

ИГНАТОВА Анастасия Валерьевна

**АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
СЛОИСТЫХ ТКАНЕВЫХ СТРУКТУР С ТОНКИМИ ПОКРЫТИЯМИ
ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

**Научный
руководитель:**

Сапожников Сергей Борисович
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Антуков Валерий Нагимович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой фундаментальной математики
ФГАОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»

Константинов Александр Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
динамических испытаний материалов НИИ механики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Защита состоится «11» июня 2021 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 999.211.02, созданного на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета и Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, по адресу 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<https://pstu.ru>).

Автореферат разослан «...» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А.Г. Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Слоистые тканевые структуры на основе арамидных волокон в настоящее время широко используются в качестве элементов защиты тела человека (бронежилетов), обеспечивая поглощение значительной части энергии ударника за счет фрикционных связей слоев и нитей в тканях, а также динамического натяжения нитей. По стандартам Российской Федерации, США и Евросоюза на пулезащитную экипировку сертификационные испытания (обстрел) бронежилетов проводят на регистрирующей среде – техническом пластилине. Глубина вмятины на поверхности такой среды (прогиб тыльной стороны бронежилета) является критерием качества защитной структуры и не должна превышать величины, заданной конкретным стандартом. Считается, что чем меньше глубина вмятины, тем выше качество бронежилета при прочих равных характеристиках, и тем меньшую травму получит человек.

Вопросы деформирования и разрушения арамидных тканей, их взаимодействие с ударником и техническим пластилином, вытягивания нитей из ткани рассмотрены в работах российских и зарубежных исследователей (С.Л. Баженов, В.А. Григорян, Ю.И. Димитриенко, И.Ф. Кобылкин, П.А. Моссаковский, Х.А. Рахматулин, С.Б. Сапожников, В.В. Селиванов, Е.Ф. Харченко, R. Barauskas, Y. Duan, A. Gawandi, M. Grujicic, C. Ha-Minh, G. Nilakantan, B.-W. Lee, C.T. Lim, A. Majumdar, J.C. Smith, V.B.C. Tan, D. Tapie, D. Zheng, D. Zhu и др.) с применением экспериментальных, аналитических и численных методов различной сложности. Серьезное внимание уделяется вопросам снижения глубины вмятины в регистрирующей среде за счет сквозной прострочки, комбинирования тканей разных типов переплетения, пропитки вязкими неньютоновскими жидкостями и др. Однако эти способы приводят к существенному увеличению массы бронежилета и снижению комфортности ношения. Анализ источников показывает, что наиболее рациональной является *поверхностная* обработка тканей *тонкими покрытиями*, практически не снижающими гибкости и комфортности ношения бронежилета.

Известные попытки экспериментальной оптимизации конструкций и технологий модификации защитных тканевых структур наталкиваются на проблемы многофакторности, разброса механических свойств компонентов тканевого пакета и регистрирующей среды, высокой стоимости одного испытания и малой информативности (регистрируется лишь глубина вмятины в пластилине).

В связи с этим мировой тренд в разработке новых средств защиты состоит в проведении расчетных исследований (на основе метода конечных элементов) с широким факторным анализом, позволяющим очертить область наиболее рациональных технических решений, с последующей проверкой рекомендаций экспериментом.

Математические модели для решения нелинейных динамических контактных задач с большими перемещениями, фрикционными контактами компонентов, их возможным разрушением представляют собой один из наиболее сложных классов задач в механике деформируемого твердого тела, и

их численное решение требует привлечения больших вычислительных ресурсов современных многопроцессорных кластеров.

Степень разработанности темы исследования. Расчетно-экспериментальные исследования влияния разных способов модификации тканевых структур представлены в отечественных и зарубежных работах (Ю.И. Димитриенко, Н.Ю. Долганина, О.А. Кудрявцев, П.А. Моссаковский, С.Б. Сапожников, Е.Ф. Харченко, M.R. Ahmad, A. Gawandi, M. Karahan, P. Kedzierski, A. Khodadadi, Y.S. Lee, A. Majumdar, R. Roy, J.L. Park, Y. Park, Y. Wang и др.). В работах M.R. Ahmad, A. Gawandi, R. Roy отмечают, что латексное покрытие позволяет увеличить баллистическую эффективность арамидных тканей при локальном ударе. Следует отметить, что в литературе практически отсутствуют работы, посвященные численному моделированию поведения модифицированных арамидных тканей и оценке их прогиба (глубины вмятины в пластилине) при локальном ударе.

В связи с этим актуальной научной проблемой, определяющей **цель данного исследования**, является разработка расчетно-экспериментальных методов анализа деформирования и разрушения слоистых тканевых структур с тонкими покрытиями при локальном ударе на техническом пластилине.

Цель исследования достигается решением следующих задач:

1. Провести экспериментальные исследования механических свойств технического пластилина при различных воздействиях и определить параметры зависимости предела текучести от скорости деформирования.

2. Провести экспериментальные исследования деформирования арамидных тканей с различными тонкими покрытиями при вытягивании нитей и низкоскоростном локальном ударе по тканям на блоке технического пластилина.

3. Разработать численную модель ткани полотняного переплетения с явным учетом тонких покрытий и методику определения параметров этой модели для использования в расчетах на локальный удар.

4. Провести численные и экспериментальные исследования деформирования и разрушения пакета арамидных тканей с тонкими покрытиями при высокоскоростном локальном ударе и оценить их эффективность.

Объект исследования: система деформируемых твердых тел, которая подвергается локальному ударному воздействию – пакет арамидных тканей с тонкими покрытиями и технический пластилин.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые получены параметры модели технического пластилина как упруговязкопластического материала в широком диапазоне скоростей деформаций ($0,0004 \dots 250 \text{ с}^{-1}$) при растяжении, сжатии, сдвиге и индентировании.

2. Получены новые экспериментальные данные по весовой эффективности тканей с тонкими покрытиями из эластомеров, термопластов и вязких жидкостей для снижения прогиба тканевого пакета при низкоскоростном локальном ударе.

3. Предложена новая численная модель ткани плоского плетения, отличающаяся от известных введением связанности нитей материалом покрытия и усилением фрикционных контактов после разрушения такого покрытия в

процессе квазистатического вытягивания нити в плоскости ткани и локального удара по нормали к ее поверхности.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается удовлетворительным сравнением расчетных результатов с экспериментальными данными, а также результатами, полученными другими исследователями.

Экспериментальные исследования выполнены на современном аттестованном оборудовании лаборатории Экспериментальной механики НИИ Опытного машиностроения ЮУрГУ. Численные исследования выполнены в лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ с использованием лицензионных пакетов ANSYS и LS-DYNA.

