

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

ИГНАТОВА Анастасия Валерьевна

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

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Сапожников С.Б.

Челябинск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Обзор литературы по вопросам повышения эффективности тканевых защитных структур при локальном ударном воздействии	14
1.1. Основные этапы развития защитных многослойных тканевых структур, применяемые материалы, оценка эффективности защитных структур	14
1.2. Методы повышения баллистической стойкости многослойных тканевых панелей при локальном ударе	18
1.2.1. Использование по толщине пакета тканей различного переплетения .	19
1.2.2. Увеличение фрикционного взаимодействия между элементами структуры.....	20
1.3. Моделирование взаимодействия многослойных тканевых структур с высокоскоростным ударником	23
1.3.1. Аналитические модели взаимодействия тканевых структур с ударником	23
1.3.2. Численное моделирование поведения многослойных тканевых структур при локальном ударе	27
1.4. Исследование механических свойств регистрирующей среды.....	33
Выводы по главе.....	36
2. Экспериментальные исследования механических свойств регистрирующей среды.....	38
2.1. Квазистатические исследования механических свойств технического пластилина	38
2.1.1. Статическое растяжение пластилина	39
2.1.2. Статическое сжатие пластилина.....	42
2.1.3. Статические испытания пластилина на сдвиг.....	44
2.1.4. Статическое индентирование пластилина	45
2.2. Динамические исследования механических свойств технического пластилина	50
2.2.1. Динамическое сжатие технического пластилина	50

2.2.2. Динамическая твердость (ударное индентирование)	52
2.3. Зависимость предела текучести от скорости деформации	53
Выводы по главе	55
3. Экспериментальные исследования баллистических тканей	56
3.1. Изготовление тканевых образцов	56
3.2. Коэффициент трения нити по арамидной ткани	58
3.3. Вытягивание нити из арамидных тканей	60
3.4. Исследование влияния обработки на прогиб ткани (на глубину вмятины в пластилине) при низкоскоростном ударе	69
3.5. Квазистатические испытания до разрушения арамидных нитей и образцов из термопласта ПВА	72
3.5.1. Определение механических свойств арамидных нитей	72
3.5.2. Определение свойств пленок из термопласта ПВА	73
Выводы по главе	77
4. численное моделирование механического поведения арамидных тканей при локальном ударе	78
4.1. Разработка мезоуровневой модели арамидных тканей с тонким покрытием из термопласта ПВА	78
4.1.1. Геометрическая сторона задачи	78
4.1.2. Определение параметров моделей материалов и контактных алгоритмов	80
4.2. Верификация расчетных моделей нити	85
4.3. Моделирование вытягивания нити из ткани	88
4.4. Моделирование деформирования арамидной ткани на техническом пластилине при низкоскоростном ударе	91
Выводы по главе	93
5. Расчетно-экспериментальные исследования баллистических тканей при высокоскоростном локальном ударе	94
5.1. Экспериментальное исследование деформирования и разрушения тканевого пакета при ударном нагружении	94
5.1.1. Вытягивание одиночной нити из ткани	95

5.1.2. Оценка баллистического предела для двух типов образцов.....	96
5.1.3. Оценка влияния обработки на глубину вмятины в пластилине при локальном ударе.....	102
5.2. Разработка и верификация расчетных моделей тканевого пакета с тонкими покрытиями для расчетов ударного взаимодействия.....	106
5.2.1. Геометрическая сторона задачи.....	106
5.2.2. Модель материалов и контактные взаимодействия.....	107
5.2.3. Численное моделирование процесса вытягивания нити из ткани	111
5.2.4. Численное моделирование оценки баллистического предела пакетов арамидной ткани при локальном ударе	113
5.2.5. Численное моделирование деформирования пакетов арамидной ткани и пластилина при локальном ударе.....	116
Выводы по главе.....	118
Заключение	120
Список литературы	122
Приложение I.....	143
Приложение II.....	145

ВВЕДЕНИЕ

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

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.

Методология и методы диссертационного исследования. Для исследований механического поведения арамидных тканей и пластилина в диссертационной работе был использован ряд расчетных и экспериментальных методов. Экспериментальные исследования деформирования технического пластилина при квазистатическом нагружении были проведены на испытательной машине Instron 5882 (силоизмерители на 100 Н и 5 кН, погрешность измерения нагрузки ± 1 Н и перемещения ± 1 мкм) с видеоекстензометром AVE, при динамическом нагружении – на лабораторной установке (максимальная высота сбрасывания груза 1,0 м) и башенном копре CEAST 9350 с максимальной энергией удара 1800 Дж. Экспериментальное определение модуля упругости и коэффициента Пуассона выполнено с помощью система цифровой корреляции изображения (DIC VIC-2D с размером пикселя 4,4 мкм и максимальной частотой съемки изображения 14 кадров/с). Поведение арамидных тканей при вытягивании нити, а также механических свойств арамидных нитей и коэффициентов трения получено на испытательной машине Instron 5882 с силоизмерителями 100 Н. Экспериментальное исследование влияния разных обработок на поведение тканей при низкоскоростном ударе проведено с помощью пневматического пистолета ИЖ53М (максимальная скорость ударника 125 м/с). Деформирование и

разрушение пакетов из слоев (сухих или обработанных) тканей экспериментально исследовано на лабораторном баллистическом стенде БС-1 (максимальная начальная скорость 900 м/с, оптический хронограф S06 с погрешностью измерения скорости тела 1 м/с). Глубина вмятины в пластилине определена инструментальным микроскопом МИМ-1с (с погрешностью 0,01 мм). Механические свойства пленок ПВА получены на испытательной машине Instron 5942 (максимальное усилие 10 Н).

Измерение массы арамидных нитей выполнено на аналитических весах Scientech SA 80 (максимальная масса 80 г, погрешность измерения 0,1 мг), анализ микроструктуры ткани и нитей с термопластом ПВА выполнен на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-7001F (увеличение до $\times 200\,000$) и оптическом микроскопе Nikon SMZ 745T (увеличение до 300 \times).

При разработке численных моделей сухих и обработанных тканей, а также исследований их деформирования и разрушения был использован лицензионный коммерческий пакет LS-Dyna R7.1.2, в котором реализован метод конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени.

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;
- кафедр «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 [18, 28, 30], включая 4 публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в базу данных Scopus [28, 30, 52, 101].

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.

Первая глава посвящена анализу российских и зарубежных литературных источников по теме деформирования многослойных арамидных тканей и технического пластилина. Рассмотрены основные этапы развития защитных тканевых структур, методы повышения баллистической стойкости многослойных тканевых панелей при локальном ударе, а также существующие подходы, применяемые для анализа взаимодействия тканевых структур с ударником.

Во второй главе проведены экспериментальные исследования механических свойств регистрирующей среды (технического пластилина) при статическом и динамическом нагружениях. Механические свойства технического пластилина были получены при статическом растяжении, сжатии, сдвиге, индентировании и динамическом сжатии и индентировании. На основании полученных данных была построена зависимость предела текучести от скорости деформации $0,4 \cdot 10^{-3} \dots 250 \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре ($20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), которая была использована при моделировании процесса деформирования арамидных тканей и регистрирующей среды при ударе в программном пакете LS-DYNA.

В третьей главе проведены квазистатические испытания на вытягивание нити из арамидной ткани с различными материалами *поверхностной обработки*, влияющими на фрикционные связи между нитями. Проведены также баллистические испытания тканей (низкоскоростной удар) и изучено влияние обработок на размер отпечатка в пластилине при ударе. Определены механические свойства арамидных нитей и термопласта ПВА в виде пленки.

Четвертая глава посвящена численному моделированию процесса вытягивания нити из ткани, процесса деформирования арамидных тканей и пластилина при ударном воздействии. Прогнозирование поведения было рассмотрено на сухой ткани полотняного переплетения и ткани с тонким покрытием из термопласта ПВА. Тонкие покрытия были учтены дополнительными разрушающимися элементами из упругопластического материала.

В пятой главе выполнена расчетно-экспериментальная оценка деформирования и разрушения многослойного тканевого пакета при

высокоскоростном ударе. Получены значения баллистических пределов тканевых пакетов в сухом состоянии и с тонким покрытием из термопласта, а также определены глубины вмятины в пластилине в зависимости от скорости соударения.

В заключении приведены основные результаты проведенных исследований.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору Сапожникову Сергею Борисовичу за постоянную поддержку, консультации и советы по выполнению работы.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВОПРОСАМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТКАНЕВЫХ ЗАЩИТНЫХ СТРУКТУР ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В данной главе представлен анализ российских и зарубежных литературных источников в области развития многослойных тканевых структур, существующих методов анализа деформирования многослойных арамидных тканевых структур и регистрирующей среды (технического пластилина) при локальном ударном воздействии.

1.1. Основные этапы развития защитных многослойных тканевых структур, применяемые материалы, оценка эффективности защитных структур

Человек начал задумываться о защите сразу же после возникновения оружия, начиная с первобытнообщинного строя. При модификации или появлении нового оружия человек пытался усовершенствовать защиту. К самым первым средствами защиты можно отнести кожу и шкуры животных [12, 17]. Многослойные защитные структуры были сделаны из простых материалов и защищали от ударов тупыми или острыми предметами.

Далее развитие защитных структур было направлено на их усовершенствование с помощью различных костяных, металлических элементов, прикрепленные на ткани или коже. Стала появляться бронеодежда с множеством мелких элементов разной формы. В первых панцирях элементы были расположены встык, но потом они стали располагаться внахлест. Такой способ крепления позволил повысить уровень защиты за счет снижения вероятности появления щелей между пластинами. В начале Средневековья стали появляться кольчуги со стеганой рубашкой. На Руси популярным видом брони была кольчуга с металлическими пластинами [12, 172]. Но в XIV в. кольчуга стала малоэффективной против стрел и мечей, поэтому в моду вошла бригантина –

тканевый или кожаный жилет, поверх которого прикрепляли/нашивали стальные пластины.

Разработчиком прообраза современного мягкого бронежилета был Каземир Зеглен. Благодаря случаю, описанному в 1880-х годах медиком Джорджем Эмери Гудфелоу, Зеглен решил использовать шелковую ткань для защиты от мягких свинцовых пуль. В 1901 г. публике были представлены зегленовские жилеты, в которые стреляли с расстояния восьми шагов, и человек оставался жив [93].

В 1907 году полковник В.Ф. Галле с капитаном К.К. Задарновским предложили панцири с металлическими слоями, обшитым ватой с внутренней стороны [12]. По рекомендации экспертной комиссии эти панцири были закуплены для полиции. Позднее В.Ф. Галле предложил усовершенствованный вариант панциря из «проволочного войлока» (плотно спрессованных тонких стальных проволок). Масса его составляла от 19 до 21 фунтов [12]. В конструкции была использована амортизирующая подкладка из ваты. Панцирь Галле был разрешен к приобретению офицерами полиции, т.к. прошел все испытания [12, 93].

До Первой мировой войны широкое распространение получили средства защиты в виде кирас и жилетов скрытого ношения, которые защищали от пистолетных и револьверных пуль. Развитие скорострельной артиллерии, оснащенной разрывными снарядами (фугасными, осколочными и шрапнельными), привело к пониманию необходимости обеспечения пехоты противоосколочными средствами защиты [1]. Разработанные во время Первой мировой войны металлические кирасы, щитки и нагрудники не получили большой популярности, т.к. не обеспечивали заявленный уровень защиты или были тяжелыми и неудобными [12]. В основном панцирь состоял из нескольких металлических частей, которые соединялись между собой кожаными ремнями. Ближе к 1918 г. в конструкции произошли изменения: за пластинами стали располагать несколько слоев ткани. Слои ткани использовали для поглощения энергии удара и предотвращения разлета осколков внутрь брони при откольном разрушении.

В период Второй мировой войны перед конструкторами стояла задача разработать такую защиту, которая позволяла военным быть более подвижными. Развитие промышленности в США позволило разработать новые броневые материалы на основе стеклянных и синтетических волокон [23]. Преимуществом данных волокон являлась значительно меньшая стоимость по сравнению с шелком, недостатками – низкие прочность и модуль упругости [1, 23, 117]. В основном они использовались в авиации для защиты летчиков от низкоскоростных осколков. В августе 1945 г. в американской армии появился бронежилет пехоты M12, в котором для усиления применяли алюминиевые пластины на ударной стороне и несколько слоев нейлоновой ткани в качестве подложки [93].

В конце 1960-х годов Стефани Кволек на фирме DuPont (США) был разработан новый тип высокопрочных синтетических волокон [12, 67, 88, 117, 125] на основе пара-арамида, получивший название Кевлар (Kevlar®). Полимерные волокна обладали высоким модулем упругости и имели предел прочности при растяжении более 3 ГПа. В СССР также велись разработки в данном направлении. В 1971 г. в журнале «Химическая промышленность» появилась публикация о разработанном учеными ВНИИВ синтетическом волокне – арамиде. Первоначальное название было ВНИИВлон, а затем сверхвысокомодульное волокно (СВМ). Применение арамидных волокон в защитных структурах позволило значительно снизить массу бронежилета и запреградную травму. На сегодняшний день арамидное волокно является наиболее распространенным материалом для создания мягких бронежилетов и обеспечения противоосколочной защиты личного состава и военной техники.

В настоящее время существует несколько торговых марок арамидных волокон, которые используются в защитных структурах: СВМ®, Русар®, Армос® (Россия) Kevlar® (США, производитель – DuPont) и Twaron® (Нидерланды, производитель – Teijin Aramid) [20, 23, 35, 117]. Механические свойства некоторых марок нитей при статическом нагружении представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Механические свойства нитей [20, 35, 125]

Марка	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа	Прочность при растяжении, ГПа	Удлинение при разрыве, %
Армос	1450	140...142	5,00...5,50	3,5...4,5
СВМ	1430	120...135	3,80...4,20	4,0...4,5
Русар	1450...1460	140...160	4,50...5,50	3,5...4,0
Kevlar-29	1440	69...77	2,92	3,6
Kevlar-129	1440	75...98	3,20...3,39	3,5...3,6
Twaron	1440...1450	80...121	2,80... 3,10	3,3...3,5

Для оценки эффективности и защитных свойств бронеструктуры необходимо проведение сертификационных испытаний в соответствии с нормативными документами [9-11, 133]. Средства индивидуального бронирования (СИБ) проходят проверку качества в несколько этапов: испытания на противопопульную и противоосколочную стойкость, испытания на определение заброневого воздействия элементами при непробитии защитной структуры, а также испытания на стойкость к воздействию холодного оружия.

В первую очередь проверяют стойкость защитной бронеструктуры к пулям различного калибра и имитатору осколка. Основным показателем является отсутствие проникновения ударника или его частиц за тыльную сторону защитной бронеструктуры. На этом этапе для каждого класса бронезащиты должно быть выполнено не менее пяти выстрелов из нарезного оружия и двух из гладкоствольного оружия. Три выстрела выполняются в область с размерами 100×100 мм. Расстояние, с которого производятся выстрелы, также регламентируются в ГОСТ [9, 10].

При определении противоосколочной стойкости бронежилетов согласно стандартам [9, 11, 133] основной характеристикой является баллистический предел V_{50} – скорость имитатора осколка, при которой вероятность сквозного пробития составляет 50%. В качестве имитатора осколка отечественный стандарт предписывает использовать стальную сферу диаметром 6,35 мм и массой 1,05 г из стали ШХ15.

Стоит отметить, что в российских стандартах имеются определенные противоречия с зарубежными. В частности, в российском ГОСТ Р 55623-2013 [11] при скорости ударника ниже 300 м/с испытания на сопротивление осколкам проводят только на регистрирующем блоке толщиной не менее 100 мм. В качестве регистрирующей среды используют технический пластилин, который предварительно выдерживают при температуре $21 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 24 ч. После этого на выравненную поверхность пластилина с высоты 2 м сбрасывают стальной шар (диаметр 63 мм, масса $\sim 1,0$ кг). Средняя глубина отпечатка должна быть в диапазоне 18-22 мм. После этого пластилиновый блок допускается использовать для сертификационных испытаний. Максимальная глубина вмятины в пластилине при сертификационных испытаниях бронежилетов не оговаривается в этом стандарте, оставляя это на долю заказчика конкретных защитных изделий.

В стандартах США глубина вмятины в пластилине (запреградная травма) после огневых испытаний бронежилетов любых классов не должна быть более 44 мм.

1.2. Методы повышения баллистической стойкости многослойных тканевых панелях при локальном ударе

При проектировании современных защитных структур повышение баллистического предела (стойкости), снижение прогиба тыльной стороны бронежилета (запреградской травмы) являются приоритетными задачами для инженеров.

Ткани из арамидных волокон эффективно рассеивают кинетическую энергию ударника за счет высокой скорости звука в нитях. Однако при постепенном торможении ударника динамические процессы в нитях затухают и наступает стадия сравнительно медленного фрикционного взаимодействия нитей внутри каждого слоя ткани. В работах [3, 20, 35, 44, 55, 63, 125, 130, 177] авторы неоднократно упоминают о том, что трение между нитями, тканями и между тканями и ударником являются важным фактором, оказывающим влияние на

баллистическую эффективность арамидных тканей и величину запреградного прогиба (выпучины, травмы). Остальная часть энергии удара затрачивается на растяжение и разрыв нитей, деформирование ткани. Повышение коэффициента трения не только способствует повышению количества энергии, которая рассеивается при вытягивании первичных нитей, но и повышает вовлеченность вторичных нитей [60, 68, 174, 175], непосредственно не контактирующих с ударником. В то же время, при слишком большом сопротивлении вытягиванию наблюдается обратный эффект из-за преждевременного разрыва нитей [55, 68].

Таким образом, при проектировании защитных многослойных тканевых структур (бронезилетов, щитов, касок) существует всего три основных способа повышения их эффективности:

1. использование более прочных волокон;
2. использование по толщине пакета тканей различного переплетения;
3. увеличение фрикционного взаимодействия между элементами структуры (нитьями в слое, слоями ткани).

В подавляющем большинстве случаев разработчики бронеструктур закупают готовые арамидные нити или ткани у производителей, поэтому практическое применение находят последние два способа. Рассмотрим их более подробно.

1.2.1. Использование по толщине пакета тканей различного переплетения

В наружных слоях бронезилета, контактирующих с высокоскоростной ударником, обычно используют ткани саржевого или атласного переплетения, а в тыльных слоях ткани полотняного переплетения [13, 25, 26, 87]. В тканях саржевого или атласного переплетения нити являются более прямыми и при ударе разрушаются позднее, чем в тканях полотняного переплетения. Расположение их на ударной стороне позволяет более эффективно тормозить ударник. После того, как его скорость уменьшается до определенного предела, в работу вступают тыльные слои ткани полотняного переплетения, которые рассеивают большее количество энергии за счет трения между нитьями и обеспечивают меньший прогиб тыльной стороны.

Недостатком такого способа является некоторое увеличение толщины пакета, и повышение стоимости за счет усложнения логистики и входного контроля.

1.2.2. Увеличение фрикционного взаимодействия между элементами структуры

1. Тканевые структуры с разными углами ориентации слоев по толщине были рассмотрены в работах [36, 40, 45, 135]. При локальном ударе вытягивание нитей происходит в основном нитей, расположенным под ударником. В результате комбинации слоев ткани под углами 0° и 90° формируется пирамидальная выпучина – вытягивание нитей основы и утка. Однако при взаимодействии ударника с многослойной тканевой панелью, в которой слои уложены под разными углами, наблюдается формирование выпучины в форме конуса и повышение баллистического предела. Такой способ усложняет производство защитных панелей и значительно удорожает стоимость готового изделия из-за большого количества отходов ткани при крое.

2. Прошивка тканевой композита [19, 49, 55, 79, 82, 94, 108, 109, 117, 156]. Прошивка пакета повышает связанность слоев друг с другом. При правильном выборе параметров прошивки наблюдается повышение баллистического предела и снижение запреградной выпучины. К недостаткам такого способа можно отнести повреждение нитей, появление концентраторов напряжений, снижение гибкости и трудоемкость подбора параметров прошивки (шаг прошивки, натяжение и толщина нити), обеспечивающих заметное повышение эффективности.

3. Пропитка тканей неньютоновскими жидкостями [24, 46, 48-50, 76, 83, 96, 97, 102, 105, 115, 120, 121, 140, 142, 143, 160]. Неньютоновские жидкости характеризуются существенным повышением вязкости при высоких скоростях деформирования. Чаще всего такое поведение наблюдается в коллоидных суспензиях. При пропитке баллистических тканей коллоидными растворами, количество поглощаемой композитом энергии увеличивается не только за счет сдвиговых эффектов, но за счет повышения трения между слоями ткани и нитями, распределения давления от ударника на большую площадь. Недостатком такого

способа является существенное повышение (иногда более чем в два раза) поверхностной плотности композита по сравнению с непропитанными тканями. Несмотря на большое количество публикаций, использование неньютоновских жидкостей так и не нашло широкого применения в серийных изделиях.

4. Использование тканевых композитов с термопластичной матрицей [47, 51, 81, 87, 112, 157]. Такие материалы получают методом горячего прессования арамидных тканей с прослойками термопластичных полимеров. Массовая доля термопласта в готовом композите составляет около 20%. Термопластичные композиты чаще всего используют в качестве подложки для керамического лицевого слоя или в шлемах. Термопласты имеют сравнительно низкую адгезию к волокнам и позволяют волокнам вытягиваться, а композиту – расслаиваться. Запреградная выпучина при использовании таких материалов будет намного меньше, чем для сухих тканей. В то же время увеличивается вес панели, снижаются баллистический предел и гибкость.

5. Покрытие ткани эластомерами. В работе [95] авторы исследовали влияние латексного покрытия на усилие вытягивания нитей из арамидных тканей, которое косвенно характеризует баллистическую эффективность [157]. Авторами в работах [79, 103, 132, 156] было показано, что при высоких скоростях деформирования нормализованная энергия вытягивания намного больше для обработанных тканей, чем для сухих. В работах [58, 79, 152] авторы представили результаты влияния латексного покрытия арамидной ткани на баллистическую эффективность защитной структуры. По результатам испытаний было установлено, что использование латексного покрытия позволило снизить запреградную выпучину приблизительно в два раза, и в некоторых случаях приводило к увеличению баллистического предела. Существенным недостатком является заметное повышение поверхностной плотности пакета (до 50%).

Приведенные данные свидетельствуют об актуальности разработки новых способов повышения баллистической эффективности многослойных тканевых

структур за счет использования полимерных покрытий, обеспечивающих минимальное (не более 10%) повышение поверхностной плотности.

Необходимо отметить, что на величины баллистического предела и запреградной выпучины, помимо параметров полимерного покрытия, также влияет большое количество параметров: тип переплетения тканей, поверхностная плотность, количество слоев ткани, трение между элементами, условия закрепления образца – граничные условия, размеры образца, скорость, угол подлета и форма ударника и т.д. Экспериментальный подбор рациональной комбинации полимерного покрытия ткани и параметров всего пакета, обеспечивающих заданную баллистическую эффективность защитной преграды, требует значительных материальных и временных затрат. Это связано с высокой стоимостью арамидных тканей, сложностью и дорогостоящей проведением инструментированных ударных испытаний, большим числом варьируемых параметров.

Современная концепция проектирования любого технического изделия направлена на снижение количества дорогостоящих натурных испытаний прототипов за счет использования математического моделирования. Верификация математических моделей выполняется на основании результатов сравнительно простых и недорогих испытаний отдельных компонентов изделия. При таком подходе удастся ограничиться изготовлением одного или двух прототипов и минимизировать количество изменений на финальной стадии разработки. Защитные структуры в этом плане не стали исключением. В литературе имеются как аналитические, так и численные модели, позволяющие прогнозировать влияние различных параметров многослойной тканевой структуры на ее баллистическую эффективность при ударе, которые рассматриваются ниже.

1.3. Моделирование взаимодействия многослойных тканевых структур с высокоскоростным ударником

1.3.1. Аналитические модели взаимодействия тканевых структур с ударником

Первоначально для описания процессов взаимодействия арамидных тканей и нитей с ударником применяли аналитический подход. Аналитические модели взаимодействия ударника с тканью или многослойной структурой в основном базируются на энергетическом балансе, законе сохранения импульса и волновой теории. Они позволяют прогнозировать рассеяние кинетической энергии ударника, баллистическую стойкость, а также определять вклад каждого механизма рассеяния энергии в снижение кинетической энергии ударника.

В некоторых случаях аналитические модели взаимодействия ударника с тканью требуют определения ряда специфических параметров, например, коэффициентов трения или рассеиваемой энергии при вытягивании нитей из слоя ткани. По этой причине параллельно с моделированием удара по ткани разрабатывались и применялись модели, описывающие процесс вытяжки нитей.

1.3.1.1. Аналитические модели процесса вытяжки нити из ткани

Вытягивание нити из ткани является одним из важных механизмов рассеяния кинетической энергии ударника при сравнительно небольших скоростях (стадия фрикционного взаимодействия). Исследование механизма вытягивания нити из ткани рассмотрено во множестве работ [3, 4, 39, 49, 55-57, 71, 78, 85, 86, 88, 92, 95, 102, 120, 121, 131, 132, 146, 147, 157, 170, 176, 177]. На рисунке 1.1 представлен характерный вид кривой «нагрузка – перемещение» при вытягивании одиночной нити из ткани.

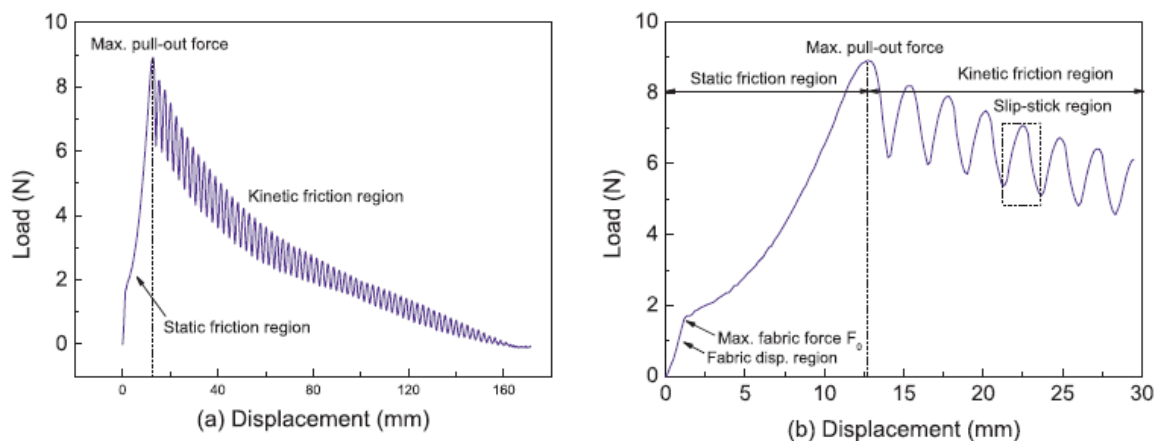


Рисунок 1.1. Кривая «нагрузка – перемещение» [88]

Следует отметить, что данные кривые можно разделить на два участка. На первом участке происходит натяжение основной нити и деформирование всего образца (перпендикулярные уточные нити перемещаются и деформируются). Второй участок начинается после достижения максимального усилия, то есть нить начинает двигаться. Для этого участка характерен синусоидальный вид кривой – переход свободного конца нити через пересечения с уточной нитью. Амплитуда синусоиды определяется шагом переплетения и толщиной нити.

Для прогнозирования характеристик вытягивания разработан ряд аналитических моделей [71, 86, 176], которые основаны на обработке экспериментальных кривых. Их иногда называют полуаналитическими или полуэмпирическими моделями. В работе [71] авторы определили статический и кинетический коэффициенты трения между нитями в ткани. В работах [176, 177] разработана модель вытягивания нити из ткани Kevlar[®] KM2 (рисунок 1.2) на основе полиномов, коэффициенты которых определяются на основе экспериментов с вытягиванием одной нити.

Недостатком таких моделей является фокусировка на статической стороне задачи вытягивания и рассмотрении конкретного типа переплетения нитей. Некоторые модели рассматривают вытягивание нескольких нитей из ткани.

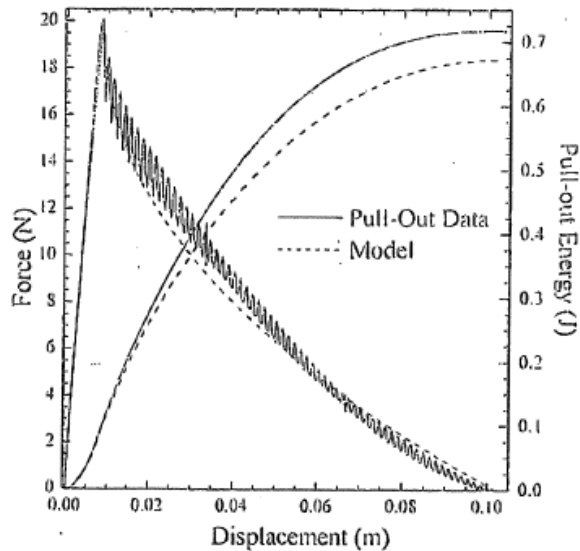


Рисунок 1.2. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых вытягивания одной нити из ткани длиной $L = 10,16$ см и усилием закрепления $T = 250$ Н [176]

К сожалению, учет сил инерции или связанности нитей тонкими покрытиями в таких моделях невозможен.

1.3.1.2. Аналитические модели деформирования тканевых пакетов при локальном ударе

Первые работы по данной теме были посвящены деформированию и разрушению бесконечной нити при точечном ударе [29, 161]. Эти модели позволили определить напряжения в нитях, время и скорость распространения упругой волны.

Следующим шагом было представление деформирования ткани, тканевого пакета, композита в виде мембраны, пластины, отдельных перпендикулярных нитей [20, 29, 35, 66, 74, 122, 145, 150, 153, 159]. Аналитические модели используют комбинация волновой теории с законами сохранения энергии/импульса. Авторы работы [150] представили простую модель удара в многослойную тканевую структуру. Ткань полотняного переплетения заменяли на перпендикулярные нити, рисунок 1.3. Расстояние между слоями ткани было постоянным, и авторы не рассматривали влияние этого параметра на баллистический предел. Данная модель

позволяет учитывать взаимодействие нитей основы и утка, но не учитывает волнистость нитей. В данной модели пренебрегали трением между нитями и ударником. Форма ударника не рассматривалась, удар был точечным.

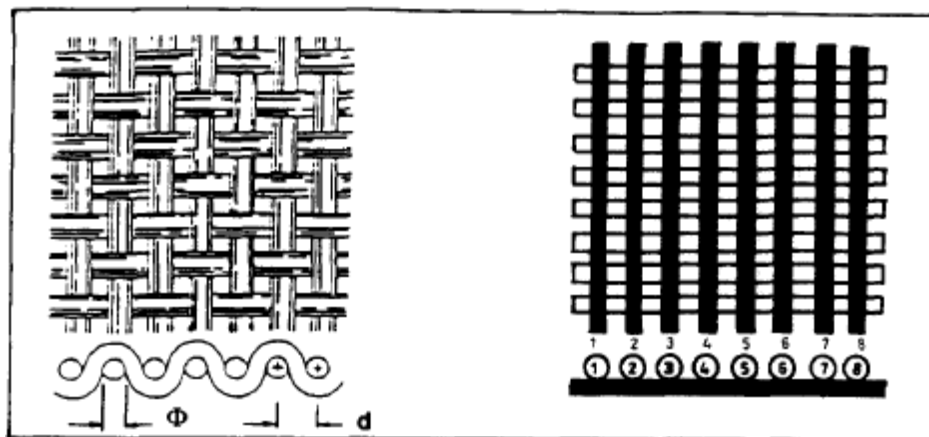


Fig.3a

Fig.3b

Рисунок 1.3. Архитектура полотняной ткани
и аналитические модели [150]

Аналитическая модель процесса деформирования многослойного тканевого пакета, в которой слои взаимодействуют друг с другом, представлена в работе [122]. Эта модель позволяет варьировать расстояние между слоями для изучения влияния на баллистический предел (V_{50}). Расчетные и экспериментальные результаты хорошо согласуются между собой. В качестве критерия разрушения были выбраны первые главные деформации. В рассмотренной модели не были учтены фрикционные контакты между слоями и нитями ткани, волнистость нитей, которые оказывают влияние на рассеяние кинетической энергии при торможении ударника.

В работе [153] авторами были разработаны аналитическую модель изотропной мембраны, на которую воздействует цилиндрический ударник. Аналитическое определение баллистической стойкости (V_{50}) хорошо согласуется с экспериментальными данными [70]. К сожалению, несмотря на хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений, в мембранах не учтены

вытягивание нитей, фрикционные контакты, проскальзывание нитей в тканях в процессе деформирования и разрушения многослойных тканевых структур.

Общим недостатком аналитических подходов является большое количество допущений и применение для конкретного расчетного случая. При усложнении конструкции (кривизна, использование ударника сложной формы) применение этого подхода становится невозможным. В связи с этим в последнее время получили развитие численные модели, которые позволяют учесть влияние формы и размеров как самой тканевой панели, так и ударника, структуру ткани (типа переплетения нитей, модификации покрытиями, жидкостями, прошивкой и т.д.), а также влияние регистрирующей среды на общий характер деформирования и баллистическую эффективность.

1.3.2. Численное моделирование поведения многослойных тканевых структур при локальном ударе

Решение численных задач деформирования и разрушения тканевых защитных структур проводится методом конечных элементов или методом конечных разностей с использованием принципа возможных перемещений. Принцип возможных перемещений в математической постановке имеет вид [59]:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_S p_i \delta u_i dS + \int_V \rho \ddot{u}_i \delta u_i dV, \quad (1.1)$$

где σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензора упругих напряжений и деформаций соответственно, u_i и \ddot{u}_i – компоненты вектора перемещений и ускорений соответственно, p_i – вектор поверхностных сил, ρ – плотность, V – объем твердого деформируемого тела, S – площадь, на которую действуют поверхностные силы. В коммерческих пакета LS-DYNA, ANSYS, ABAQUS использование метода конечных элементов для решения уравнения (1.1) с явной схемой интегрирования по времени позволяет получить уравнение движения на n -ом шаге по времени

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, \quad (1.2)$$

где $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ и $\{u\}$ – вектор ускорений, скоростей и перемещений соответственно, $[M]$ – матрица масс, $[C]$ – матрица вязкости, $[K]$ – матрица жесткостей, $\{F\}$ – вектор внешних сил. На каждом шаге вычисляются перемещения, скорости и ускорения через известные значения с предыдущих шагов. На следующем шаге применяется интегрирование по времени методом центральных разностей

$$\begin{aligned}\{\dot{u}_{n+\frac{1}{2}}\} &= \{\dot{u}_{n-\frac{1}{2}}\} + \{\ddot{u}_n\} \cdot \Delta t_n, \\ \{u_{n+1}\} &= \{u_n\} + \{\dot{u}_{n+\frac{1}{2}}\} \cdot \Delta t_{n+\frac{1}{2}}. \\ \Delta t_{n+\frac{1}{2}} &= \frac{\Delta t_n + \Delta t_{n+1}}{2}\end{aligned}\quad (1.3)$$

При известных значения величины u_n в момент времени t_n можно получить следующее значение u_{n+1} . На первом шаге интегрирования используются начальные условия и внешние силы. Шаг интегрирования выбирается из условия стабильности решения по критерию Фридрихса-Куранта-Леви

$$\Delta t \leq \frac{h}{c}, \quad (1.4)$$

здесь h – наименьший линейный размер конечного элемента, $c = \sqrt{E/\rho}$ – скорость распространения упругой волны в материале, E – модуль упругости материала.

На сегодняшний день существует большое количество численных моделей тканевой структуры разной сложности. Все модели можно разделить на три группы: макро-, мезо- и микромодели тканей (рисунок 1.4).

Макроуровневое представление ткани основано на моделировании слоя ткани в виде мембраны [37, 43, 72, 74, 118, 124, 139, 169]. Данный подход заключается в моделировании ткани в виде гомогенной структуры с применением классической теории слоистых пластин.

