

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова
д. ф.-м. н, проф.  А. А. Федянин

ОТЗЫВ

ведущей организации Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова о диссертационной работе Игнатовой Анастасии Валерьевны «Анализ кинетики деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

В области создания и оптимизации элементов защиты тела человека (бронежилетов) в последнее время находят широкое применение композитные слоистые тканевые структуры. К таким изделиям существуют сертификационные требования, регламентирующие глубину прогиба тыльной стороны бронежилета в результате обстрела заданными поражающими элементами. С целью уменьшения прогибов проводятся различные исследования, направленные на активацию механизмов, способствующих диссипации энергии ударника: комбинирование тканей с разным типом плетения, сквозная прострочка, пропитка различными неньютоновскими жидкостями, поверхностная обработка тканей тонкими покрытиями и пр. При этом дополнительным требованием становится задача минимизации массы итогового изделия. Одновременно с развитием компьютерных технологий все большая доля исследований такого рода посвящена прямому математическому моделированию на разном уровне масштабирования нелинейных динамических процессов контактного взаимодействия, что позволяет учесть множество факторов, в том числе: конечные перемещения и деформации, параметры определяющих соотношений и критериев разрушения материалов, модели трения и т. д.

Целью данного исследования заявлена разработка расчетно-экспериментальных методов анализа деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе на техническом пластилине – специальной регистрирующей среде, позволяющей оценить прогиб преграды. Этим и определяется **актуальность** и **обоснованность** темы диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложения, изложена на 144 страницах, содержит 65 рисунков и 22 таблицы. Библиографический список включает 180 наименований.

Во введении отмечена актуальность работы, научная новизна и ее практическая значимость, сформулированы основные цели, задачи исследования и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор российских и зарубежных литературных источников, отражающих: эволюцию защитных структур в исторической перспективе; развитие экспериментальных, аналитических и расчетных методов исследования деформирования многослойных тканевых преград; способы моделирования поведения технического пластилина при локальном динамическом нагружении. В результате сделан выбор в пользу рассмотрения в работе тканой структуры на основе арамидных волокон, а в качестве способа повышения ее защитных свойств и уменьшения ее прогибов – увеличение доли диссипации энергии ударника путем повышения межволоконного трения нитей при их вытягивании с помощью поверхностной обработки тканей тонкими покрытиями. Также сформулирован тезис о необходимости экспериментального исследования механических свойств технического пластилина и построения на его основе модели, отражающей скоростную чувствительность материала.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям механических свойств технического пластилина при растяжении, сжатии, сдвиге и индентировании (внедрении сферического индентора) в широком диапазоне скоростей деформаций ($0,4 \cdot 10^{-3} \dots 250 \text{ с}^{-1}$) и деформациях до 30% при комнатной температуре ($20 \pm 1^\circ\text{C}$). В результате получено, что коэффициент Пуассона равен 0,5. Построенные диаграммы деформирования пластилина имеют выраженную площадку текучести, что позволяет считать его идеальной упругопластической средой с пределом текучести, зависящим от скорости деформирования. Эту зависимость предложено задавать двухпараметрической степенной моделью Нортона $\sigma_T = K\dot{\epsilon}^n$. Отмечено существенное влияние температуры на пластические свойства пластилина.

