

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Константинова Александра Юрьевича на диссертационную работу Игнатовой Анастасии Валерьевны «Анализ кинетики деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

### **Актуальность выбранной темы исследования**

Диссертационная работа Игнатовой А.В. посвящена актуальной теме, связанной с разработкой средств индивидуальной защиты человека в условиях боевых действий – бронежилетов, панелей бронев автомобилей и др. В современном мире рациональное проектирование новых изделий тесно связано с численным моделированием, поэтому обеспечение подобного процесса математическими моделями, характеристиками материалов, верифицированными подходами к моделированию тех или иных процессов широко востребованы в самых разных областях человеческой деятельности. Рецензируемая работа посвящена разработке расчетных моделей, позволяющих описать деформирование и разрушение модифицированных тонкими покрытиями тканевых преград. Особое внимание уделяется не только разным способам повышения баллистической стойкости бронепанелей, но и снижению прогибов ее тыльной стороны от ударных воздействий высокоскоростными ударниками. В связи с многофакторностью и разбросом механических характеристик тканевого пакета, регистрирующей среды (технического пластилина) создание оптимальной конфигурации защитной конструкции эмпирическими методами практически невозможно, что приводит к необходимости использования численных методов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения, списка литературы, приложения. Диссертация содержит 65 рисунков, 22 таблицы, библиографический список из 180 источников – всего 145 страниц машинописного текста.

**Во введении** обоснована актуальность и отмечена степень разработанности темы диссертационного исследования, изложены цель, задачи, объект исследования, научная новизна работы, практическая значимость и положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, методология и методы исследования, информация об апробации результатов работы, сведения о публикациях и данные об объеме и структуре работы.

**В первой главе** диссертации приводится обзор, охватывающий вопросы развития защитных тканевых структур, методы оценки их эффективности, способы повышения баллистической стойкости многослойных тканевых структурах и подходы, применяемые для

моделирования деформирования и разрушения тканевых преград, а также поведение технического пластилина при квазистатическом и динамическом характере нагружения. В конце главы сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** изложены результаты экспериментальных исследований поведения регистрирующей среды – технического пластилина – при разных видах нагружениях. В этой главе приведены механические характеристики пластилина при квазистатическом растяжении, сжатии, сдвиге и индентировании, а также при динамическом сжатии и индентировании. Построены кривые «предел текучести – скорость деформации», по которым определены параметры степенной модели, описывающей зависимость напряжения течения технического пластилина от скорости деформации в широком диапазоне изменения скоростей деформаций.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований процессов деформирования арамидных тканей полотняного переплетения с тонкими покрытиями из эластомеров, термопластов, вязких жидкостей при квазистатическом и ударном нагружениях. Показано, что наличие тонкого покрытия позволяет увеличить трение между нитями и тканями, что приводит к возрастанию максимального усилия и энергии вытяжки нитей с сохранением их прочности. Приведены результаты оценки влияния тонких покрытий на глубину вмятины в пластилине (запреградную выпучину) при низкоскоростном ударном воздействии на арамидные ткани. Несомненный интерес представляют результаты, полученные для поверхностной обработки на основе водной эмульсии ПВА, при увеличении поверхностной плотности ткани лишь на 5-6%.

**Четвертая глава** посвящена численному моделированию арамидной ткани с явным учётом тонкого покрытия в виде специальных конечных элементов. Таким образом, предложенная автором модель отличается от существующих моделей тканевых преград. В качестве модели материала для арамидных нитей выбран упругий ортотропный материал, для термопласта ПВА – упругопластический материал, для пластилина – вязкоупругопластическая модель, учитывающая зависимость предела текучести от скорости деформирования.

На первом этапе была решена задача вытягивания одиночной нити из сухой и обработанной ткани в программном пакете LS-DYNA. Верификация определяющих параметров модели материала (предел текучести, максимальная деформация разрушения ПВА) проводилась на базе экспериментов по квазистатическому вытягиванию нитей из ткани (глава 3). Далее предложенная модель ткани была успешно использована для прогнозирования глубины вмятины в пластилине при низкоскоростном локальном ударе, не предполагающем разрыв нитей.

**В пятой главе** рассмотрены расчетные и экспериментальные исследования деформирования двух видов тканевых пакетов при высокоскоростном ударном нагружении. Приведены результаты баллистических испытаний двух видов образцов размерами 100x100 мм при варьировании скорости ударника в диапазоне 100-800 м/с на специальном разгонном стенде. Отмечено существенное повышение баллистического предела (почти в два раза!) за счет обработки ткани при увеличении поверхностной плотности ткани на 5-6%. Предложено объяснение данному факту за счет повышения связанности нитей и, в итоге, за счёт более продолжительного взаимодействия ударника с нитями без их раздвигания. При этом количество поглощенной энергии (в случае несквозного пробоя) возросло более чем в 3 раза. Завершается экспериментальная часть анализом деформирования образцов и пластилина при скоростях, близких к баллистическому пределу.

Параметры расчетных моделей двух видов образцов верифицированы с применением известных экспериментальных данных, полученных при вытягивании одиночной нити из ткани и при высокоскоростном ударном нагружении. Разработанная модель позволила адекватно оценить прогибы тыльной стороны образцов при разных скоростях удара.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертации А.В. Игнатовой отвечают заявленным целям диссертационного исследования.