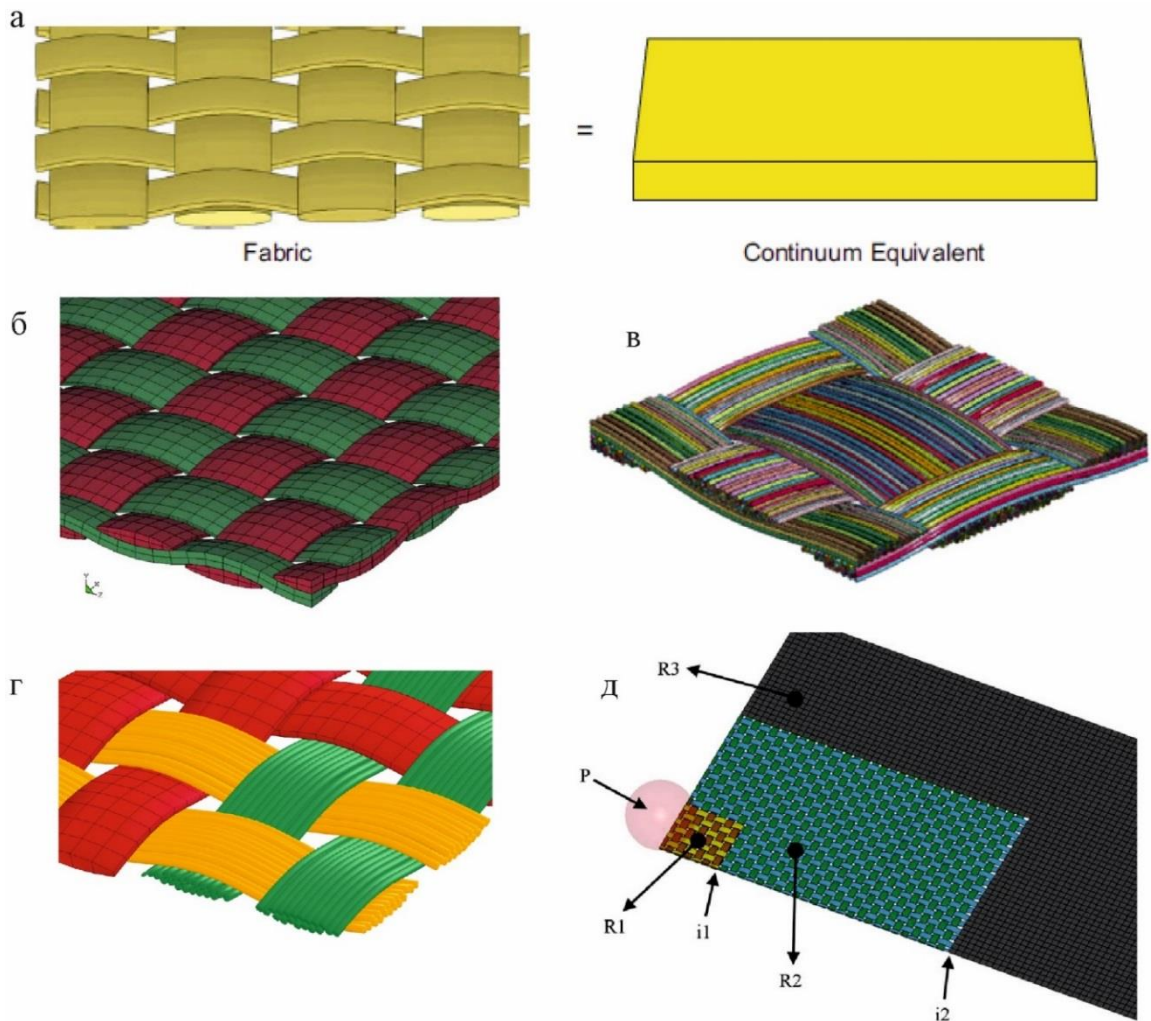


Рисунок 1.4. Классификация подходов моделирования тканевых структур
а – макро модель, б – мезо модель, в – микро модель,
г, д – комбинированные модели ткани

Макроуровневый подход широко применяется при анализе баллистической стойкости ткани при ударе. При решении таких задач необходимо задать модель материала, которая позволила бы адекватно описывать поведение ткани. В работе [118] была использована вязкоупругая модель материала, свойства которой зависят от скорости деформирования. Расчетные результаты адекватно согласуются с экспериментальными данными остаточной скорости ударника. На рисунке 1.5 представлена картина деформирования ткани при локальном ударе с начальной скоростью 550 м/с. Недостатком данного подхода является невозможность отобразить фрикционные контакты, распрямление и движение нитей при меньших

скоростях удара. В другой работе [124] нелинейную модель материала получают на основе экспериментальных данных на растяжение ткани.

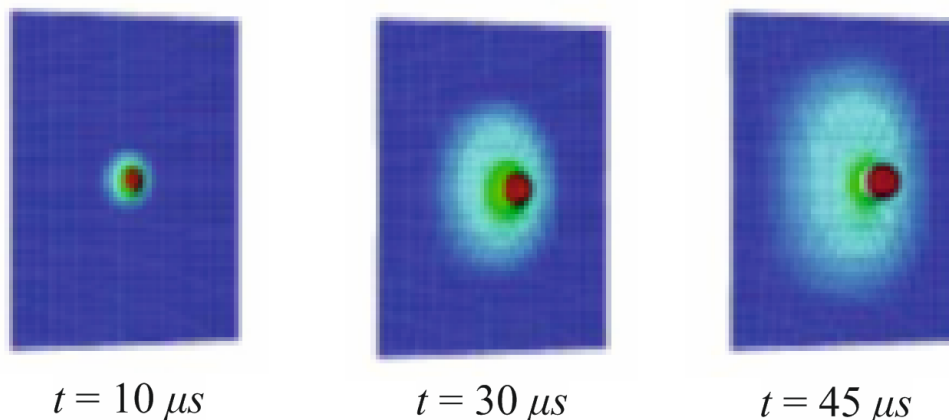


Рисунок 1.5. Расчетная картина поведение ткани при начальной скорости ударника 550 м/с [118]

В работах [43, 72, 169] используют подмодели элементарной ячейки реального переплетения ткани, позволяющие адекватно задать механические свойства и поведение макромоделей с помощью подпрограммы, встроенной, например, в МКЭ-пакет LS-DYNA.

Макроуровневые подходы с разными способами задания моделей материала позволили прогнозировать поведение взаимодействие ткани с ударником в пределах допустимой для инженерных приложений погрешности. Одним из достоинств использования данного подхода является возможность перехода от мезоструктуры ткани к макромоделям крупногабаритных изделий [43, 72]. Но макромоделирование не позволяет учесть механизмы, влияющие на рассеяние энергии (вытягивание, распрямление, проскальзывание нитей, фрикционные контакты между ними и т.д.) при отсутствии пробивания, поэтому разрабатываются более детализированные модели ткани (мезоуровневые модели).

Мезоуровневое моделирование процессов деформирования тканевых структур можно считать самым распространенным [13, 19, 24, 39, 44, 45, 63, 71, 75, 86, 100, 103, 105, 114, 127, 129-131, 134, 135, 139-141, 144, 146, 147, 167, 168,

170, 171]. Арамидные ткани имеют сложную геометрию с большим количеством контактов, переплетений, искривленностью нитей утка и основы, линзообразным поперечным сечением нитей. Авторы разрабатывают модели ткани в виде отдельных нитей с изотропными или ортотропными свойствами. Преимуществом таких моделей является возможность учесть искривленность нити, вытягивание, проскальзывание, растяжение нитей в ткани, фрикционные взаимодействия между нитями, соседними тканями и др. Существует несколько возможных реализаций геометрии нитей: моделирование ткани в виде стержневых конечных элементов или сетки со связанными узлами – 1D элементами (truss elements); моделирование ткани с помощью оболочечных конечных элементов (shell elements); моделирование ткани с помощью объемных конечных элементов (solid elements).

При моделировании тканевой структуры важно учесть взаимодействие между нитями. Моделирование самыми простыми – одномерными конечными элементами – может быть представлено в виде сетки из гибких линейных элементов с дополнительными массами в местах соединения или стержневых конечных элементов. Однако они не дают возможности учитывать взаимодействие между слоями ткани, что является важным аспектом при изучении деформирования многослойной ткани.

Моделирование оболочечными конечными элементами пользуется популярностью при решении задач деформирования и разрушения многослойных тканевых структур, рисунок 1.6. Этот подход позволяет учитывать растяжение и вытягивание нити, взаимодействие между слоями, а также изменение толщины по ширине нити без значительных вычислительных затрат [139].

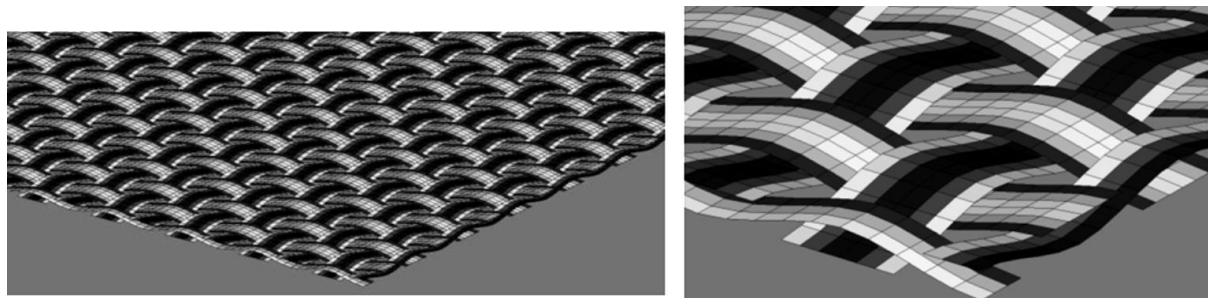


Рисунок 1.6. Моделирование геометрии ткани с помощью оболочечных конечных элементов [139]

Модели с объемными конечными элементами позволяют непосредственно построить реальную геометрию нитей, что позволяет учесть трение между ними. Этот подход схож с предыдущим (позволяет понять процессы рассеяния энергии ударника), но требует больших вычислительных ресурсов.

Арамидные нити состоят из 100 и более волокон, поэтому для изучения поведения волокон в нити используют *микроуровневый подход* [75, 77, 90, 137, 162]. Данный подход позволяет моделировать изменение геометрии, свойств нитей при локальном ударе за счет учета растяжения и перемещения волокон в нити. Авторы ограничиваются рассмотрением деформирования элементарной ячейки, нити или комбинированием разных подходов при ударе, т.к. эти задачи требуют больших вычислительных ресурсов.

Также существует *комбинированный подход для моделирования тканей* [53, 92, 119, 148, 149], когда сочетают несколько подходов в одной модели. Недостатком комбинированного моделирования тканей является необходимость адекватного задания свойств материала для двух сред и моделирование прохождения и отражения волн на границе между двумя частями модели (рисунок 1.7). Такой подход является наиболее перспективным с точки зрения моделирования взаимодействия многослойных тканевых структур большого размера с ударником.

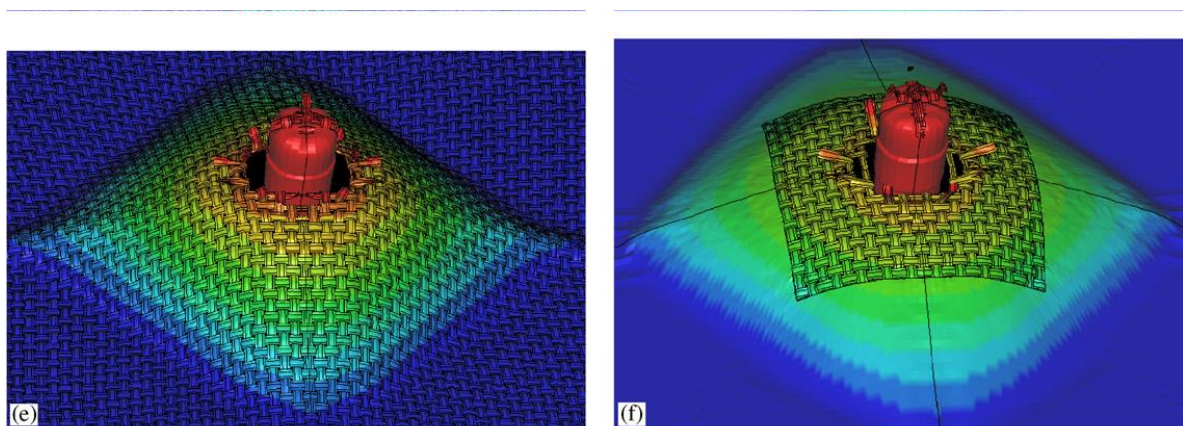


Рисунок 1.7. Распространение поперечной волны в ткани для мезоуровневой и комбинированной моделей в момент времени $6 \cdot 10^{-5}$ с [53]

Все вышеперечисленные численные способы моделирования имеют свои преимущества и недостатки. На сегодняшний день наиболее рациональным является использование мезоуровневого моделирования, обеспечивающего учет большинства механизмов рассеяния энергии в тканях при ударе при вполне выполнимых требованиях к вычислительным ресурсам.

Как было отмечено выше, для адекватного описания поведения тканевой преграды во время сертификационных испытаний необходимо также учитывать наличие вязкоупругой регистрирующей среды – пластилина.

1.4. Исследование механических свойств регистрирующей среды

Пластелин представляет собой многокомпонентный композитный материал, состоящий из высоковязкой суспензии воска, жиров и ультрамелкодисперсных наполнителей (талька, глины и пигментов). Он применяется при тестировании и моделировании средств индивидуального бронирования в качестве среды, регистрирующей форму и глубину вмятины после удара индентора через бронезилет [11, 13, 14, 23, 34, 69, 73, 82, 84, 87, 109, 115, 133, 174, 175], а также как модельный материал при изучении процессов обработки давлением (ковка, штамповка, прокатка и т.п.) [42, 65, 123, 154, 158, 163-165, 178], при моделировании процессов пенетрации, то есть проникновении жесткого тела в пластическую среду [2, 5, 6, 54, 61, 62, 64, 106, 107, 126].

Пластелин не является конструкционным материалом, поэтому отсутствуют корректные справочные данные об его механических свойствах. Более того, нет утвержденных методик определения механических свойств пластилина (стандартов) ни в Российской Федерации, ни за рубежом.

При нормальных условиях он ведет себя как низко модульный вязкоупругий материал. Его реологические и механические свойства зависят от состава, дефектов, температуры, скорости деформирования, срока эксплуатации и т.д. [41, 65, 155, 165].

В литературе [38, 54, 62, 64, 65, 98, 99, 123, 126, 151, 165, 178] излагаются экспериментальные методы определения механических свойств на одноосное сжатие или индентирование (пенетрацию). Кривые деформирования пластилина описывают степенной зависимостью напряжения от скорости деформации из условия, что пластилин является сплошной вязкоупругопластической средой [38, 54, 64, 65, 110, 126]. Есть несколько работ, посвященных испытаниям на растяжение или сдвиг при небольших скоростях деформирования [54, 65, 158]. В работе [65] приведены близкие значения механических свойств при одноосном растяжении или сжатии.

Пластилин используется как модельный материал, имитирующий штамповку, прокатку и др., при моделировании необходимо знать коэффициент трения между пластилином и металлом. Имеется ряд работ, посвященных определению коэффициента трения различных материалов с пластилином [38, 62, 64, 65, 123, 154, 164]. Значение это колеблется от 0,10 до 0,50 в зависимости от давления, скорости движения и шероховатости контртела.

В работах [54, 155] представлены вязкоупругие характеристики пластилина Roma Plastilina No. 1 от частоты нагружения и температуры, полученные с помощью реометра методом динамического механического анализа. Следует отметить, что при повышении температуры на 5-10 градусов вязкоупругие характеристики заметно меняются, что приводит к необходимости тщательного контроля температуры пластилина перед испытаниями бронеструктур.

При индентировании или локальном ударе в защитную структуру, расположенную на пластилине, в нем наблюдается сложное напряженное состояние (СНС). Поэтому для прогнозирования поведения пластилина при СНС используется *метод конечных элементов*. Численное моделирование деформирования тканевой структуры и пластилина требует адекватного задания свойств, моделей материала и контактов между элементами. В работах [13, 14, 34, 73, 140, 146, 174, 175, 180] применяют модели изотропной сплошной вязкоупругой идеально пластической среды, в которых учитывается только зависимость предела

текучести от скорости деформирования. Параметры таких моделей определяют из простых экспериментов на растяжение, сжатие, пенетрацию (индентирование). В литературе для пределов текучести наиболее распространенными являются степенные законы [65, 73, 98]

$$\sigma = K \cdot \dot{\varepsilon}^n, \quad (1.5a)$$

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \dot{\varepsilon}^n, \quad (1.5b)$$

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^m \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^n, \quad (1.6)$$

где K – константа материала, n – коэффициент чувствительности к скорости деформации, σ_0 – предел текучести при одноосном нагружении, m – коэффициент деформационного упрочнения, $\dot{\varepsilon}_0$ – начальная скорость деформации (обычно принимают равной 1). В работе [65] представлена модель материала, в которой учтена температура

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^m \cdot \dot{\varepsilon}^n \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (1.7)$$

где K , B – коэффициенты материала, m – коэффициент деформационного упрочнения, n – коэффициент чувствительности к скорости деформации, ε – логарифмическая деформация, $\dot{\varepsilon}_0$ – логарифмическая скорость деформации, T – абсолютная температура.

Модели Джонсона-Кука, Купера-Саймондса и их модификации [41] также применяются, поскольку они позволяют учитывать не только вязкоупругое поведение, но и изменение температуры в адиабатических условиях. К сожалению, при учете в модели зависимостей напряжения от деформации, предела текучести от скорости деформации и от температуры, от параметров объемности напряженного состояния – модели описания деформирования пластилина становятся громоздкими, а определение комплекса параметров – неустойчивым [41, 61].

Основной особенностью известных моделей пластилина заключается в том, что параметры были определены, как правило, из квазистатических испытаний.

Определенным исключением является работа [180], в которой была проведена подстройка модели пластилина Roma Plastilina No. 1 при сбрасывании груза со сферическим торцом (по аналогии с проведением предварительных испытаний со сбрасыванием стальной сферы или груза [133]). Тем не менее в расчетах погрешность глубины запреградной травмы после удара в бронепанель составила около 30% в сравнении с экспериментом.

МКЭ также используют для определения параметров модели деформирования пластилина при решении обратной задачи [98]. Однако устойчивость такой процедуры и корректность полученного набора параметров не доказана.

Также стоит отметить использование пластилина как модельного материала при изучении течения горячего металла при штамповке и экструзии [38, 98, 99, 123, 154, 164].

В завершение обзора отметим, что для проведения сертификационных и исследовательских испытаний защитных структур за рубежом рекомендуется применять технический пластилин Roma Plastilina No. 1. В России существует несколько марок технического пластилина, близких по свойствам к Roma Plastilina No. 1, но более доступных по цене. Их применение при проектировании защитных структур позволяет заметно удешевить проведение экспериментов.

Выводы по главе

Проведен анализ отечественных и зарубежных источников по вопросам, посвященным анализу прочности арамидных тканей при ударе и способам повышения фрикционных контактных взаимодействий нитей в ткани в свободном состоянии и на слое технического пластилина. Рассмотрены основные подходы к численному моделированию процессов деформирования и разрушения многослойных тканевых структур при ударе. На основании полученной информации сформулированы задачи данной работы:

1. Провести экспериментальные исследования механических свойств технического пластилина при различных воздействиях и разработать расчетную модель его механического поведения с учетом 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 расчетные и экспериментальные исследования деформирования и разрушения пакета арамидных тканей с тонкими покрытиями при высокоскоростном локальном ударе и оценить их эффективность.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ

Данная глава посвящена разработке комплекса методов экспериментального исследования механических свойств вязкоупругопластического материала (технический пластилин) при разных видах нагружения (квазистатические растяжение, сжатие, сдвиг, индентирование, динамические сжатие и индентирование). Полученные значения предела текучести при скоростях деформаций: $0,4 \cdot 10^{-3} \dots 250 \text{ с}^{-1}$ использованы ниже в расчетных моделях деформирования тканей на пластилине при локальном ударном воздействии.

2.1. Квазистатические исследования механических свойств технического пластилина

Квазистатические испытания при растяжении, сжатии и сдвиге образцов были проведены на универсальной испытательной машине Instron 5882 с силоизмерителем с предельным усилием 100 Н, и при индентировании – с силоизмерителем 5 кН. Скорость движения траверсы при сжатии варьировали от 1 до 500 мм/мин, при растяжении – до 400 мм/мин, при испытаниях на сдвиг – до 80 мм/мин, при индентировании – до 100 мм/мин. Деформации образцов были измерены с помощью бесконтактного видеоэкстензометра AVE, входящего в комплект испытательной машины INSTRON 5882. На образце были установлены метки, по которым AVE определял геометрический центр каждой метки, далее вычислял текущее расстояние между метками и деформацию образца. Метки должны контрастировать с поверхностью образца, т.к. в AVE используется плоско поляризованный источник света, а материал меток должен обеспечивать деполяризацию света. В качестве меток была использована писчая бумага. При невозможности использования меток (большие деформации сжатия) для фиксации деформаций был использован датчик перемещения траверсы машины. Погрешность измерения удлинения образца соответствовала погрешности измерения перемещения траверсы машины ($\pm 1 \text{ мкм}$), т.к. жесткость образцов была

на несколько порядков ниже жесткости машины и силоизмерителя. Общий вид образцов для испытаний показан на рисунке 2.1.

Статическое индентирование проводили вдавливанием стальной сферы диаметром 43 мм в поверхность пластилина.

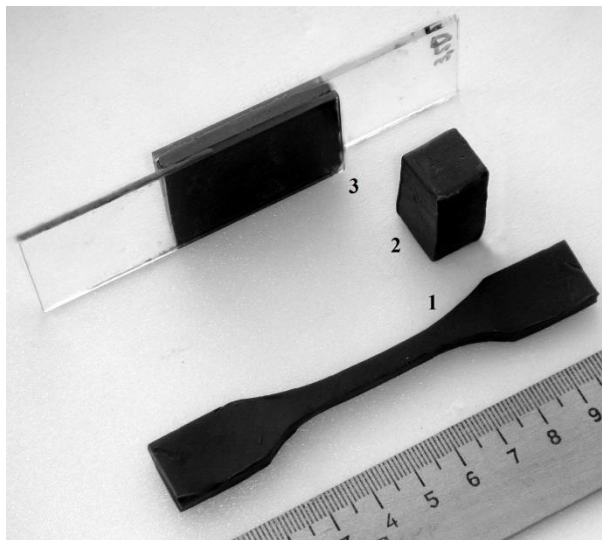


Рисунок 2.1. Образцы для испытаний на растяжение (1), сжатие (2) и сдвиг (3)

2.1.1. Статическое растяжение пластилина

Из листа пластилина толщиной 5 мм на вырубном прессе IDM Instruments C0022 были вырезаны стандартные образцы для низко модульных материалов (ASTM D412 тип 4). Образцы имели длину 100 мм, длину рабочей части 20 мм и захватные части шириной 15 мм. Образцы закрепляли в тисочных захватах INSTRON 2710-106 (рисунок 2.2). Усилие поджатия было минимальным, обеспечивая лишь плотный контакт («склейку» с резиновым покрытием захвата). В статье [65], опубликованной в 1980 г., была приведена методика испытания галтельных образцов из пластилина на растяжение. Отмечено, что были проблемы с центральностью нагружения и измерением деформаций.

Скорость движения траверсы при растяжении варьировали в диапазоне 1 ... 400 мм/мин. В результате испытаний были получены кривые «нагрузка – перемещение», которые были пересчитаны в диаграммы условных напряжений, приведенных на рисунке 2.3. Цифры на рисунке 2.3 обозначают скорость

деформации (c^{-1}), которая вычисляется как отношение скорости перемещения траверсы к начальной длине образца.

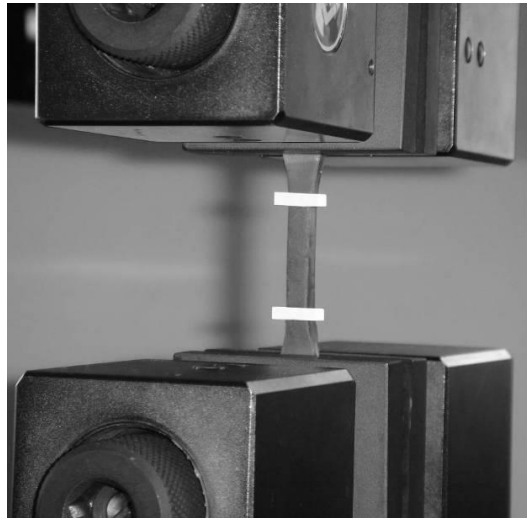


Рисунок 2.2. Образец с метками для испытаний на растяжение в тисочных захватах

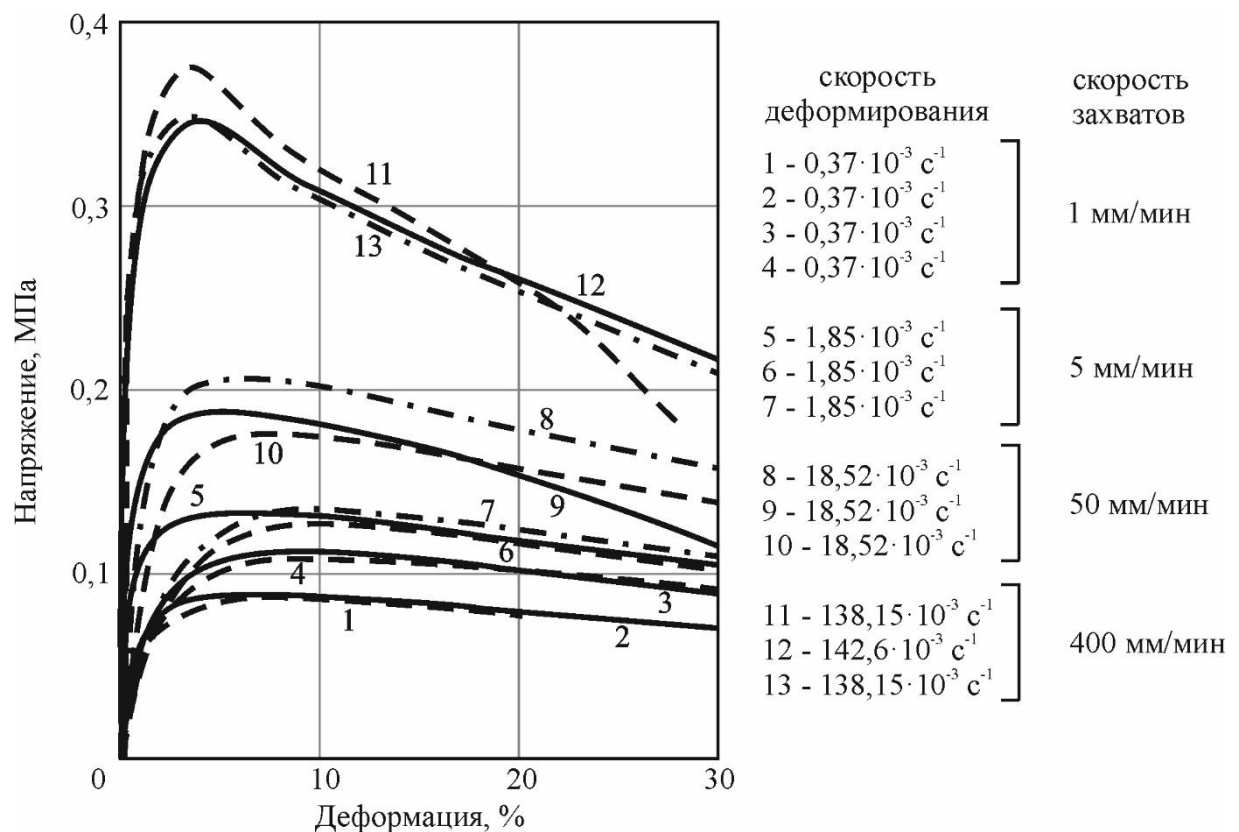


Рисунок 2.3. Условные диаграммы растяжения пластилина

Можно отметить, что образование шейки и начало спадающего участка кривой деформирования происходило при разных деформациях (от 4% при

высокой скорости до 10% при малой скорости деформирования). Разрушение образцов на растяжение было типичным (срез под углом 45°), что характерно для пластичных материалов.

Построение диаграмм истинных напряжений было признано нецелесообразным по причине образования видимых пор и изменения объема образца при больших деформациях.

Обработка начальных участков деформирования показала, что модуль упругости обладает достаточно большим разбросом. Это обусловлено сложностью определения тангенса угла наклона касательной в начале диаграммы «напряжение – деформация» при отсутствии линейного участка или проведения хорды в диапазоне небольших деформаций.

С помощью бесконтактного оптического метода (система DIC – Digital image correlation, фирма Correlated Solution, – цифровая корреляция изображений на установке VIC-2D) при растяжении были зарегистрированы продольные и поперечные деформации, что позволило определить модуль упругости и коэффициент Пуассона. Для этого из пластилина толщиной 5 мм были вырезаны плоские образцы с размерами $27 \times 5 \times 100$ мм, которые закрепляли в тисочных захватах INSTRON 2710-106 (рисунок 2.4). Скорость движения захвата 5 мм/мин, скорость съемки составляла 1 кадр/сек. На поверхность образца были установлены маркеры для фиксации продольной и поперечной деформации. Маркеры представляли собой канцелярские кнопки с плоской шляпкой, у которых игольчатая часть была полностью погружена в образец. Иные способы крепления маркеров не позволили получить надежные значения деформаций.

При деформациях до 1% хордовый модуль упругости составил 30 ± 5 МПа во всех испытаниях, а коэффициент Пуассона близок к 0,5 (рисунок 2.5).

Анализ данных рисунка 2.5 показывает, что коэффициент Пуассона с увеличением деформаций не остается постоянным как у идеально пластического материала. Это говорит о том, что возникающие несплошности, поры меняют объем образца. Изменение, однако, не слишком велико и в расчетах можно считать

возможным использование классической теории пластичности и модели сплошной среды при анализе работы тканей при ударе на слое пластилина с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

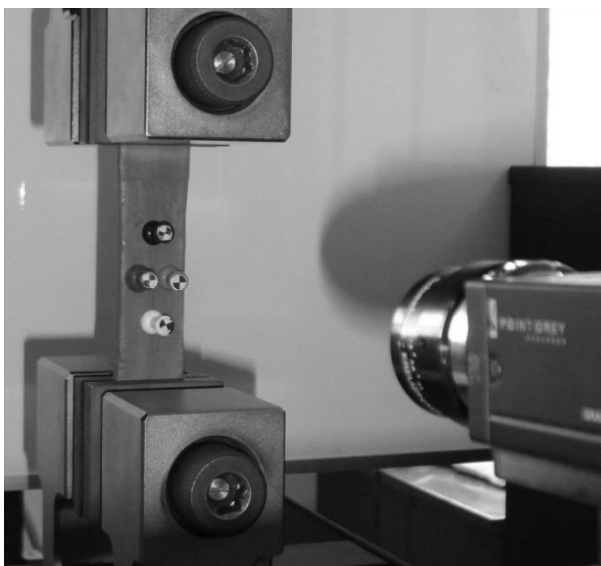


Рисунок 2.4. Образец с метками для определения коэффициента Пуассона при растяжении

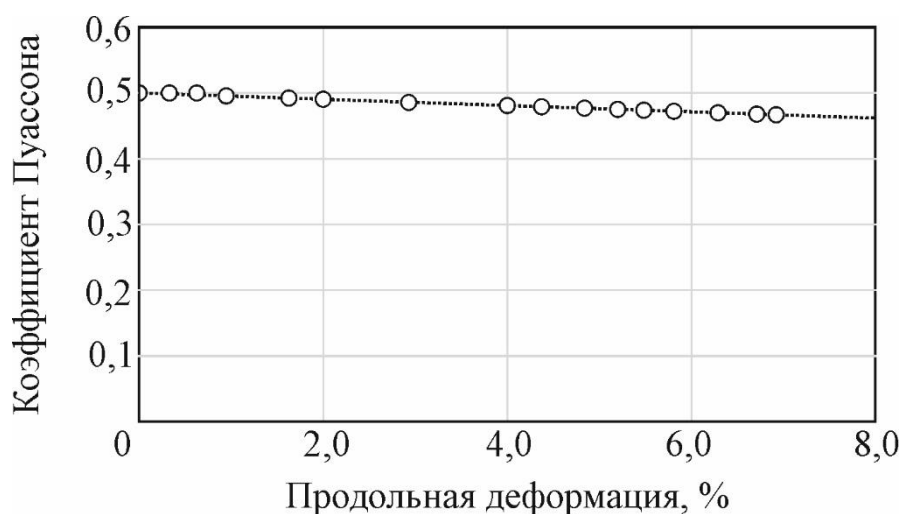


Рисунок 2.5. Зависимость «поперечная деформация – продольная деформация» при растяжении

2.1.2. Статическое сжатие пластилина

Из блока пластилина толщиной 40 мм были вырезаны образцы в виде параллелепипеда с размерами 15×15×30 мм, которые испытывали на сжатие между двумя плоскими стальными плитами при движении траверсы со скоростями

1 ... 500 мм/мин. Важно отметить, что испытательные машины обладают определенной инерцией механического привода, что существенно при испытаниях на высоких скоростях. Имеется участок разгона, в котором скорость движения изменяется от нуля до заданного значения. Пренебрежение данным фактом приводит к нестабильности первого участка деформирования пластилина и неконтролируемым разбросам в определении механических свойств. В связи с этим в данной работе верхнюю траверсу устанавливали с зазором 20 мм, обеспечивающим набор заданной скорости до контакта с образцом.

Диаграммы сжатия представлены на рисунке 2.6.

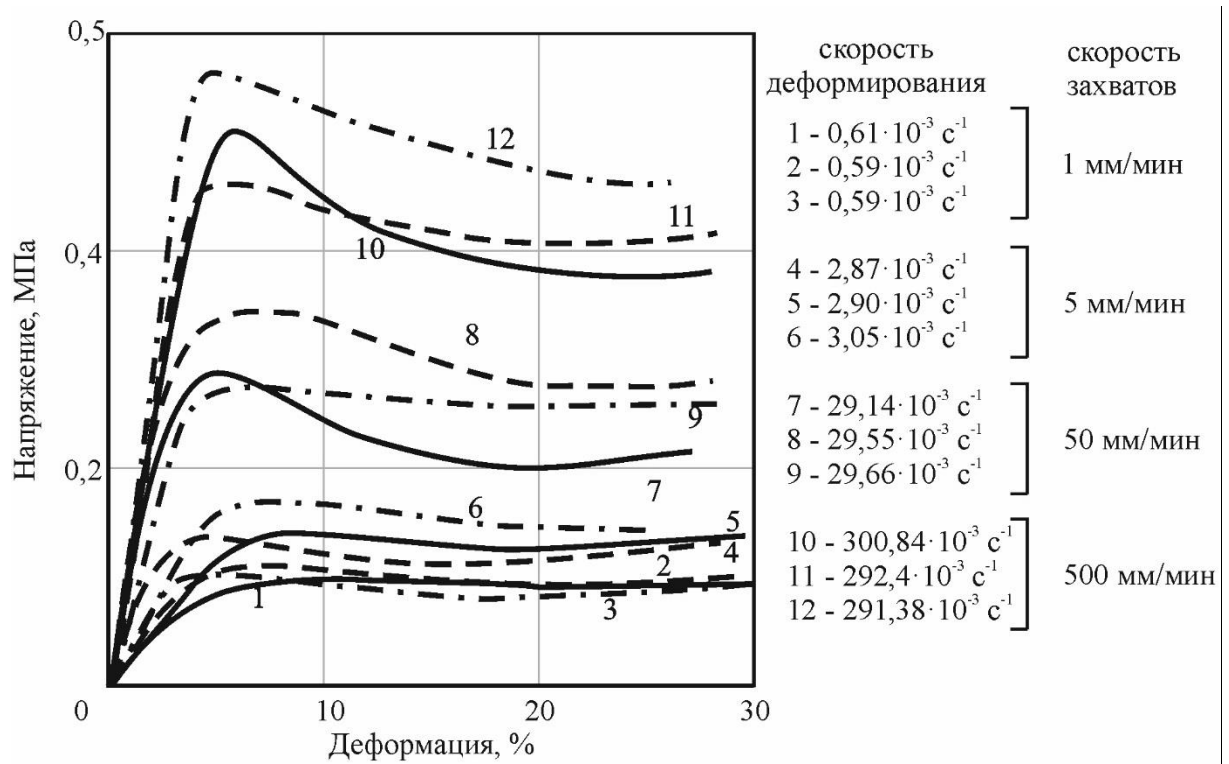


Рисунок 2.6. Диаграмма деформирования пластилина при сжатии

По представленным на рисунке 2.6 диаграммам условных напряжений можно подтвердить, что пластилин является упруговязкопластичным материалом. Будем считать, что предел текучести соответствует максимальному условному напряжению сжатия (аналог «зуба текучести» при испытаниях малоуглеродистых сталей). Некоторое снижение напряжений обусловлено развитием процессов течения на микроуровне, поскольку пластилин является смесью твердых и высоковязких компонентов. Выявлено, что предел текучести и модуль упругости

(наклон начального участка) зависят от скорости деформирования. Разброс механических свойств материала, очевидно, связан с неоднородностью структуры пластилина, контролировать которую, к сожалению, невозможно.

2.1.3. Статические испытания пластилина на сдвиг

Из листа пластилина толщиной 3,5 мм были вырезаны образцы в виде параллелепипеда с размерами 3,5×26×40 мм, которые закрепили между стеклянными пластинами толщиной 2 мм и испытали на сдвиг (рисунок 2.7) со скоростями движения захватов 0,1...81 мм/мин. Высокая адгезия пластилина к стеклу после небольшого поджатия позволила проводить испытания вплоть до разрушения без использования дополнительного клея.