В третьей главе представлены две группы экспериментов над арамидными тканями (СВМ Р110 полотняного переплетения): квазистатические (определение механических свойств отдельной нити Русар и изучение параметров трения на основе тестов по вытягиванию нити из полотна) и баллистические (изучение размеров вмятин в пластилине при локальном ударе). В тестах на квазистатическое растяжение нити построены диаграммы деформирования и определена максимальная разрушающая нагрузка, соответствующая пределу прочности $2,9 \pm 0,2 \text{ ГПа}$. Предложен технологичный способ модификации арамидных тканей с помощью поверхностной обработки различными материалами (эмульсиями на основе ПВА, различными эластомерами, герметиками, канифолью и эпоксидными смолами), которые позволяют обеспечить начальное сцепление нитей, сухое или вязкое трение. Получена аналитическая оценка усилия вытяжения нити, по которой путем сопоставления с экспериментальными данными можно идентифицировать коэффициент межволоконного трения. Композиции с покрытиями на основе ПВА показали более высокий расчетный коэффициент сухого трения, что выразилось в итоге в росте максимального усилия вытяжки и поглощенной энергии. В баллистических тестах рассматривались сборки из двух-трех слоев сухой и обработанной арамидной ткани с подложкой из технического пластилина. Скорости ударников были достаточно малыми, чтобы в композите

не возникало разрушений. Далее происходила оценка глубины вмятин на срезах пластилина оптическим методом. По результатам этой группы испытаний было признано, что наиболее эффективное покрытие арамидных тканей – так же термопласт ПВА. По совокупности можно утверждать, что это покрытие увеличило усилие вытягивания в 3,4 раза, энергию вытягивания – в 2,5 раза при увеличении поверхностной плотности ткани на 5...6 %. Отдельное внимание было уделено экспериментальному определению модуля Юнга, предела прочности и плотности выбранного термопласта.

В четвертой главе были разработаны конечно-элементные модели, которые позволили прогнозировать поведение тканей при квазистатическом вытягивании нити и динамическом деформировании ткани при локальном ударе. Было использовано специализированное коммерческое расчетное ПО LS-Dyna (решатель R7.1.2 MPP), моделирование выполнялось на мезоуровне на основе ячейки периодичности ткани с детализацией до отдельной нити оболочечными элементами (SHELL163) постоянной толщины, с дополнительными элементами, отвечающими за покрытие. Материал нитей принимали упругим и ортотропным с возможностью разрушения (*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC), для тонких покрытий была выбрана изотропная модель пластичности с кинематическим упрочнением (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) с разрушением по достижении критической деформации, для пластилина была использована модель материала, позволяющая учесть зависимость свойств (предела текучести) от скорости деформации (*MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY). В результате проведения серии верификационных расчетов: квазистатических по вытягиванию нити и баллистических тестов, – были доопределены недостающие параметры моделей материалов и показана удовлетворительная точность построенной модели.

В последней главе рассмотрены экспериментальные и расчетные исследования процесса деформирования и разрушения пакета из арамидных тканей Twaron (сухого и с тонким покрытием термопластом ПВА) при высокоскоростном локальном воздействии. Механические свойства нитей взяты из сторонней работы. Для определения параметров трения выполнены по отраженной в третьей главе схеме квазистатические испытания по вытягиванию нити. Далее для двух типов преград (пакет из пяти сухих слоев ткани и пакет из пяти обработанных термопластом ПВА слоев ткани) выполнена серия баллистических тестов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что баллистический предел сухого пакета после обработки ПВА увеличился почти в два раза – со 149 м/с до 283 м/с за счет вовлечения в работу большего количества связанных нитей. Однако при скоростях ударника, превышающих 350 м/с, обе композиции показывают одинаковые запреградные скорости и, соответственно, равное количество поглощенной энергии. Во всех случаях пакет из обработанной ткани демонстрировал меньшие прогибы и меньшее коробление отдельных слоев ткани. Затем была проведена серия баллистических тестов со скоростями порядка 90% от баллистического предела с тканевыми образцами того же типа, размещенными на пластилине для регистрации глубины вмятин. Установлено, что глубина вмятины в пластилине для пакетов с обработанными тканями почти в два раза ниже по сравнению с сухими тканями при скоростях 130-150 м/с, и, кроме того, обработанный пакет «выдерживает» скорости (250 м/с), существенно

превышающие баллистический предел сухого пакета, с глубиной вмятины меньше 11 мм. Далее по описанной в четвертой главе процедуре была построена и верифицирована модель ткани (сухой и с покрытием), которая в итоге использовалась для выполнения численных баллистических тестов. Последние показали хорошую точность в определении баллистических пределов преград, однако при более высоких скоростях остаточные скорости ударников оказываются существенно завышенными.

