Улан-Удэнский авиационный завод» (г. Улан-Удэ). Результаты работы внедрены в учебный процесс на кафедре «Информационные технологии и прикладная механика» ВСГУТУ.

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

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и региональных конференциях, научных семинарах. Результаты исследования достаточно полно представлены в 35 научных работах, опубликованных в ведущих рецензируемых научных изданиях, включая пять публикаций в изданиях, индексируемых Scopus или Web of Science, четыре публикации в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»

Замечания по содержанию работы.

1. Не обозначены ограничения разработанных численных моделей и границы применимости.

2. Изготовление образцов из композиционных материалов контактным формованием может приводить к неравномерному распределению связующего на поверхностях слоев. Необходимо уточнить, как проводился контроль образцов.

3. В работе отсутствует развернутое теоретическое и методическое обоснование выбора именно 5-, 10- и 20-слойных пластин для экспериментальных исследований.

4. Формы ударника пуль 1, 2, 3 в целом отличаются по углу острия, массе. Считаю некорректным сравнивать их в единой картине.

8. Заключение о диссертации.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Следует отметить огромную экспериментальную трудоемкость проделанной работы. Вывод предложенных моделей потребовал от автора большого терпения, сосредоточенности и высокой научной квалификации.

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы.

Считаю, что представленная диссертационная работа Балданова А. Б. представляет собой законченное научное исследование, которое по актуальности, научному уровню и практической значимости полученных результатов соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным в Постановлении Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 16.10.2024) «О порядке присуждения ученых степеней». Считаю, что автор диссертационной работы, Балданов Алдар Батомункуевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»

Официальный оппонент:

Кандидат технических наук,
Начальник отдела нагрузок и
аэроупругости управления прочности
инженерного центра
ООО «АУРУС-АЭРО»


02.12.25

А. В. Хомченко

Научная специальность, по которой защищена диссертация:

1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Подпись Хомченко Антона Васильевича удостоверяю:

Заместитель начальника отдела
по работе с персоналом
ООО «АУРУС-АЭРО»



Г. И. Маскинская

Телефон: нет. E-mail: office@aurus-aero.ru

ООО «АУРУС-АЭРО»



А. В. Степин

ГЛАВНЫЙ БУХГАЛТЕР
ООО «АУРУС-АЭРО»
КУЗЬМЕНКОВА Г. Л.
ДОВ. № 2 ОТ 09.01.2025

Созданная органами
Барабаш А.Б. 
10.12.2025