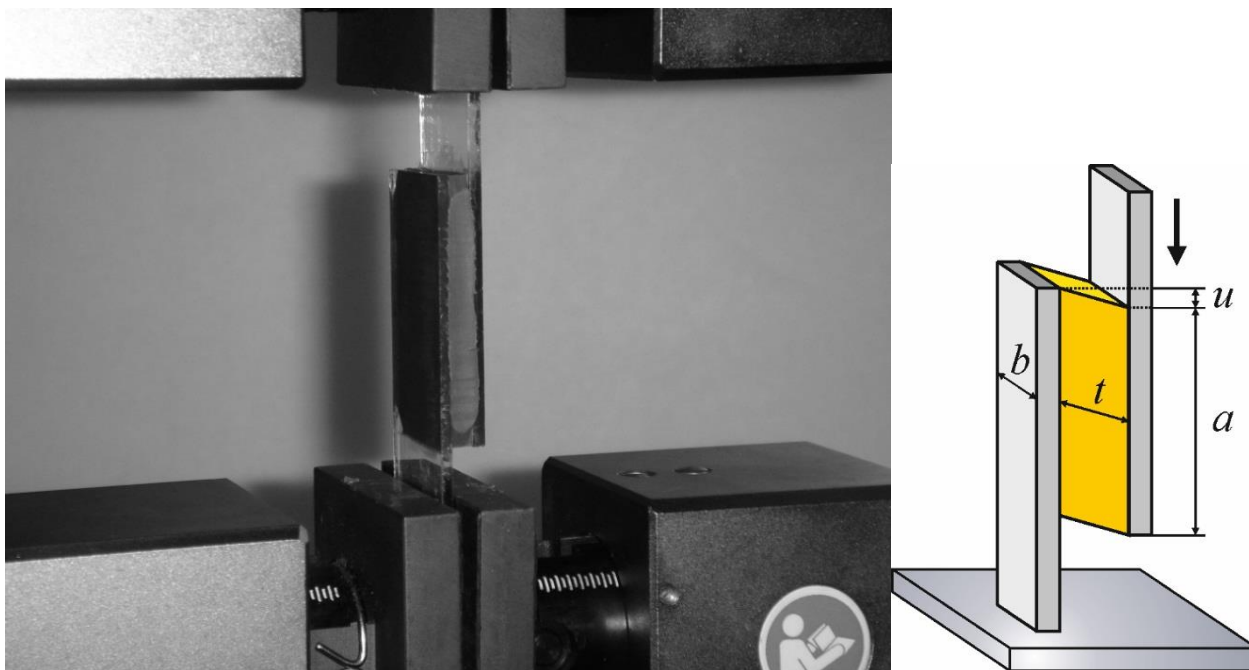


Рисунок 2.7. Образец на сдвиг в тисочных захватах и схема

Полученные диаграммы «нагрузка – перемещение траверсы» пересчитывали в касательные напряжения и деформации сдвига по формулам

$$\tau = \frac{P}{a \cdot b}, \quad \gamma = \frac{u}{t} \quad (2.1)$$

где τ – касательные напряжения, P – нагрузка, a и b – размеры образца, γ – деформации сдвига, t – толщина образца. Диаграммы сдвига приведены на рисунке 2.8.

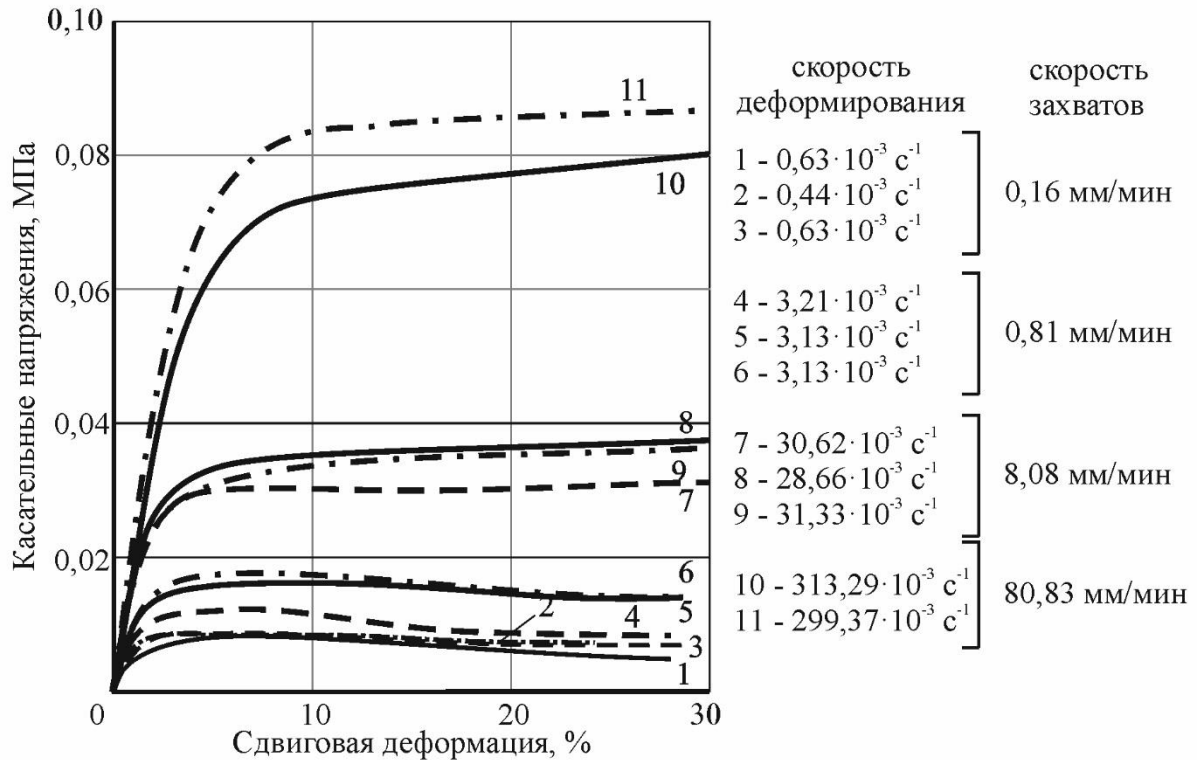


Рисунок 2.8. Диаграммы сдвига пластилина

Далее касательные напряжения были пересчитаны в нормальные напряжения, которые сопоставляли с полученным пределом текучести при сжатии и растяжении. Предел текучести был посчитан по теории Мора

$$\sigma_y = \sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau. \quad (2.2)$$

Следует отметить, что предел текучести пластилина из испытаний на сдвиг получился несколько ниже чем при сжатии/растяжении. Это связано, очевидно, с накоплением микрповреждений в присутствии растягивающей компоненты напряжения и неравномерным распределением касательных напряжений по длине образца.

2.1.4. Статическое индентирование пластилина

Индентирование (пенетрация) является альтернативным испытанием на сжатие. В поверхность пластилина с размерами $180 \times 180 \times 75$ мм вдавливали стальную сферу диаметром $D = 43$ мм. Сферу внедряли со скоростями 5, 20 и 100 мм/мин на испытательной машине INSTRON 5882 с силоизмерителем 500 Н.

Диаграмма индентирования «нагрузка – глубина вмятины» представлены на рисунке 2.9.

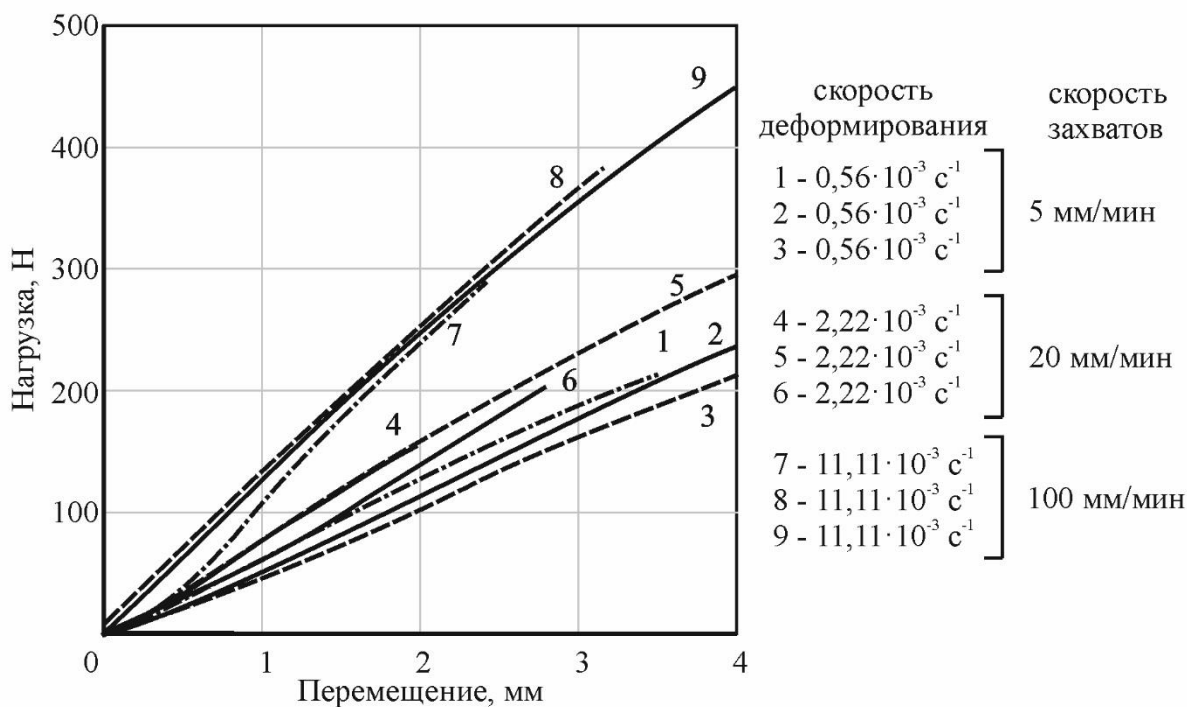


Рисунок 2.9. Кривые индентирования при статическом нагружении

На начальном участке кривые нелинейные, но эта область достаточно мала, чтобы аппроксимировать линейной функцией диаграмму индентирования до глубины 2-3 мм без потери точности. При внедрении сферического индентора в пластилине возникает трехосное напряженное состояние, характер которого определяется в значительной степени трением в контакте, которое необходимо исключить (применяли смазку водой поверхности пластилина).

Испытания на индентирование аналогичны испытаниям на твердость металлов по Бринеллю. Данные, представленные на рисунке 2.9, позволяют считать твердость пластилина по Бринеллю практически неизменной величиной при перемещениях до 3 мм. В работах [22, 33, 179] для пластичных материалов приведена связь твердости по Бринеллю с пределом текучести

$$\sigma_T = k \cdot HB = k \cdot \frac{P}{2\pi Rh} \quad (2.3)$$

где HB – твердость по Бринеллю, P – нагрузка, R – радиус сферы, $2\pi Rh$ – площадь поверхности отпечатка, k – коэффициент (для стали равный 0,33-0,36). После испытания регистрировали диаметр отпечатка d на поверхности пластилина оптическим методом с обработкой изображения на компьютере. Погрешность измерения диаметра не превышала 0,1 мм.

Для расчета скорости деформации необходимо иметь информацию о размере очага деформирования под индентором, где материал испытывает сжатие, по аналогии с длиной образца L_0 , на которую производится деление скорости движения траверсы при испытании на сжатие призматических образцов. Очагом деформации считается объем, испытывающий напряжения сжатия, составляющие не менее 5% от максимального значения под индентором. Размеры очага деформации можно приближенно оценить, используя решение задачи Буссинеску (действие сосредоточенной силы на упругое полупространство [21]). В соответствии с этим решением радиальные напряжения сжатия изменяются по глубине образца в зависимости

$$\sigma(r) = \frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{1}{r^2}, \quad (2.4)$$

где r – расстояние от точки приложения нагрузки. Учитывая, что напряжение на площади контакта равно HB (см. формулу (2.3)), то при условии $\sigma(r = L_0) = HB/20$ глубина очага деформации равна

$$L_0 = \sqrt{60Rh}. \quad (2.5)$$

Для оценки корректности формулы (2.5) был проведен статический расчет напряженного состояния в зоне контакта пластилина со сферическим индентором в конечно-элементном пакете ANSYS Workbench. В осесимметричной 2D модели материал пластилина и сферы были заданы идеально упругими. Для сферы были заданы характеристики стали (плотность $\rho = 7850$ кг/м³, модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$), для пластилина – упругие характеристики (модуль упругости $E = 25$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$). В качестве граничных условий краевой задачи принимали жесткое закрепление по нижней линии у пластилина ($U_x = U_y = U_z = 0$) и перемещение стальной сферы

вдоль вертикальной оси $y - U_z(0) = 0$, $U_z(t) = 3$ мм. Сферический индентор был перемещен с автоматическим определением реакции опор (964 Н). Средние сжимающие напряжения на площадке контакта составили 4,08 МПа (радиус площадки контакта и ее глубина равны 8,5 и 1,75 мм соответственно). Значение сжимающего напряжения равно 0,2 МПа, которое соответствует 5% от 4,08 МПа. В результате расчета «глубина образца L_0 » составила 47,5 мм (рисунок 2.10). Подстановка найденных значений в формулу (2.5) дает $L_0 = \sqrt{60 \cdot 21,5 \cdot 1,75} = 47,5$ мм. Совпадение аналитического и расчетного значения вполне удовлетворительное.

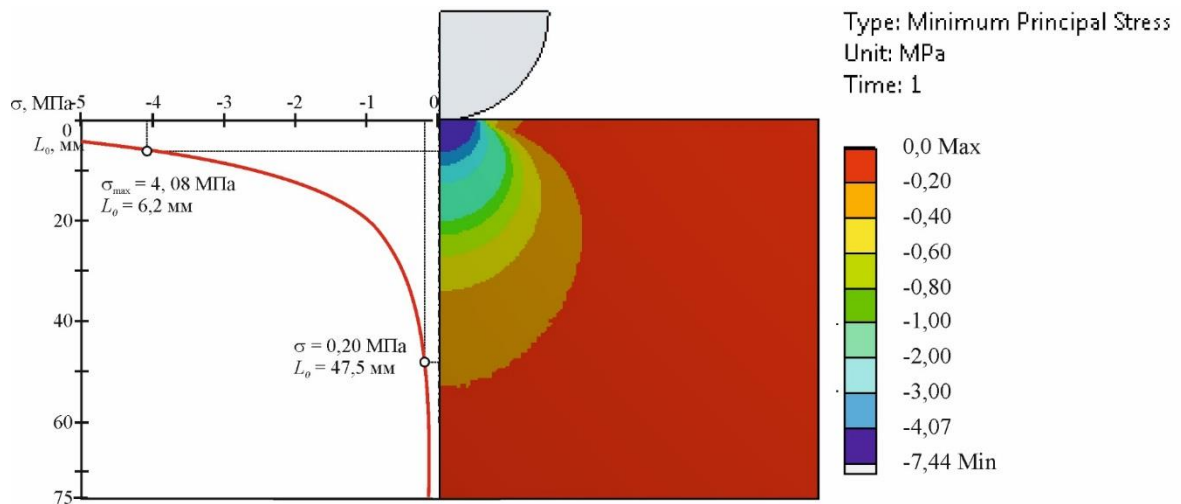


Рисунок 2.10. Распределение сжимающих напряжений при индентировании

Пластилин проявляет пластические свойства, связь предела текучести и величины твердости по Бринеллю (2.3) определяется коэффициентом $k = 0,24$ при отсутствии трения. Это было показано статическим расчетом в конечно-элементном пакете ANSYS Workbench. В осесимметричной 2D-модели материал пластилина был задан упруго-идеально-пластическим (билинейная диаграмма деформирования с нулевым упрочнением), а материал сферы (диаметром 43 мм) – сталь (идеально упругий). Граничные и начальные условия были заданы аналогично предыдущему случаю. Отличие найденного коэффициента от величины 0,33-0,36 в формуле (2.3) объясняется практической недеформируемостью стального индентора в контакте с пластилином в отличие от

испытаний сталей (испытаний на твердость). Диаграмма индентирования была практически линейной вплоть до максимального перемещения 3 мм.

Отмеченная линейность диаграмм индентирования оказывается полезной для анализа и сравнения статической и динамической твердости. В работах [8, 27, 104, 166] введено понятие «динамическая твердость» как частного от деления энергии падающего тела на объем вытесненного материала. В условиях квазистатического нагружения это соответствует энергии деформирования E (площадь под кривой индентирования), деленной на объем сферического сегмента V в пластине. Статическая твердость была определена по формуле

$$\begin{cases} HB = \frac{E}{V}, \\ E = \frac{P \cdot u}{2}, \\ V = \pi h \cdot \left(\frac{d^2}{8} + \frac{h^2}{6} \right), \end{cases} \quad (2.6)$$

здесь u – перемещение сферического индентора. В таблице 2.1 представлены сопоставление значений динамической и статической твердости.

Таблица 2.1 – Сопоставление значений статической и динамической твердости

	Скорость деформации $10^{-3}, \text{с}^{-1}$	Статическая твердость, МПа	Динамическая твердость, МПа	Погрешность, %
1	0,89	0,45	0,48	6,25
2	0,89	0,44	0,47	6,38
3	0,89	0,39	0,43	9,30
среднее	0,89	0,43	0,46	7,31
4	3,50	0,58	0,60	3,33
5	3,50	0,53	0,56	5,36
6	3,50	0,55	0,59	6,78
среднее	3,50	0,55	0,58	5,16
7	17,53	0,89	0,92	3,26
8	17,53	0,90	0,95	5,26
9	17,53	0,83	0,89	6,74
среднее	17,53	0,87	0,92	5,07

Результаты расчетов статической и динамической твердости близки при одинаковых скоростях деформаций. Различие не превышает 10%.

2.2. Динамические исследования механических свойств технического пластилина

Динамическое сжатие/индентирование пластилина было проведено при сбрасывании груза с плоским торцом или стальной сферы диаметром 43 мм с высоты от 0,1 до 1,3 м.

2.2.1. Динамическое сжатие технического пластилина

Образцы с размерами 15×15 мм (площадь поперечного сечения $S = 225$ мм²) и длиной $L_0 = 30$ мм нагружали падающим грузом массой $m = 200$ г с высоты $H = 0,1 \dots 1$ м. Сопротивление воздуха не учитывали. Остаточная длина ΔL образцов после испытаний была измерена для вычисления предела текучести σ_T и скорости деформирования $\dot{\varepsilon}$ в предположении идеальной текучести, неизменности объема материала, и пренебрежении тепловыми эффектами (потенциальная энергия груза полностью переходит в работу пластического деформирования):

$$\sigma_T = \frac{mgH}{S \cdot \Delta L}, \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2gH}}{2L_0}, \quad (2.7)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Испытания сжатия при скорости деформации более 80 с⁻¹ были проведены на башенном копре Instron CEAST 9350. Образцы с размерами 25×25 мм и высотой $L_0 = 10$ мм сжимали падающим грузом массой $m = 2,144$ кг со скоростями $1 \dots 5$ м/с. Сопротивление воздуха не учитывали. На рисунке 2.11 представлена диаграмма деформирования пластилина при динамическом сжатии с разными скоростями.

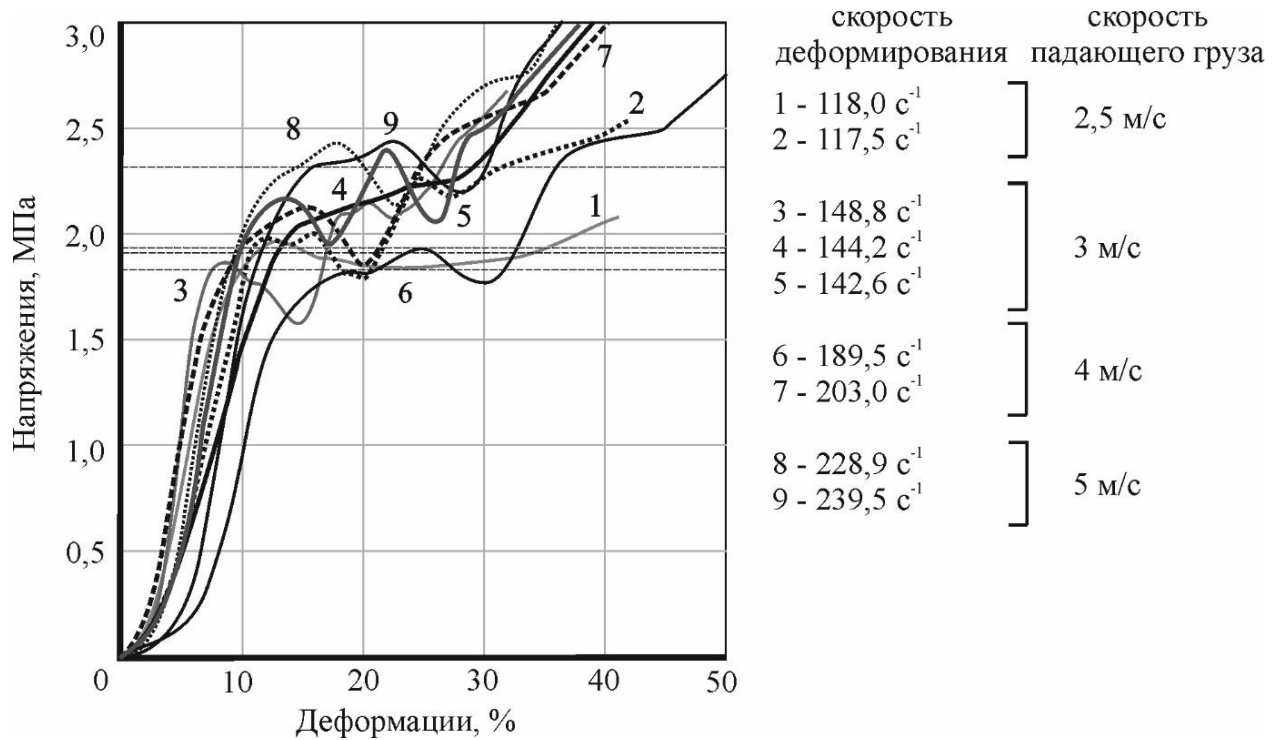


Рисунок 2.11. Диаграммы деформирования пластилина при динамическом сжатии

Колебания на диаграмме деформирования обусловлены тем, что силоизмеритель вместе с штангой и грузом представляет собой систему, в которой имеют место волновые процессы при испытании. Кривые были сглажены с сохранением характера деформирования и полной энергии. По сглаженным кривым были определены пределы текучести при разных скоростях деформирования. В таблице 2.2 представлены значения высоты падения груза, скорости деформаций и предела текучести при динамическом сжатии. Серым цветом отмечены данные, полученные при сжатии на башенном копре Instron CEAST 9350. Здесь основным варьируемым параметром была высота падения груза, поэтому в строках от 1 до 8 она монотонно увеличивалась.

Таблица 2.2 – Параметры, полученные при динамическом сжатии

№	Масса груза, кг	Высота падения груза, м	Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа
1	2,144	0,05	49,0±2,27	1,11±0,01
2	0,211	0,10	21,6±0,44	1,4±0,23
3	2,144	0,32	116,63±1,98	1,68±0,39
4	2,144	0,46	145,21±3,23	1,94±0,2
5	0,211	0,50	48,5±0,18	1,96±0,44
6	2,144	0,82	196,31±9,53	2,18±0,2
7	0,211	1,00	68,7±0,10	1,89±0,19
8	2,144	1,26	233,80±5,31	2,23±0,36

2.2.2. Динамическая твердость (ударное индентирование)

На блок пластилина с размерами 180×180×75 мм с высоты $H = 0,1...1$ м бросали сферический индентор диаметром $D = 43$ мм и массой $m = 321$ г. Аналогичные испытания проводят для проверки пригодности пластилина при сертификационных испытаний бронежилетов (см. п. 1.1). Сопротивление воздуха не учитывали. Измеряли диаметр отпечатка методом фотографирования, аналогично п. 2.1.4. Глубина отпечатка была вычислена по формуле

$$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}, \quad (2.8)$$

где D – диаметр стальной сферы, d – диаметр отпечатка.

Динамическая твердость была вычислена по формуле (2.6), в которой вместо $0,5P \cdot u$ использовали потенциальную энергию падающего тела mgH . Вычисления динамических пределов текучести и скорости деформирования были проведены по формулам (2.3) и (2.7) соответственно. В таблице 2.3 представлены значения диаметра и глубины отпечатка, предела текучести и скорости деформаций при динамическом индентировании.

Таблица 2.3 – Параметры, полученные при динамическом индентировании

№	Высота падения сферы, м	Диаметр отпечатка, мм	Глубина отпечатка, мм	Скорость деформации, с ⁻¹	Предел текучести, МПа
1	0,1	12,81±0,53	0,98±0,08	14,14	5,1±0,96
2	0,5	18,25±0,39	2,03±0,09	31,60	6,0±0,73
3	1,0	22,25±1,24	3,13±0,38	44,70	5,2±1,30

2.3. Зависимость предела текучести от скорости деформации

Диаграммы деформирования пластилина имеют выраженную площадку текучести, что позволяет его считать в расчетах идеальной упругопластической средой с пределом текучести, зависящим от скорости деформирования. Зависимость предела текучести от скорости деформации была аппроксимирована двухпараметрическим степенным законом – модель Нортон:

$$\sigma_T = K \cdot \dot{\varepsilon}^n \quad (2.9)$$

где K – константа материала, n – коэффициент чувствительности к скорости деформации. Методом наименьших квадратов были определены параметры K и n , сравнивая расчетную кривую с экспериментальными данными предела текучести при скоростях деформаций до 250 с⁻¹. Кривая для случаев растяжения/сжатия/индентирования имеет вид

$$\sigma_T = 5,68 \cdot 10^5 \cdot \dot{\varepsilon}^{0,229} . \quad (2.10)$$

Для чистого сдвига уравнение (2.9) имеет другие значения параметров

$$\sigma_T = 2,23 \cdot 10^5 \cdot \dot{\varepsilon}^{0,347} \quad (2.11)$$

Однако при высоких скоростях деформирования результаты сближаются, что делает возможным использование классической теории пластичности при анализе баллистических задач со скоростями деформаций более 10⁴ с⁻¹. Иными словами, технический пластилин в расчетах на растяжение/сжатие может быть имитирован моделью типа Нортон (вязкоупругое тело с последовательно соединенным упругим и вязким элементами). На рисунке 2.12 представлены экспериментальные

данные при квазистатическом и динамическом нагружениях в виде линейной аппроксимации предела текучести от скорости деформации в двойных логарифмических координатах.

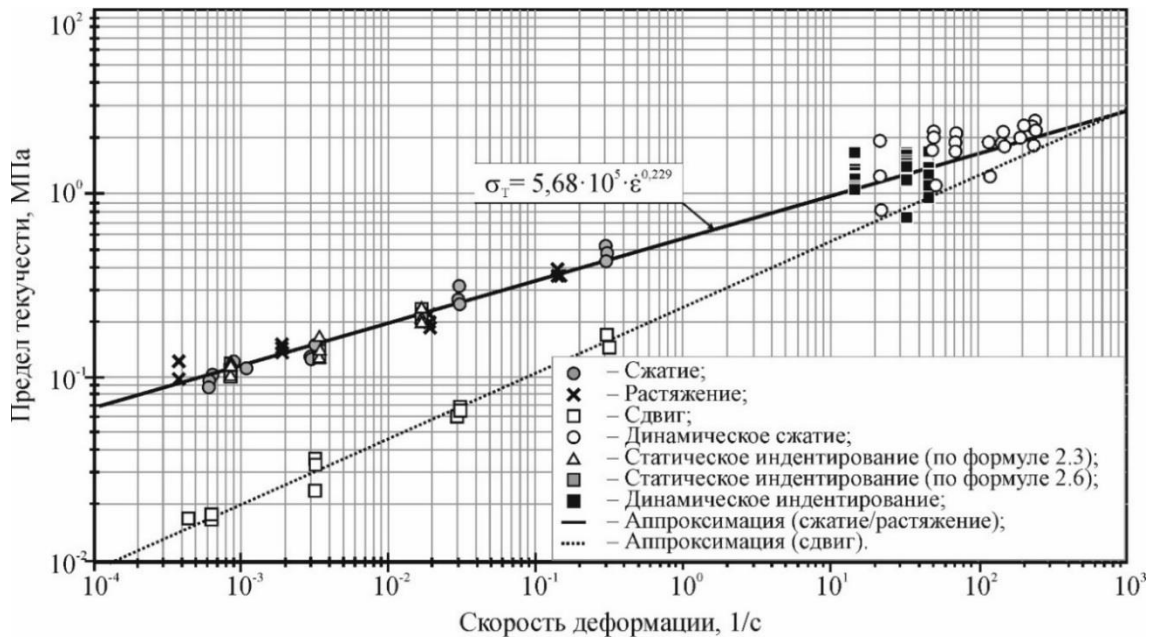


Рисунок 2.12. Зависимости предела текучести от скорости деформации

Отметим, что значения предела текучести при квазистатическом растяжении и сжатии близки (различие во всех случаях не превосходило 15%). Это характерная особенность отмечена в работе [65] при исследовании материала при одной скорости деформирования. Испытания на сдвиг несколько нарушают идеальную картину: предел текучести при сдвиге оказывается связан с пределом текучести на растяжение/сжатие коэффициентом 0,35, тогда как для классического упругопластического материала должен быть 0,5-0,6 (в зависимости от выбранной теории пластичности). Это связано с тем, что при больших деформациях не выполняется гипотеза несжимаемости материала (неизменности объема) из-за развития рассеянных микрповреждений от растягивающих компонентов напряженно-деформированного состояния (рисунок 2.3 при деформациях больше 3-5%), то есть задолго до полного разрушения. Предел текучести пластилина при ударном индентировании удовлетворительно согласуется с данными предела текучести при динамическом сжатии образцов. Данные исследования были проведены при температуре окружающей среды $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Была также получена зависимость предела текучести от скорости деформации при температуре окружающей среды $25\pm 1^\circ\text{C}$. Испытания статического и динамического индентирования стальной сферы были проведены аналогично пп. 2.1.4 и 2.2.2. Зависимость предела текучести от скорости деформации в данном случае выражается зависимостью

$$\sigma_T = 2,926 \cdot 10^5 \cdot \dot{\epsilon}^{0,279}. \quad (2.12)$$

Можно сделать вывод, что следует очень тщательно контролировать температуру пластилина, поскольку изменение ее на пять градусов приводит к изменению почти вдвое предела текучести.

Полученные характеристики (2.10) использованы далее при моделировании деформирования арамидных тканей и регистрирующей среды (пластилина) при ударе в пакете LS-DYNA. Зависимость предела текучести от скорости деформирования задана в материале *MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY с помощью дополнительной карты.

Выводы по главе

Технический пластилин является полимерным композитом, армированным мелкодисперсным наполнителем с объемной долей около 50%. Он демонстрирует реономное поведение, изменяя предел текучести в 20 раз при изменении скорости деформации на шесть порядков. Материал проявляет при сдвиге и сжатии развитую пластичность, деформации текучести превышают 25-30%. Однако при растяжении пластилин ведет себя как материал с весьма ограниченной пластичностью, в диапазоне деформации 3-5% в нем зарождаются микрповреждения, приводящие к появлению спадающего участка кривой «напряжение – деформация», образованию шейки и разрыву при средних деформациях 25-40%. При динамическом сжатии падающим грузом предел текучести достигает величины 2 МПа.

Полученные данные будут использованы при численных расчетах кинетики деформирования тканей, расположенных на пластилине.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов квазистатического вытягивания нити из ткани и деформирования арамидных тканей при локальном ударном воздействии. Рассмотрено влияние *поверхностной обработки* на характеристики арамидных тканей. Поверхностные обработки позволяют увеличить трение между нитями и тканями при минимальном увеличении массы тканевого пакета.

3.1. Изготовление тканевых образцов

Материалы, которые были нанесены на поверхность арамидных тканей, были выбраны из условий: обработка должна позволить обеспечить начальное сцепление нитей, сухое или вязкое трение. Трение между нитями не должно быть слишком сильным, чтобы исключить разрыв нити при вытягивании. В данной главе были рассмотрены следующие виды поверхностной обработки:

1. Сухая арамидная ткань в исходном состоянии.
2. Водная эмульсия ПВА, содержание сухого вещества 7% и 38%. Утяжеление ткани варьировали в диапазоне 5,0...6,5%.
3. ПВА-Т – водная эмульсия ПВА, содержание сухого вещества 38%. Ткань дополнительно подвергали температурной обработке +98°C. Утяжеление ткани составило 5,1%.
4. Водная эмульсия ПВА с многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ), содержание сухого вещества ПВА 7% (МУНТ марки «Таунит-МД», производство АО «НТЦ», г. Тамбов, 1% по массе). Утяжеление ткани составило 2,5%.
5. Эластомер а) красный, б) синий и в) бесцветный (марка RTV silicone, производство ARCO Master, США). Утяжеление ткани 4%, 6% и 9% соответственно.

6. Бесцветный эластомер (марка RTV silicone) с МУНТ («Таунит-МД» 1% по массе). Утяжеление ткани 14%.

7. Водная суспензия акрилового герметика (производство АО «Новбытхим», г. Санкт-Петербург, содержание твердого вещества 10%). Утяжеление ткани 20%.

8. Неотвержденная эпоксидная смола ЭД-20. Утяжеление ткани 31%.

9. Суспензия эпоксидной смолы ЭД-20 и наноалмазов (производство АО «НТЦ», г. Снежинск, Россия, 1% по массе). Утяжеление ткани 33%.

10. Канифоль сосновая В10 (производство ООО «Паяльные материалы», г. Рязань, Россия). Утяжеление ткани 3,1%.

11. Силиконовая смазка FELIX (производитель ООО «Тосол-Синтез-Инвест», г. Дзержинск, Россия). Утяжеление ткани 19,4%.

Все консистентные материалы покрытий были нанесены на ткань и разглажены плоским шпателем так, чтобы материал оставался лишь в местах переплетения (минимально возможное количество), после чего образцы были помещены на 24 часа в сушильный шкаф при температуре +60°C до полного высыхания водной основы. Эластомеры и герметики были влаготверждаемыми, и были выдержаны при комнатной температуре и относительной влажности ~50% в течение 48 часов до полной полимеризации. Канифоль была нанесена в измельченном порошкообразном виде на поверхность ткани, опрыскана этиловым спиртом для растворения канифоли. Далее ее выдерживали при температуре +60°C в течение 24 часов. Силиконовую смазку наносили на поверхность ткани разбрызгиванием (штатная спрей-упаковка), видимые капли излишков удаляли с помощью бумажной салфетки.

На рисунке 3.1 представлены фотографии лицевой и тыльной стороны баллистической ткани СВМ Р110 полотняного переплетения с поверхностной обработкой термопластом ПВА. На рисунке 3.2 представлена поверхность образца после обработки ПВА, полученная с помощью сканирующей электронной микроскопии JEOL JSM-7001F (SEM).

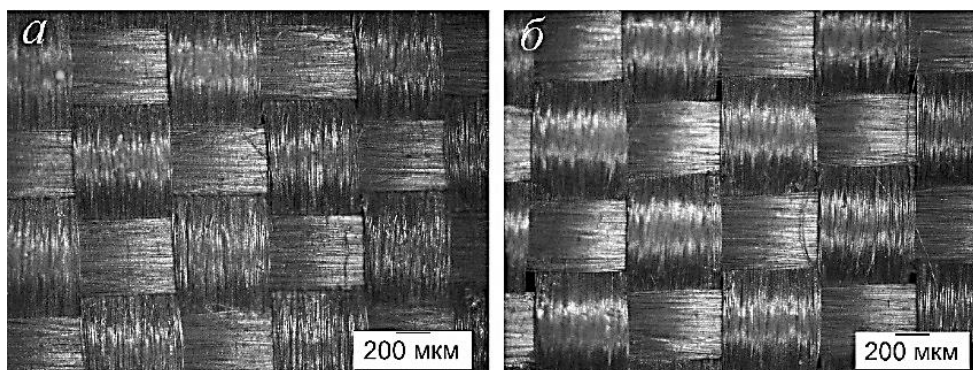


Рисунок 3.1. Фотографии арамидной ткани P110:
лицевая сторона (а) и тыльная сторона (б)

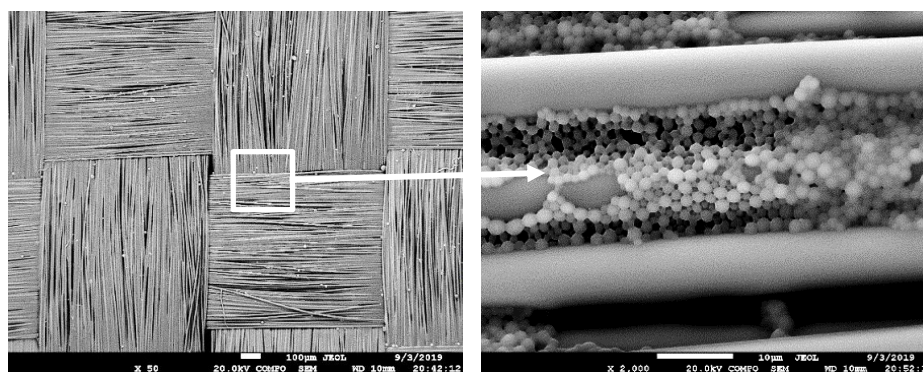


Рисунок 3.2. Поверхность ткани после обработки ПВА

Таким образом, основная часть ПВА в виде агломератов дисперсных частиц остается на поверхности ткани и вглубь нитей практически не проникает. Такая обработка способствует повышению усилия вытягивания нитей из ткани и снижает подвижность нитей, что в сумме должно дать увеличение энергии, рассеиваемой тканью при ударе.

3.2. Коэффициент трения нити по арамидной ткани

В статьях [13, 37, 44, 53, 78, 114, 127, 135, 171] авторы при проведении расчетов используют различные значения коэффициента трения между нитями. Поэтому в данной работе были проведены эксперименты на основе задачи Эйлера (скольжение нити по цилиндрической поверхности, [7, 138]). Для определения коэффициента трения нити по ткани на пластиковый цилиндр была приклеена сухая ткань СВМ P110 с помощью двухстороннего скотча. Один конец свободной

арамидной нити закрепляли в захвате, далее нить обернули вокруг цилиндра на один оборот (360°) и к другому концу нити закрепили груз массой 100 г (рисунок 3.3). Нить нагружали со скоростью 50 мм/мин при комнатной температуре. На рисунке 3.4 представлены кривые «нагрузка – перемещение», на которых имеется зона трения покоя (возрастание нагрузки) и зона трения скольжения (практически с постоянным усилием). Периодическое изменение нагрузки обусловлено автоколебательной природой трения упругой нити по цилиндру. По формуле Эйлера определили коэффициент трения

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{P}{Q}\right), \quad (3.1)$$

где α – угол охвата нитью цилиндра, $\alpha = 2\pi$, P и Q – нагрузка, прикладываемая к концам нити сверху и снизу относительно цилиндра, $P = 3,01$ Н и $Q = 0,98$ Н. По формуле (3.1) получили коэффициент трения $\mu = 0,174$.