#### **Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов, сформулированных в диссертации**

Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечена применением современного аттестованного испытательного оборудования ФГАОУ ВО Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), а также методов проведения испытаний и обработки их результатов в соответствии с требованиями ГОСТов.

Достоверность полученных численных результатов обеспечивается корректной постановкой задач механики деформируемого тела в рамках разработанной модели тканевой структуры, использованием проверенных средств моделирования и удовлетворительным согласием с экспериментальными данными автора, а также с результатами других исследователей.

Новизна диссертационного исследования определяется большим объемом новых экспериментальных данных о поведении материала-свидетеля (технический пластилин), арамидных нитей, тканей с различными вариантами тонких покрытий. Кроме того, предложена новая численная модель ткани плоского плетения, которая отличается от существовавших до этого моделей.

## **Степень обоснованности научных положений, выводов, сформулированных в диссертации**

Научные положения, выводы, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы и опираются на результаты экспериментальных исследований, принципы современной механики деформируемого твердого тела и механики разрушения.

Диссертационное исследование использует системный подход к изучению предмета исследования, при котором сложный по природе своей процесс или объект разбивается на более простые составляющие, каждая из которых проверяется отдельно на основе аналитических решений или экспериментальных данных, что существенно повышает уровень доверия к полученным результатам и выводам.

### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Результаты диссертационной работы способствуют пониманию важных аспектов деформирования и разрушения слоистых тканевых пакетов при ударном нагружении и способов повышения их баллистических характеристик за счет нанесения тонких покрытий.

Подтверждена научная гипотеза о возможности существенного снижения глубины вмятины в пластилине и повышения баллистического предела при локальном ударе за счет тонкого покрытия арамидных тканей слоем термопласта.

Для практики большую ценность представляет расчетно-экспериментальная методика оценки баллистического предела и прогиба тканевого пакета с тонкими покрытиями и без них при ударном нагружении.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты и выводы диссертации А.В. Игнатовой могут быть рекомендованы к использованию в организациях и предприятиях, выполняющих исследовательские, проектные и опытно-конструкторские работы, связанные с созданием защитных элементов конструкций на основе арамидных материалов, а также в исследовательских университетах РФ.

### **Замечания по содержанию и оформлению диссертации**

1. Верхняя граница скорости деформации, которая была достигнута при экспериментальном исследовании поведения материала-свидетеля (технического пластилина), составила порядка  $250 \text{ с}^{-1}$ . Однако представляется, что скорости деформации в моделируемых экспериментах на локальное ударное воздействие, описанных в разделе 5.2.5, в пластилине превышают указанный порог, и таким образом модель выходит в область экстраполяции экспериментальных данных.

2. Не достаточно описана постановка эксперимента на сжатие образцов из пластилина, а именно методы минимизации эффектов трения между образцом и траверсами испытательной машины (молотом копра). В данном типе эксперимента использовались

образцы размером 15x15x30 мм, т.е. длина рабочей части образца составляла всего 2 размера поперечного сечения. В динамических испытаниях для достижения высоких скоростей деформаций использовались еще более короткие образцы (25x25x10 мм). По-видимому, высокий коэффициент трения пластилина должен вносить существенное искажение в одномерное напряженное состояние образца, что затрудняет корректную интерпретацию экспериментальной информации.

3. Используемый в разделе 2.1.4 термин «динамическая твердость» вводит в заблуждение. Ведь «статическая твердость» и «динамическая твердость» здесь получены из одних и тех же статических экспериментов. Отличие заключается лишь в способе обработки данных экспериментов, что следовало бы указать явно, как это сделано далее на рисунке 2.12 раздела 2.3.

4. Не уделено должного внимания вопросам адиабатического разогрева пластилина при высокоскоростном деформировании, имеющего место при ударном воздействии, хотя свойства пластилина сильно зависят от температуры. Судя по рисункам 5.18 и 5.19, на которых приводится сравнение форм отпечатков, полученных в натурном и вычислительном экспериментах, модельное представление поведения пластилина завышает его жесткость по сравнению с реальным поведением, что, отчасти, может быть связано с пренебрежением указанным эффектом.

5. В разделе 3.2 приводятся результаты определения коэффициента трения нити по ткани. Интересно было бы оценить влияние скорости скольжения на коэффициент трения.

Высказанные замечания не снижают значимости и новизны полученных результатов.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным**

#### **Положением о порядке присуждения ученых степеней**

В целом работа выполнена на актуальную для науки тему, написана хорошим техническим языком, опубликована в достаточной степени, автореферат соответствует содержанию диссертации. Оформление диссертации в целом отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней ВАК РФ.

Таким образом, диссертация А.В. Игнатовой «Анализ кинетики деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические, технологические решения, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения научных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. N 842, к кандидатским диссертациям. Её автор, Игнатова Анастасия Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,

старший научный сотрудник лаборатории динамических испытаний материалов НИИ механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»,  
доктор физико-математических наук

Константинов А.Ю.

«17» мая 2021 г.

Докторская диссертация защищена по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры на тему: «Экспериментально-теоретический подход к исследованию высокоскоростного деформирования и разрушения материалов с использованием мерных стержней».

Адрес:

603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23,

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Научно-исследовательский институт механики

Телефон: +7 (831) 465-16-22

e-mail: [konstantinov@mech.unn.ru](mailto:konstantinov@mech.unn.ru)

Я, Константинов Александр Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного Совета и их дальнейшую обработку.