Практическая значимость работы. Экспериментально показана возможность существенного снижения прогибов тканевых защитных структур при ударе за счет тонких покрытий арамидных тканей термопластом ПВА с утяжелением в пределах технологического разброса поверхностной плотности серийно выпускаемых тканей (5-6%). Расчетные (численные) модели арамидной ткани с тонким покрытием в составе тканевого пакета и технического пластилина позволили оценить качество новых защитных структур с точки зрения снижения прогиба и численно подтвердить повышение баллистического предела, обнаруженное экспериментально.

Получена справка об использовании результатов научной работы на предприятии АО «ФОРТ Технология» (г. Москва).

Положения, выносимые на защиту:

1. 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;

2. Экспериментальная методика, позволяющая определить механические свойства технического пластилина в широком диапазоне скоростей деформаций;

3. Расчетная методика определения параметров численных моделей арамидной ткани с тонкими покрытиями, позволяющих определить прогибы тканевых образцов или глубины вмятины в пластилине при локальном ударе;

4. Расчетно-экспериментальная методика оценки баллистического предела и прогиба тканевого пакета с тонкими покрытиями и без них при ударном нагружении.

Апробация работы. Работа в целом и ее части были представлены на ежегодных научно-технических конференциях кафедры «Техническая механика» ЮУрГУ (2010-2019 гг.), на конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ (г. Челябинск, 2011-2019 гг.), на научных российских и зарубежных конференциях: «Суперкомпьютерные дни в России» (г. Москва, 24-25 сентября 2018 г.), V конференция «Инновационные направления в расчетах прочности с использованием суперкомпьютеров и грид-технологий» (г. Касли, 23-27 сентября 2019 г.).

Полностью диссертация обсуждалась на научных семинарах:

- кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета). Руководитель – кандидат технических наук, доцент П.А. Тараненко;

- кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций» и «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Руководители – доктор технических наук, профессор А.Н. Аношкин и доктор физико-математических наук, профессор В.Э. Вильдеман;

- кафедры «Вычислительная и экспериментальная механика» Пермского государственного национального исследовательского университета. Руководитель - доктор технических наук, профессор В. Н. Терпугов;

- Института механики сплошных сред УрО РАН. Руководитель – доктор физико-математических наук, профессор О.Б. Наймарк.

Представленные исследования были выполнены по грантам Российского научного фонда (№ 18-79-00069 «Разработка новых гибридных полимерных композитных материалов для защитных структур с повышенной энергопоглощающей способностью», № 18-19-00377 «Разработка новых полимерных волокнистых композитных материалов с управляемой нелинейностью механического поведения и методов проектирования из них элементов турбовентиляторных двигателей») и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 17-08-01024 «Разработка численных моделей деформирования и разрушения сетчатых конструкций со слабыми поверхностными связями при баллистическом нагружении»), ряда хозяйственных договоров с промышленными предприятиями.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, из которых 3 работ в журналах из перечня ВАК [1-3], включая 4 публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в базу данных Scopus [1, 3, 6, 7].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы и приложения, которая изложена на 145 страницах и содержит 65 рисунков, 22 таблицы. Библиографический список включает 180 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 анализ российских и зарубежных литературных источников по теме расчетно-экспериментальных исследований деформирования многослойных арамидных тканей и технического пластилина при локальном динамическом нагружении.

Испытания пластилина проводили, как правило, лишь на сжатие или индентирование; считали, что пластилин является сплошной упругопластической средой со степенной зависимостью предела текучести от скорости деформирования. Поведение пластилина при растяжении или сдвиге практически не рассматривалось.

Широкое распространение получили экспериментальные методы исследования вытягивания нити из ткани, прогибов защитных структур и их баллистических пределов при локальном ударе.

Достаточно большое количество публикаций посвящено моделированию механизмов деформирования и разрушения тканевых защитных структур при локальном ударе (схемы эквивалентной нити, мембраны или сетки со связанными узлами). В последние годы в связи с развитием вычислительных мощностей компьютеров появились весьма сложные, детализированные модели отдельных нитей (балочные, оболочечные, объемные и комбинированные). Однако их «тяжесть» настолько велика, что удается провести расчеты только сравнительно простых конструкций. Расчеты многослойных тканей с тонкими поверхностными покрытиями в таких постановках просто невыполнимы. Нужны детализированные, но при этом численно эффективные модели.

При проектировании защитных структур с позиции снижения прогиба тыльной стороны бронежилета (запреградной травмы) актуальным вопросом является исследование влияния модификации тканей: сквозная прошивка, пропитка эластомерами или неньютоновскими жидкостями и др. (П.А. Моссаковский, Е.Ф. Харченко, М. R. Ahmad, A. Gawandi, B.-W. Lee, R. Roy и др.). Однако, неприятным следствием этого является увеличение массы и жесткости слоистой тканевой структуры.

Таким образом, проблема создания легких поверхностных обработок тканей (тонких покрытий), имеющих количественное математическое обоснование (эффективные численные модели) с корректным заданием механических свойств материалов, является актуальной.

На основании проведенного литературного анализа были сформулированы **цели и задачи** диссертационной работы.

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 ($20 \pm 1^\circ \text{C}$). Квасистатические испытания проводили на универсальной испытательной машине Instron 5882 с силоизмерителем 100 Н. Динамическое и статическое индентирование проводили вдавливанием стальной сферы в поверхность пластилина [1].

С помощью бесконтактного оптического метода (цифровая корреляция изображений, VIC-2D) при растяжении были зарегистрированы продольные и поперечные деформации. При деформациях до 1 % хордовый модуль упругости составляет $30 \pm 5 \text{ МПа}^*$, а коэффициент Пуассона равен 0,50. Диаграммы деформирования пластилина имеет выраженную площадку текучести, что позволяет его считать в расчетах идеальной упругопластической средой с пределом текучести, зависящим от скорости деформирования.

На рисунке 1 представлены экспериментальные данные при квазистатическом и динамическом нагружениях в виде линейной

* Ниже при обработке данных использовано среднее значение, а после знака \pm отмечено среднеквадратическое отклонение выборки.

аппроксимации предела текучести от скорости деформации в двойных логарифмических координатах (аналог – модель Нортона). В пакете LS-DYNA этому соответствует материал *MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY. Отметим, что значения предела текучести при квазистатическом растяжении и сжатии близки (различие во всех случаях не превосходило 15%).

