

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Беляева Антона Павловича

**на тему: «Разработка разноуровневых математических моделей и
исследование механизмов пробивания многослойных тканевых преград»
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»**

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений (текстов программ на языке параметрического программирования ANSYS для создания ячеек различных типов плетения).

Многослойные защитные оболочки, представляющие собой пакеты тканых слоев на основе арамидных нитей, широко используются при создании облегченных корпусных элементов авиационно-космической техники, а также средств индивидуальной бронезащиты. Основной задачей, поставленной перед производителями и исследователями арамидных тканей, является улучшение их защитных свойств без дополнительного увеличения массы преграды.

В настоящее время в тканых преградах таких конструкций принято использовать лишь один тип плетения ткани во всех слоях. Такие ткани не являются в равной степени эффективными против ударников различной геометрии. В ряде исследований утверждается, что использование тканей полотняного плетения обеспечивает лучшую защиту от заостренных ударников (типа ножа), тогда как некоторые саржевые плетения - от ударников сферической и оживальной форм. Из этого можно сделать вывод, что определённое чередование слоёв различного типа плетения может обеспечить универсальную защиту в случаях, когда заранее неизвестно, с каким именно типом ударника преграде предстоит взаимодействовать.

Выбор материалов слоев таких преград, их толщин и взаимного расположения в зависимости от конструктивных особенностей и характера

динамической нагрузки является нетривиальной оптимизационной задачей, решение которой невозможно без привлечения компьютерного моделирования. Выполненные в диссертационной работе нахождение наиболее эффективных (с точки зрения запреградной скорости) способов укладки слоёв тканых защитных преград различных типов плетения и определение ведущих механизмов поглощения энергии поражающих элементов являются весьма **актуальными**. С помощью разработанных автором компьютерных моделей, отличающихся по степени детализации, осуществлен поиск эффективных комбинаций слоёв, изучено влияние различных механизмов поглощения кинетической энергии ударников и предложены специальные способы комбинирования слоёв различных типов плетений, демонстрирующие лучшие защитные свойства, чем сугубо полотняные.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных задаче пробивания тканых преград, вопрос о главных диссипативных факторах в процессе пробивания остается до сих пор открытым. Рассматриваемая работа посвящена определению основных диссипативных факторов, определяющих защитные свойства преграды, а также исследованию влияния разнообразных типов плетения ткани на диссипативные характеристики многослойного тканого композита.

Научная новизна диссертации состоит в том, что для решения этих задач автором использованы два различных по степени детализации метода численного моделирования процесса пробития тканых преград. Одним из них является микро- или натурное моделирование, которое учитывает детальную геометрическую структуру тканого слоистого композита. Такой метод требует больших вычислительных ресурсов, но обычно для описания поведения отдельных нитей, образующих композит, могут использоваться простые материальные модели. Высокодетализированная модель арамидной ткани полотняного плетения была разработана и верифицирована по данным натуральных экспериментов по пробиванию коллективом авторов под

руководством П.А.Моссаковского. В ходе работы над диссертацией автором лично на основе этой полотняной модели были созданы высокодетализированные модели тканых преград других типов плетения, включая плетение с поперечной прошивкой, а также выполнены расчеты распределения энергии при пробивании и проведено сравнительное экспериментально-вычислительное исследование эффективности десятислойных полотняных тканых преград с поперечным армированием и без него.

Другой метод - это так называемое макро или редуцированное моделирование. Автором в работе разработаны упрощенные модели тканых преград различных плетений, менее требовательные к вычислительным ресурсам и лучше описывающие поведение нитей при изгибе. Построенные модели верифицированы по результатам баллистических тестов, оценена погрешность моделирования.

Автор в работе использовал комплексный экспериментально-вычислительный подход, включающий экспериментальное исследование и численное моделирование динамических процессов пробивания многослойных тканых преград различных типов плетения ударниками трёх типов форм. Надежность результатов, полученных с применением этого подхода, в основном определяется качеством использованной математической модели процесса пробивания.