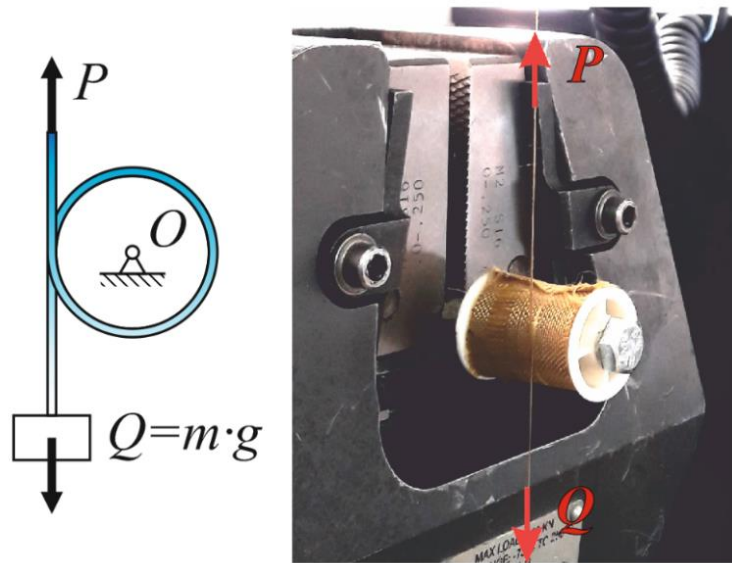


Рисунок 3.3. Схема и фотография закрепления образца при определении коэффициента трения

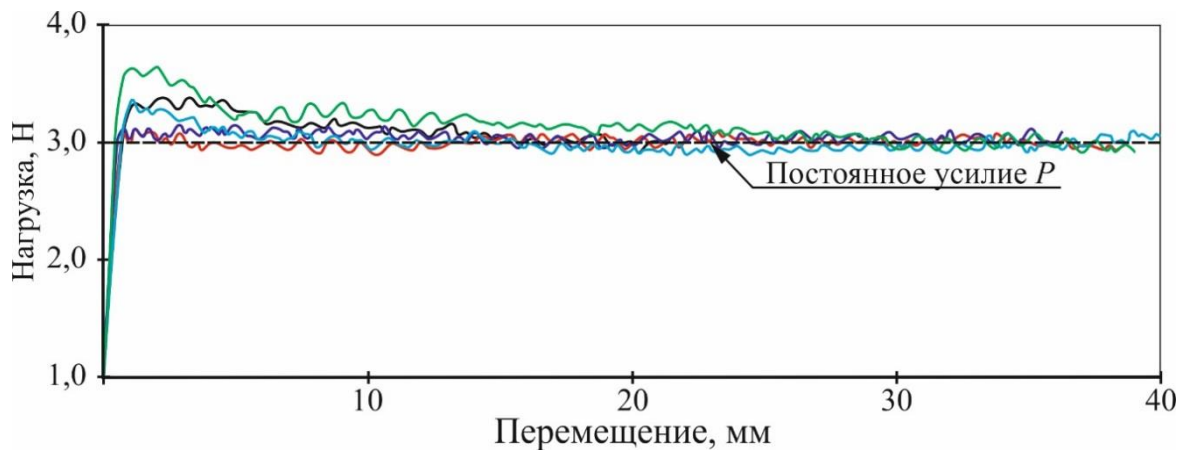


Рисунок 3.4. Кривые «нагрузка – перемещение» при определении коэффициента трения

Полученное значение коэффициента трения нитей в ткани использовано ниже при моделировании процесса деформирования ткани при локальном ударе.

3.3. Вытягивание нити из арамидных тканей

В первой части были проведены испытания вытягивания нитей из ткани размерами 50×50 мм на испытательной машине Instron 5882 с предельным значением силоизмерителя 100 Н. Скорость вытягивания нити была 50 мм/мин. На рисунке 3.5 показано закрепление образца ткани в захватах INSTRON 2710-106, поверхности которого покрыты тонким слоем эластомера, что обеспечивало эффективную передачу нагрузки на нити без их травмирования. На тисочные захваты были приклеены две ленты из пластика толщиной 0,5 мм и шириной 15 мм. Область, в которой происходило вытягивание нитей, имела ширину ~ 10 мм.

При локальном ударе происходит вытягивание, растяжение и разрушение нитей, которые лежат непосредственно под ударником в многослойной тканевой панели. Количество нитей в зоне контакте зависит от формы и размеров индентора. На рисунке 3.6 представлены результаты испытаний «усилие – перемещение» для сухой ткани при вытягивании одной, трех и пяти нитей.

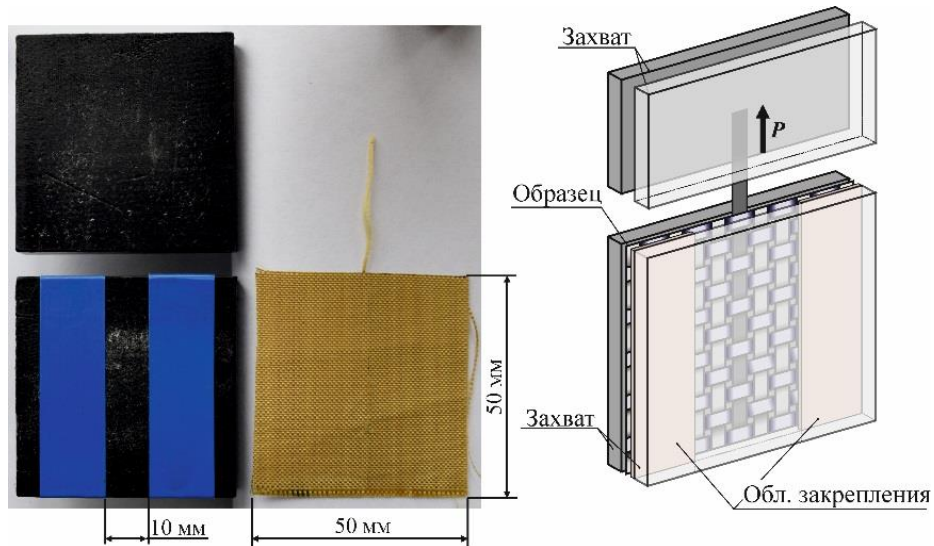


Рисунок 3.5. Фотография и схема закрепления образца при вытягивании нити

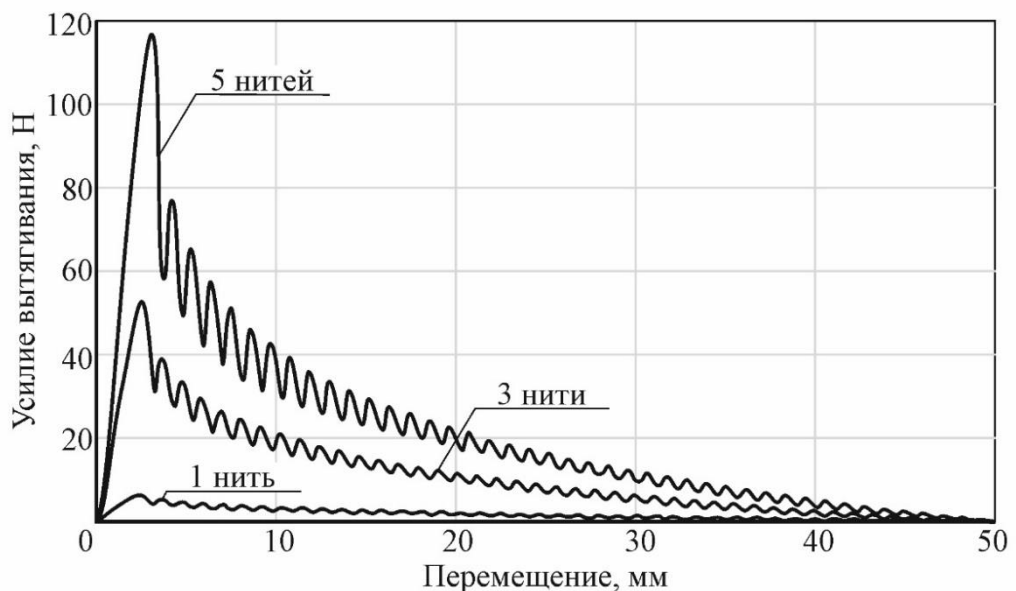


Рисунок 3.6. Кривые «усилие – перемещение» при вытягивании одной, трех и пяти нитей из ткани полотняного переплетения P110

Диаграммы вытягивания нити из ткани имеют два участка: возрастания нагрузки до перемещения 2-2,5 мм и снижения до нуля при полной вытяжке нити из ткани. На первом участке нить практически выпрямляется, при этом свободный конец нити неподвижен. Кажущееся удлинение ($2 \text{ мм}/50 \text{ мм} = 4\%$) хорошо согласуется с увеличением длины нитей в полотняном переплетении из-за их искривления. Очевидно, что саржевое или сатиновое переплетение будут иметь меньшее кажущееся удлинение.

Учитывая регулярную структуру ткани и выпуклую форму поперечного сечения крученых нитей, можно предположить, что нить касается ортогонального семейства на дуге α с коэффициентом трения f . Используя аналогию с задачей Эйлера (трение гибкой нити на поверхности множества последовательных цилиндров), получим зависимость усилия вытяжки от перемещения в виде:

$$P(x) = q \cdot \exp\left(\frac{\alpha f (L - x)}{\Delta}\right), \quad (3.2)$$

где L – длина нити, $L = 50$ мм, x – перемещение нити, α – дуга контакта с нитью утка, f – коэффициент трения скольжения, Δ – шаг переплетений, $\Delta = 0,55$ мм, q – начальное усилие на свободном конце нити (эмпирическая константа, определяемая материалом и типом переплетения нитей в ткани). При незначительном увеличении коэффициента трения (на 10%) в зависимости (3.1) приводит к существенному увеличению усилия вытягивания (на 42%) и, соответственно, энергии вытягивания.

При одновременном вытягивании двух, трех и т.д. нитей максимальное усилие возрастает непропорционально количеству одновременно вытягиваемых нитей. По экспериментальным данным был получен коэффициент возрастания k , который позволяет учесть количество вытягиваемых нитей:

$$k = 0,375n^2 + 2n - 1,375, \quad (3.3)$$

здесь n – количество вытягиваемых нитей из ткани. Таким образом, для вытягивания трех нитей $k = 8$, а для пяти нитей $k = 18$. Отсюда следует, что при вытягивании трех нитей каждая нить нагружена сильнее в $8/3=2,67$ раза по сравнению с усилием вытягиваний одной нити. Максимальное усилие вытягивания одной нити в проведенных экспериментах составляло ~ 7 Н (при нагрузке разрыва ~ 50 Н).

Осцилляции усилия вытягивания были представлены законом

$$P_0(x) = 1 + A \cdot \text{Cos}\left(\frac{\pi x}{\Delta}\right), \quad (3.4)$$

где A – амплитуда осцилляции усилия. При добавлении (3.3) и (3.4) к формуле (3.2), была получена аппроксимационная зависимость максимального усилия

вытягивания от количества вытягиваемых нитей, которая может быть полезна для оценки сопротивления вытягиванию (или обрыву) нитей при ударе индентором произвольного диаметра:

$$P(x) = q \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot f \cdot (L-x)}{\Delta}\right) \left(0,375n^2 + 2n - 1,375\right) \cdot \left(1 + A \cdot \cos\left(\frac{\pi x}{\Delta}\right)\right). \quad (3.5)$$

В таблице 3.1 представлены экспериментальные данные усилия вытягивания нитей из ткани полотняного переплетения, а также параметры зависимости (3.5) и сопоставление с полученными характеристиками. Принято, что значение q для трех и пяти нитей равно значению q для одной нити и коэффициент трения – 0,174; α и A – варьируемые параметры.

Ошибка прогнозирования энергии вытягивания по всем опытам не превышает 15%. Усилие вытягивания нитей обладает достаточно большим разбросом в связи со значительной вариацией линейной плотности и, соответственно, изгибной жесткости нитей, доходящей до 30%. Измерения показывают, что масса 70 арамидных нитей основы длиной 210 мм лежит в диапазоне 5,7...6,9 мг. В Приложении I приведены более детальные данные.

Формула (3.5) может быть полезна для расчетной оценки возможности вытягивания нитей из панелей большего размера, чем в проведенных экспериментах. В защитных структурах (бронезилеты, щиты, каски) размеры используемых тканей ограничены величинами порядка около 30 см, то есть вытягивание нитей происходит из области длиной до 150 мм. При взаимодействии ударника диаметром 9 мм с пакетом тканей P110 в контакте находится до 17 нитей. Однако уже при одновременном вытягивании трех нитей из ткани P110 длиной 150 мм будет происходить их разрушение. Следовательно, использование ткани СВМ P110 в защитных структурах нерационально. Очевидно, следует рассмотреть ткани с более широкими нитями, например, Twaron® 709 (кстати, он используется в зарубежных бронезилетах). Подробные данные по этой ткани приведены ниже, в главе 5.

Далее были проведены исследования влияния разных типов обработки на максимальное усилие и энергию вытягивания одиночной нити из ткани СВМ P110.

Условия испытания и схема закрепления были аналогичны предыдущим экспериментам. На рисунке 3.7 и в таблице 3.2 представлены типичные результаты экспериментов по вытягиванию одной нити (опыты повторяли до пяти раз для каждого из 11 видов обработки) из ткани полотняного переплетения. Энергию вытягивания W_3 определяли как площадь под кривой «усилие – перемещение».

Максимальные значение удельной энергии (энергия вытягивания, деленная на массу 1 м² ткани) имели эпоксидная смола с наноалмазами, акриловый герметик, канифоли и композиции ПВА с МУНТ, ПВА, ПВА-Т. Композиции на основе ПВА и канифоли имели более высокий расчетный коэффициент сухого трения наряду с начальным эффектом склеивания, что выразилось в итоге в росте максимального усилия вытяжки и поглощенной энергии. Определенным преимуществом обработки ткани канифолью является то, что она из твердого состояния переходит в жидкое при скольжении нити, т.к. легко плавится при трении. После остановки нити канифоль остывает и вновь становится твердым телом, не теряя своих свойств при повторном вытягивании. К сожалению, канифоль не может обеспечить стабильные результаты при массовом производстве защитных структур, т.к. является природным материалом с существенно варьируемыми свойствами. Также стоит отметить, что водная суспензия акрилового герметика имеет высокие значения характеристик вытягивания нити, но поверхностная плотность ткани увеличилась на 20,3%.

На основании параметров аналитической модели, представленных в таблице 3.1, было принято, что дуга контакта составляет 14,3°, а q , f и A – варьируемые переменные в формуле (3.5). В результате были получены коэффициенты трения для наиболее эффективных способов обработки. Коэффициент трения при вытягивании нити из ткани, обработанной ПВА оказался равен 0,20. Полученное значение далее будет использовано в численных расчетах. Ошибка прогнозирования энергии вытягивания в данном случае не превышала 15%.

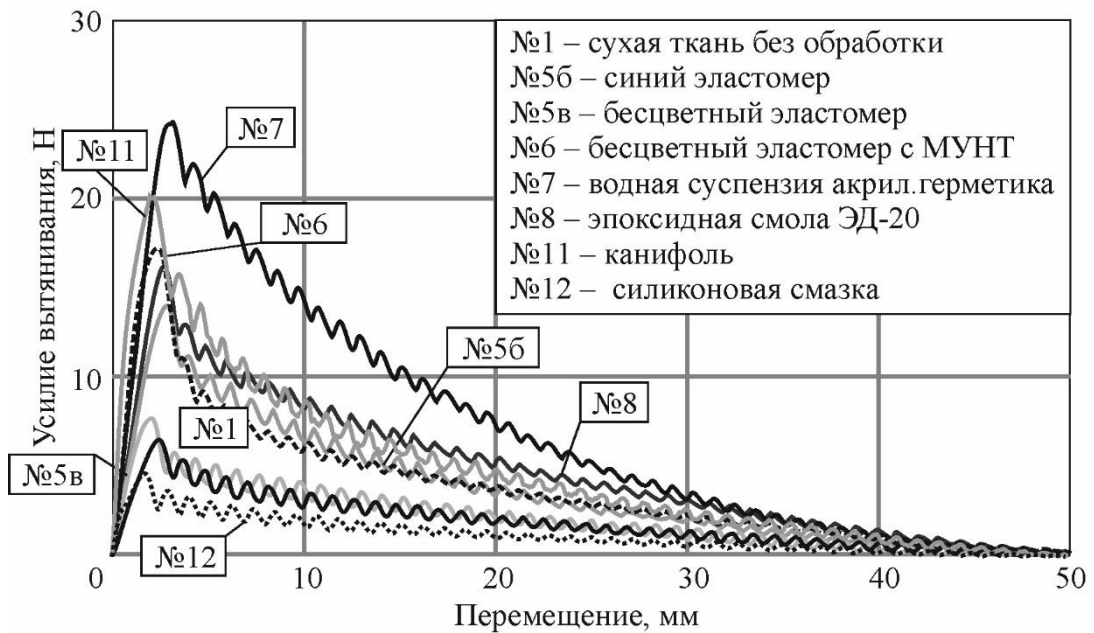
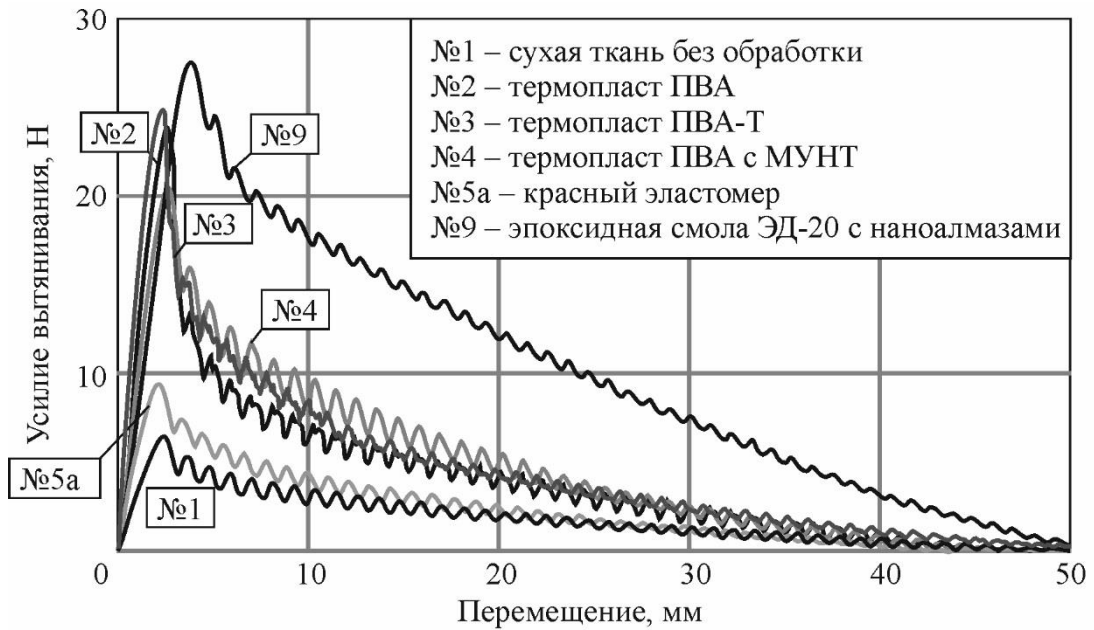


Рисунок 3.7. Кривые «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из обработанной ткани

Таблица 3.1 – Средние характеристики при вытягивании n нитей из сухой ткани CBM P110

Кол-во нитей n	Эксперимент		Оптимальные параметры в формуле (3.4)					Погрешность, %	
	Максимальное усилие F_3 , Н	Энергия вытягивания W_3 , Дж	q , Н	α , °	A	Макс. усилие F_p , Н	Энергия вытягивания W_p , Дж	$\frac{\Delta F}{F_3}$	$\frac{\Delta W}{W_3}$
1	6,94	0,089	0,164	14,3	0,208	7,36	0,076	-6,1	14,6
3	52,51	0,547	0,164	13,3	0,166	45,02	0,508	14,3	7,1
5	116,87	1,034	0,164	12,3	0,130	74,47	0,933	36,3	9,8

Таблица 3.2 – Характеристики при вытягивании одной нити из обработанной ткани CBM P110

№	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 $\frac{W_3}{\rho}$, $1 \cdot 10^{-3}$ Дж·м ³ /кг	Рейтинг
1	Без обработки	110	6,94±0,94	0,089±0,018	0,06±0,01	0,81±0,16	–
2	Термопласт ПВА	116,3	23,52±1,22	0,22±0,013	0,20±0,02	1,92±0,12	IV
3	Термопласт ПВА-Т	115,6	23,94±1,36	0,22±0,018	0,21±0,01	1,90±0,15	IV
4	Термопласт ПВА с МУНТ 1%	112,8	19,20±1,85	0,22±0,016	0,17±0,02	1,95±0,14	IV
5а	Эластомер RTV красный (ABRO Masters)	114,3	9,25±0,54	0,12±0,011	0,08±0,01	1,05±0,100	VIII
5б	Эластомер RTV синий (ABRO Masters)	117,0	14,54±0,88	0,20±0,026	0,12±0,01	1,70±0,23	V
5в	Эластомер RTV бесцветный (ABRO Masters)	119,6	7,47±0,25	0,09±0,007	0,06±0,01	0,75±0,06	IX

Продолжение таблицы 3.2

6	Эластомер RTV (ABRO Masters) с МУНТ 1%	125,7	16,70±0,74	0,189±0,001	0,13±0,01	1,50±0,01	VII
7	Водная суспензия акрилового герметика	132,3	26,79±3,60	0,39±0,057	0,20±0,03	2,39±0,28	II
8	Эпоксидная смола ЭД-20	143,7	16,06±0,23	0,234±0,01	0,11±0,01	1,63±0,01	VI
9	Эпоксидная смола ЭД-20 с наноалмазами 1%	146,5	25,65±3,0	0,474±0,057	0,18±0,02	3,24±0,386	I
10	Канифоль сосновая В10	113,4	19,62±0,78	0,24±0,01	0,17±0,01	2,13±0,03	III
11	Силиконовая смазка FELIX	131,3	4,89±0,33	0,06±0,01	0,04±0,01	0,44±0,02	X

Таблица 3.3 – Средние характеристики при вытягивании одной нити из обработанной ткани СВМ Р110

№	Тип обработки	Эксперимент		Оптимальные параметры в формуле (3.4)					Погрешность, %	
		Макс. усилие $F_э$, Н	Энергия вытягивания $W_э$, Дж	q , Н	f	A	Макс. усилие F_p , Н	Энергия вытягивания W_p , Дж	$\frac{\Delta F}{F_э}$	$\frac{\Delta W}{W_э}$
1	Термопласт ПВА	23,5	0,22	0,255	0,204	0,148	22,1	0,21	6,1	5,9
2	Эластомер RTV (ABRO Masters) с МУНТ 1%	16,7	0,19	0,483	0,148	0,067	12,7	0,17	24,0	9,5
3	Водная суспензия акрилового герметика	26,8	0,39	0,673	0,166	0,034	25,2	0,32	3,9	17,7
4	Эпоксидная смола ЭД-20	16,1	0,23	0,874	0,123	0,042	13,9	0,22	13,3	4,3
5	Эпоксидная смола ЭД-20 с нанодиамазами 1%	25,7	0,47	1,40	0,137	0,014	27,8	0,42	-8,3	11,6
6	Канифоль сосновая В10	19,62	0,24	0,546	0,193	0,072	19,17	0,24	2,3	0,4

Как правило, термопласт ПВА частично остается на поверхности нити после разрушения, что приводит к некоторому увеличению коэффициента трения между нитями при вытягивании. На рисунке 3.8 представлены фотографии поверхностей арамидной нити после вытягивания из обработанной ткани, полученные на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7001F.

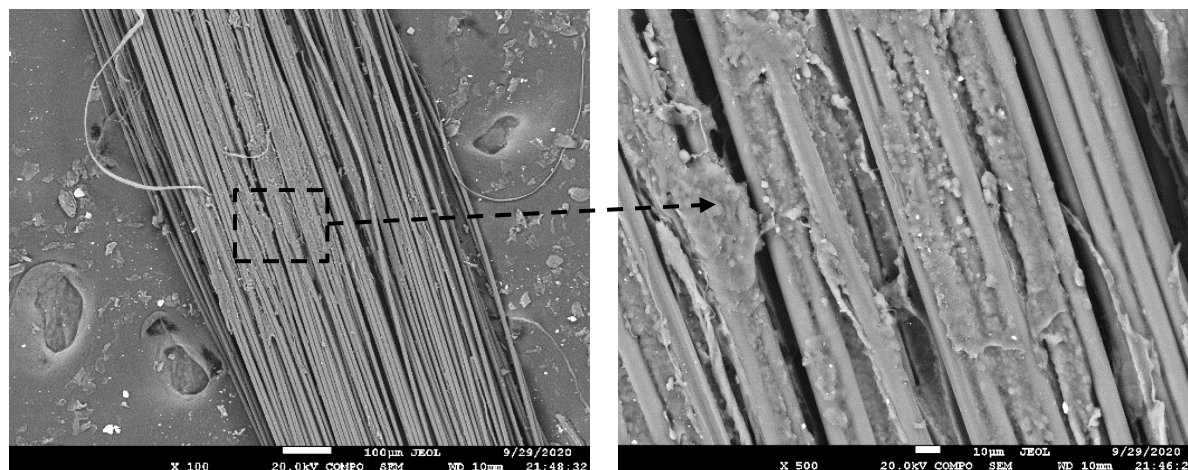


Рисунок 3.8. Поверхность нити после вытягивания из ткани с обработкой ПВА

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что характеристики вытягивания нити из ткани (усилия, энергии) увеличиваются при обработке арамидной ткани рассмотренными материалами. Наиболее эффективными (см. рейтинг в таблице 3.2) с учетом утяжеления оказались эпоксидная смола с нанодиамазами, канифоль, акриловый герметик и композиции ПВА с МУНТ, ПВА, ПВА-Т.

3.4. Исследование влияния обработки на прогиб ткани (на глубину вмятины в пластилине) при низкоскоростном ударе

В данном разделе проведены баллистические испытания тестовых пакетов ударником диаметром 4,5 мм из пневматического пистолета ИЖ53М, рисунок 3.9. Двух- или трехслойные пакеты (100×100 мм) из арамидной ткани располагали на блоке пластилина толщиной 75 мм. Скорость ударника 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 и, соответственно, на глубину вмятины в пластилине. В пакетах были обработаны один или два слоя ткани. Этим моделировали частичную или полную обработку всего пакета (испытания на полноразмерных пакетах с десятками слоев ткани в исследовательских целях было преждевременным). Рассеяние энергии происходило за счет вытягивания нитей и деформирования регистрирующей среды – технического пластилина, рисунок 3.10.



Рисунок 3.9. Оборудование для испытания:

1 – образец, 2 – ударник, 3 – пластилиновый блок,
4 – пневматический пистолет ИЖ53М, 5 – хронограф S04



Рисунок 3.10. Характер деформирования двух слоев ткани P110 с термопластом ПВА и технического пластилина после удара со скоростью 108 м/с

После удара 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 », рисунок 3.11. Кривая №1 построена по результатам испытаний сухой ткани и используется ниже для сравнения с поверхностно модифицированными вариантами при разных скоростях.

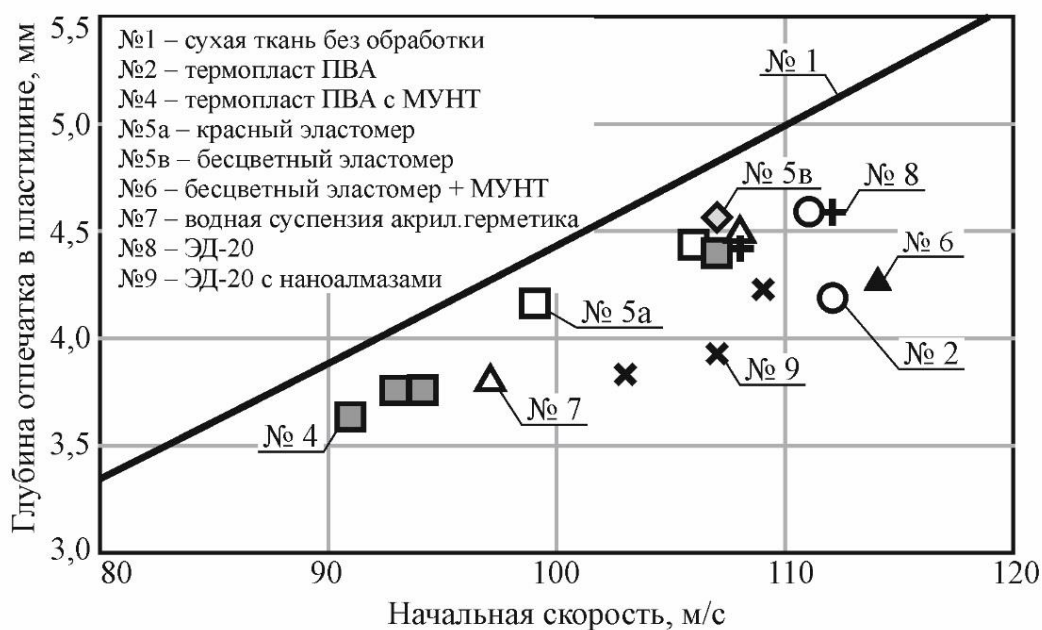


Рисунок 3.11. Кривая «глубина отпечатка в пластилине – начальная скорость ударника» для пакета из трех слоев арамидной ткани

В таблице 3.4 представлены экспериментальные данные эффективности покрытий по критерию, максимум которого обеспечит минимальный прогиб и массу тканевого пакета при неизменной энергии удара

$$\Psi = \frac{m \cdot V^2}{2 \cdot w \cdot \rho}, \quad (3.5)$$

где m – масса ударника ($m = 0,35$ г), V – начальная скорость ударника, w – глубина вмятины в пластилине, ρ – поверхностная плотность образца.

В таблице 3.5 представлены виды поверхностной обработки, значения глубины вмятин в пластилине, скорости ударника, эффективность рассмотренных обработок – значения критерия (3.5). В данном случае наиболее эффективным

оказались покрытия из термопласта ПВА, эластомера RVT с МУНТ и эпоксидная смола с наноалмазами.

Таким образом, во всех рассмотренных примерах наибольший коэффициент эффективности покрытия получился у термопласта ПВА. При рассмотренных скоростях эффективность использования вязких жидкостей оказалась невысокой ввиду ограниченной «прочности» жидкостей при динамическом сдвиге (кавитационная прочность), тогда как при квазистатическом вытягивании картина была противоположной.

3.5. Квазистатические испытания до разрушения арамидных нитей и образцов из термопласта ПВА

При моделировании процесса вытягивания нитей и деформирования арамидных тканей с тонкими покрытиями термопласта ПВА при локальном ударе необходимо задавать механические свойства материалов.

3.5.1. Определение механических свойств арамидных нитей

Механические свойства арамидных нитей Русар® (АО «Каменскволокно», Россия) со средней линейной плотностью 29,4 текс были определены при квазистатическом растяжении. Длина нитей была 200 мм, захватных частей – 50 мм. Области нити для захвата были предварительно обработаны цианакрилатным клеем (производство Axton) и высушены при комнатной температуре в течение 24 ч. Образцы растягивали со скоростью 5 мм/мин на испытательной машине INSTRON 5882 с предельными значениями силоизмерителя 100 Н. В результате были получены диаграммы деформирования при растяжении, рисунок 3.12.

Разрушающая нагрузка составляет 61 ± 5 Н (предел прочности $2,9 \pm 0,2$ ГПа). Полученные значения хорошо согласуются с известными в литературе [13, 157].

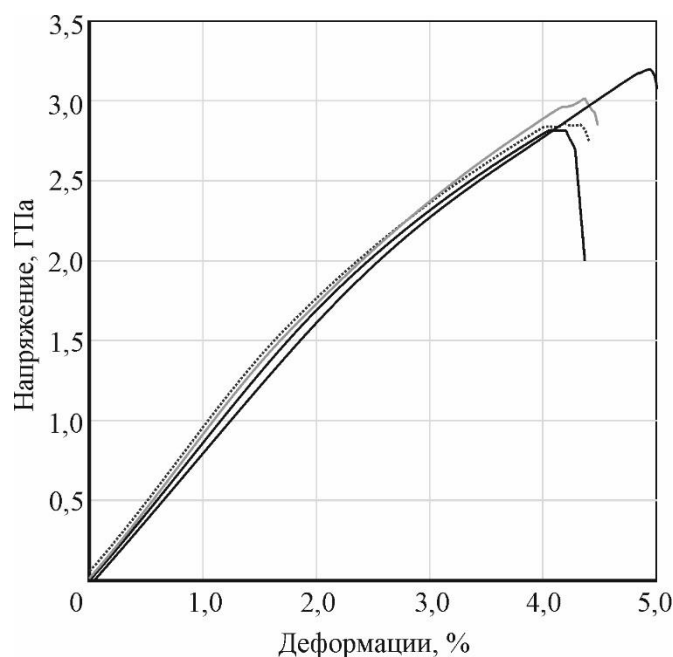


Рисунок 3.12. Диаграмма растяжения арамидных нитей

3.5.2. Определение свойств пленок из термопласта ПВА

Механические свойства термопласта ПВА были определены при растяжении пленочных образцов до разрушения. Водную эмульсию ПВА заливали в форму размерами $2,5 \times 80 \times 0,1$ мм. Образцы выдерживали в сушильном шкафу 24 часа при температуре $+60^\circ\text{C}$ до полного высыхания водной основы.

Квазистатические испытания проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 5942 с предельным значением силоизмерителя 10 Н, скорость движения траверсы 5 мм/мин. Образцы закрепляли в пневматических захватах Instron 2712-019 с давлением 5 бар. В результате испытаний были получены диаграммы «напряжение – деформации» (рисунок 3.13). Значения плотности 1088 ± 15 кг/м³, модуля упругости $1,99 \pm 0,2$ ГПа и предела прочности 24 ± 1 МПа. Полученные значения согласуются с известными в литературе значениями для поливинилацетата [32].

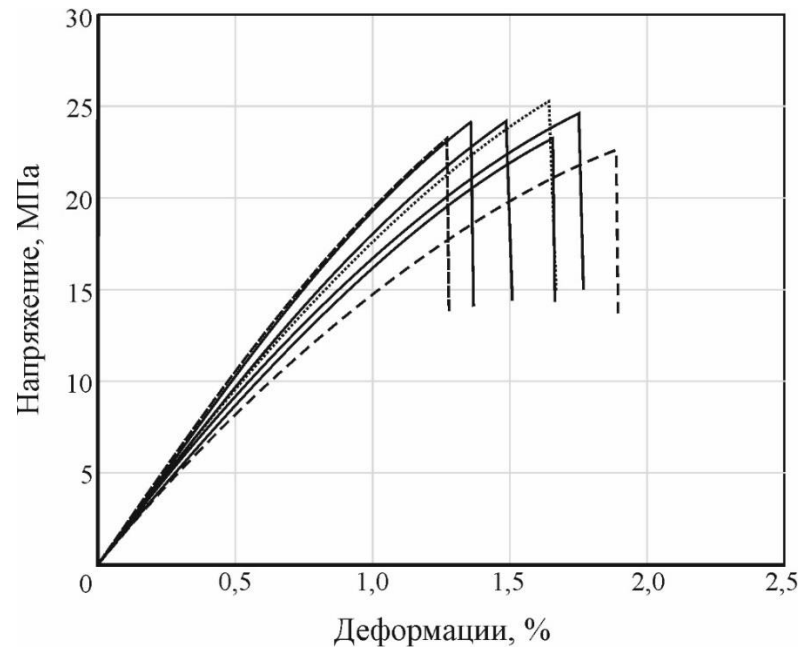


Рисунок 3.13. Диаграммы деформирования образцов из ПВА

Таблица 3.4 – 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±4	4,4±0,4	1,31±0,1	IV
2	Термопласт ПВА	2 / 110	1 / 115,6	335,6	5,0	109±3	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	4,0±0,3	1,25±0,1	VIII
4	Эластомер RTV красный (ABRO Masters)	2 / 110	1 / 114,3	334,3	3,9	103±5	4,3±0,2	1,28±0,1	VI
5	Эластомер RTV бесцветный (ABRO Masters)	2 / 110	1 / 119,7	339,6	8,7	107±3	4,6±0,2	1,29±0,04	V
6	Эластомер RTV (ABRO Masters) с МУНТ 1%	2 / 110	1 / 125,7	345,7	14,3	106±3	4,0±0,2	1,43±0,04	II
7	Водная суспензия акрилового герметик	2/110	1/ 132,3	352,3	20,3	103±8	4,1±0,5	1,26±0,04	VII
8	Эпоксидная смола ЭД- 20	2 / 110	1 / 143,7	363,7	30,6	110±3	4,5±0,1	1,29±0,03	V
9	Эпоксидная смола ЭД-20 с наноалмазами 1%	2 / 110	1 / 146,5	366,7	33,2	112±1	4,39±0,3	1,36±0,10	III

Таблица 3.5 – 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	Эффективность 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

Выводы по главе

Проведены испытания образцов арамидной ткани с разными видами покрытий при квазистатическом и ударном нагружении. Из рассмотренных 11 поверхностных обработок наиболее эффективными при *квазистатическом* вытягивании нити из ткани оказались эпоксидная смола с наноалмазами (утяжеление ткани 33,2%), водная суспензия акрилового герметика (утяжеление ткани 20,3%), канифоль (утяжеление ткани 3,7%) и композиция ПВА (утяжеление ткани 2,5...5,7%). При *ударном нагружении* наиболее эффективными оказались композиции ПВА (утяжеление 5...6%), эластомер с МУНТ (утяжеление до 14,7%) и эпоксидная смола с наноалмазами (утяжеление ткани 33,2%). Обобщая результаты экспериментов на вытягивание *и ударное* нагружения, можно выделить наиболее эффективное покрытие арамидных тканей – термопласт ПВА. Термопласт ПВА увеличил усилие вытягивание в 3,4 раза, энергию вытягивания в 2,5 раза при увеличении поверхностной плотности ткани на 5...6%. Канифоль не может обеспечить стабильные результаты при массовом производстве защитных структур, поэтому далее исследования проводили лишь на термопласте ПВА.