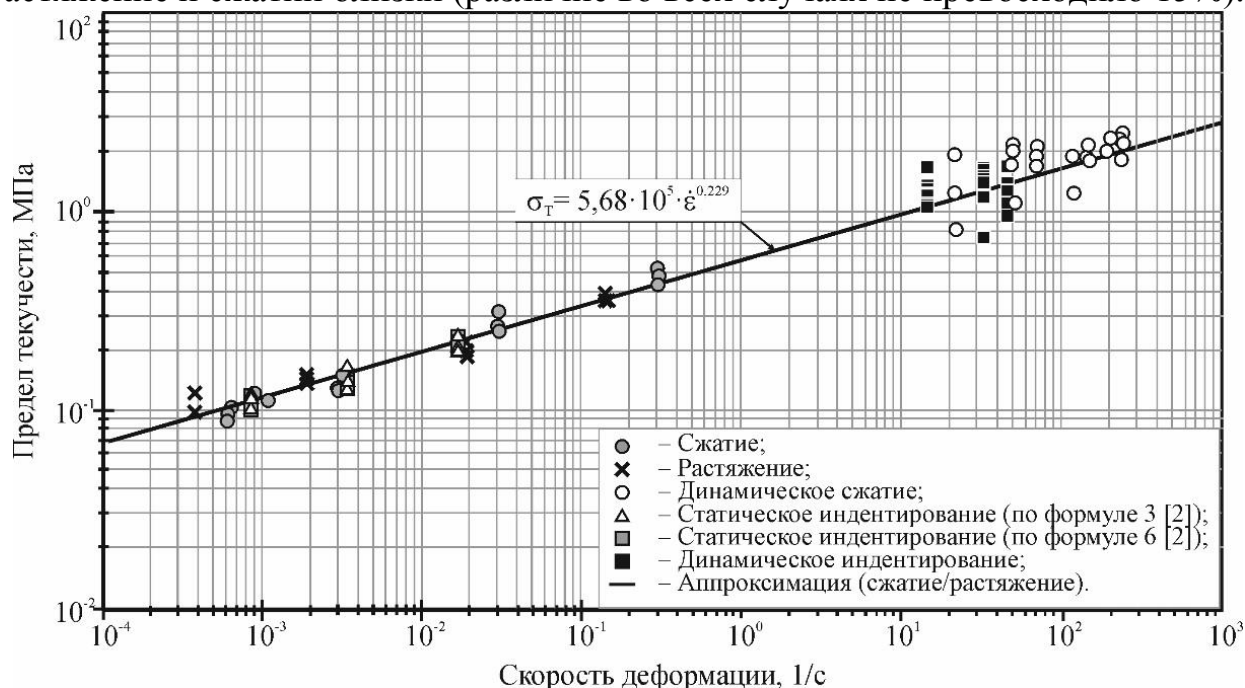


Рис. 1. Зависимости предела текучести от скорости деформации

Получив информацию о свойствах основания (регистрирующей среды), в **третьей главе** представлены две группы экспериментальных исследований деформирования элемента тканевого бронежилета – арамидной ткани – квазистатические (изучение параметров фрикционных связей для последующего учета в численной модели деформирования ткани при локальном ударе) и баллистические исследования (изучение размеров вмятин в пластине при локальном ударе).

Предложен технологичный способ модификации арамидных тканей с помощью *поверхностной обработки* различными материалами, которые позволяют обеспечить начальное сцепление нитей, сухое или вязкое трение (эмульсия ПВА естественной сушки и термообработанная (Т), эмульсия ПВА с многостенными углеродными нанотрубками – МУНТ (1%), акриловый герметик, эластомер RTV, эластомер RTV с добавлением МУНТ (1%), канифоль сосновая и силиконовая смазка аэрозольная, эпоксидная смола ЭД-20 и ЭД-20 с нанодиамазами с массовой долей 1%) [2, 3, 6]. После сушки эмульсия ПВА превращается в тонкий слой термопласта ПВА.

Вытягивание нитей производили из образцов ткани размерами 50×50 мм на универсальной испытательной машине Instron 5882 со скоростью 50 мм/мин при комнатной температуре. На рисунке 2 показано закрепление образца ткани в захватах. Область, в которой происходило вытягивание нитей, имела ширину 10 мм.

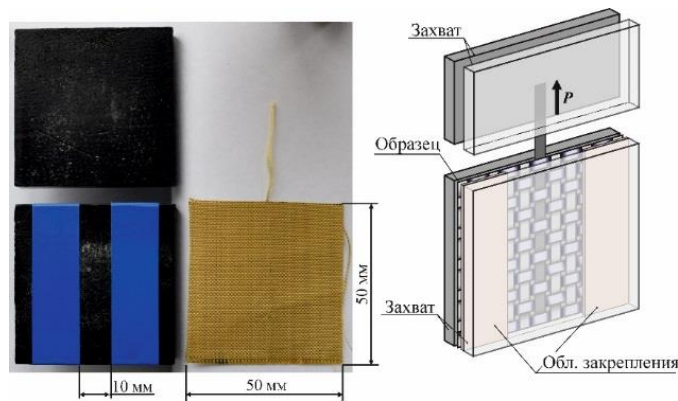


Рис. 2. Фотография и схема закрепления образца при вытягивании нити

На рисунке 3 представлены типичные результаты экспериментов по вытягиванию одной нити (опыты повторяли до пяти раз для каждого из 11 видов обработки) из ткани полотняного переплетения (таблица 1 с выборкой из одиннадцати наиболее эффективных четырех обработок). Полученные данные показали, что даже слабое покрытие, меняющее трение и обеспечивающее начальную связанность, может существенно изменять максимальное усилие и энергию вытягивания [2].