Научная новизна работы состоит как в получении ряда новых экспериментальных данных (например, параметров вязкоупругопластической модели пластилина со скоростной чувствительностью; сравнительные данные по энергопоглощающей способности различных типов покрытий арамидных тканей), так и в построении и верификации новой численной модели ткани плоского плетения, отличающейся от известных введением связанности нитей материалом покрытия.

Практическая значимость работы состоит в том, что достигнут важный результат, показывающий эффективность предложенного способа обработки тканей бронезащитных элементов тонкими покрытиями (термопластом ПВА), а также отработан подход к экспериментально-вычислительному исследованию такого типа объектов. Получена справка об использовании результатов научной работы на предприятии АО «ФОРТ Технология» (г. Москва).

В качестве **общих замечаний** по диссертации отметим следующие:

1. В пункте 5.2.2. подход к подбору сдвиговых модулей сухой ткани и ткани с покрытием отличается от изложенного выше в главе 4, рассматривающей ткань СВМ Р110. В данном случае сказано, что, «используя метод проб и ошибок при моделировании последовательного вытягивания нити и высокоскоростного удара», значения модулей сдвига для сухой и обработанной ткани были приняты, соответственно, 100 МПа и 450 МПа. Ранее различие механических свойств сухой и обработанной ткани объяснялось наличием слоя элементов покрытия, параметры материала которого (предел текучести и предельная деформация) подбирались ровно из намерения удовлетворить эти различия. Сюда же вносили вклад различные коэффициенты трения.
2. Из рисунка 5.1 отчетливо видно, что толщины нитей основы и утка существенно (до 15%) отличаются друг от друга. Кроме того, в работе со ссылкой на источник, указано, что и некоторые механические свойства нитей различны. Возможно, следовало закладывать эти различия при построении ячейки периодичности в конечно-элементной модели и проводить соответствующие экспериментальные исследования для нити каждого направления.
3. Из рисунка 5.15 видно, что построенная модель ткани показывает существенно завышенные по сравнению с экспериментом значения запреградной скорости ударника, что в целом можно зачесть в запас проектируемого изделия, однако считать ее полностью удовлетворительной нельзя. Вместе с тем специфика задачи требует корректного описания процесса при скоростях ударника, близких и меньших баллистического предела, где модель "работает" хорошо.

Вероятно, для корректировки модели тканого пакета следует уделить больше внимания исследованию трения в паре ткань-ударник.

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из которых 3 работы – в журналах из перечня ВАК, включая 4 публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в базу данных Scopus. Работа в целом и ее части были представлены на ежегодных научно-технических российских и зарубежных конференциях.

Диссертационная работа является законченным научно-квалификационным исследованием, которое вносит существенный вклад в изучение защитных свойств и способов экспериментально-расчетного исследования многослойных тканевых преград в условиях высокоскоростного нагружения, обладает научной новизной, практической значимостью и содержит богатый экспериментальный материал.

Работа «Анализ кинетики деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе» отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела», а её автор Игнатова Анастасия Валерьевна заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Костырева Лилия Александровна, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории упругости и пластичности НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова.

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М.В. Ломоносова
Телефон: +7 (495) 939-10-0, E-mail: info@rector.msu.ru

Диссертация и отзыв рассмотрены, а отзыв утвержден на заседании секции «МДТТ» при Ученом совете НИИ механики МГУ.

Протокол № 4/21 от 28 апреля 2021 г.

Председатель секции,
доктор физико-математических наук, профессор Д. В. Тарлаковский

Подписи Д. В. Тарлаковского и Л. А. Костыревой заверяю

Директор НИИ механики МГУ, академик РАЕН Ю.М. Окунев