Полученные значения механических свойств арамидных нитей и термопласта ПВА использованы ниже при численных расчетах кинетики деформирования тканей, расположенных на пластине. Среднее значение предела прочности арамидных нитей равно 2,9 ГПа, модуль упругости 141 ГПа, для термопласта ПВА модуль упругости 1,99 ГПа и предел прочности 24 МПа. На основании экспериментальных данных коэффициент трения скольжения между сухими нитями принят равным 0,174, а для обработанных ПВА – 0,204.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ

Данная глава посвящена численному моделированию процессов деформирования арамидных тканей. Полученные экспериментальные данные о механических свойствах арамидных тканей и пластилина (см. п. 2, 3) использованы в конечно-элементной модели деформирования баллистических тканей при локальном ударном воздействии.

4.1. Разработка мезоуровневой модели арамидных тканей с тонким покрытием из термопласта ПВА

Решение задач деформирования и разрушения тканей является одной из наиболее сложных в механике деформируемого тела (большие перемещения, тысячи фрикционных контактов компонентов, разрушение этих компонентов и др.), т.к. ткань имеет сложную внутреннюю геометрию, нити регулярно искривляются и вытягиваются. В научной литературе хорошо зарекомендовал себя мезоуровневый подход для анализа кинетики деформирования и разрушения сухих арамидных тканей при ударном нагружении [13, 19, 39, 44, 71, 75, 86, 100, 105, 112, 114, 127, 129-131, 134, 140, 144, 146, 168, 170, 171]. Напомним, понятие «мезоуровневый» означает включение в модель ткани только нитей. Отдельные волокна не рассматриваются.

В данной работе расчеты динамики деформирования тканей с тонкими покрытиями были также проведены на мезоуровневых моделях, с включением *дополнительных элементов*, отвечающих за покрытия. Использован коммерческий пакет LS-DYNA R7.1.2 MPP на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» Лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ.

4.1.1. Геометрическая сторона задачи

Мезоуровневая конечно-элементная модель сухой ткани составлена из отдельных нитей как кусочно-линейных оболочечных конечных элементов SHELL163 *постоянной* толщины, рисунок 4.1. Размеры плоских конечных

элементов были назначены так, чтобы схематизировать изогнутость нитей в виде кусочно-линейных поверхностей в направлениях основы и утка. В работах [14, 112] авторами была доказана возможность получения адекватного интегрального отклика модели при такой схематизации на локальный удар. Разработанная геометрическая модель основана на представительной повторяющейся ячейке (рисунок 4.2а). Арамидная ткань СВМ Р110 имеет поверхностную плотность 110 г/м^2 , 92 нити приходится на 50 мм ткани как в направлении основы, так и утка. По этим данным было определено, что повторяющийся элемент имеет длину 0,54 мм.

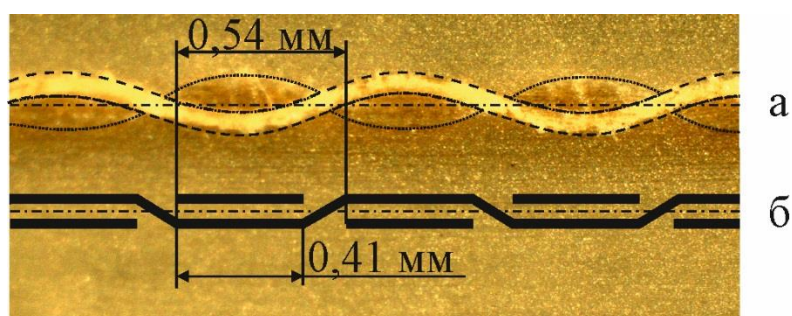


Рисунок 4.1. Схематизация арамидной ткани полотняного переплетения (а) численной моделью (б)

На рисунке 3.2 было приведено SEM-изображение поверхности ткани после обработки ПВА. На поверхности нитей практически нет покрытия, оно располагается в области пересечения нитей. На основе этого наблюдения было принято, что тонкое покрытие ПВА в модели должно иметь вид плоских элементов, соединяющих соседние нити основы и утка (рисунок 4.2б). Они были построены на узлах имеющихся нитей. Это обуславливает численную эффективность такой модели, не приводя к увеличению трудоемкости вычислений.

Опуская элементарные вычисления, толщину оболочечных элементов нитей задавали равной 0,050 мм на основании данных о поверхностной плотности ткани и размерах элементарной ячейки. Толщина конечных элементов тонких покрытий определена из известного утяжеления ткани (5,1%), плотности ПВА и равна, в итоге, 0,014 мм.

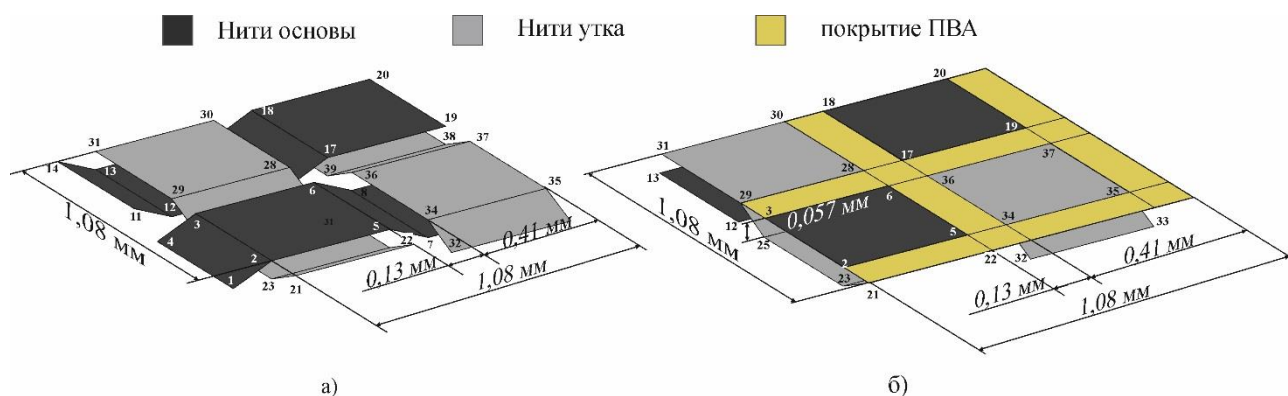


Рисунок 4.2. Элементарные ячейки для сухой ткани P110 (а)
и ткани P110 с обработкой поверхности (б)

(Номерами отмечены ключевые точки нитей и тонких покрытий)

Нити из высокопрочных волокон и тонкие покрытия термопласта ПВА были представлены прямоугольными 4-узловыми элементами типа SHELL (параметр ELFORM = 16 в LS-DYNA). Модели с оболочечными конечными элементами с одной точкой интегрирования (мембраны) не учитывают жесткость нити при изгибе. Арамидные нити в ткани состоят из сотен волокон диаметром 10-15 мкм, изготовлены с небольшой круткой (100-200 оборотов на метр) и, вследствие чего, имеют некоторую жесткость при изгибе и сдвиге. Поэтому в оболочечном конечном элементе было использовано три точки интегрирования по толщине. Это несколько удлиняет расчеты по сравнению с мембранными схемами, но позволяет адекватно отразить осцилляции усилия в процессе вытягивания.

4.1.2. Определение параметров моделей материалов и контактных алгоритмов

Преимуществом мезоуровневого моделирования ткани является возможность задания ортотропных моделей материалов и соответствующих критериев разрушения (в этой главе разрушение нитей не рассматривается, поскольку ни вытягивание, ни низкоскоростной удар не создают в них высоких напряжений). Арамидные ткани обладают высокими модулем упругости, прочностью на растяжение, гибкостью, но имеют небольшие удлинения [20, 23, 35, 117] до разрушения. Материал нитей принимали упругим и ортотропным с возможностью разрушения (*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC). Значения модулей упругости E_B ,

E_C и модули сдвига G_{AB} , G_{BC} были приняты на два порядка меньше модуля упругости E_A , согласно рекомендациям в работах [44, 114]. Коэффициенты Пуассона были выбраны близкими к нулю [44, 114]. Согласно литературным данным [114, 134] они слабо влияют на жесткость модели при одноосном нагружении. Механические характеристики нитей представлены в таблице 4.1.

Значение трансверсального модуля сдвига эквивалентного сплошного материала нити G_{CA} было определено обратным методом, сравнивая расчетную (МКЭ) и экспериментальную диаграммы *разгрузки* регулярно искривленной нити, извлеченной из ткани. Остальные упругие свойства слабо влияют на результаты расчетов и приняты малыми в соответствии с рекомендациями литературных источников.

Нить в ткани имеет искривленную форму и при растяжении начинает выпрямляться. На рисунке 4.3 показана нить до испытания и изменение геометрии при численном моделировании процесса растяжения нити. Образцы испытаны на машине INSTRON 5882 аналогично п. 3.5.1. Образцы растягивали до нагрузки, соответствующей ~50% от нагрузки разрушения (до 30 Н), и разгружали до начального состояния. Чтобы исключить влияние внутреннего трения при натяжении нити, модуль упругости был определен при разгрузке (141 ± 5 ГПа), что хорошо согласуется с литературными данными [35]. В результате были получены диаграммы деформирования, серым цветом на диаграмме отмечен наблюдаемый разброс (рисунок 4.4).

Моделирование растяжения одной искривленной нити в МКЭ показало, что диаграмма деформирования может быть описана лишь двумя константами: E_A и G_{CA} – модулем упругости (вдоль оси нити) и трансверсальным модулем сдвига (в направлении толщины). Остальные упругие константы слабо влияют на жесткость модели нити при ее разгибе. Красной пунктирной линией показан результат расчета диаграммы растяжения (распряmlения) нити при $E_A = 140$ ГПа и $G_{CA} = 150$ МПа. Так как в данной модели нет внутреннего трения из-за крутки волокон, диаграммы растяжения и разгрузки совпадают.

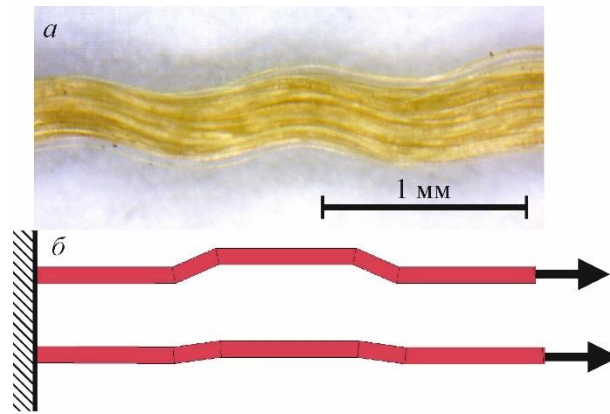


Рисунок 4.3. Фотография арамидной нити до испытания на растяжение (а) и схема деформирования при численных расчетах (б)

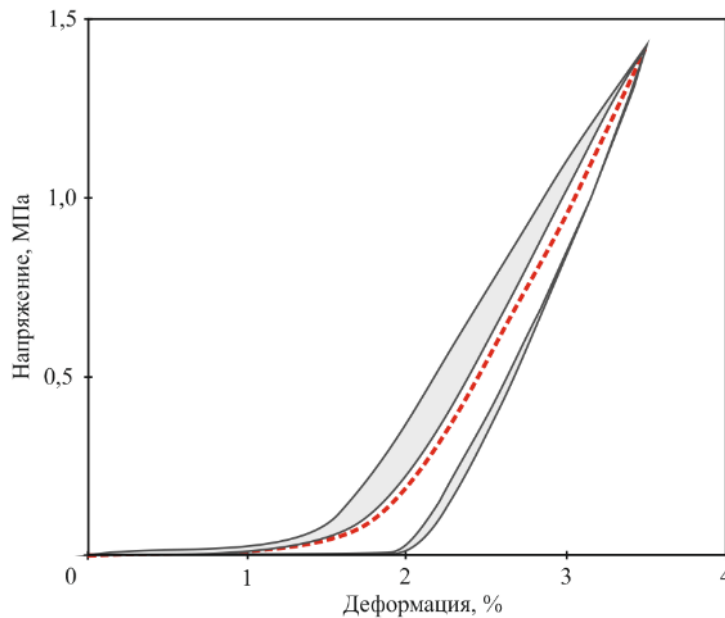


Рисунок 4.4. Диаграммы «напряжение – деформация» арамидной нити

Материал для тонких покрытий был задан изотропным с кинематическим упрочнением (упругопластический материал – *MAT_PLASTIC_KINEMATIC). Также была учтена возможность его разрушения при достижении предельных деформаций.

При моделировании баллистических испытаний для стального сферического индентора использовали упругий материал (*MAT_ELASTIC). В таблице 4.2 представлены механические характеристики материала ударника.

Таблица 4.1 – Механические свойства арамидных нитей

Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, ГПа			Модуль сдвига, ГПа			Коэффициент Пуассона			Предел прочности, ГПа
	E_A	E_B	E_C	G_{AB}	G_{BC}	G_{CA}	μ_{AB}	μ_{BC}	μ_{AC}	
ρ	E_A	E_B	E_C	G_{AB}	G_{BC}	G_{CA}	μ_{AB}	μ_{BC}	μ_{AC}	σ_B
1 440	140	1,4	1,4	1,4	1, 4	0,15	0,001	0,001	0,001	2,9

Таблица 4.2 – Некоторые механические свойства тонких обработок термопласта ПВА, ударника и пластилина

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести σ_T , МПа	Касательный модуль E_t , МПа	Макс. разрушающие деформации ε_f , мм/мм
Термопласт ПВА	1 088	2,0	0,44 [111]	–	1,0	–
Сталь	7 850	210	0,30	–	–	–
пластилин	1 400	0,20	0,49	$\sigma_T = 2,926 \cdot 10^5 \cdot \dot{\varepsilon}^{0,279}$ (2.12)	–	–

В расчетах для пластилина была использована модель материала, позволяющая учесть зависимость свойств (предела текучести) от скорости деформации (*MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY) – формула (2.12), ранее полученная в главе 2.

Механические характеристики материалов представлены в таблице 4.2. В качестве граничных условий краевой задачи принимали жесткое закрепление по нижней поверхности блока пластилина ($U_x = U_y = U_z = 0$) и начальную скорость стальной сферы $V_z(0) = 4,34$ м/с направленная вдоль вертикальной оси z . Варьируя модуль упругости, сравнивали расчетные и экспериментальные значения глубины и диаметра отпечатка в пластилине (рисунок 4.5). В результате получили уточненное значение *динамического* модуля упругости ~ 150 МПа (таблица 4.2). Различие со статическим модулем (30 МПа) может показаться существенным, если не учитывать то, что энергия упругого деформирования многократно меньше энергии пластического деформирования из-за невысокого значения предела текучести в проведенных экспериментах.

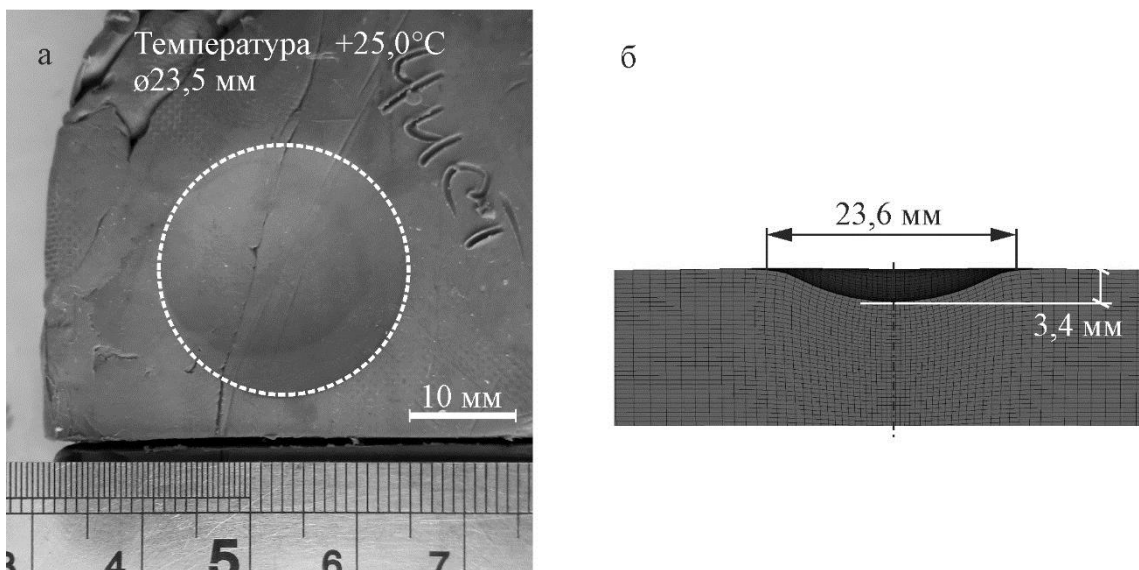


Рисунок 4.5. Сопоставление экспериментальных (а) и расчетных (б) значений отпечатка

Контакт между нитями задавали командой *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE. В контактный алгоритм заложена проверка проникновения между частями и поверхностью подчиненной части. Контакт между тканью и

ударником задавали командой *CONTACT_AUTOMATIC_ERODING_SINGLE_SURFACE. Контакт между тканью и техническим пластилином задавали командой *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, которая выполняет проверку контактного взаимодействия между поверхностями. Здесь узлам одной поверхности соответствуют виртуальные узлы на другой поверхности и оценивается проникновение (с генерацией усилий отталкивания, пропорциональных контактной жесткости) или зазор. Значения коэффициентов трения представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Коэффициенты трения, использованные в расчетах

Контактные пары	Величина
Нить – Нить (сухие)	0,174
Нить – Нить (с покрытием)	0,20
Ударник – Нити	0,18 [131]
Нити – Пластилин	0,40 [13]

Ввиду малости размеров конечных элементов покрытий трение других элементов с ним не рассматривается. После разрушения покрытия и его удаления из сетки конечных элементов проблема автоматически снимается.

4.2. Верификация расчетных моделей нити

Как было отмечено в обзоре литературы, простого аналитического решения не существует для верификации модели деформирования *ткани*. Поэтому определенную проверку адекватности численной модели выполняли при сравнении с известным аналитическим решением *для нити*. В работе Х.А. Рахматулина [29] приведено аналитическое решение точечного удара по гибкой деформируемой нити бесконечной длины.

В защитных структурах (бронежилеты, щиты, каски) размеры используемых тканей ограничены величинами порядка 30-50 см, поэтому в конечно-элементном пакете LS-DYNA была решена тестовая задача – точечный удар по гибкой нити

длиной 0,3 м с постоянной шириной 0,41 мм и толщиной 50 мкм. Размер конечного элемента был задан равным 0,41 мм. К середине свободной нити была приложена постоянная скорость удара, равная 315 м/с, рисунок 4.6. Свойства нити были заданы согласно таблице 4.1. Время расчета было выбрано таким, чтобы отраженная от свободного конца волна не успела вернуться к месту нагружения.

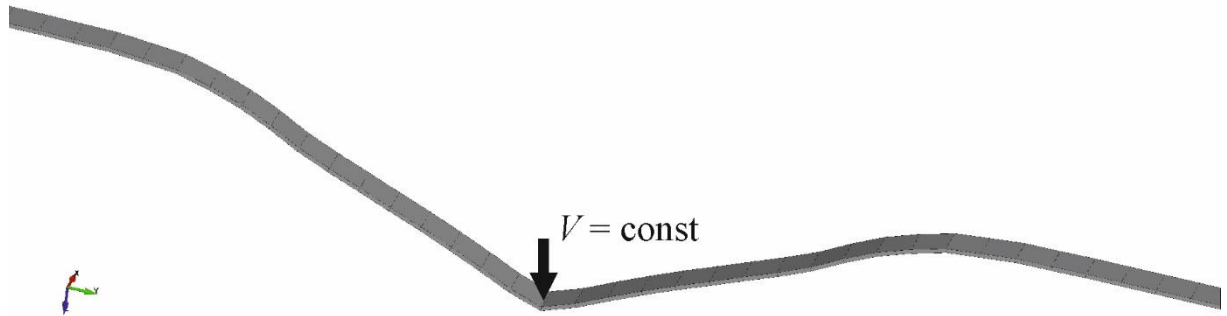


Рисунок 4.6. Конечно-элементная модель нити ($t = 6,4 \cdot 10^{-6}$ с)

При ударе первое главное напряжение в нити быстро возрастает до определенной величины и остается постоянным до тех пор, пока упругая волна Римана не дойдет от места удара до конца нити и не вернется обратно [13, 29]. По формулам из работы [29] были определены главное напряжение, угол наклона и время, за которое волна Римана дойдет до края нити и вернется:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \approx E \cdot \frac{\bar{V}^{\frac{4}{3}}}{\sqrt[3]{4}} = E \cdot \left(\frac{V_0}{\sqrt{2}a_0} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (4.1)$$

$$\operatorname{tg}(\gamma) = 1,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_0}{a_0}}, \quad (4.2)$$

$$t = \frac{S}{a_0}, \quad (4.3)$$

где E – модуль упругости, ε – деформация, V_0 – скорость удара, a_0 – скорость звука в нити, $a_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, ρ – плотность нити, S – путь пройденный волной в нити. На рисунке 4.7 представлено сравнение расчетного и теоретического значения первых главных напряжений.

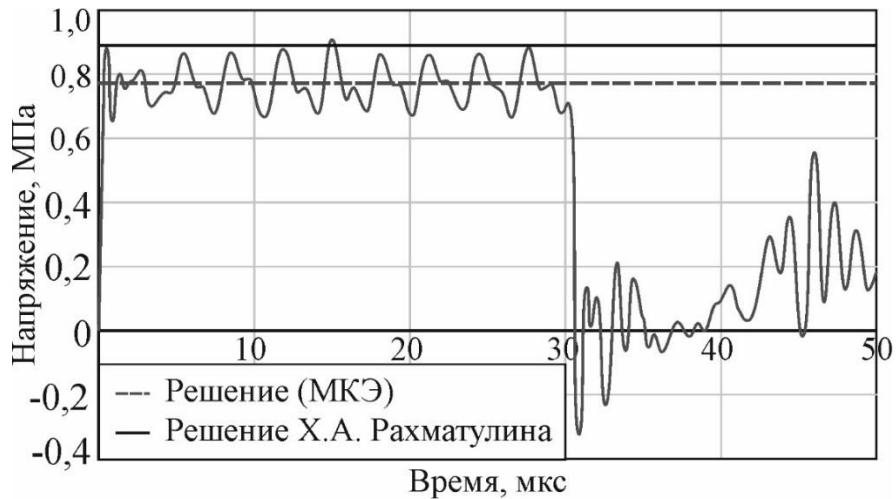


Рисунок 4.7. Зависимость первых главных напряжений от времени

В таблице 4.3 представлено сопоставление значений продольных напряжений в нити, угол наклона нити и время, за которое упругая волна пройдет от места удара до конца нити и обратно при размерах КЭ, равных длине ячейки периодичности в ткани СВМ Р110. Численное решение показало хорошее *качественное совпадение* расчетной (МКЭ) и аналитической моделей. Однако допущения аналитической модели иные, они не учитывают сдвиговую и изгибную жесткость нити. Поэтому погрешность расчета здесь не является фактором, определяющим точность численной модели. Тем не менее, средние продольные напряжения и угол поворота нити у точки удара отличаются менее, чем на 15% от теоретических значений, что говорит об определенной близости *реальной* нити к используемой в анализе Х.А. Рахматулина *гибкой* нити.

Таблица 4.3 – Сопоставление расчетных результатов и теоретического решения Х.А. Рахматулина

Параметр	Теоретическое решение Х.А. Рахматулина	Решение (МКЭ)	Погрешность, %
Продольные напряжения σ , МПа	894,0	776,2	13,1
Угол наклона нити γ , град	21,7°	22°	1,4
Время, за которое упругая волна пройдет от места удара до конца нити и обратно t , с	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$	1,0

4.3. Моделирование вытягивания нити из ткани

Моделирование процесса вытягивания нити из ткани позволяет определить максимальное усилие и энергию вытягивания. Для модели ткани с тонким покрытием ключевыми являются вопросы о расчетном пределе текучести и разрушающей деформации материала покрытия. Прямое экспериментальное определение этих величин на пленках ПВА не имеет смысла, т.к. на ткани это связано не только со свойствами ПВА, но и со сложной геометрией места контакта и адгезионными взаимодействиями с поверхностями нитей. Поэтому предлагается выполнить эту процедуру с использованием обратного подхода – варьируя в расчете эти величины и добиваясь соответствия расчетной и экспериментальной кривых вытягивания.

Для решения задачи вытягивания нити из сухой ткани СВМ Р110 полотняного переплетения была построена конечно-элементная модель размером 50×10 мм, состоящая из отдельных изогнутых нитей, рисунок 4.8. Размер модели был выбран так, чтобы соответствовать нагружаемой части образца в экспериментах. Граничные и начальные условия краевой задачи: жесткое закрепление по краям ткани ($U_x = U_y = U_z = 0$) и перемещение одной нити вдоль оси y – $U_y(t=0) = 0$, $U_y(t_{max}) = 50$ мм, рисунок 4.8.

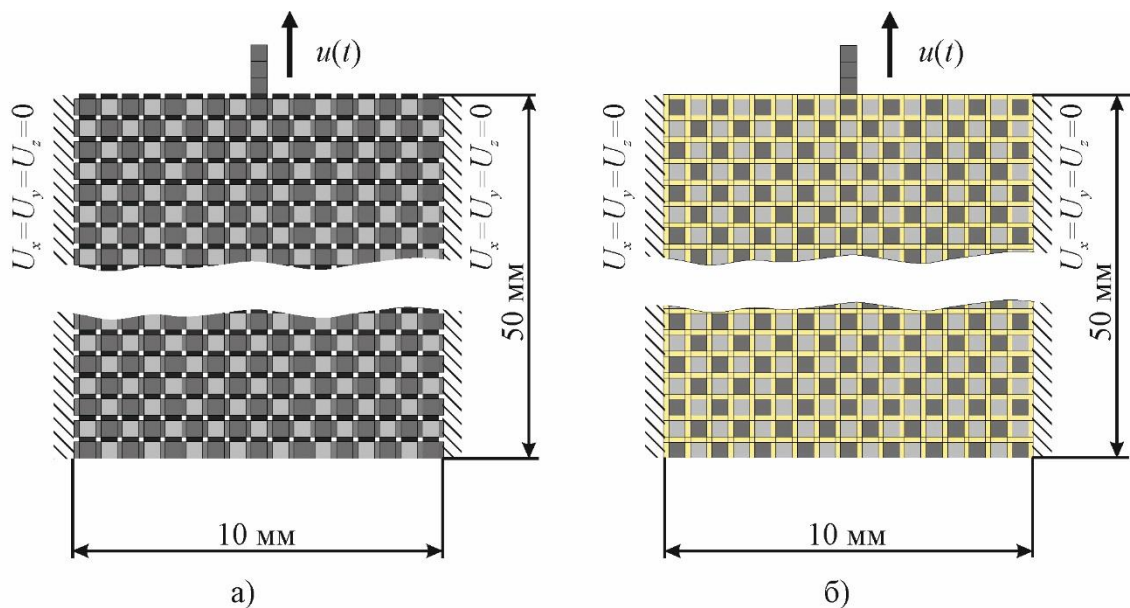


Рисунок 4.8. Конечно-элементная модель вытягивания нити из сухой (а) и обработанной (б) ткани

При квазистатическом расчете была использована явная схема интегрирования, поскольку при неявной схеме нет возможности учитывать разрушение элементов. Скорость вытягивания нити в модели была принята равной 0,01 м/с для ускорения расчета. При данной скорости кинетическая энергия системы была пренебрежимо мала по сравнению с полной энергией.

Разработанная численно эффективная модель вытягивания нити из ткани позволяет прогнозировать зависимость нагрузки вытягивания от перемещения нити. Влияние варьирования параметров (предела прочности и разрушающей деформации ПВА) на кривые вытягивания приведено на рисунке 4.9.

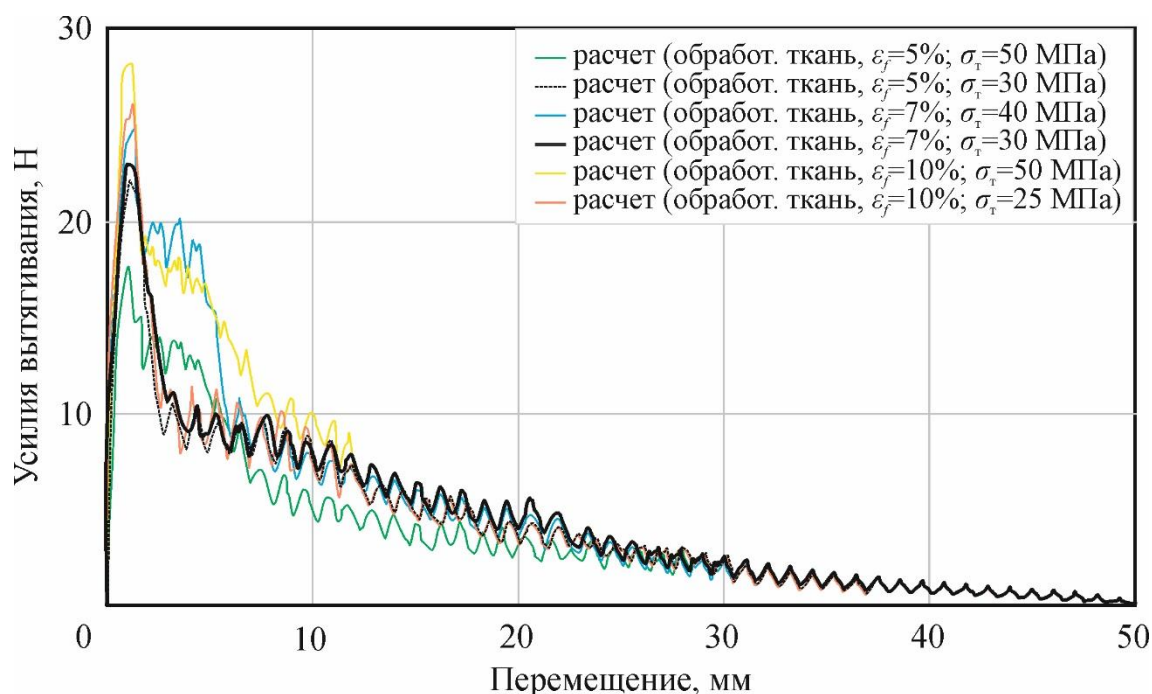


Рисунок 4.9. Сопоставление расчетных зависимостей вытягивания нити из ткани при различных параметрах ПВА

Минимизация отклонений расчетных и экспериментальных усилий в процессе вытягивания позволила определить наилучшее сочетание искомых параметров ПВА: предел текучести и разрушающая деформация для тонких покрытий ПВА были получены равными 30 МПа и 7% соответственно. Расчетные кривые лежат в пределах разброса экспериментальных данных. Осцилляции нагрузки на экспериментальных и расчетных кривых совпадают и зависят от шага искривления

– геометрии переплетения ткани. На рисунке 4.10 представлено сопоставление экспериментальных и расчетных кривых «усилие – перемещение» при вытягивании нити из сухой и обработанной ткани. Разброс экспериментальных данных показан закрашенной областью.

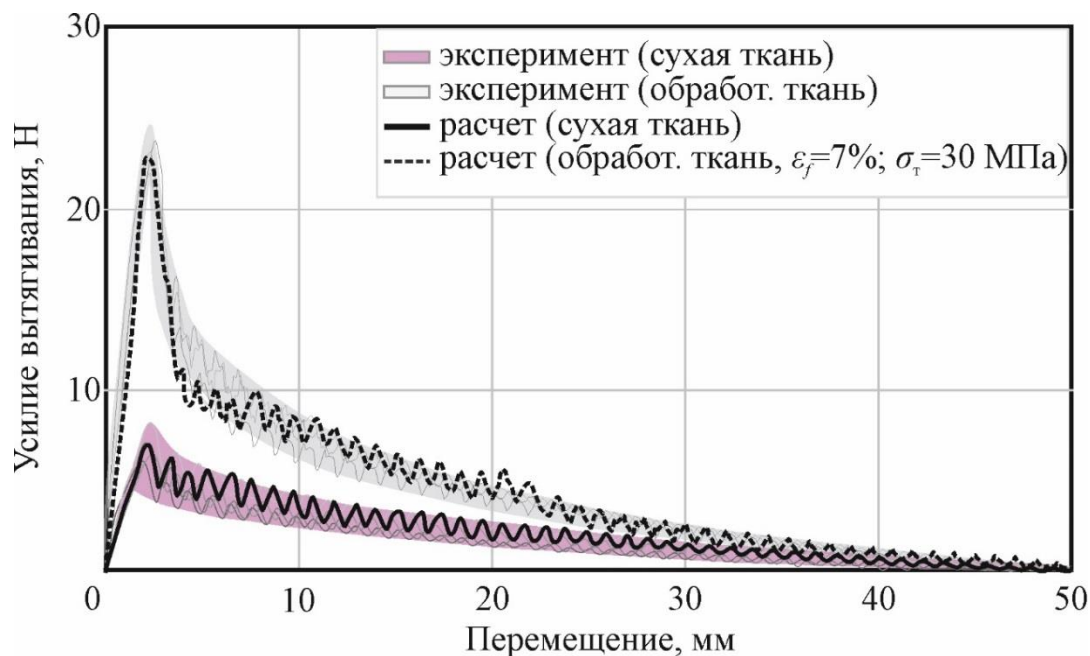


Рисунок 4.10. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей вытягивания нити из ткани

В таблице 4.4 представлено сравнение экспериментальных (среднее значение) и расчетных характеристик процесса вытягивания образцов из сухих тканей и тканей с покрытием. Максимальная погрешность по усилию вытягивания не превышала 5%.

Таблица 4.4 – Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристики при вытягивании нити из ткани

Тип образца	Эксперимент		Расчет		Погрешность, %	
	Макс. усилие F_3 , Н	Энергия вытягивания W_3 , Дж	Макс. усилие F_p , Н	Энергия вытягивания W_p , Дж	$\frac{\Delta F}{F_3}$	$\frac{\Delta W}{W_3}$
Сухая ткань	6,94±0,94	0,089±0,02	6,88	0,10	0,9	14,6
Обработанная ткань	23,52±1,22	0,22±0,01	22,67	0,26	3,6	18,2

Далее эта малопараметрическая модель использована для оценки поведения пакета баллистических арамидных тканей с различной поверхностной обработкой слоев при локальном ударе.

4.4. Моделирование деформирования арамидной ткани на техническом пластилине при низкоскоростном ударе

В этом разделе было проведено исследование процесса взаимодействия ткани и ударника, которое позволило прогнозировать глубину отпечатка в пластилине. Удар рассматривался по нормали к поверхности ткани. Численная модель взаимодействия нитей с учетом наличия покрытия была верифицирована *на задаче вытягивания нити*, откуда определены механические свойства материала покрытия (см. п. 4.2). **То есть в этих расчетах не было варьируемых параметров.**

Образцы, состоявшие из двух слоев ткани (размером 100×100 мм), были размещены на пластилиновом блоке. Индентор имел сферическую форму диаметром 4,5 мм и массу 0,50 г. Граничные условия были заданы следующие: нижняя поверхность блока пластилина имеет ограничение перемещений по оси Z ($U_z = 0$). На рисунке 4.11 представлены расчетная модель и граничные условия.

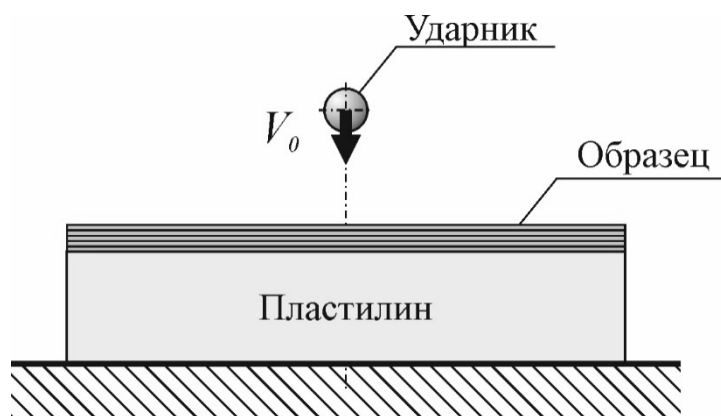


Рисунок 4.11. Расчетная схема взаимодействия ударника, ткани и пластилина

Полученные расчетом картины деформирования соответствуют экспериментально наблюдаемым (рисунки 4.12, 4.13). В расчете наблюдается вытягивание нитей, расположенных непосредственно под ударником, по

направлениям основы и утка, а также потеря устойчивости (складки). Расчетная глубина вмятины в пластине близка к экспериментальным значениям – погрешность не превышает 15%.