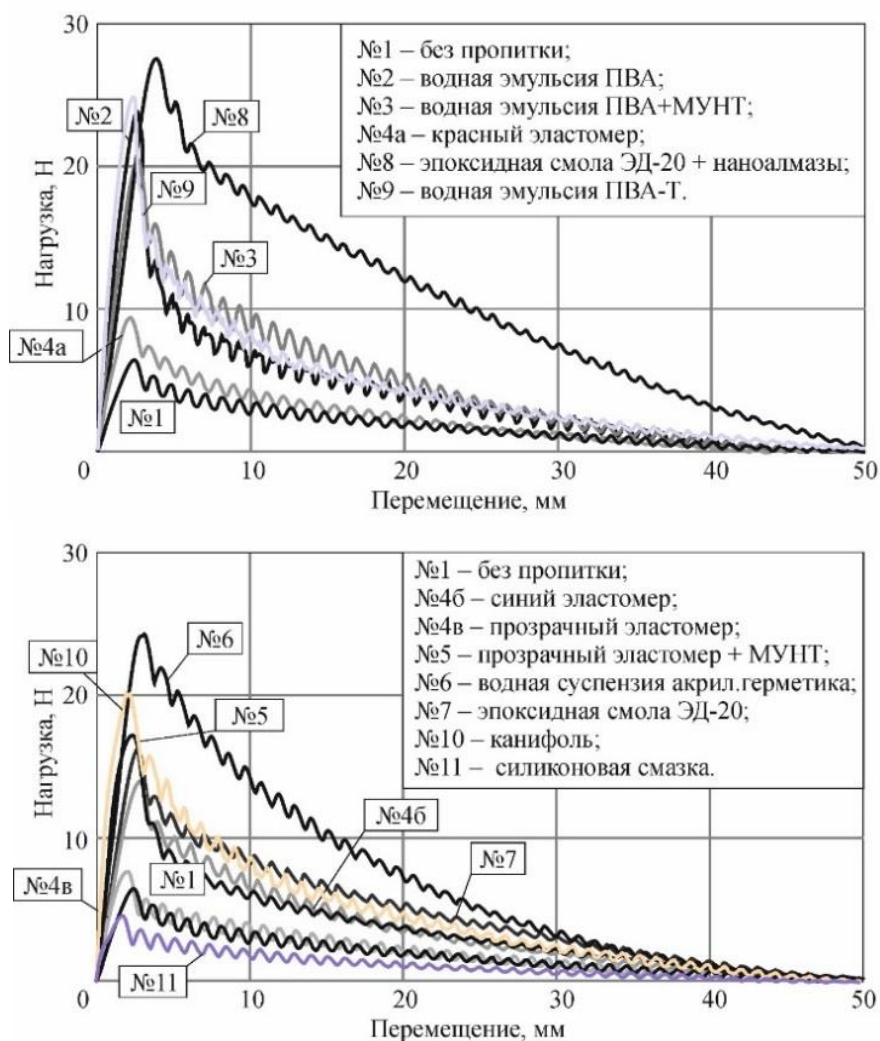


Рис. 3. Кривые «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из обработанной ткани

Таблица 1

Характеристики вытягивания нити из обработанной ткани полотняного переплетения

№	Тип обработки	Поверх. плотность ткани ρ , кг/м ²	Макс. усилие F_3 , Н	Энергия вытягивания W_3 , Дж	Удельное усилие $\frac{F_3}{\rho}$, Н·м ³ /кг	Удельная энергия $\frac{W_3}{\rho}$, 1·10 ⁻³ Дж·м ³ /кг	Рейтинг
1	Без обработки	110	6,94±0,94	0,089±0,018	0,06±0,009	0,807±0,162	–
2	Термопласт ПВА	116,3	23,52±1,22	0,22±0,01	0,20±0,009	1,92±0,118	III
3	Термопласт ПВА-Т	115,6	23,94±1,36	0,22±0,018	0,21±0,01	1,90±0,15	III
4	Термопласт ПВА с МУНТ 1%	112,8	19,20±1,85	0,22±0,016	0,17±0,02	1,95±0,14	III
5	Эластомер RTV синий (ABRO Masters)	125,7	16,70±0,74	0,189±0,001	0,13±0,01	1,50±0,01	IV
6	Акриловый герметик	132,3	26,79±3,60	0,39±0,057	0,20±0,03	2,39±0,28	II
7	Эпоксидная смола ЭД-20 с нанодиамазами 1%	146,5	25,65±3,0	0,474±0,057	0,18±0,02	3,24±0,386	I

Таблица 2

Характеристики пакета из трех слоев ткани при локальном ударе

№	Тип обработки	Количество слоев / поверх. плотность (г/м ²) слоя ткани в образце		Поверх. плотность пакета ρ, кг/м ²	Увеличение массы ткани, %	Скорость ударника V, м/с	Глубина вмятины w, мм	Эффективность покрытия Ψ, Дж·м/кг	Рейтинг
		Сухая ткань	Обработан- ная ткань						
1	Без обработки	3 / 110	–	330,0	–	104 ± 3,6	4,38 ± 0,4	1,31 ± 0,1	IV
2	Термопласт ПВА	2 / 110	1 / 115,6	335,6	5,0	109 ± 3,4	4,0 ± 0,5	1,56 ± 0,1	I
3	Термопласт ПВА с МУНТ	2 / 110	1 / 112,8	332,8	2,5	96 ± 7,3	3,9 ± 0,3	1,25 ± 0,1	VI
4	Эластомер RTV (ABRO Masters) + МУНТ 1%	2 / 110	1 / 125,7	345,7	14,3	106 ± 3,1	3,99 ± 0,2	1,40 ± 0,04	II
5	Эпоксидная смола ЭД-20	2 / 110	1 / 143,7	363,7	30,6	110 ± 2,8	4,50 ± 0,1	1,30 ± 0,04	V
6	Эпоксидная смола ЭД-20 с наноалмазами 1%	2 / 110	1 / 146,5	366,7	33,2	112 ± 0,7	4,39 ± 0,3	1,36 ± 0,1	III

Таблица 3

Характеристики пакета из двух слоев ткани при локальном ударе

№	Тип обработки	Количество слоев / поверх. плотность (г/м ²) слоя ткани в образце		Поверх. плотность пакета ρ, кг/м ²	Увеличение массы ткани, %	Скорость ударника V, м/с	Глубина вмятины w, мм	Эффективност ь покрытия Ψ, Дж·м/кг	Рейтинг
		Сухая ткань	Обработан- ная ткань						
1	Без обработки	2 / 110	–	220,0	–	124±1	6,7±0,2	1,84±0,01	–
2	Термопласт ПВА	–	2 / 115,8	231,6	5,3	114±7	3,8±0,2	2,63±0,22	I
3	Термопласт ПВА-Т	–	2 / 115,2	230,4	4,7	122±4	4,3±0,4	2,68±0,17	I
4	Канифоль	–	2 / 114,1	228,2	3,7	112±2	4,0±0,4	2,40±0,17	II

Максимальные значение удельной энергии (энергия вытягивания, деленная на массу 1 м² ткани) имели эпоксидная смола с наноалмазами, акриловый герметик и композиции ПВА с МУНТ, ПВА, ПВА-Т. Композиции на основе ПВА имели более высокий расчетный коэффициент сухого трения наряду с начальным эффектом склеивания, что выразилось в итоге в росте максимального усилия вытяжки и поглощенной энергии.

Во второй части третьей главы проведены баллистические испытания ударником диаметром 4,5 мм из пневматического пистолета ИЖ53М. Двух- и трехслойные пакеты из арамидных тканей (100×100 мм) были уложены на поверхность блока из технического пластилина (регистрирующей среды). Скорость ударника была 104±6 м/с, которую фиксировали с помощью хронографа S04 с погрешностью 1 м/с. Скорости были достаточно малые, чтобы не рассматривать разрушение нитей, а выявить лишь влияние тонких покрытий на процесс вытягивания нитей.

На поверхности пластилина были получены отпечатки, глубина которых была измерена на срезах оптическим методом на инструментальном микроскопе с погрешностью 0,01 мм. Далее построена зависимость «глубина вмятины в пластилине w – начальная скорость ударника V ». В таблице 2 представлены экспериментальные данные эффективности покрытий, которые были

определены по критерию $\Psi = \frac{m \cdot V^2}{2 \cdot w \cdot \rho}$, где $m = 0,35$ г – масса ударника, ρ –

поверхностная плотность образца. Максимум этого критерия обеспечит минимальный прогиб и массу тканевого пакета при неизменной энергии удара.