Для оценки погрешностей предложенных моделей автором были выполнены численные и натурные верификационные эксперименты по высокоскоростному пробитию многослойных тканевых преград различных плетений ударниками с оживальной и полусферической формами головной части. Натурные эксперименты были выполнены в лаборатории динамических испытаний материалов НИИ Механики Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского при непосредственном участии автора.

Автором лично разработаны описанные в третьей главе диссертации численные модели тканых преград пяти типов плетений, запатентован захват,

обеспечивающий трансверсальные сжимающие нагрузки и позволяющий проводить эксперименты по вытягиванию слоя ткани. Для формулирования модели автором определена геометрическая форма нитей и тканей на их основе для защитных преград полотняного и четырёх типов саржевого плетения, а также определены упругие и предельные характеристики. Для полотняного плетения определены параметры межслойного трения и созданы высокодетализированные компьютерные модели с использованием многоцелевой программы компьютерного моделирования LS-DYNA.

Защитные свойства многослойных тканевых преград зависят от трения на всех уровнях: между волокнами, нитями, тканевыми слоями и, наконец, между ударником и многослойным тканым барьером. **Научная новизна** работы состоит в том, что впервые определены ведущие механизмы поглощения кинетической энергии ударника при пробивании (за счет изменения кинетической энергии нитей и межволоконного трения), а также разработана и успешно использована методика определения статических и динамических коэффициентов межслойного трения для всех комбинаций рассмотренных типов плетения. Дополнительно проводились эксперименты по определению коэффициентов межслойного трения при относительном угле поворота слоёв, отличном от 0 градусов.

Достоверность полученных автором результатов диссертации обусловлена использованием для моделирования процессов пробивания тканых композитов метода конечных элементов и контактных алгоритмов, применимость которых к данному типу задач хорошо исследована и подтверждена, а также использованием численных моделей, достоверность которых проверена по результатам натуральных и виртуальных (с использованием полномасштабной математической модели) баллистических тестов по пробиванию четырехслойных преград с различными типами переплетения волокон твердым сферическим ударником.

С помощью численного моделирования автором **впервые решены задачи** пробивания комбинированных защитных преград, проанализированы

их защитные свойства и предложен более эффективный способ укладки слоёв различных плетений по сравнению с чисто полотняным.

Основные результаты диссертационной работы были представлены и положительно оценены на различных всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в ряде статей, в том числе, в двух статьях из списка Scopus.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

По работе можно высказать следующие замечания.

1. Замечены орфографические ошибки в тексте диссертации и в автореферате.
2. В диссертации в разделе 1.5, касающемся экспериментов на пробивание, выполненных в НИИ механики ННГУ, автор ошибочно указал марку использованной высокоскоростной камеры "Tektronix TDS2024B" вместо реально использованной камеры "HSFC Pro".
3. В тексте диссертационной работы и в автореферате буквенно-цифровые обозначения тканевых преград в таблицах и на рисунках приводятся на разных языках.
4. Основные результаты диссертационной работы, представленные в автореферате и в диссертации (раздел Заключение), несколько отличаются по форме.

Тем не менее, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Оформление автореферата и диссертации выполнено

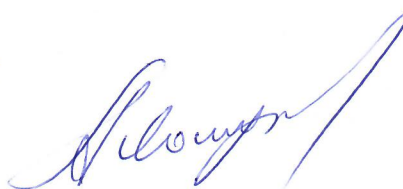
согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Беляев Антон Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник Научно-исследовательского института механики
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

ЛОМУНОВ Андрей Кириллович



" 27 " мая 2019 г.

Контактные данные:

тел.: 7(831)4651622, e-mail: lomonov@mech.unn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Адрес места работы:

603950, г. Нижний Новгород, пр.Гагарина, д.23, корп.6
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского", Научно-
исследовательский институт механики
Тел.: (831) 4656611; e-mail: niim@mech.unn.ru

Нижегородский государственный
университет им.Н.И.Лобачевского
Подпись удостоверяю
«27» 05 2019
Сотрудник УП *Кор*

Ведущий
документовед УП
Новосельцева Н.А.