Расчеты для образцов с покрытиями также показал близкие результаты с экспериментом (рисунок 4.13). Также наблюдается небольшой прогиб в области удара, крестообразная зона вытягивания и множественные складки.

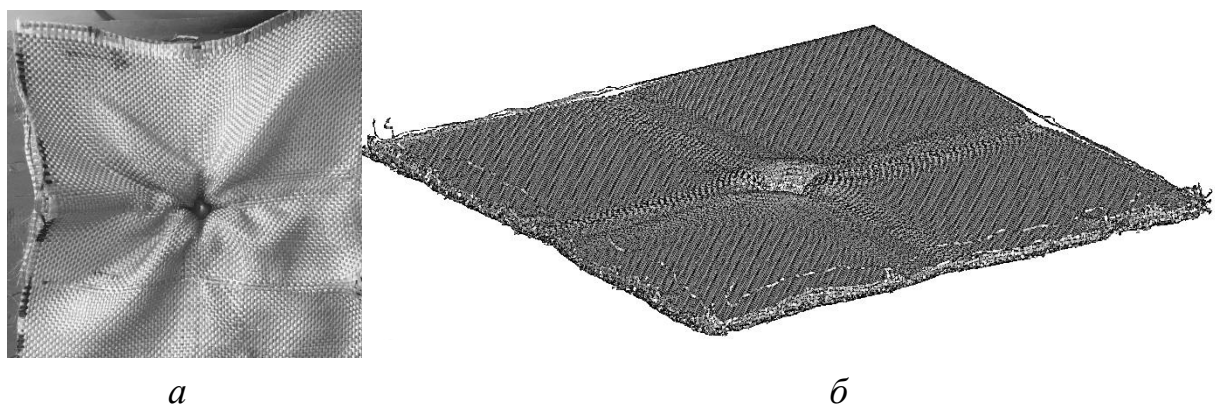


Рисунок 4.12. Экспериментальная (а) и расчетная (б) картины деформирования двух слоев арамидных тканей полотняного переплетения Р110 при скорости ударника ~ 125 м/с

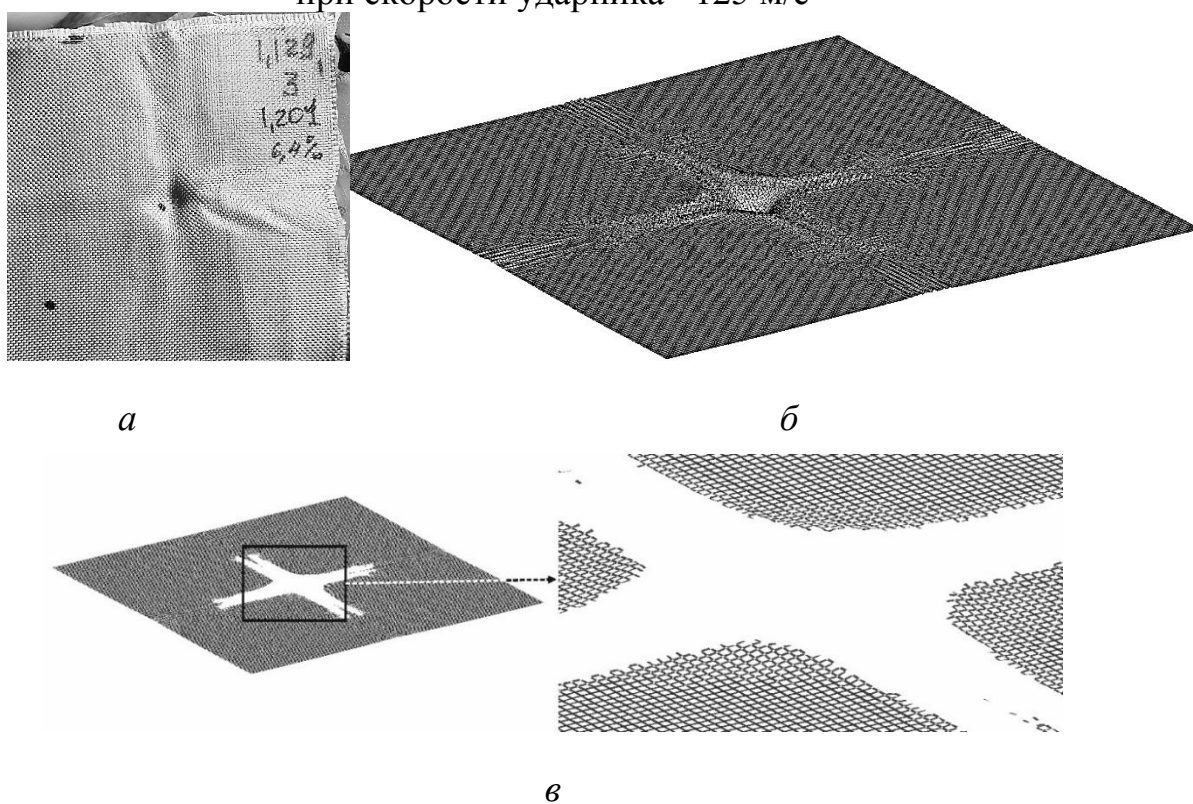


Рисунок 4.13. Экспериментальная (а) и расчетная (б) картины деформирования двух слоев арамидных тканей Р110 с тонкими покрытиями при скорости ударника ~ 122 м/с. Разрушение тонкого покрытия (в)

В таблице 4.5 представлено сопоставление экспериментальных и расчетных данных глубины отпечатка в пластилине для двух типов образцов. Следует отметить, что расчетные точки лежат в пределах экспериментального разброса.

Таблица 4.5 – Сопоставление экспериментальных и расчетных значений глубины отпечатка в пластилине после удара

Количество слоев		Скорость удара, м/с	Глубина отпечатка, мм		Погрешность, %
Сухая ткань	Обработанная ткань		Эксперимент	Расчет	
2	–	125	6,7	5,8	13,4
–	2	122	3,9	4,2	-7,7

Погрешность между расчетными и экспериментальными значениями глубины вмятины в пластилин не превышает 15%. В работе [74] приведено различие экспериментальной и численной глубины вмятины около 20%, что считается приемлемым для таких сложных многопараметрических задач.

Выводы по главе

Проведено расчетное исследование поведения тканей при квазистатическом и динамическом нагружениях. Параметры прочности и пластичности тонких покрытий ПВА были определены из решения обратной задачи – многовариантного расчетного прогнозирования усилия вытягивания нити из ткани и сопоставления с экспериментами. Разработанные расчетные модели арамидной ткани с покрытиями и без них были использованы при анализе процессе деформирования пакетов из слоев арамидной ткани и пластилина при локальном ударе.

В результате расчетов установлено, что разработанные модели позволяют предсказывать максимальное усилие вытягивание нити из ткани, а при локальном ударе – глубину вмятины в пластилине, незначительно отличающуюся от экспериментальных значений.

5. РАСЧЕТНО-ЭКСПРЕИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ

В последней главе рассмотрены экспериментальное и расчетные исследования процесса деформирования и разрушения пакета из арамидных тканей Twaron *при высокоскоростном локальном воздействии*. Исследования влияния тонких покрытий на поведение тканевого пакета были проведены в три этапа:

1. определение усилия и энергии вытягивания нити Twaron[®] 709 из ткани;
2. определение баллистического предела;
3. определение глубины отпечатка в пластилине при локальном ударе через тканевую структуру.

5.1. Экспериментальное исследование деформирования и разрушения тканевого пакета при ударном нагружении

Все испытания были проведены на арамидной ткани Twaron[®] 709 полотняного переплетения, которая имела поверхностную плотность ~ 200 г/м². (рисунок 5.1). Механические свойства нитей вдоль основы и утка были взяты из работы [157]. Среднее значение предела прочности нити 2,57 ГПа вдоль основы и 2,64 ГПа – вдоль утка, модуля упругости 100 ГПа.

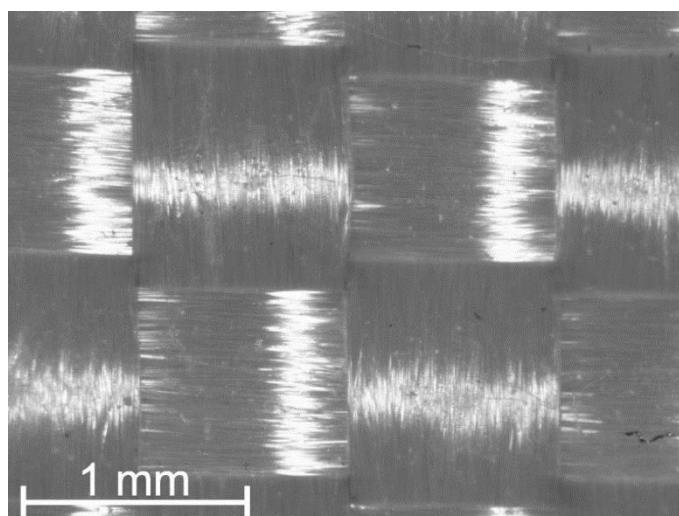


Рисунок 5.1. Фотография структуры ткани Twaron[®] 709

Ранее было определено, что термопласт ПВА в качестве тонких покрытий тканей значительно повышает фрикционное взаимодействие между нитями при незначительном увеличении поверхностной плотности. Влияния тонких покрытий на 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 ~1,0 кг/м²;
2. пакет из пяти слоев той же ткани с покрытием ПВА суммарной поверхностной плотностью ~1,05 кг/м² (утяжеление ткани ~5%).

Технология нанесения тонких покрытий ПВА была описана ранее в п. 3.1.

5.1.1. Вытягивание одиночной нити из ткани

Эксперименты по вытягиванию нитей были проведены согласно методике, описанной в п. 3.3. Скорость вытягивания нити была задана 50 мм/мин. Было испытано четыре образца для сухой ткани и ткани с термопластом ПВА (размерами 50×50 мм). На рисунке 5.2 представлены типичные экспериментальные кривые «усилие вытягивания – перемещение» для исходных и обработанных тканей.

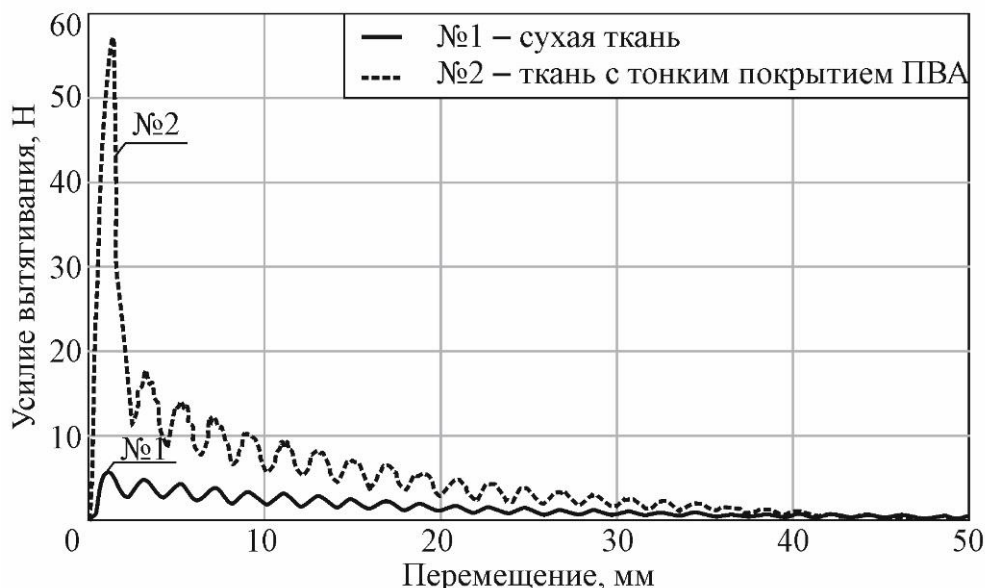


Рисунок 5.2. Кривые «усилие – перемещение» при вытягивании нити из ткани

На первом участке нагрузка возрастает до перемещения 1-1,5 мм и далее снижается до нуля, то есть в случае полной вытяжки нити из ткани. В таблице 5.1

представлены характеристики процессов вытягивания нитей из исходной ткани и ткани с тонкими покрытиями термопласта ПВА.

Таблица 5.1 – Влияние термопласта ПВА на характеристики вытягивания нити из ткани

№	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 $\frac{W_3}{\rho}$, $1 \cdot 10^{-3}$ Дж·м ³ /кг
1	Без обработки	200,0	6,07±0,82	0,07±0,011	0,03±0,004	0,373±0,056
2	Термопласт ПВА	209,9	54,66±3,58	0,31±0,034	0,26±0,017	1,47±0,164

Полученные результаты говорят о том, что при увеличении поверхностной плотности сухой ткани на 5% за счет поверхностной обработки максимальное усилие вытяжки увеличилось в 9 раз, а энергия вытягивания нити из ткани – в 4,13 раза по сравнению с образцами сухой ткани.

5.1.2. Оценка баллистического предела для двух типов образцов

Баллистические испытания были проведены по нормали к поверхности пакетов на баллистическом разгонном стенде ЮУрГУ, рисунок 5.3. Подробное описание разгонного стенда и методики определения начальной и конечной скорости ударника указаны в работе [31]. Перед проведением испытаний пакет размером 100×100 мм был помещен между двумя пластинами из поликарбоната с центральным отверстием диаметром 40 мм и были закреплены на стенде в области размером 68×22 мм, рисунок 5.3. Стальной ударник имел диаметр 6,35 мм и массу 1,05 г (ГОСТ 34286-2017 [9] и ГОСТ Р 55623-2013 [11] на противоосколочную стойкость). Начальную скорость ударника варьировали в диапазоне 120-805 м/с и фиксировали с помощью оптического хронографа S06 с погрешностью измерения 1 м/с. Остаточная скорость ударника была определена по перемещению фрикционного тормоза (ловушки, в которую попадает ударник после пробития пакета) по направляющей.

Было испытано по 25 образцов каждого типа. При взаимодействии с ударником пакеты из сухих тканей и обработанных тканей не только имели разное энергопоглощение, но и деформировались по-разному.



Рисунок 5.3. Баллистический стенд с закрепленным образцом в захвате

На рисунке 5.4 представлено деформированное состояние образцов двух типов при взаимодействии с ударником при скоростях близких баллистическому пределу при отсутствии сквозного пробоя. Пакет из сухой ткани был деформирован сильнее, при этом наблюдалось существенное вытягивание основных нитей. В пакете из обработанных тканей вытяжка была менее заметной, поскольку обработка затрудняла движение нитей даже под ударником.

Когда скорость ударника незначительно превышала баллистический предел, в обоих случаях наблюдали уменьшение запреградной выпучины и вытяжку волокон под ударником (рисунок 5.5). Пакеты из сухой ткани имели по направлениям основных нитей уменьшение размеров в плоскости. На обработанных образцах это явление было менее выражено за счет меньшей вытяжки нитей.

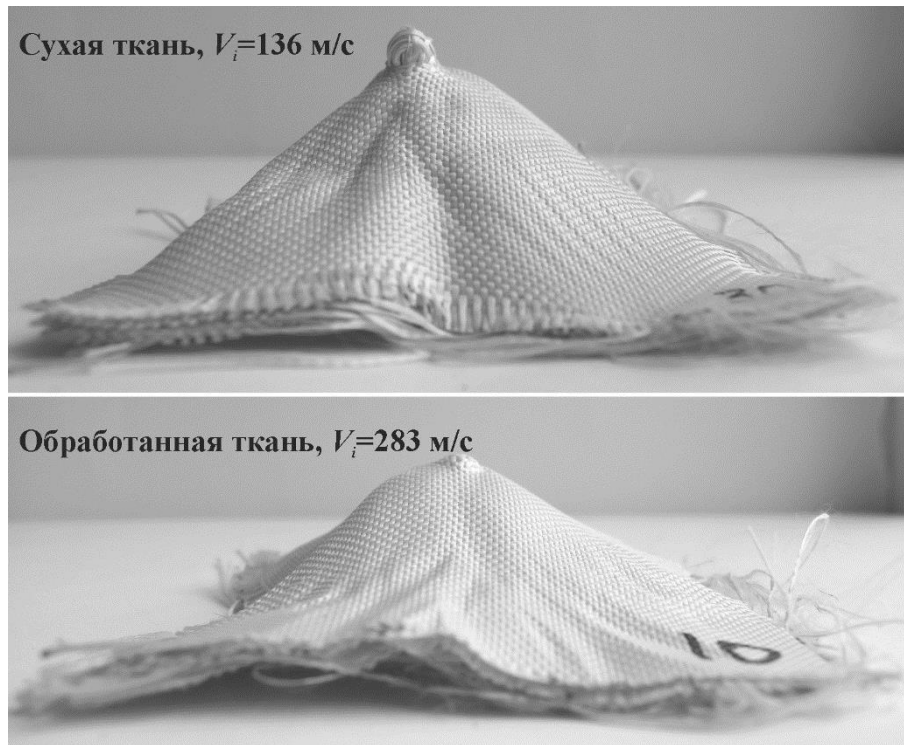


Рисунок 5.4. Деформированное состояние образца при скорости удара близкой к баллистическому пределу

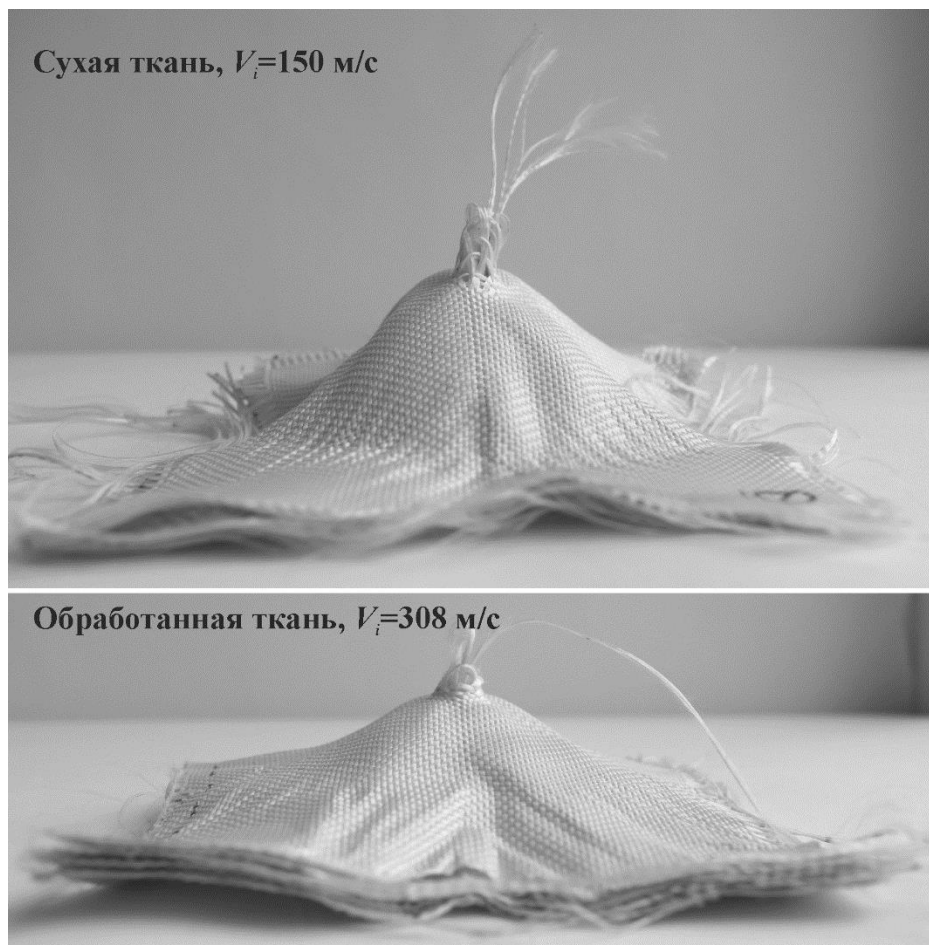


Рисунок 5.5. Деформированное состояние образца при скорости ударника, которая незначительно превышает баллистический предел

В обоих случаях разорванных нитей было лишь по 1-2 в каждом слое, большая часть была вытянута и раздвинута ударником. Когда скорость ударника превышала баллистический предел более чем на 100-110 м/с (рисунок 5.6), пакеты из сухой ткани демонстрировали значительную вытяжку основных нитей, находящихся непосредственно в контакте с ударником, в то время как на обработанных образцах вытяжки нитей практически не наблюдали, почти все основные нити были разорваны.

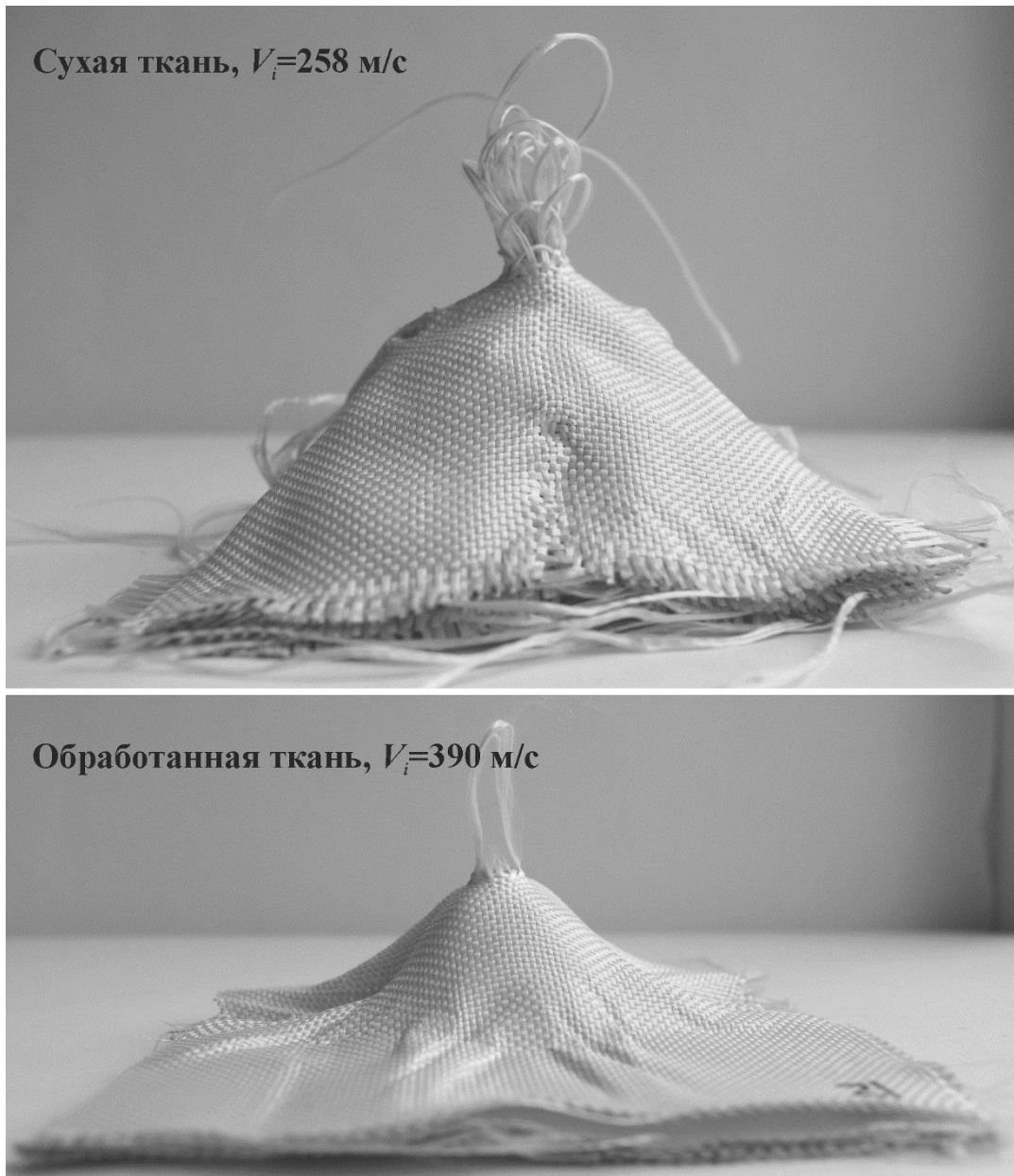


Рисунок 5.6. Деформированное состояние образца при скорости удара, которая незначительно превышает баллистический предел

При дальнейшем повышении скорости оба типа образца демонстрировали уменьшение запреградной выпучины и разрыв основных нитей (рисунок 5.7).

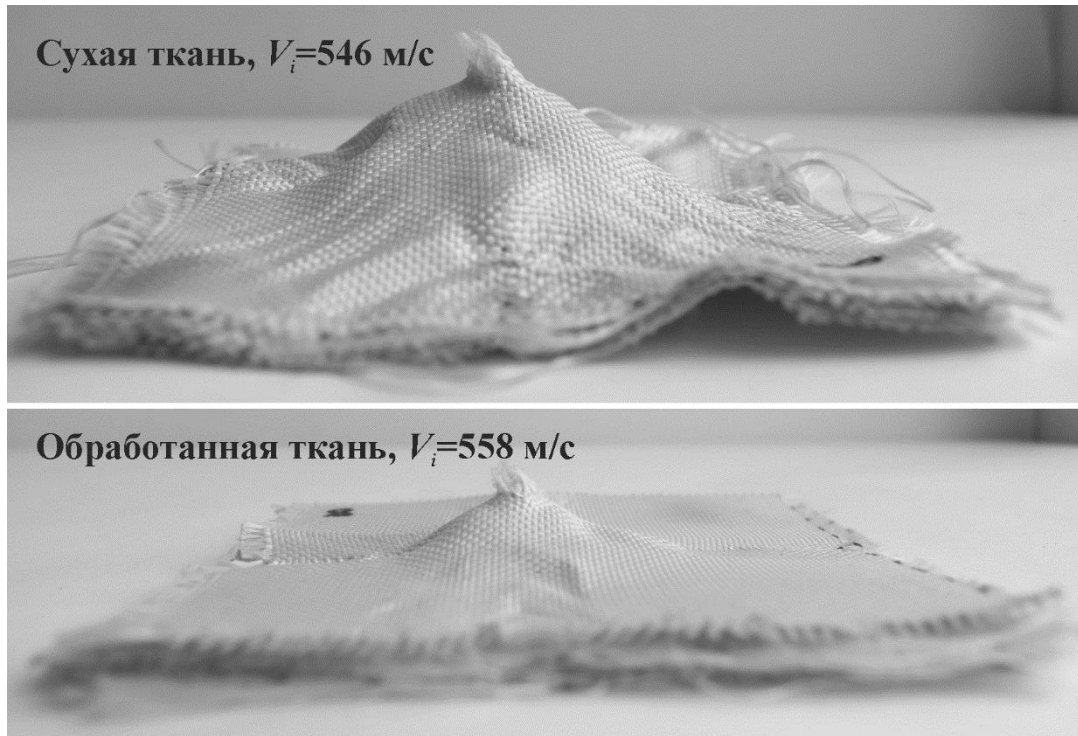


Рисунок 5.7. Деформированное состояние образца при скорости ударника 540-560 м/с

Во всех случаях обработанные образцы демонстрировали меньшее коробление по сравнению с сухими. Это связано с тем, что поверхностная обработка тканей создает дополнительные связи между нитями и препятствует их скольжению относительно друг друга.

Зависимость Ламберта-Джонаса [113] была использована для аппроксимации экспериментальных точек и получения баллистической кривой

$$V_r = \begin{cases} 0 & \text{if } V_i < V_L \\ A \cdot (V_i^n - V_L^n)^{1/n} & \text{if } V_i \geq V_L \end{cases}, \quad (5.1)$$

где A и n – множитель и степень соответственно, V_L – баллистический предел (минимальная скорость пробоя), V_r и V_i – остаточная и начальная скорости ударника соответственно. Значения параметров A , V_L и n были найдены с помощью метода наименьших квадратов, таблица 5.2. Полученные баллистические кривые с нанесенными экспериментальными точками представлены на рисунке 5.8.

Таблица 5.2 – Параметры кривых Ламберта-Джонаса для пакетов из сухих и обработанных тканей

Параметры	Сухая ткань	Обработанная ткань
A	1,97	0,910
m	1,371	2,698
V_L , м/с	149	283

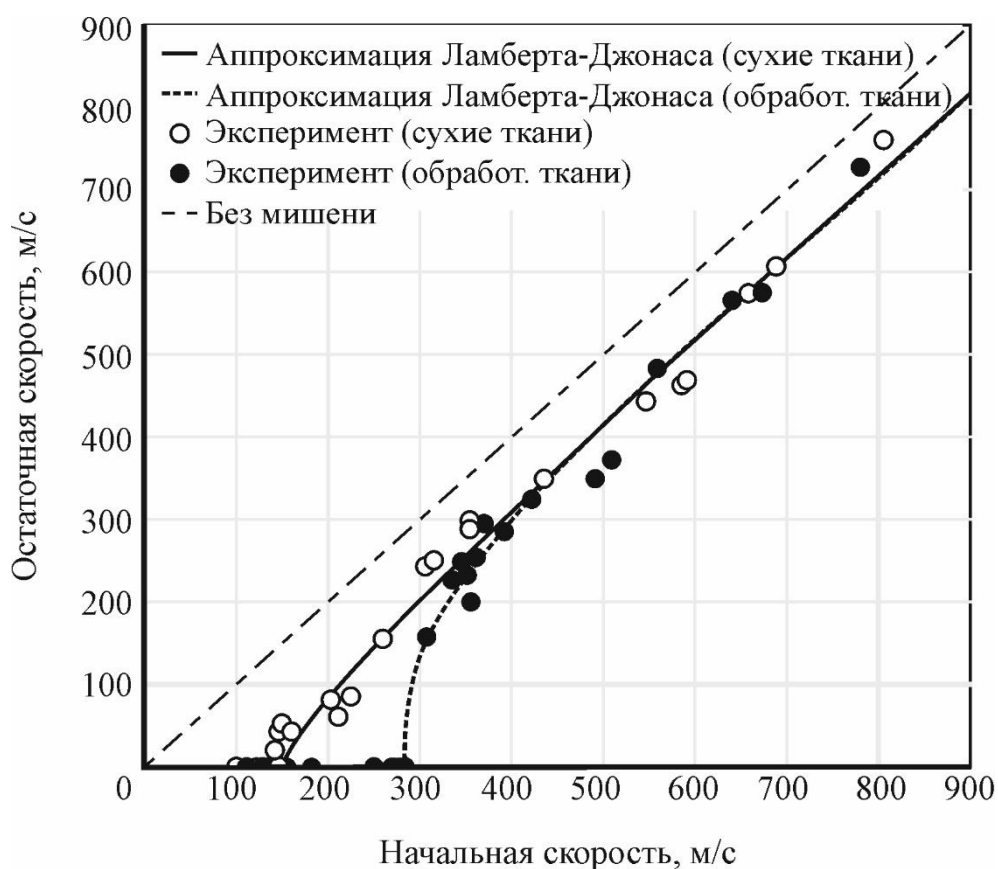


Рисунок 5.8. Баллистические кривые (эксперимент и расчет) для пакетов из сухой и обработанной ткани

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 пробоа, 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, и поверхностная обработка оказывает влияние только на деформированное состояние образца после пробоя.

5.1.3. Оценка влияния обработки на глубину вмятины в пластилине при локальном ударе

Величина запреградной травмы (вмятина в пластилине) наряду с баллистическим пределом является одной из ключевых характеристик защитной структуры. Для оценки запреградной травмы пакетов из сухой ткани и ткани с тонкими покрытиями были проведены баллистические испытания на разгонном стенде. Перед испытаниями образцы располагали на поверхности блока из пластилина толщиной 70 мм и закрепляли липкой лентой (рисунок 5.9).



Рисунок 5.9. Общий вид закрепления образца на разгонном стенде

Максимальную начальную скорость ударника выбирали таким образом, чтобы она составляла не менее 90% от величины баллистического предела для каждого из типов образцов (см. п. 5.1.2), а взаимодействие с ударником не приводило к разрыву волокон. Начальная скорость для пакета из сухой ткани была около 140-150 м/с, для пакета с обработанными тканями рассматривали диапазон – 135-274 м/с. При таких начальных скоростях ударника рассеяние его кинетической

энергии происходит только за счет упругого деформирования и вытягивания нитей, а также за счет деформирования пластилина.

Все испытания были проведены при температуре окружающей среды $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$. На каждый диапазон скоростей и тип образцов проводили не менее трех испытаний. На рисунке 5.9 представлено деформированное состояние двух типов образцов после взаимодействия с ударником на скоростях, близких к баллистическому пределу.

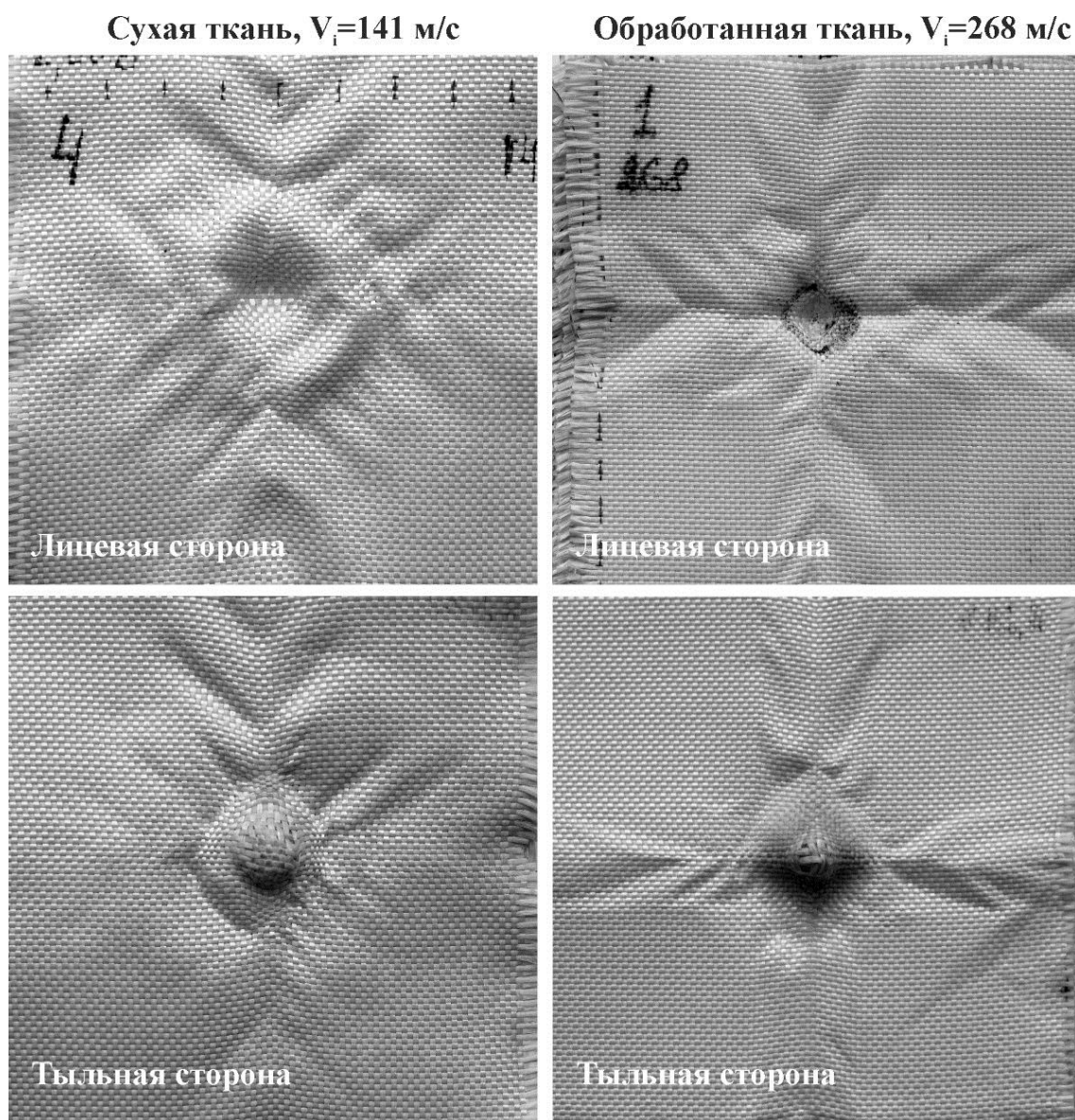


Рисунок 5.9. Деформирование образцов, расположенных на пластилине, при ударе со скоростью вблизи баллистического предел

В обоих случаях на образце возникала крестообразная деформированная зона с ориентацией по направлениям основы и утка. Помимо утяжки в ней наблюдается потеря устойчивости ткани (складки) вблизи основных нитей. В то же время на образцах с тонкими покрытиями размеры деформированной области в плоскости были меньше и имели четкие границы. Также следует отметить, что на обработанных образцах значительной вытяжке подверглось гораздо меньше основных нитей по сравнению с образцами без обработки, что видно на фотографиях тыльной стороны. Наиболее вероятной причиной такого поведения является снижение подвижности нитей и общей драпируемости тканей вследствие наличия обработки.