Обобщая результаты экспериментов на вытягивание и баллистическое нагружение, можно выделить наиболее эффективное покрытие арамидных тканей – термопласт ПВА.

С использованием полученных экспериментальных данных о механических свойствах арамидных тканей и регистрирующей среды **в четвертой главе** были разработаны конечно-элементные модели, которые позволили прогнозировать поведение тканей при квазистатическом вытягивании нити и динамическом деформировании ткани при локальном ударе [3-6].

Экспериментальное значение нагрузки разрушения арамидной нити Русар® (АО «Каменскволокно», Россия) со средней линейной плотностью 29,4 текс лежит в диапазоне 61±5 Н (предел прочности 2,9±0,2 ГПа), модуль упругости 141±5 ГПа. Значение трансверсального модуля сдвига эквивалентного сплошного материала нити G_{zx} было определено обратным методом, сравнивая расчетную (МКЭ) и экспериментальную диаграммы *разгрузки* регулярно искривленной нити, извлеченной из ткани (подробно рассмотрено в тексте диссертации). Остальные упругие свойства слабо влияют на результаты расчетов и приняты малыми в соответствии с рекомендациями литературных источников.

Для проведения расчетных исследований был использован пакет LS-DYNA. Конечно-элементная модель ткани состояла из отдельных нитей как кусочно-линейных оболочечных конечных элементов SHELL163 *постоянной* толщины, рисунок 4. Размеры конечных элементов был приняты соответствующими

схематизации ткани. Показано, что такой размер обеспечивает достаточно высокую точность определения деформаций нити в тестовом примере – ударе по бесконечной гибкой нити (задача Х.А. Рахматулина) с постоянной скоростью. Материал нитей был принят ортотропным. Покрытие в модели было учтено с помощью дополнительных оболочечных конечных элементов из упругопластического материала, рисунок 5, без увеличения количества узлов. На рисунке 6 представлена поверхность образца после обработки, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM).

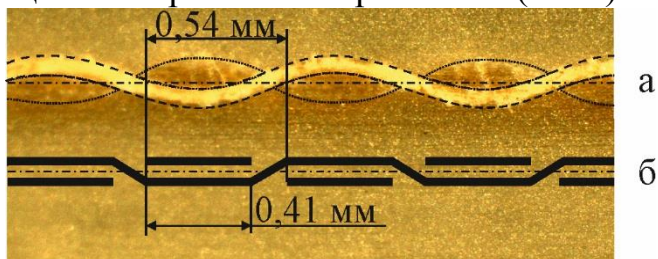


Рис. 4. Схематизация ткани Twaron 709 (а) численной моделью (б)

■ Нити основы ■ Нити утка ■ покрытие ПВА

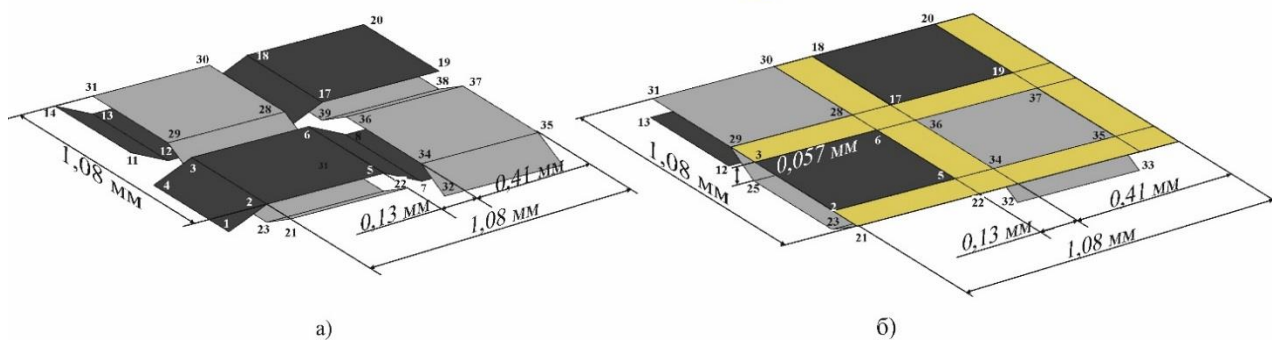


Рис. 5. Элементарные ячейки для сухой ткани (а) и ткани с обработкой поверхности (б)

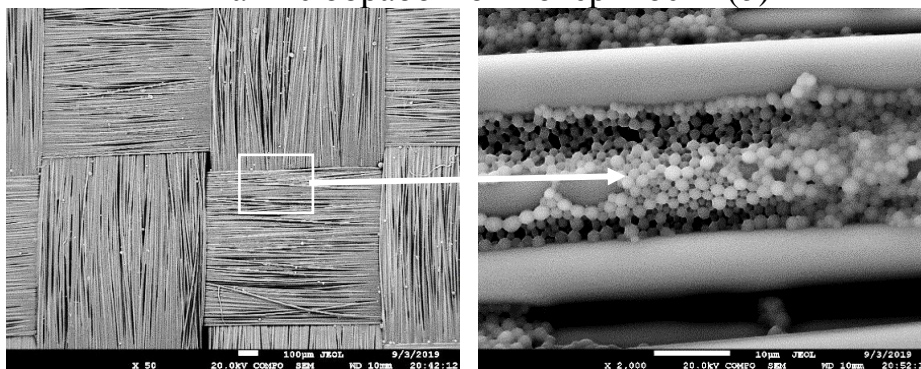


Рис. 6. Поверхность ткани после обработки ПВА

Толщина тонкого покрытия была определена на основании данных об увеличении поверхностной плотности ткани. Модуль упругости и плотность покрытия были предварительно определены из экспериментов на пленке ПВА. Предел текучести и разрушающая деформация покрытия были варьируемыми параметрами (использована технология удаления конечных элементов из сетки с сохранением их инерции). Результаты поиска наилучшего сочетания этих параметров (критерий – качественное и количественное согласие расчетных и экспериментальных кривых вытяжки) приведены на рисунке 7. Отклонение значений расчетной нагрузки от экспериментальной составляет менее 5%.