Во всех экспериментах глубина отпечатка в пластилине была определена по срезам оптическим методом на инструментальном микроскопе. В таблице 5.3 представлены данные о глубине вмятины при различных скоростях ударника. На рисунке 5.10 приведены линейные зависимости глубины прогиба пакетов (отпечатков в пластилине) от начальной скорости ударника.

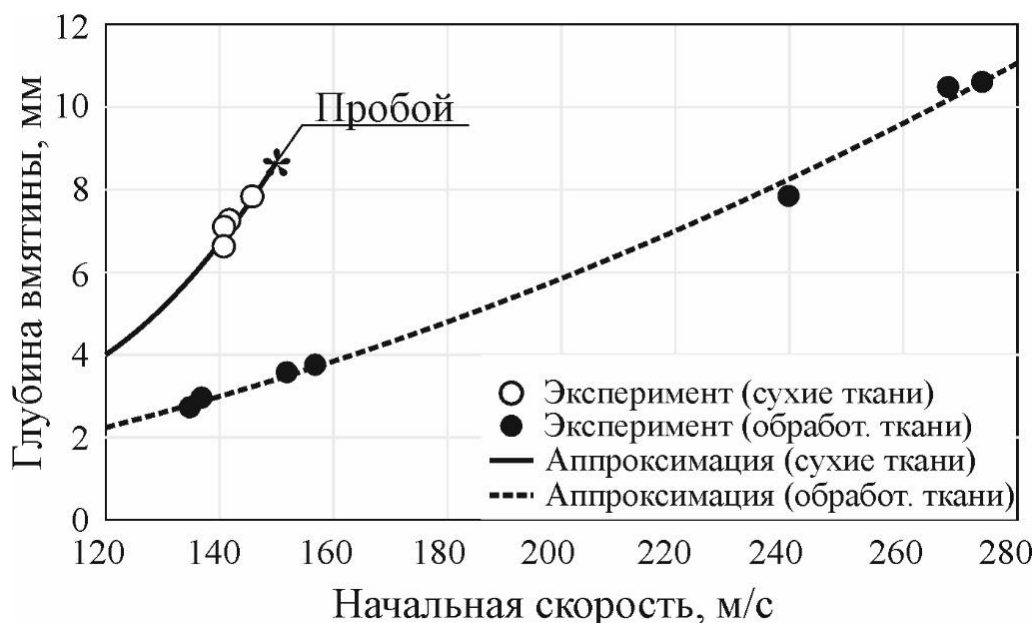


Рисунок 5.10. Глубина вмятин в пластилине при локальном ударе по тканевым пакетам

Таблица 5.3 – Характеристики пакета тканей при наличии или отсутствии тонких покрытий термопласта ПВА при локальном ударе

№	Тип образца	Поверх. плотность ρ , г/м ²	Увеличение массы пакета, %	Скорость ударника V, м/с	Глубина вмятины в пластилине w, мм
1	Сухая ткань	200	–	142	7,3
				146	7,8
				141	6,6
				141	7,1
2	Обработанная ткань	213	5,7	268	10,5
				240	7,9
				274	10,6
				152	3,6
				135	2,7
				137	3,0
				138	3,4

Полученные результаты говорят о том, что увеличение массы пакета на 5-6% за счет тонких покрытий значительно снижает величину глубины вмятины в регистрирующей среде. При начальной скорости ударника 130-150 м/с глубина вмятины в пластилине для пакета с обработанными тканями была в среднем в два раза ниже по сравнению со значениями для пакета из сухих тканей. При скоростях выше 250 м/с пакет на основе сухой ткани пробивался, а максимальная глубина вмятины в пластилине для пакета с обработанными тканями не превышала 10,5 мм.

Таким образом, при увеличении массы на 5-6% обработка ткани позволяет более чем в три раза повысить максимальную кинетическую энергию ударника, которую может поглотить панель без сквозного пробоа, при этом величина

запреградной выпучены при скоростях, близких к баллистическому пределу, отличаются незначительно.

5.2. Разработка и верификация расчетных моделей тканевого пакета с тонкими покрытиями для расчетов ударного взаимодействия

В данном разделе представлено описание расчетных исследований процесса деформирования и разрушения тканевого пакета при оценке баллистического предела и запреградной травмы на образцах с тонкими покрытиями и без них. В данном разделе также был использован мезомасштабный подход при конечно-элементном моделировании образцов ткани.

5.2.1. Геометрическая сторона задачи

Для прогнозирования поведения двух типов тканевых образцов при деформировании была построена конечно-элементная микроструктурная малопараметрическая модель в пакете LS-DYNA R 7.1.2. MPP с явной схемой интегрирования. Повторяющиеся элементы расчетной модели ткани представлены на рисунке 5.11. Арамидная ткань Twaron® 709 имеет поверхностную плотность 200 г/м^2 , 105 нитей приходится на 100 мм ткани как в направлении основы, так и утка. По этим данным было определено, что повторяющийся элемент имеет длину $0,95 \text{ мм}$. Размер конечного элемента в моделях был задан $0,81 \text{ мм}$, толщина элементов нитей – 80 мкм , толщина оболочечных элементов ПВА – 40 мкм .

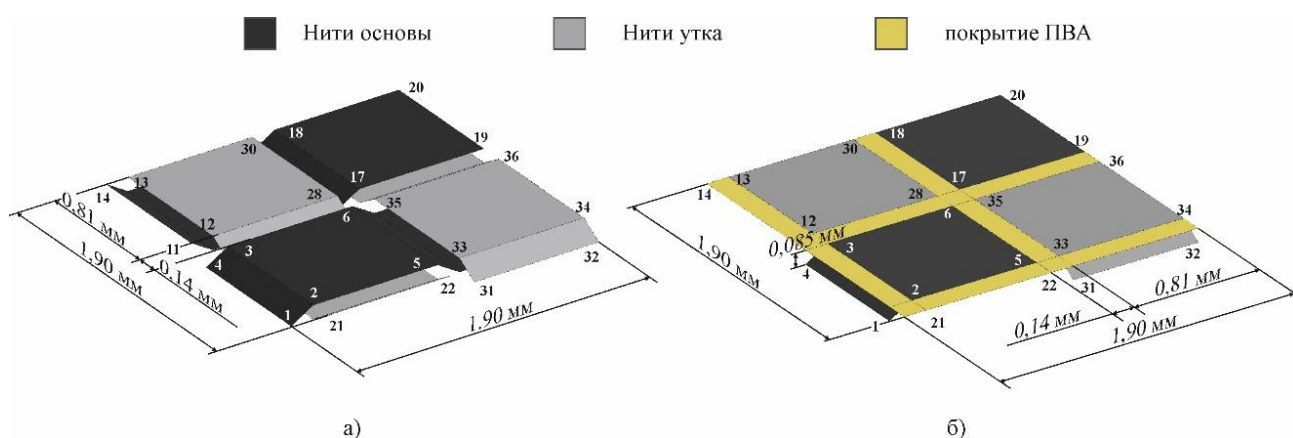


Рисунок 5.11. Элементарные ячейки для сухой ткани (а) и ткани с обработкой поверхности (б)

В случае вытягивания нити из ткани важную роль играет поперечный изгиб, поэтому при моделировании процесса вытягивания был задан полностью интегрируемый оболочечный тип элементов (ELFORM = 16) с тремя точками интегрирования по толщине. При моделировании деформирования образцов при локальном ударе – 4-узловой тип элементов Бельчико-Вонга-Чанга (ELFORM = 10) с одной точкой интегрирования по толщине для учета разрушения.

5.2.2. Модель материалов и контактные взаимодействия

Материал нитей принимали упругим и ортотропным с возможностью разрушения (*MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC). Модуль упругости E_A (вдоль нити), предел прочности σ_B были заданы в соответствии с данными работы [157]. Значения модулей упругости E_B , E_C были взяты на два порядка меньше, чем E_A согласно рекомендациям [91, 127, 131, 136]. Они слабо влияют на жесткость модели при локальном ударе, т.к. нити в арамидной ткани Twaron® 709 некрученые.

Обзор литературы показал, что в большинстве публикаций значения модулей сдвига находятся в диапазоне 100-1500 МПа. Используя метод проб и ошибок при моделировании последовательного вытягивания нити и высокоскоростного удара, было обнаружено, что наилучшие результаты достигаются, когда модуль сдвига для сухой ткани составляет 100 МПа, а для ткани с покрытием – 450 МПа. Коэффициенты Пуассона были выбраны близкими к нулю на основании [44, 114, 134]. Разрушение нитей было учтено с помощью использования дополнительной карты *MAT_ADD_EROSION. Данная карта позволяет удалять элементы из расчета при достижении значения заданного критерия разрушения – превышения первым главным напряжением величины σ_B . В работе [80] проведены испытания на растяжение одиночных волокон Twaron®. Одиночные волокна Twaron® не показали значительного влияния скорости деформации на прочность на разрыв в диапазоне скоростей деформации от 0,001 до 1500 с⁻¹. По этой причине было принято, что модель нити нечувствительна к скорости. В таблице 5.4 представлены свойства арамидной нитей, использованные в численных моделях.

Материал для тонких покрытий термопласта ПВА был задан изотропный с кинематическим упрочнением (упруго-пластичный материал – *MAT_PLASTIC_KINEMATIC) с возможностью разрушения при достижении предельных деформаций. Механические характеристики представлены в таблице 5.5, аналогично п. 4.1.2.

При моделировании высокоскоростных испытаний для стального сферического индентора использовали упругий материал (*MAT_ELASTIC). Механические свойства ударника были заданы ранее (таблица 4.2, см. п. 4.1.2). Механические свойства упруго-пластичного материала пластин из поликарбоната (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC) были взяты из работы [116]. В таблице 5.5 представлены механические характеристики поликарбоната.

В расчетах материал пластилина был задан моделью, которая позволяет учитывать зависимость свойств (предела текучести) от скорости деформации (*MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY). Динамический модуль упругости был определен при решении обратной задачи индентирования как это было сделано в п. 4.1.2. Механические свойства и зависимость предела текучести задана в таблице 5.6.

Контакт между нитями задавали командой *CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE. В контактный алгоритм заложена проверка проникновения между частями и поверхностью подчиненной части. Контакт между тканью и ударником задавали командой *CONTACT_AUTOMATIC_ERODING_SINGLE_SURFACE. Контакт между тканью с пластинами поликарбоната и техническим пластилином задавали *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, который выполняет проверку контактного взаимодействия между поверхностями. Здесь узлам одной поверхности находятся виртуальные узлы на другой поверхности и оценивается проникновение (с генерацией усилий отталкивания, пропорциональных контактной жесткости) или зазор.

Коэффициент трения между нитями и ударником задавали равным 0,18 согласно [131]. Было проведено несколько предварительных расчетов с коэффициентом трения ткань – поликарбонат от 0 до 0,5, и не было обнаружено

заметного различия. По этой причине коэффициент статического трения между образцами и пластинами был принят равным 0,25. Коэффициент статического трения ткань – пластилин принят равным 0,4 на основании данных работы [13].

Таблица 5.4 – Механические свойства нитей в ткани Twaron® 709

Тип образца	Плотность,	Модуль упругости,			Модуль сдвига, МПа			Коэффициент Пуассона			Предел прочности	
	кг/м ³	ГПа									σ _В , ГПа	
	ρ	E_A	E_B	E_C	G_{AB}	G_{BC}	G_{CA}	μ_{AB}	μ_{BC}	μ_{AC}	основа	уток
Сухая ткань	1 440	100,0	1,0	1,0	100	100	100	0,001	0,001	0,001	2,54	2,67
Обработанная ткань	1440	100,0	1,0	1,0	450	450	450	0,001	0,001	0,001	2,54	2,67

Таблица 5.5 – Механические характеристики покрытия ПВА, поликарбонатных пластин

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести σ_T , МПа	Касательный модуль E_t , МПа	Макс. разрушающие деформации ε_f , мм/мм
Термопласт ПВА	1 088	2,0	0,44 [111]	–	1,0	–
Поликарбонат [116]	1 200	1,8	0,3	46,0	45,0	–

Таблица 5.6 – Механические свойства пластилина при температуре окружающей среды 20°±1°С

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести σ_T , Па
Пластилин	1 400	200	0,49	$\sigma(\dot{\varepsilon}) = 5,68 \cdot 10^5 \cdot \dot{\varepsilon}^{0,229}$ (2.10)

5.2.3. Численное моделирование процесса вытягивания нити из ткани

Процесс вытягивания нити из ткани позволяет определить максимальную силу и энергию вытягивания. Основная цель моделирования процесса вытягивания заключалась в определении коэффициента трения между нитями, а также прочности покрытия ПВА. Создана конечно-элементная модель ткани размером 50×10 мм. Граничные условия были заданы аналогично п. 4.3. Нити имеют относительную свободу перемещения с возможностью вытягивания из ткани с учетом сухого трения, поэтому края ткани были полностью зафиксированы. (рисунок 5.12). Скорость вытягивания была задана равной $0,1$ м/с для сокращения времени расчета. В этом случае кинетическая энергия была пренебрежимо мала по сравнению с полной энергией системы.

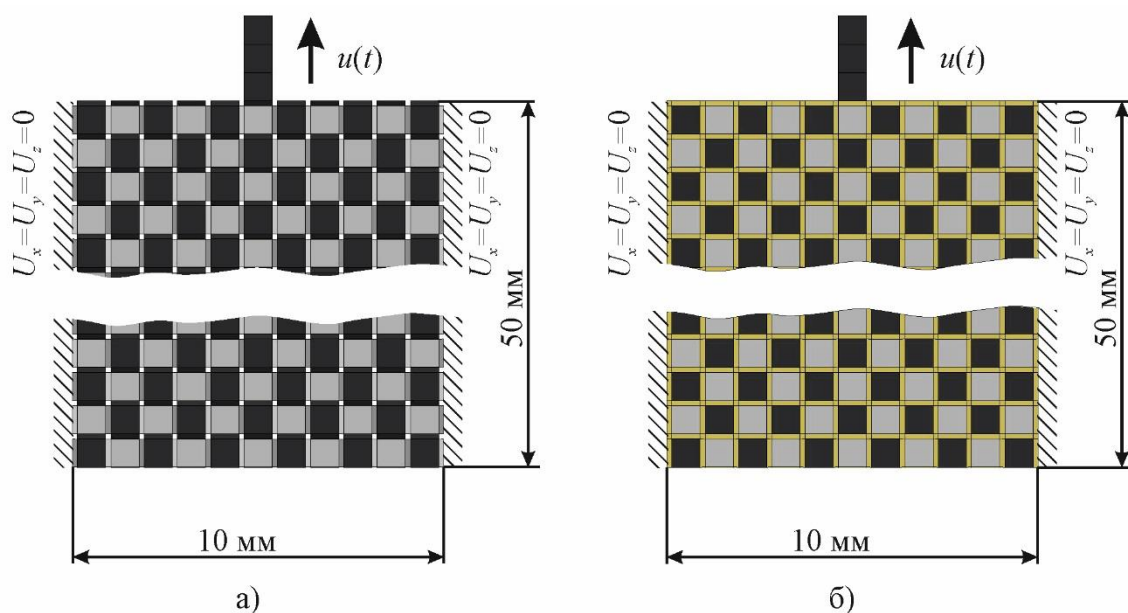


Рисунок 5.12. Конечно-элементная модель вытягивания нити из сухой (а) и обработанной (б) ткани

Коэффициент трения между нитями был получен путем сравнения расчетных и экспериментальных диаграмм «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из ткани. В результате расчетов коэффициент трения был принят равным $0,2$. Предел текучести и разрушающая деформация для термопласта ПВА были приняты 20 МПа и $4,4\%$ соответственно. На рисунке 5.13 представлено сравнение экспериментальных и расчетных диаграмм «усилие – перемещение» для двух

типов образцов с заданным коэффициентом трения и прочностью термопласта ПВА. Расчетные кривые лежат в диапазоне разброса экспериментальных данных.

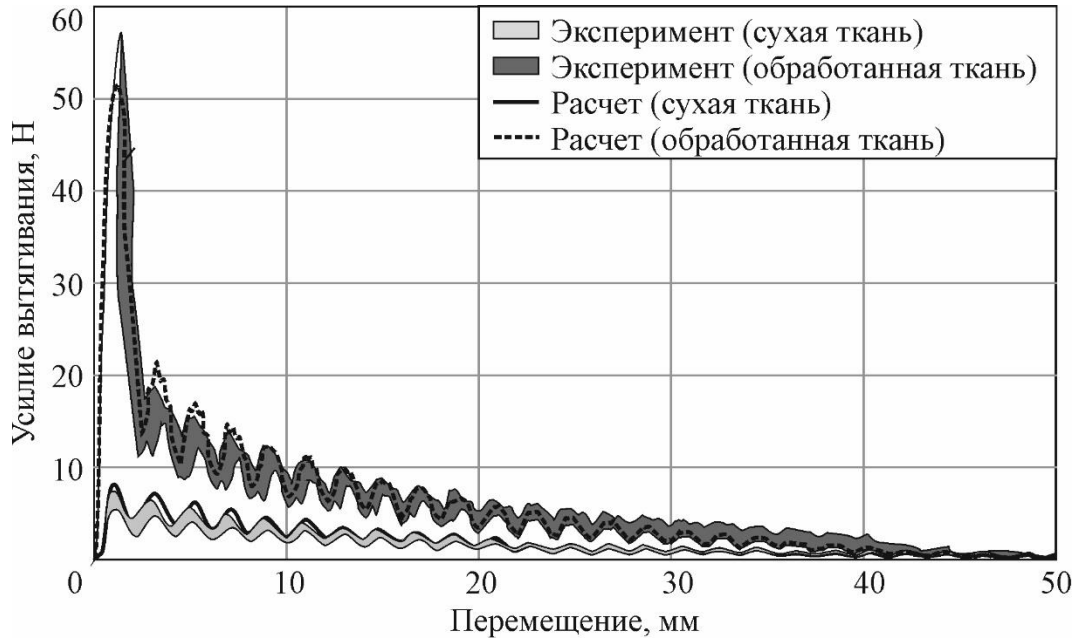


Рисунок 5.13. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей вытягивания нити из ткани

В таблице 5.7 представлено сравнение экспериментальных (среднее значение) и расчетных характеристик процесса вытягивания образцов из сухих тканей и тканей с покрытием. Максимальная погрешность не превышала 12%. На следующем этапе модели сухих тканей и тканей с покрытием ПВА были использованы для моделирования высокоскоростного удара.

Таблица 5.7 – Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристики при вытягивании нити из ткани

Тип образца	Эксперимент		Расчет		Погрешность, %	
	Макс. усилие F_p , Н	Энергия вытягивания W_p , Дж	Макс. усилие F_p , Н	Энергия вытягивания W_p , Дж	$\frac{\Delta F}{F_p}$	$\frac{\Delta W}{W_p}$
Сухая ткань	$6,07 \pm 0,82$	$0,075 \pm 0,011$	6,73	0,072	10,8	4,0
Обработанная ткань	$54,66 \pm 3,58$	$0,308 \pm 0,034$	53,25	0,343	2,6	11,4

5.2.4. Численное моделирование оценки баллистического предела пакетов арамидной ткани при локальном ударе

Граничные условия закрепления были заданы следующие: пакет из пяти слоев ткани был расположен между двумя пластинами поликарбоната размерами $140 \times 120 \times 4$ мм с отверстием диаметром 40 мм. Они были полностью зафиксированы внизу в области 22×66 мм (заделка – $U_x = U_y = U_z = 0$). Схема закрепления и численная модель представлена на рисунок 5.14.

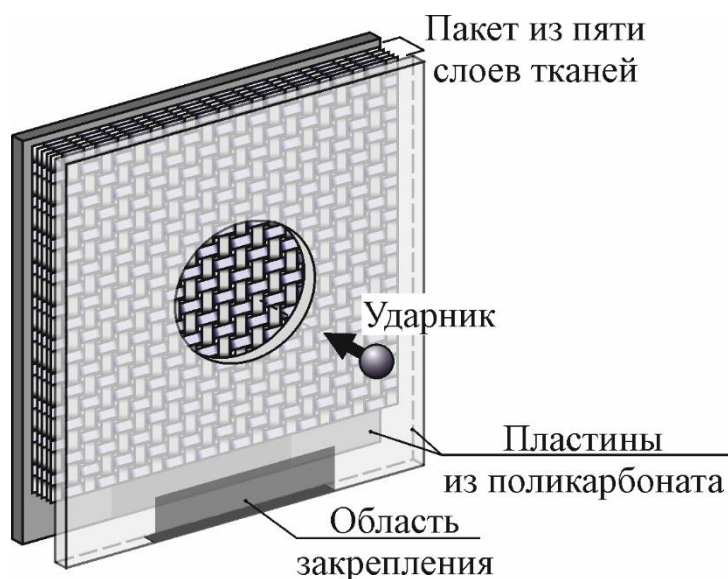


Рисунок 5.14. Схема для численного анализа высокоскоростных ударных нагружения

По результатам расчета были получены остаточные скорости ударника, которые сравнивали с экспериментальными данными. На рисунке 5.15 представлено сравнение экспериментальных и расчетных остаточных скоростей ударника для двух типов образцов.

Как видно из рисунка 5.15, модели пакетов с поверхностной обработкой и без нее хорошо предсказывают остаточную скорость и описывают баллистическую кривую при низких скоростях. Разница между экспериментальными и расчетными значениями баллистических пределов не превышает 3% и 5% для сухих и обработанных образцов ткани соответственно. В обоих случаях прогнозирование остаточной скорости на 10 м/с меньше экспериментальных значений. Однако при высоких скоростях получают завышенные значения остаточной скорости

ударника. Это, возможно, связано с недостаточно корректным учетом условий закрепления образца (не было учтено некоторое давление пластин на пакет ткани). В то же время предложенные модели позволяют адекватно описывать поведение пакета ткани вблизи баллистических пределов, что является актуальным при проектировании многослойных тканевых защитных структур.

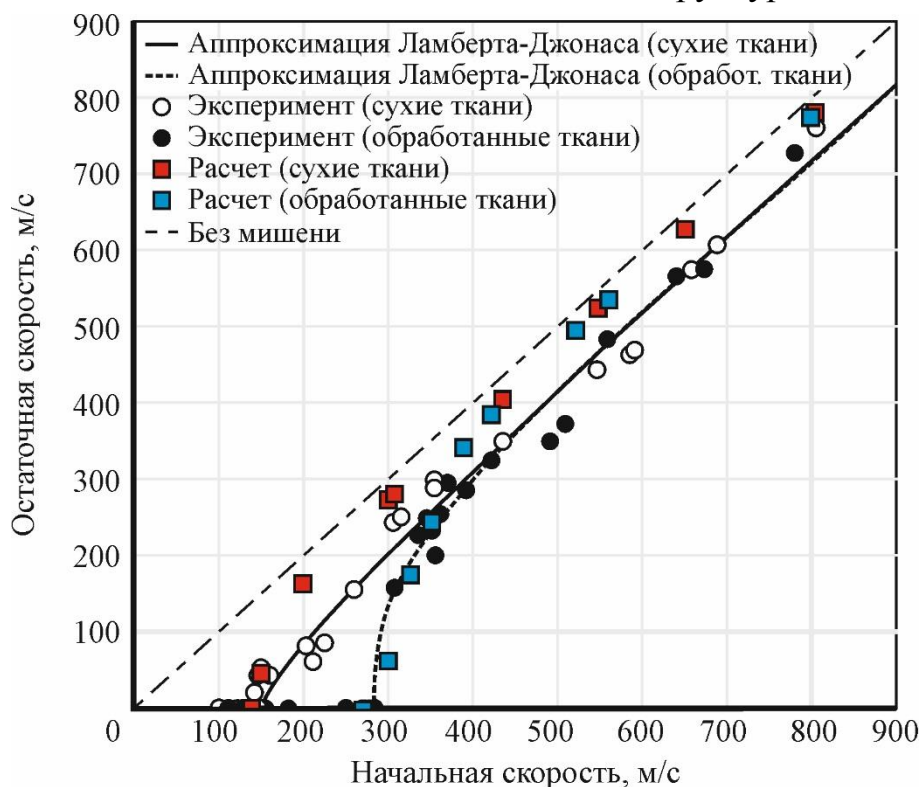
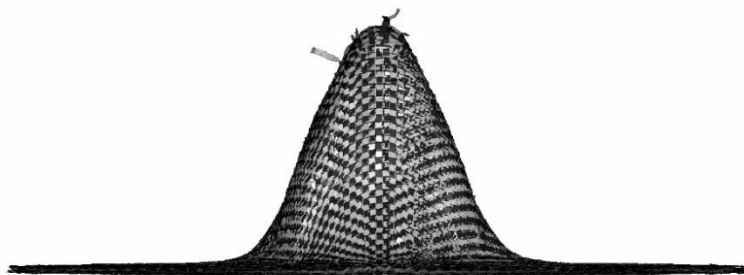


Рисунок 5.15. Баллистические кривые (эксперимент и расчет) для образцов из сухой и обработанной ткани

Благодаря мезомоделированию ткани в расчете возможно наблюдать такие процессы как растяжение, вытягивание и разрушение нитей при локальном ударе. На рисунке 5.16 представлено расчетные деформированные состояния пакетов двух типов при отсутствии пробоя.

Из расчетных случаев видно, что в образцах также наблюдается вытягивание нитей, расположенными непосредственно под ударником. Деформации в пакетах из сухих тканей существенно больше по сравнению с перемещениями в обработанных тканях.

Сухая ткань, $V_i=140$ м/с



Обработанная ткань, $V_i=280$ м/с

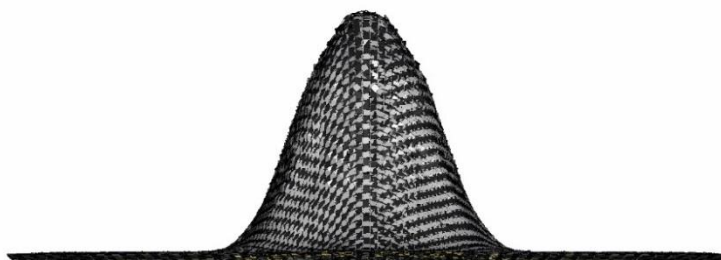


Рисунок 5.16. Сравнение картин деформирования пакетов двух типов при скорости удара вблизи баллистического предела при полной остановке ударника

В случае, когда скорость ударника были около 300 м/с, в обоих случаях наблюдали уменьшение запреградной выпучины, вытягивание и разрушение нитей под ударником (рисунок 5.17).

Полученные результаты подтвердили возможность прогнозировать адекватное поглощение энергии вблизи баллистических пределов, поэтому разработанные модели использованы для расчета глубины вмятины в пластилине.

Сухая ткань, $V_i=306$ м/с



Обработанная ткань, $V_i=300$ м/с

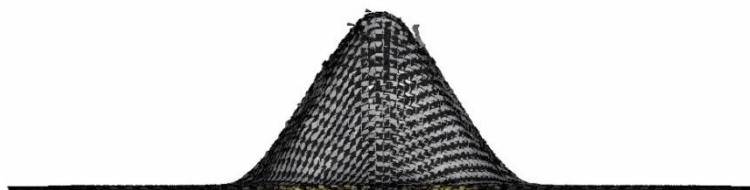


Рисунок 5.17. Сравнение расчетной картины деформирования двух видов пакета при скорости около 300 м/с

5.2.5. Численное моделирование деформирования пакетов арамидной ткани и пластилина при локальном ударе

Моделирование процесса деформирования тканевого пакета, расположенного на регистрирующей среде, позволяет прогнозировать величину запреградной выпучины (запреградную травму) для разных случаев. В расчетной модели образец свободно лежал на поверхности пластилина размерами 100×100×70 мм. Стальной ударник воздействует на пакет по нормали со скоростью близкой к баллистическому пределу. Граничные условия были заданы аналогично п. 4.4, рисунок 4.8.

На рисунке 5.18 представлено деформированное состояние пакета на основе исходных тканей после взаимодействия с ударником при скорости 139 м/с. В расчете наблюдается также крестообразная деформированная зона с ориентацией по направлениям основы и утка, потеря устойчивости вблизи основных нитей. Расчетная глубина вмятины в пластилине близка к экспериментальным значениям.

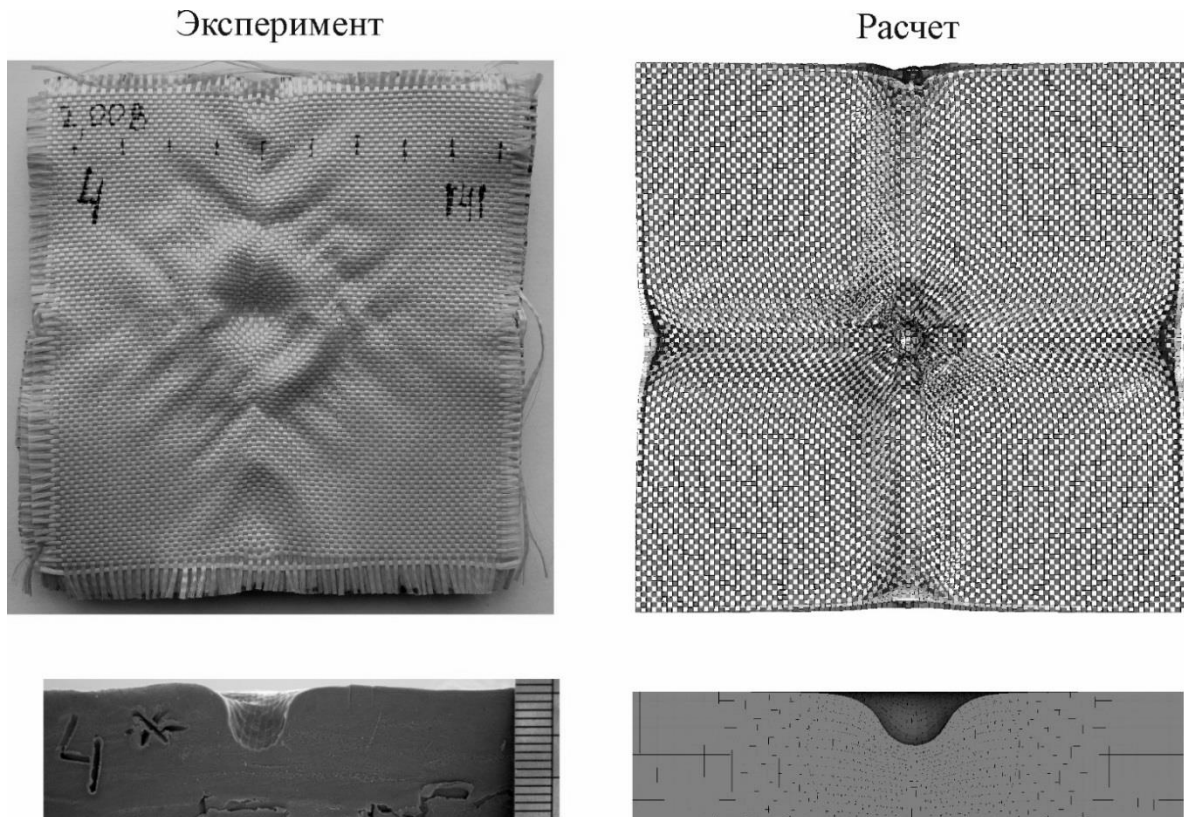


Рисунок 5.18. Сравнение экспериментальной и расчетной картины деформирования пакета из сухих тканей и профили пластилина при скорости ударника 141 м/с

Расчет для образцов с тонкими покрытиями показал близкие к экспериментальным данным результаты (рисунок 5.19). Наблюдается небольшое деформирование в области удара, незначительная крестообразная зона вытягивания и глубина вмятины в пластилине меньше по сравнению с результатами для пакета из сухих тканей.

В таблице 5.8 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.

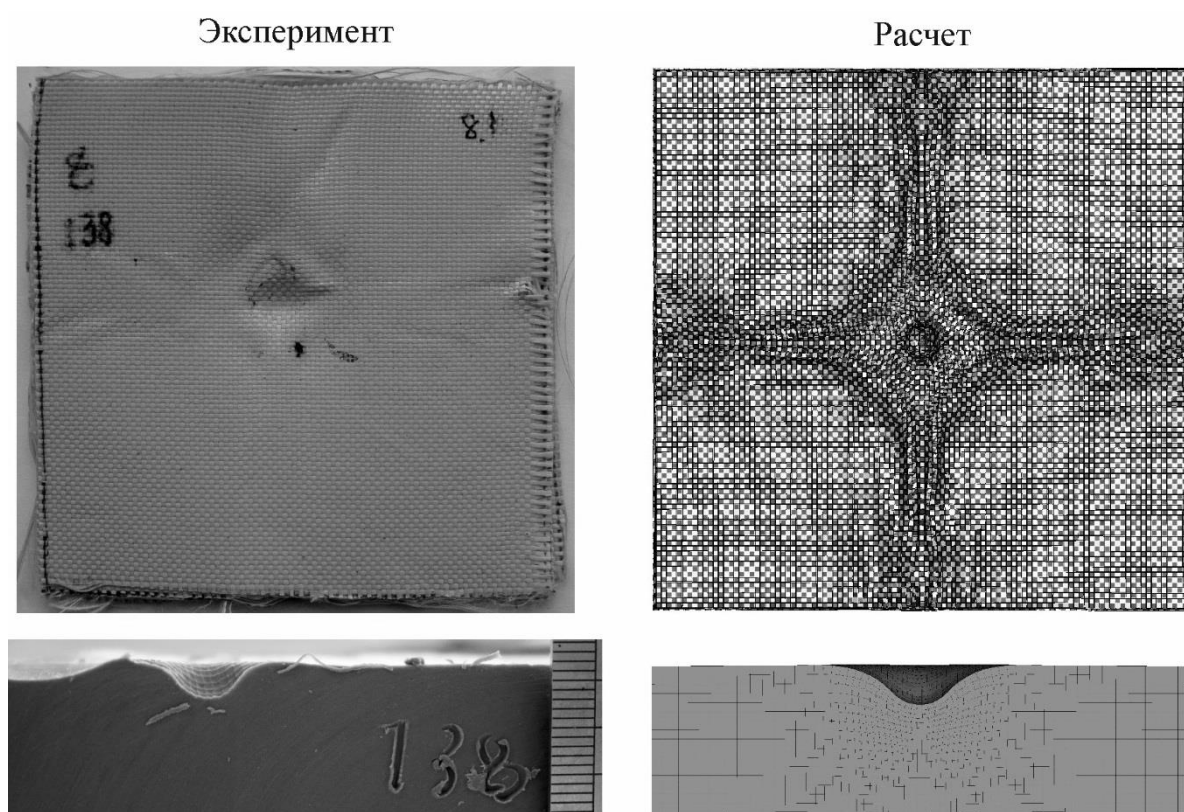


Рисунок 5.19. Сравнение экспериментальной и расчетной картины деформирования пакета из обработанных тканей и прогиб пластилина при скорости ударника 138 м/с

Таблица 5.8 – 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	
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

Подобное различие между экспериментальными и расчетными глубинами вмятин в литературе считается приемлемым для таких сложных задач взаимодействия ударника и многослойных тканевых структур, расположенных на пластилиновом блоке.

Выводы по главе

В данной работе были проведены экспериментальные и расчетные исследования влияния поверхностной обработки арамидной ткани на способность многослойных тканевых структур деформироваться и разрушаться при высокоскоростном ударном нагружении.

По результатам испытаний образцов ткани с тонким покрытием ПВА и без него было установлено, что при увеличении поверхностной плотности пакета всего на 5-6% можно достичь увеличения баллистического предела почти в два раза для пакетов с одинаковым количеством слоев ткани. Кроме того, глубина вмятины в пластилине для пакетов с обработанными тканями почти в два раза меньше по сравнению со значениями для пакетов с сухими тканями при скоростях 130-150 м/с.

Предложенный метод повышения баллистических характеристик многослойных тканевых защитных структур также может быть реализован на различных термопластичных связующих и синтетических каучуках. Работы в данном направлении могут составить предмет дополнительного исследования.

Результаты численного моделирования тканей с применением мезоуровневого подхода (на основе моделирования нитей оболочками) показали, что такие модели позволяют с удовлетворительной точностью оценивать баллистический предел и

глубину вмятины в пластилине как для сухих тканевых пакетов, так и пакетов на основе обработанных тканей.

В данной главе была применена пошаговая калибровка численной модели ткани. Она была проведена за счет моделирования квазистатического процесса вытягивания нити из ткани, а затем – пробивания при высокоскоростном нагружении. Полученные параметры модели в итоге были использованы при прогнозировании глубины отпечатка в пластилиновом блоке при скоростях удара меньших баллистического предела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 $d\varepsilon/dt = 0,0004 \dots 250 \text{ с}^{-1}$. Она может быть использована в расчетах взаимодействия ударника и образцов защитных тканевых структур, расположенных на пластилине, или при моделировании технологических процессов обработки металлов давлением.

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%.

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 фрикционного взаимодействия 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 вытягивание нити из ткани, а при локальном ударе – глубину вмятины в пластилине, согласующиеся с экспериментальными значениями.