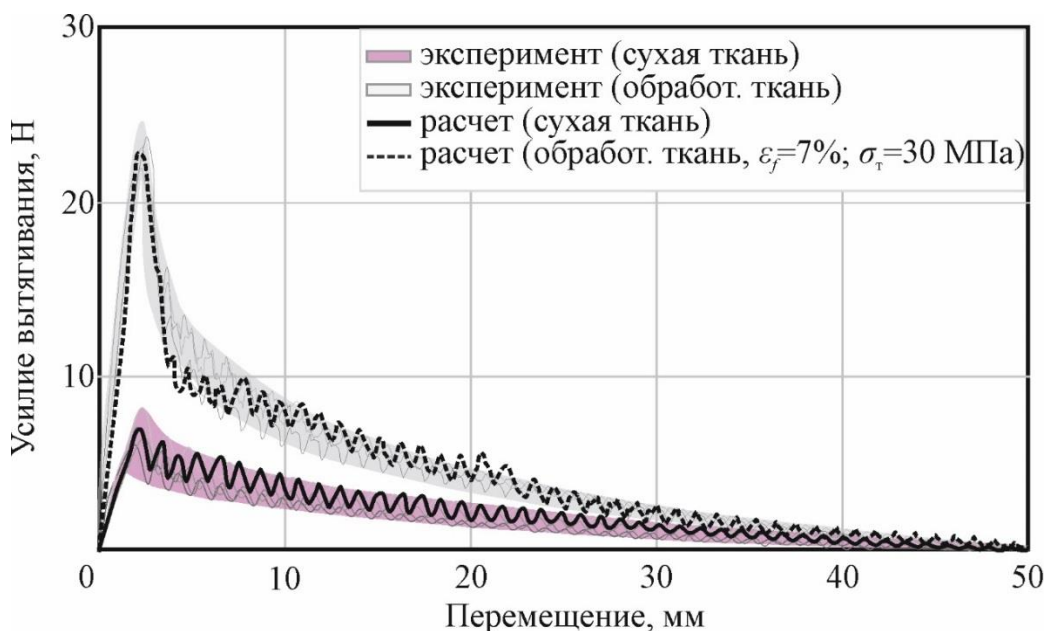


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей вытягивания нити из ткани

Во второй части четвертой главы рассмотрен локальный удар по нормали к поверхности ткани с определением глубины вмятины в регистрирующей среде. Материал ударника был задан упругим, а регистрирующей среды (пластилина) – упругопластическим с пределом текучести, зависящим от скорости деформирования (глава 2). Численная модель взаимодействия нитей с учетом наличия покрытия была верифицирована ранее *на задаче вытягивания нити*, откуда определены механические свойства материала покрытия.

Полученные расчетом картины деформирования близки к экспериментально наблюдаемым (рисунки 8, 9).

Результаты расчетов взаимодействия ударника и тканевых образцов при низкоскоростном локальном воздействии показали, что разработанные модели позволяют предсказать максимальное усилие вытягивание нити из ткани и при локальном ударе глубину вмятины в пластилине, отличающихся от экспериментальных значений не более, чем на 15%.

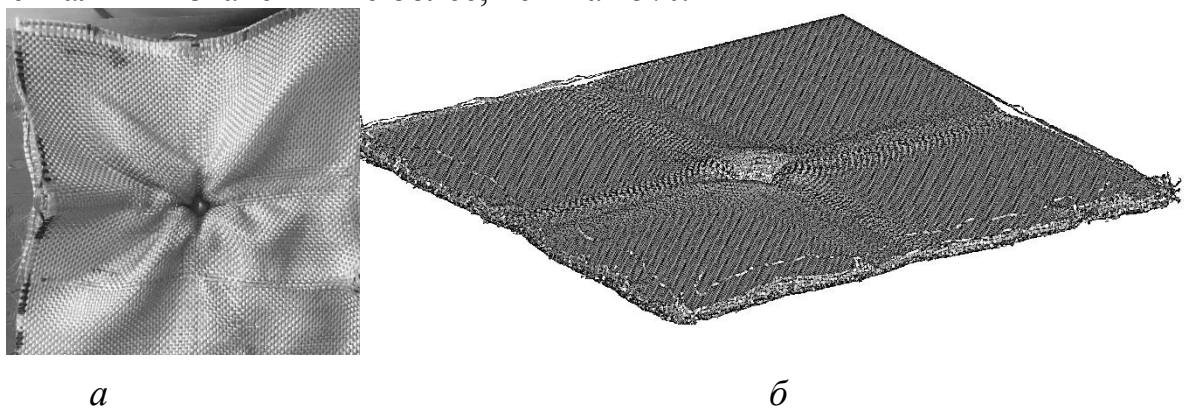


Рис. 8. Экспериментальная (а) и расчетная (б) картины деформирования двух слоев арамидных тканей полотняного переплетения P110 при скорости ударника ~125 м/с

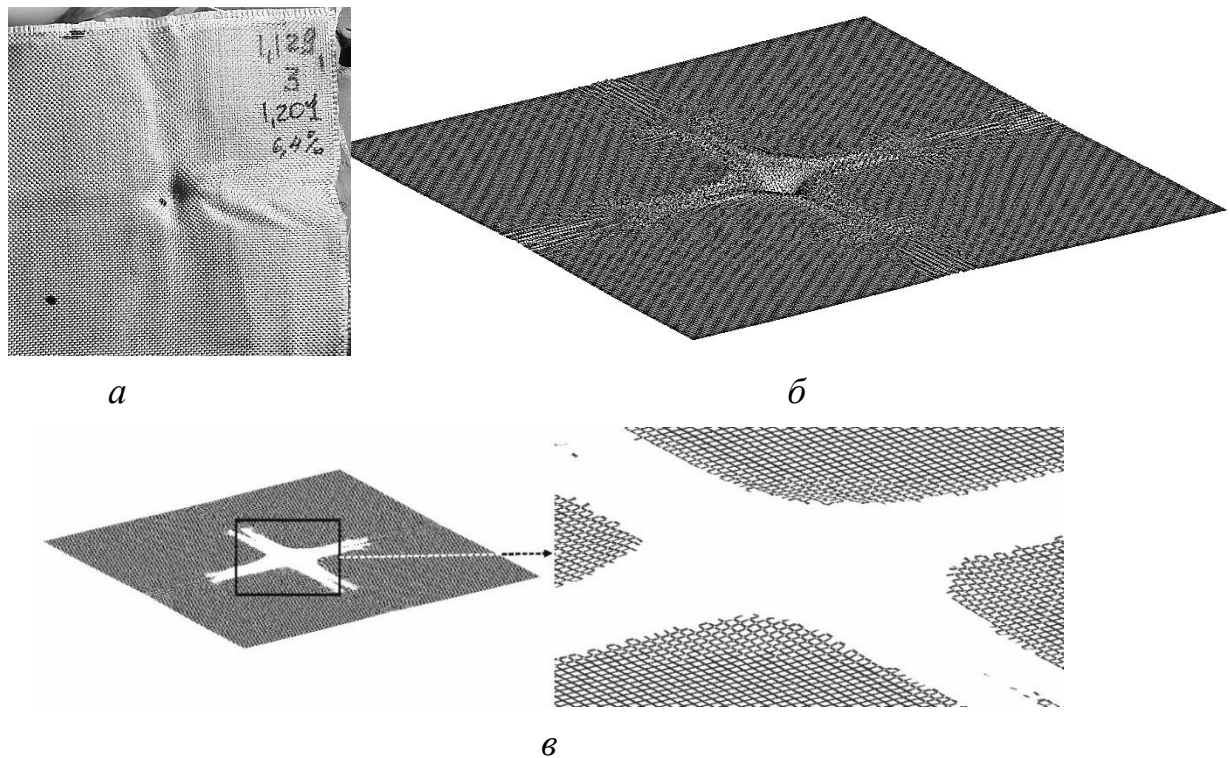


Рис. 9. Экспериментальная (а) и расчетная (б) картины деформирования двух слоев арамидных тканей Р110 с тонкими покрытиями при скорости ударника ~ 122 м/с. Разрушение тонкого покрытия (в)

Разработанные модели были использованы **в пятой главе**, которая посвящена расчетно-экспериментальной оценке деформирования и разрушения многослойного тканевого пакета из арамидных тканей *при высокоскоростном ударе* [7]. Получена оценка баллистических пределов тканевых пакетов в сухом состоянии и с тонким покрытием ПВА, а также определены глубины вмятин в пластилине в зависимости от скорости соударения. Влияния тонких покрытий на баллистические характеристики арамидных тканевых структур было рассмотрено на двух видах образцов: №1 – пакет из пяти слоев сухой арамидной ткани Twaron® 709 размерами 100×100 мм суммарной поверхностной плотностью $\sim 1,0$ кг/м²; №2 – пакет из пяти слоев той же ткани с покрытием термопласта суммарной поверхностной плотностью $\sim 1,05$ кг/м² (утяжеление $\sim 5\%$).

Баллистические испытания были проведены по нормали к поверхности образцов на баллистическом разгонном стенде ЮУрГУ, рисунок 10. Перед проведением испытаний образец помещали между двумя поликарбонатными пластинами с центральным отверстием диаметром 40 мм, которые были закреплены на стенде, рисунок 10. Стальной ударник имел диаметр 6,35 мм и массу 1,05 г (ГОСТ 34286-2017 и ГОСТ Р 55623-2013 на противоосколочную стойкость). Начальную скорость ударника варьировали в диапазоне 120-805 м/с и фиксировали с помощью оптического хронографа S06. Остаточная скорость ударника была определена по перемещениям фрикционного тормоза (ловушки, в которую попадает ударник после пробития пакета). На основании полученных

данных были построены кривые «остаточная скорость – начальная скорость ударника», рисунок 11.



Рис. 10. Баллистический стенд с закрепленным образцом в захвате

В пакете LS-DYNA были проведены расчеты взаимодействия тканевого пакета и ударника с различными скоростями соударения. В расчетной модели учтены условия закрепления пластин из поликарбоната. По результатам расчета были получены остаточные скорости ударника, которые были сопоставлены с экспериментальными данными (рисунок 11) с использованием трехпараметрической аппроксимации Ламберта-Джонаса

$$V_r = \begin{cases} 0 & \text{if } V_i < V_L \\ A \cdot (V_i^n - V_L^n)^{1/n} & \text{if } V_i \geq V_L \end{cases}, \quad (1)$$

где V_L – баллистический предел (минимальная скорость пробоя), V_i , V_r – начальная и остаточная скорости ударника, n – степень, A – множитель. Значения параметров A , V_L и m были найдены с помощью метода наименьших квадратов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что баллистический предел V_L 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. Энергия, которую образец может поглотить без сквозного пробоя возросла более, чем в три раза, тогда как поверхностная плотность увеличилась лишь на 5%. При скоростях соударения, превышающих 350 м/с, образцы из сухой ткани и ткани с покрытием ПВА поглощают практически одинаковое количество энергии.

На втором этапе была проведена расчетно-экспериментальная оценка влияния тонких покрытий ПВА на величину *прогиба тыльной стороны пакета* (глубины вмятины в пластилине). Экспериментальные данные были получены на разгонном стенде с аналогичными вариантами тканевых пакетов. Испытания были произведены стальной сферой диаметром 6,35 мм в образец, который был расположен на поверхности технического пластилина при температуре окружающей среды $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Начальная скорость ударника была выбрана таким образом, чтобы она составляла не менее 90% от величины баллистического

предела для каждого из типов образцов, а взаимодействие с ударником не приводило к разрыву волокон. Начальную скорость для пакета из сухих тканей варьировали в диапазоне 140-150 м/с; для пакета с обработанными ПВА тканями было рассмотрен диапазон 135-274 м/с.

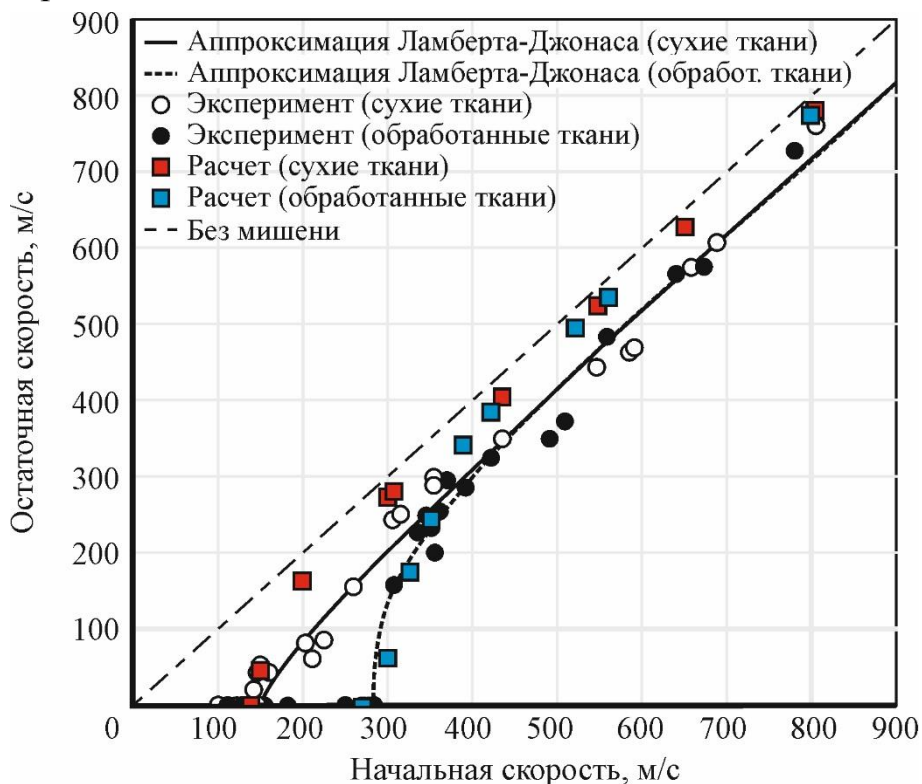


Рис. 11. Баллистические кривые (эксперимент и расчет) для образцов из сухой и обработанной ткани

Установлено, что глубина вмятины в пластилине для пакетов с обработанными тканями почти в два раза ниже по сравнению со значениями для пакетов с сухими тканями при скоростях 130-150 м/с (рисунок 12).

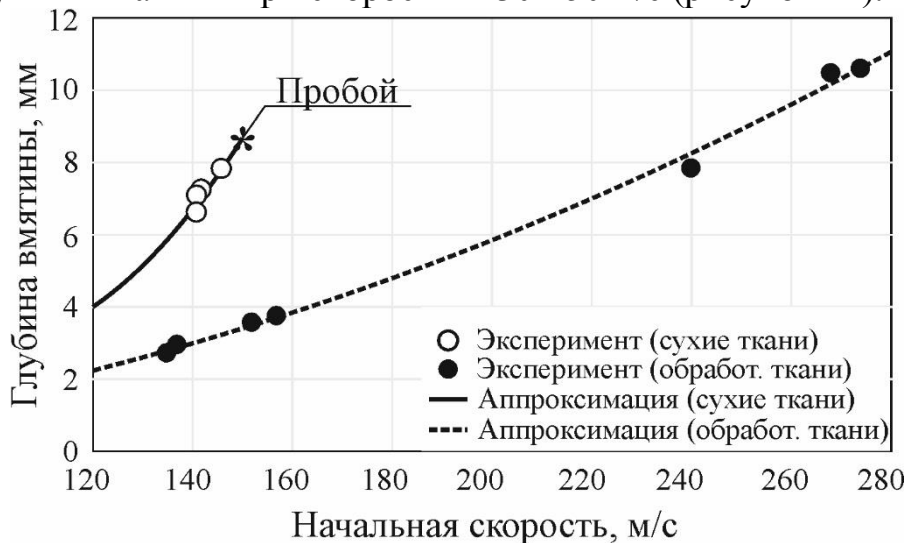


Рис. 12. Глубина вмятин в пластилине при локальном ударе по тканевым пакетам

В таблице 4 представлено сопоставление экспериментальных и расчетных значений глубины отпечатка в пластилине для двух типов образцов. Максимальная погрешность не превышает 20%, тогда как абсолютная погрешность прогноза перемещений была менее 1 мм.

Таблица 4

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных глубины отпечатка в пластилине

Тип образца	Скорость ударника V_i , м/с	Глубина отпечатка в пластилине w , мм		Погрешность, %
		Эксперимент	Расчет МКЭ	
Сухая ткань	141	6,6	6,0	12,4
Обработанная ткань	138	3,4	4,1	20,5
	268	10,3	10,5	1,9

В качестве заключения по главе можно отметить, что отмеченное уменьшение глубины вмятины в пластилине при выстреле в реальный бронезилет может привести к снижению травмирования человека.

Рекомендации по использованию арамидных тканей с тонкими покрытиями термопластом ПВА и эластомерами использованы ЗАО «ФОРТ Технология» (г. Москва) при создании новых защитных структур.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования механических свойств и определены параметры модели упруговязкопластического деформирования технического пластилина. Модель учитывает изменение предела текучести при растяжении, сжатии, сдвиге и индентировании в диапазоне скоростей деформаций $d\varepsilon/dt = 0,0004...250 \text{ с}^{-1}$. Она может быть использована в расчетах взаимодействия ударника и образцов защитных тканевых структур, расположенных на пластилине, или при моделировании технологических процессов обработки металлов давлением.

2. Проведены экспериментальные исследования влияния тонких покрытий из различных материалов на деформирование арамидной ткани полотняного переплетения P110 при вытягивании нити и ударном воздействии по ткани на пластилине. Показано, что тонкие покрытия приводят к усилению фрикционного взаимодействия нитей при минимальном утяжелении и являются эффективным средством снижения прогибов ткани при локальном ударе. Среди одиннадцати рассмотренных материалов покрытий термопласт ПВА является наиболее предпочтительным. Термопласт ПВА увеличил усилие вытягивание в 3,4 раза, энергию вытягивания в 2,5 раза при увеличении поверхностной плотности ткани на 5...6%.

3. Разработаны и верифицированы численные модели процесса деформирования ткани при вытягивании нити и при низкоскоростном ударном воздействии по ткани, расположенной на пластилине. Модели отличаются от известных учетом тонких покрытий в виде дополнительных разрушающихся

элементов из изотропного упругопластического материала и усилением трения между нитями. Элементы покрытия имеют общие узлы с нитями, обеспечивая неизменность времени расчетов по сравнению с сухими тканями (численную эффективность). В результате установлено, что разработанные модели позволяют предсказывать максимальное усилие вытягивания нити из ткани, а при локальном ударе – глубину вмятины в пластине, согласующиеся с экспериментальными значениями.

4. Проведены расчетно-экспериментальные исследования процесса деформирования и разрушения пакетов из сухих или обработанных термопластом ПВА арамидных тканей плотного переплетения Twaron® 709 при локальном ударном воздействии стальной сферой диаметром 6,35 мм со скоростями до 800 м/с. Установлено, что обработка позволила увеличить баллистический предел со 149 м/с до 283 м/с, а прогиб пакета (глубина вмятины в пластине) снизить в два раза при увеличении массы пакета на 5-6%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сапожников, С.Б. Исследование механических свойств технического пластилина при квазистатическом и динамическом деформировании / С.Б. Сапожников, А.В. Игнатова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 200-219 (ВАК, Scopus).

2. Игнатова, А.В. Обработка поверхности арамидной ткани для управления поглощением энергии удара в слоистых композитах / А.В. Игнатова, С.Б. Сапожников // Композиты и наноструктуры. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 231-240 (ВАК).

3. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику трения нитей / А.В. Игнатова, Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников, А.А. Шаблей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 4. – С. 121-137. doi: 10.15593/perm.mech/2017.4.09 (ВАК, Scopus).

4. Долганина, Н.Ю. Разработка компьютерных моделей баллистических тканей с поверхностной обработкой / Н.Ю. Долганина, А.В. Игнатова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – Т. 6, № 4. – С. 91-100. doi: 10.14529/cmse170407 (ВАК).

5. Долганина, Н.Ю. Разработка компьютерных моделей модифицированных арамидных тканей / Н.Ю. Долганина, А.В. Игнатова, И.С. Слободин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2018. – Т. 7, № 4. – С. 30-40. doi: 10.14529/cmse180402 (ВАК).

6. Ballistic resistance modeling of aramid fabric with surface treatment / N.Yu. Dolganina, A.V. Ignatova, A.A. Shabley, S.B. Sapozhnikov // Communications in Computer and Information Science (4th Russian Supercomputing Days:

Supercomputing, RuSCDays 2018). – 2019. – Vol. 965. – P. 185-194. doi: 10.1007/978-3-030-05807-4_16 (Scopus).

7. Ignatova, A.V. Influence of surface polymer coating on ballistic impact response of multi-layered fabric composites: Experimental and numerical study / A.V. Ignatova, O.A. Kudryavtsev, M.V. Zhikharev // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – Vol. 144. – No. 103654. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103654 (Scopus).