Проведены расчетно-экспериментальные исследования процесса деформирования и разрушения пакетов из сухих или обработанных термопластом ПВА арамидных тканей полотняного 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 пластилине) снизить в два раза при увеличении массы пакета на 5-6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ материалов и их свойств, применяемых для средств индивидуальной бронезащиты / В.В. Мыльников, А.А. Абросимов, И.Д. Романов, А.Д. Романов // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 9-2. – С. 143-147.
2. Аптуков, В.Н. Аналитико-экспериментальное определение удельного сопротивления прониканию, описание лицевого и тыльного ослабляющего эффекта / В.Н. Аптуков, А.Р. Хасанов, А.Ф. Мерзляков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». – 2019. – Т. 23, № 1. – С. 49-68.
3. Баженов, С.Л. Исследование трения нитей в арамидных тканях / С.Л. Баженов, Г.П. Гончарук // Высокомолекулярные соединения: Серия А. – 2012. – Т. 54, № 10. – С. 1532-1538.
4. Баженов, С.Л. О роли трения в диссипации энергии при поперечном баллистическом ударе по ткани / С.Л. Баженов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2006. – Т. 48, № 10. – С. 1916-1920.
5. Бивин, Ю.К. Механика динамического проникания в грунтовую среду / Ю.К. Бивин, И.В. Симонов // Известия российской академии наук. Механика твердого тела. – 2010. – №6. – С. 157-191. = Bivin, Yu.K. Mechanics of Dynamic Penetration into Soil Medium / Yu.K. Bivin, I.V. Simonov // Mechanics of solids. – 2010. – Vol. 45, No. 6. – P. 892-920. DOI: [10.3103/S0025654410060130](https://doi.org/10.3103/S0025654410060130)
6. Бивин, Ю.К. Проникание твердого тела в слоистую преграду / Ю.К. Бивин // известия российской академии наук. Механика твердого тела. – 2019. – №3. – С. 64-68.
7. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики [в 2 томах] / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – М.: Наука, 1979. – 272 с.
8. Горик, А.В. Определение упругопластического коэффициента ударного взаимодействия сферического индентора с деформируемым полупространством / А.В. Горик, С.Б. Ковальчук, Г.А. Шулянский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 1, № 7(61). – С. 56-59.

9. ГОСТ 34286-2017 Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. – введен 2019-03-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
10. ГОСТ Р 50744-95 Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. – введен 1995-07-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
11. ГОСТ Р 55623-2013 Бронеодежда. Методы испытаний. – введен 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 16 с.
12. Дик, В.Н. Средства индивидуальной бронезащиты: справочное пособие: в 2 книгах. Книга 1. История доспеха / В.Н. Дик. – Минск: Белорусская наука, 2017. – 452 с.
13. Долганина, Н.Ю. Деформирование и разрушение слоистых тканевых пластин при локальном ударе: дис. ... канд. тех. наук: 01.02.06 / Долганина Наталья Юрьевна. – Челябинск, 2010. – 128 с.
14. Долганина, Н.Ю. Оценка баллистического предела и прогиба многослойных тканевых пластин при ударе индентором / Н.Ю. Долганина // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. – 2010. – Вып. 15, № 10(186). – С. 17-23.
15. Долганина, Н.Ю. Разработка компьютерных моделей баллистических тканей с поверхностной обработкой / Н.Ю. Долганина, А.В. Игнатова // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – Т. 6, № 4. – С. 91-100. DOI: 10.14529/cmse170407
16. Долганина, Н.Ю. Разработка компьютерных моделей модифицированных арамидных тканей / Н.Ю. Долганина, А.В. Игнатова, И.С. Слободин // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2018. – Т. 7, № 4. – С. 30-40. DOI: [10.14529/cmse180402](https://doi.org/10.14529/cmse180402)
17. Джеймс, П. Древние изобретения / П. Джеймс, Н. Торп. – Минск: ООО «Попурри», 1997. – 768 с.
18. 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.

19. Исследование диссипативных факторов при пробивании многослойных тканых преград / П.А. Моссаковский, В.В. Баландин, А.П. Беляев, Т.А. Белякова, А.М. Брагов, А.В. Инюхин, Л.А. Костырева // Проблемы прочности и пластичности. – 2015. – Т. 77, № 4. – С. 385-392.
20. Кобылкин, И.Ф. Материалы и структуры легкой бронезащиты / И.Ф. Кобылкин, В.В. Селиванов. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 191 с.
21. Лурье, А.И. Теория упругости / А.И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
22. Марковец, М.П. Определение механических свойств металлов по твердости / М.П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
23. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. – М.: РадиоСофт, 2008. – 408 с.
24. Моссаковский, П.А. Исследование процесса пробивания многослойной преграды из тканого композита с нанокompозитной пропиткой / П.А. Моссаковский, М.Е. Колотников, Ф.К. Антонов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10. – С. 151-155.
25. Патент 2100748 Российская Федерация: МПК F41H 1/02 (1995.01), B32B 27/04 (1995.01). Композиционный пулезащитный материал / С.Б. Сапожников, А.В. Понькин, С.И. Шульженко; заявитель С.Б. Сапожников, А.В. Понькин, С.И. Шульженко. – № 93042738/02; заявл. 26.08.93; опубл. 27.12.97, Бюл. №36. – 6 с.
26. Патент 2175035 Российская Федерация, МПК D03D 15/00 (2000.01), F41H 1/02 (2000.01). Ткань для баллистической защиты и баллистический защитный тканевой пакет на ее основе / В.Г. Бова, В.А. Федоров, И.В. Тихонов, А.П. Башенко, И.В. Слугин, В.Н. Ситуха, Н.А. Лебедева, В.В. Львов, Г.П. Анилионис, Ю.Л. Васильев, А.С. Карусевич; заявитель НПП «Термостойкий текстиль». – № 99127977; заяв. 30.12.1999; опубл. 20.10.2001, Бюл. № 29. – 8 с.
27. Патент 2258211 Российская Федерация, МКП7 G01N 3/48 (2000.01). Способ определения динамической твердости материалов / В.В. Болденков,

П.А. Дрокин; заявитель Минатом РФ, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – № 2004109856/28: заявл. 31.03.2004: опубл. 10.08.2005, Бюл. 22. – 6 с.

28. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику фрикционного взаимодействия 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](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.4.09)

29. Рахматулин, Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 339 с.

30. 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.

31. Сапожников, С.Б. Компактный разгонный стенд для баллистических испытаний / С.Б. Сапожников, О.А. Кудрявцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 20, № 33(292). – С. 139-143.

32. Справочник по пластическим массам / под ред. М.И. Гарбара, М.С. Акутина, Н.М. Егорова. – М.: Изд-во «Химия». – 1967. – 462 с.

33. Стоев, П.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости / П.И. Стоев, В.И. Мощенок // Вестник Харьковского научного университета им. Каразина. – 2003. – Т. 601, № 2(22). – С. 106-112.

34. Форенталь, М.В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростном нагружении ударниками со сложной структурой: дис. ... канд. тех. наук: 01.02.06 / Форенталь Михаил Вольдемарович. – Челябинск, 2010. – 174 с.

35. Харченко, Е.Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы: в 3 книгах. Т. 1. Механизмы взаимодействия с баллистическими поражающими элементами / Е.Ф. Харченко, А.Ф. Ермоленко. – М.: ОАО ЦНИИСМ. – 2013. – 294 с.

36. Харченко, Е.Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы: в 3 книгах. Т. 2. Современные защитные структуры и средства индивидуальной защиты / Е.Ф. Харченко. – М.: ОАО ЦНИИСМ. – 2014. – 332 с.
37. Экспериментальное исследование и конечно-элементный анализ тканевых композитов в условиях ударного нагружения / П.А. Моссаковский, Ф.К. Антонов, Т.А. Белякова, Л.А. Костырева, А.М. Брагов, В.В. Баландин // Проблемы Прочности и Пластичности. – 2014. – Вып. 76(1). – С. 39-45.
38. A finite element analysis of the squeeze flow of an elasto-viscoplastic paste material / M.J. Adams, I. Aydin, B.J. Briscoe, S.K. Sinha // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 1997. – Vol. 71. – P. 41-57.
39. A method for inter-yarn friction coefficient calculation for plain wave of aramid fibers / H. López-Gálvez, M. Rodriguez-Millán, N. Feito, H. Miguelez // Mechanics Research Communications. – 2016. – Vol. 74. – P. 52-56. DOI: [10.1016/j.mechrescom.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2016.04.004)
40. An experimental study of the effect of ply orientation on ballistic impact performance of multi-ply fabric panels / Y. Wang, X. Chen, R. Young, I. Kinloch, W. Garry // Textile Research Journal. – 2016. – Vol. 86, No. 1. – P. 34-43. DOI: [10.1177/2F0040517514566110](https://doi.org/10.1177/2F0040517514566110)
41. A new constitutive model for ballistic Roma Plastilina no. 1 clay / Y.Q. Li, X.-L. Gao, V.A. Halls, J.Q. Zheng // Mechanics of advanced materials and structures. – 2020. – Vol. 27, No. 24. – P. 2027-2034. DOI: [10.1080/15376494.2018.1538471](https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1538471)
42. An inverse technique for evaluation of flow parameters of modeling materials using extrusion / K.K. Pathak, A.K. Soni, M. Sharma, M.M. Sahu // Experimental Techniques. – 2013. – Vol. 37, No. 2. – P. 16-22.
43. A numerical and experimental study of woven fabric material under ballistic impacts / H. Fang, M. Gutowski, M. DiSogra, Q. Wang // Advances in Engineering Software. – 2016. – Vol. 96. – P. 14-28. DOI: [10.1016/j.advengsoft.2015.12.008](https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.12.008)
44. A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact / Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti,

B.A. Cheeseman, B. Powers // International Journal of Impact Engineering. – 2006. – Vol. 32. – P. 1299-1312.

45. A numerical study of ply orientation on ballistic impact resistance of multi-ply fabric panels / Y. Wang, X. Chen, R. Young, I. Kinloch, G. Wells // Composites: Part B. – 2015. – Vol. 68. – P. 259-265. DOI: [10.1016/j.compositesb.2014.08.049](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.049)

46. Aramid fabric/nano-size dual phase shear thickening fluid composites response to ballistic impact / A.F. Ávila, A.M. de Oliveira, S.G. Leão, M.G. Martins // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Vol. 112. – P. 468-474.

47. Ballistic impact response of Kevlar[®] reinforced thermoplastic composite armors / A.K. Bandaru, V.V. Chavan, S. Ahmad, R. Alagirusamy, N. Bhatnagar // International Journal of Impact Engineering. – 2016. – Vol. 89. – P. 1-13.

48. Ballistic performance of Kevlar fabric impregnated with nanosilica/PEG shear thickening fluid / A. Khodadadi, Gh. Liaghat, S. Vahid, A.R. Sabet, H. Hadavinia // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 162. – P. 643-652.

49. Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I – Effect of laminating sequence / J.L. Park, B.I. Yoon, J.G. Paik, T.J. Kang // Textile Research Journal. – 2012. – Vol. 82, No. 6. – P. 527-541. DOI: [10.1177/2F0040517511420753](https://doi.org/10.1177/2F0040517511420753)

50. Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part II – Effect of fabric count and shot location / J.L. Park, B.I. Yoon, J.G. Paik, T.J. Kang // Textile Research Journal. – 2012. – Vol. 82, No. 6. – P. 542-557. DOI: [10.1177/2F0040517511420765](https://doi.org/10.1177/2F0040517511420765)

51. Ballistic performance of thermoplastic composite laminates made from aramid woven fabric and polypropylene matrix / J.G. Carrillo, R.A. Gamboa, E.A. Flores-Johnson, P.I. Gonzalez-Chi // Polymer Testing. – 2012. – Vol. 31, No. 4. – P. 512-519.

52. 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.

53. Barauskas, R. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA / R. Barauskas, A. Abraitiene // *International Journal of Impact Engineering*. – 2007. – Vol. 34. – P. 1286-1305.
54. Bhattacharjee, D. Energy absorption and dynamic deformation of backing material for ballistic evaluation of body armour / D. Bhattacharjee, A. Kumar, I. Biswas // *Defence Science Journal*. – 2013. – Vol. 63, No. 5. – P. 462-466.
55. Bilisik, K. Multilayered and multidirectionally-stitched aramid woven fabric structures: experimental characterization of ballistic performance by considering the yarn pull-out test / K. Bilisik, M. Korkmaz // *Textile Research Journal*. – 2010. – Vol. 80, No. 16. – P. 1697-1720.
56. Bilisik, K. Properties of yarn pull-out in para-aramid fabric structure and analysis by statistical model / K. Bilisik // *Composites: Part A*. – 2011. – Vol. 42. – P. 1930-1942. DOI: [10.1016/j.compositesa.2011.08.018](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.08.018)
57. Bilisik, K. Weft directional stick–slip force of yarn pullout in para-aramid fabric for ballistics / K. Bilisik, B. Yildirim // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2014. – Vol. 27, No. 9. – P. 1167-1191. DOI: [10.1177/2F0892705712470261](https://doi.org/10.1177/2F0892705712470261)
58. Blunt trauma performance of fabric systems utilizing natural rubber coated high strength fabrics / M.R. Ahmad, W.Y.W. Ahmad, A. Samsuri, J. Salleh, M.H. Abidin // In: *Proceeding of the International Conference on Advancement of Materials and Nanotechnology (ICAMN 2007, Langkawi, 29 May-1 June 2007)*. – 2010. – Vol. 1217. – P. 328-334. DOI: [10.1063/1.3377838](https://doi.org/10.1063/1.3377838)
59. Bower, A.F. *Applied Mechanics of Solids* / A.F. Bower. – Boca Raton, Florida: CRC Press, 2009. – 820 p.
60. Briscoe, B.J. The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: The influence of interface friction / B.J. Briscoe, F. Motamedi // *Wear*. – 1992. – Vol. 158. – P. 229-247.
61. Buchely, M.F. An engineering model for the penetration of a rigid-rod into a Cowper-Symonds low-strength material / M.F. Buchely, A. Maranon // *Acta Mechanica*. – 2015. – Vol. 226. – P. 2999-3010. DOI: [10.1007/s00707-015-1359-6](https://doi.org/10.1007/s00707-015-1359-6)

62. Buchely, M.F. Material model for modeling clay at high strain rates / M.F. Buchely, A. Maranon, V.V. Silberschmidt // *International Journal of Impact Engineering*. – 2016. – Vol. 90. – P. 1-11. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.11.005)
63. Cheeseman, B.A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates / B.A. Cheeseman, T.A. Bogetti // *Composite Structures*. – 2003. – Vol. 61. – P. 161-173. DOI: [10.1016/S0263-8223\(03\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00029-1)
64. Characterization of dynamic properties of ballistic clay / E.P. Carton, G.H.J.J. Roebroeks, J.P.F. Broos, V. Halls, J. Zheng // *PASS 2014 – Personal Armour Systems Symposium* (Robinson College, Cambridge, United Kingdom, 8-12 September 2014). – 2014.
65. Chijiwa, K. Characteristics of plasticine used in the simulation of slab in rolling and continuous casting / K. Chijiwa, Y. Hatamura, N. Hasegawa // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. – 1980. – Vol. 66, No. 5. – P. 496-505.
66. Chen, X. An analytical model for ballistic impact on textile based body armour / X. Chen, F. Zhu, Garry Wells // *Composites: Part B*. – 2013. – Vol. 45. – P. 1508-1514. DOI: [10.1016/j.compositesb.2012.08.005](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.005)
67. Chen, X. Technical textiles for ballistic protection. In: *Handbook of Technical Textiles Vol. 2. Technical Textile Applications* / X. Chen, Y. Zhou. – Second Edition. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. – P. 169-192.
68. Chu, Y. Numerical study of inter-yarn friction on the failure of fabrics upon ballistic impacts / Y. Chu, S. Min, X. Chen // *Materials and Design*. – 2017. – Vol. 115. – P. 299-316. DOI: [10.1016/j.matdes.2016.11.013](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.013)
69. Cork, C.R. The ballistic performance of narrow fabrics / C.R. Cork, P.W. Foster // *International Journal of Impact Engineering*. – 2007. – Vol. 34, No. 3. – P. 495-508. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2005.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.10.006)
70. Cunniff, P.M. Vs–Vr relationships in textile system impact / P.M. Cunniff // In: *Proceedings of the 18th International Symposium of Ballistics* (San Antonio, Texas, 15-19 November 1999). – 1999.
71. Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact / S. Das, S. Jagan, A. Shaw, A. Pal

// Composite Structures. – 2015. – Vol. 120. – P. 129-140. DOI: [10.1016/j.compstruct.2014.09.063](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.063)

72. Development of a meso-scale material model for ballistic fabric and its use in flexible-armor protection systems / M. Grujicic, W.C. Bell, G. Arakere, T. He, X. Xie, B.A. Cheeseman // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2010. – Vol. 19. – P. 22-39. DOI: [10.1007/s11665-009-9419-5](https://doi.org/10.1007/s11665-009-9419-5)

73. Development of numerical model for ballistic resistance evaluation of combat helmet and experimental validation / M. Rodriguez-Millan, T. Ito, J.A. Loya, A. Olmedo, M.H. Miguelez // Materials and Design. – 2016. – Vol. 110. – P. 391-403. DOI: [10.1016/j.matdes.2016.08.015](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.015)

74. Development of reliable modeling methodologies for engine fan blade out containment analysis. Part II: Finite element analysis / Z. Stahlecker, B. Mobasher, S.D. Rajan, J.M. Pereira // International Journal of Impact Engineering. – 2009. – Vol. 36. – P. 447-459. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2008.08.004](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.08.004)

75. Digital element approach for simulating impact and penetration of textiles / Y. Wang, Y. Miao, D. Swenson, B.A. Cheeseman, C.-F. Yen, B. LaMattina // International Journal of Impact Engineering. – 2010. – Vol. 37. – P. 552-560. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2009.10.009](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.10.009)

76. Dimitrienko, Yu.I. Modeling of Non-Newtonian resin flows in Composite Microstructures / Yu.I. Dimitrienko, Sh. Li // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 683. – No. 012008.

77. Döbrich, O. Modeling the mechanical properties of textile-reinforced composites with a near micro-scale approach / O. Döbrich, T. Gereke, C. Cherif // Composite Structures. – 2016. – Vol. 135. – P. 1-7. DOI: [10.1016/j.compstruct.2015.09.010](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.010)

78. Dong, Z. Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics / Z. Dong, C.T. Sun // Composites: Part A. – 2009. – Vol. 40. – P. 1863-1869. DOI: [10.1016/j.compositesa.2009.04.019](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.019)

79. Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems / M.R. Ahmad, W.Y.W. Ahmad, J. Salleh, A. Samsuri // *Materials and Design*. – 2008. – Vol. 29. – P. 1353-1358.
80. Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers / J. Lim, J.Q. Zheng, K. Masters, W.W. Chen // *International Journal of Impact Engineering*. – Vol. 38, No. 4. – P. 219-227. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2010.11.009](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.11.009)
81. Effect of matrix on the ballistic impact of aramid fabric composite laminates by armor piercing projectiles / N. Nayak, P. Sivaraman, A. Banerjee, V. Madhu, A.L. Dutta, V.S. Mishra, B.C. Chakraborty // *Polymer Composites*. – 2012. – Vol. 33. – P. 443-450. DOI: [10.1002/pc.21259](https://doi.org/10.1002/pc.21259)
82. Effect of stitching parameters on ballistic resistance of Kevlar fabrics / R.M. Sohaimi, A. Ani, S.A.F.M. Ishak, R. Yahaya // *Defence S and T Technical Bulletin*. – 2016. – Vol. 9, No. 2. – P. 53-60.
83. Empirical study of the high velocity impact energy absorption characteristics of shear thickening fluid (STF) impregnated Kevlar fabric / Y. Park, Y.H. Kim, A.H. Baluch, C.-G. Kim // *International Journal of Impact Engineering*. – 2014. – Vol. 72. – P. 67-74.
84. Experimental and numerical investigation of fabric impact behavior / P. Kedzierski, A. Popławski, R. Gieleta, A. Morka, G. Sławinski // *Composites: Part B*. – 2015. – Vol. 69. – P. 452-459. DOI: [10.1016/j.compositesb.2014.10.028](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.028)
85. Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of Kevlar fabrics / G. Nilakantan, R.L. Merrill, M. Keefe, J.W. Gillespie Jr., E.D. Wetzel // *Composites: Part B*. – 2015. – Vol. 68. – P. 215-229. DOI: [10.1016/j.compositesb.2014.08.033](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.033)
86. Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of Kevlar 49 fabric / D. Zhu, C. Soranakom, B. Mobasher, S.D. Rajan // *Composites: Part A*. – 2011. – Vol. 42. – P. 868-879. DOI: [10.1016/j.compositesa.2011.03.017](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.03.017)
87. Experimental study of hybrid soft ballistic structures / P. Kedzierski, R. Gieleta, A. Morka, T. Niezgodą, Z. Surma // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 153. – P. 204-211. DOI: [10.1016/j.compstruct.2016.06.006](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.006)

88. Experimental study of yarn friction slip and fabric shear deformation in yarn pull-out test / R. Bai, W. Li, Z. Lei, Y. Ma, F. Qin, Q. Fang, X. Chen, Y. Chen // *Composites Part A*. – 2018. – Vol. 107. – P. 529-535. DOI: [10.1016/j.compositesa.2018.02.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.001)
89. Experimental tests and numerical modelling of ballistic impacts against Kevlar 29 plain-woven fabrics with an epoxy matrix: Macro-homogeneous and Meso-heterogeneous approaches / L.M. Bresciani, A. Manes, A. Ruggiero, G. Iannitti, M. Giglio // *Composites Part B*. – 2016. – Vol. 88. – P. 114-130.
90. Fiber-level modeling of dynamic strength of Kevlar KM2 ballistic fabric / M. Grujicic, A. Hariharan, B. Pandurangan, C.-F. Yen, B.A. Cheeseman, Y. Wang, Y. Miao, J.Q. Zheng // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2012. – Vol. 21. – P. 1107-1119. DOI: [10.1007/s11665-011-0006-1](https://doi.org/10.1007/s11665-011-0006-1)
91. Finite element modeling of ballistic impact on multi-layer Kevlar 49 fabrics / D. Zhu, A. Vaidya, B. Mobasher, S.D. Rajan // *Composites*. – 2014. – Vol. 56. – P. 254-262. DOI: [10.1016/j.compositesb.2013.08.051](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.051)
92. Finite element simulation of a yarn pullout test for plain woven fabrics / M. Valizadeh, S. Lomov, S.A.H. Ravandi, M. Salimi, S.Z. Rad // *Textile Research Journal*. – 2010. – Vol. 80, No. 10. – P. 892-903. DOI: [10.1177/2F0040517509346436](https://doi.org/10.1177/2F0040517509346436)
93. *Flak Jackets: 20th Century Military Body Armor* / ed. by Martin Windrow. – London: Osprey Publishing Co, 1985. – 48 p.
94. Forming characteristics and surface damages of stitched multi-layered para-aramid fabrics with various stitching parameters for soft body armour design / M.A. Abtew, F. Boussu, P. Bruniaux, C. Loghin, I. Cristian, Y. Chen, L. Wang // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2018. – Vol 109. – P. 517-537.
95. Gawandi, A. Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric / A. Gawandi, E.T. Thostenson, J.W. Gillespie Jr. // *Journal of Materials Science*. – 2011. – Vol. 46, No. 1. – P. 77-89. DOI: [10.1007/s10853-010-4819-3](https://doi.org/10.1007/s10853-010-4819-3)

96. Gürgen, S. Shear thickening fluids in protective applications: A review / S. Gürgen, M.C. Kuşhan, W. Li // Progress in Polymer Science. – 2017. – Vol. 75. – P. 48-72.
97. Gürgen, S. The ballistic performance of aramid based fabrics impregnated with multiphase shear thickening fluids / S. Gürgen, M.C. Kuşhan // Polymer Testing. – 2017. – Vol. 64. – P. 296-306.
98. Hernandez, C. Dynamic characterization of Roma Plastilina No.1 from DropTest and inverse analysis / C. Hernandez, M.F. Buchely, A. Maranon // International Journal of Mechanical Sciences. – 2015. – Vol. 100. – P. 158-168. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2015.06.009](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.06.009)
99. Huang, Z. A numerical and experimental study of the indentation mechanics of plasticine / Z. Huang, M. Lucas, M.J. Adams // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2002. – Vol. 37, No. 2. – P. 141-150. DOI: [10.1243/0309324021514907](https://doi.org/10.1243/0309324021514907)
100. Hybrid-mesh modelling & validation of woven fabric subjected to medium velocity impact / E.C. Yang, S. Linforth, T. Ngo, P. Tran // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 144. – P. 427-437. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2018.05.017](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.05.017)
101. 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](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103654)
102. Impact resistance of shear thickening fluid/Kevlar composite treated with shear-stiffening gel / Q. He, S. Cao, Y. Wang, S. Xuan, P. Wang, X. Gong // Composites: Part A. – 2018. – Vol. 106. – P. 82-90. DOI: [10.1016/j.compositesa.2017.12.019](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.019)
103. Impact response of Kevlar/rubber composite / A. Khodadadi, G. Liaghat, H. Ahmadi, A.R. Bahramian, O. Razmkhah // Composites Science and Technology. – 2019. – Vol. 184. – No. 107880. DOI: [10.1016/j.compscitech.2019.107880](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107880)

104. Inelastic deformation and failure of tungsten carbide under ballistic-loading conditions / P.J. Hazella, G.J. Appleby-Thomas, K. Herlaar, J. Painter // *Materials Science and Engineering: Part A*. – 2010. – Vol. 527, No. 29-30. – P. 7638-7645.
105. Investigation of impact resistance of multilayered woven composite barrier impregnated with the shear thickening fluid / E.V. Lomakin, P.A. Mossakovsky, A.M. Bragov, A.K. Lomunov, A.Yu. Konstantinov, M.E. Kolotnikov, F.K. Antonov, M.S. Vakshtein // *Archive of Applied Mechanics*. – 2011. – Vol. 81. – P. 2007-2020.
106. Ji, H. Compressive creep and indentation behavior of plasticine between 103 and 353 K / H. Ji, E. Robin, T. Rouxel // *Mechanics of Materials*. – 2009. – Vol. 41. – P. 199-209.
107. Johnson, W. Plasticine modelled high velocity oblique impact and ricochet of long rods / W. Johnson, A.K. Sengupta, S.K. Ghosh // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 1982. – Vol. 24, No. 7. – P. 437-455.
108. Kang, T.J. Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite / T.J. Kang, S.H. Lee // *Journal of Composite Materials*. – 1994. – Vol. 28, No. 16. – P. 1574-1587. DOI: [10.1177/2F002199839402801604](https://doi.org/10.1177/2F002199839402801604)
109. Karahan, M. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics / M. Karahan, A. Kus, R. Eren // *International Journal of Impact Engineering*. – 2008. – Vol. 35, No. 6. – P. 499-510.
110. Kinetic dissipation in ballistic tests of soft body armors / J.L. Park, Y.S. Chi, M.H. Hahn, T.J. Kang // *Experimental Mechanics*. – 2012. – Vol. 52. – P. 1239-1250. DOI: [10.1007/s11340-011-9583-z](https://doi.org/10.1007/s11340-011-9583-z)
111. Koncar, V. Smart textiles for in situ monitoring of composites: the textile institute book series / V. Koncar. – 1st ed. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. – 422 p.
112. Kudryavtsev, O.A. Yarn-level modelling of woven and unidirectional thermoplastic composite materials under ballistic impact / O.A. Kudryavtsev, S.B. Sapozhnikov // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2016. – Vol. 3. – P. 108-119. DOI: [10.15593/perm.mech/2016.3.07](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.3.07)

113. Lambert, J.P. Towards standardization in terminal ballistics testing: Velocity representation: BRL Report No. 1852 / U.S. Army Ballistic Research Laboratories / J.P. Lambert, G.H. Jonas – MD.: Aberdeen Proving Ground, 1976. – 51 p.
114. Lee, B.-W. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts / B.-W. Lee, C.-G. Kim // *Advanced Composite Materials*. – 2012. – Vol. 21, No. 2. – P. 177-192. DOI: [10.1080/09243046.2012.690298](https://doi.org/10.1080/09243046.2012.690298)
115. Lee, Y.S. The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid / Y.S. Lee, E.D. Wetzel, N.J. Wagner // *Journal of Materials Science*. – 2003. – Vol. 38. – P. 2825-2833.
116. Levinsky, A.A. Development of knife- and bullet-impact-resistant composite structures / A.A. Levinsky, S.B. Sapozhnikov, T.S. Grass // *Mechanics of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 48, No. 4. – P. 405-414. DOI: [10.1007/s11029-012-9286-2](https://doi.org/10.1007/s11029-012-9286-2)
117. *Lightweight ballistic composites – Military and Law-Enforcement applications* / ed. by A. Bhatnagar. – 2nd ed. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2016. – 482 p.
118. Lim, C.T. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor / C.T. Lim, V.P.W. Shim, Y.H. Ng // *International Journal of Impact Engineering*. – 2003. – Vol. 28. – P. 13-31.
119. López-Gálvez, H. Suitability of numerical model from low to high velocity impacts against KM2 fabrics with isotropic hypothesis / H. López-Gálvez, X. Soldani // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 214. – P. 390-396. DOI: [10.1016/j.compstruct.2019.01.083](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.083)
120. Majumdar, A. Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid / A. Majumdar, B.S. Butola, A. Srivastava // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 54. – P. 295-300. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.07.086](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.086)
121. Majumdar, A. Effects of fabric construction and shear thickening fluid on yarn pull-out from high-performance fabrics / A. Majumdar, A. Laha // *Textile Research Journal*. – 2015. – Vol. 86, No. 19. – P. 2056-2066. DOI: [10.1177/2F0040517515619357](https://doi.org/10.1177/2F0040517515619357)

122. Mamivand, M. A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets / M. Mamivand, G.H. Liaghat // *International Journal of Impact Engineering*. – 2010. – Vol. 37. – P. 806-812. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2010.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.01.003)
123. Mandic, V. Friction studies utilizing the ring – Compression test – Part I / V. Mandic, M. Stefanovic // In: *Proceeding of the 8th International Tribology Conference (Belgrade, Serbian, 8-10 October 2003)*. – 2003. – P. 46-51.
124. Manimala, J.M. Investigation of failure in Kevlar fabric under transverse indentation using a homogenized continuum constitutive model / J.M. Manimala, C.T. Sun // *Textile Research Journal*. – 2014. – Vol. 84, No. 4. – P. 388-398. DOI: [10.1177/2F0040517513503727](https://doi.org/10.1177/2F0040517513503727)
125. Mawkhlieng, U. A review of fibrous materials for soft body armour applications / U. Mawkhlieng, A. Majumdar, A. Laha // *RSC Advances*. – 2020. – Vol. 10. – P. 1066-1086. DOI: [10.1039/C9RA06447H](https://doi.org/10.1039/C9RA06447H)
126. Mechanical properties of silicone based composites as a temperature insensitive ballistic backing material for quantifying back face deformation / T.D. Edwards, E.D. Bain, S.T. Cole, R.M. Freney, V.A. Halls, J. Ivancik, J.L. Lenhart, E. Napadensky, J.H. Yu, J.Q. Zheng, R.A. Mrozek // *Forensic Science International*. – 2018. – Vol. 285. – P. 1-12. DOI: [10.1016/j.forsciint.2018.01.014](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.01.014)
127. Modeling and validation of full fabric targets under ballistic impact / S. Chocron, E. Figueroa, N. King, T. Kirchdoerfer, A.E. Nicholls, E. Sagebiel, C. Weiss, C.J. Freitas // *Composites Science and Technology*. – 2010. – Vol. 70. – P. 2012-2022. DOI: [10.1016/j.compscitech.2010.07.025](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.07.025)
128. Modeling unidirectional composites by bundling fibers into strips with experimental determination of shear and compression properties at high pressures / S. Chocron, A.E. Nicholls, A. Brill, A. Malka, T. Namir, D. Havazelet, H. van der Werff, U. Heisserer, J.D. Walker // *Composites Science and Technology*. – Vol. 2014. – Vol. 101. – P. 32-40. DOI: [10.1016/j.compscitech.2014.06.016](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.06.016)
129. Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric / Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti, B.A. Cheeseman // *International*

Journal of Impact Engineering. – 2005. – Vol. 31. – P. 996-1012. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2004.06.008](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.06.008)

130. Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour / X.S. Zeng, V.B.C. Tan, V.P.W. Shim // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2006. – Vol. 66. – P. 1309-1330. DOI: [10.1002/nme.1596](https://doi.org/10.1002/nme.1596)

131. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric / M.P. Rao, Y. Duan, M. Keefe, B.M. Powers, T.A. Bogetti // Composite Structures. – 2009. – Vol. 89. – P. 556-566. DOI: [10.1016/j.compstruct.2008.11.012](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.11.012)

132. Multi layered natural rubber coated woven P-aramid and UHMWPE fabric composites for soft body armor application / R. Roy, A. Laha, N. Awasthi, A. Majumdar, B.S. Butola // Polymer Composites. – 2018. – Vol. 39, No.10. – P. 3636-3644. DOI: [10.1002/pc.24391](https://doi.org/10.1002/pc.24391)

133. NIJ Standard-0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor. – National Institute of Justice, 2008. – 89 p.

134. Nilakantan, G. Effects of clamping design on the ballistic impact response of soft body armor / G. Nilakantan, S. Nutt // Composite Structures. – 2014. – Vol. 108. – P. 137-150. DOI: [10.1016/j.compstruct.2013.09.017](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.017)

135. Nilakantan, G. Effects of ply orientation and material on the ballistic impact behavior of multilayer plain-weave aramid fabric targets / G. Nilakantan, S. Nutt // Defence Technology. – 2018. – Vol. 14. – P. 165-178. DOI: [10.1016/j.dt.2018.01.002](https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.002)

136. Nilakantan G. Experimentally validated predictive finite element modeling of the V0-V100 probabilistic penetration response of a Kevlar fabric against a spherical projectile / G. Nilakantan // International Journal of Protective Structures. – 2018. – Vol. 9, No. 4. – P. 504-524. DOI: [10.1177/2F2041419618776332](https://doi.org/10.1177/2F2041419618776332)

137. Nilakantan, G. Filament-level modeling of Kevlar KM2 yarns for ballistic impact studies / G. Nilakantan // Composite Structures. – 2013. – Vol. 104. – P. 1-13. DOI: [10.1016/j.compstruct.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.04.001)

138. Nikonova, E.A. The friction properties of textile yarns / E.A. Nikonova, A.B. Pakshver // Fibre Chemistry. – 1973. – Vol. 4, No. 6. – P. 657-660.

139. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric / C. Ha-Minh, A. Imad, T. Kanit, F. Boussu // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2013. – Vol. 69. – P. 32-39. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2013.01.014](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.01.014)

140. Numerical and experimental investigations into the response of STF-treated fabric composites undergoing ballistic impact / M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, M. Rezaei, H. Babaei // *Thin-Walled Structures*. – 2017. – Vol. 119. – P. 700-706. DOI: [10.1016/j.tws.2017.07.020](https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.020)

141. Numerical investigation of ballistic performance of shear thickening fluid (STF)-Kevlar composite / S. Sen, N.B. Jamal M, A. Shaw, A. Deb // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 164. – No. 105174. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2019.105174](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105174)

142. Numerical modelling of ballistic impact on HMPP woven fabric impregnated with shear-thickening fluids / A.H. Mirrahimi, M. Hasanzadeh, V. Mottaghitalab, P. Sharmac // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 173. – P. 73-76. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.12.031](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.031)

143. Numerical simulation and empirical comparison of the high velocity impact of STF impregnated Kevlar fabric using friction effects / Y. Park, Y. Kim, A.H. Baluch, C.G. Kim // *Composite Structure*. – 2015. – Vol. 125. – P. 520-529. DOI: [10.1016/j.compstruct.2015.02.041](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.041)

144. Numerical simulation of dynamic yarn pull-out process / H. Ahmadi, Y. Wang, Y. Miao, X.J. Xin, C.F. Yen // In: *Proceeding of the 19th International Conference on Composite Materials (Montreal, Canada, 28 July-02 August 2013)*. – 2013. – 8 p. – URL: <http://confsys.encs.concordia.ca/ICCM19/AllPapers/FinalVersion/WAN81211.pdf> (дата обращения: 26.06.2019 г.)

145. On analytical modelling to predict of the ballistic impact behaviour of textile multi-layer woven fabric / C. Ha-Minh, A. Imad, F. Boussu, T. Kanit // *Composite Structures*. – 2013. – Vol. 99. – P. 462-476. DOI: [10.1016/j.compstruct.2012.10.011](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.10.011)

146. On fabric materials response subjected to ballistic impact using meso-scale modelling. Numerical simulation and experimental validation / E. Giannaros,

A. Kotzakolios, G. Sotiriadis, S. Tsantzalis, V. Kostopoulos // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 204. – P. 745-754. DOI: [10.1016/j.compstruct.2018.07.090](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.090)

147. On the characterization and modelling of high-performance para-aramid fabrics / M.M. Moure, N. Feito, J. Aranda-Ruiz, J.A. Loya, M. Rodriguez-Millan // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 212. – P. 326-337. DOI: [10.1016/j.compstruct.2019.01.049](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.049)

148. On the finite element analysis of woven fabric impact using multiscale modeling techniques / G. Nilakantan, M. Keefe, T.A. Bogetti, R. Adkinson, J.W. Gillespie // *International Journal of Solids and Structures*. – 2010. – Vol. 47. – P. 2300-2315. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2010.04.029](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.04.029)

149. Palta, E. On a multi-scale finite element model for evaluating ballistic performance of multi-ply woven fabrics / E. Palta, H. Fang // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 207. – P. 488-508. DOI: [10.1016/j.compstruct.2018.09.080](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.080)

150. Parga-Landa, B. An analytical model to predict impact behaviour of soft armours / B. Parga-Landa, F. Hernandez-Olivares // *International Journal of Impact Engineering*. – 1995. – Vol. 16, No. 3. – P. 455-466. DOI: [10.1016/0734-743X\(94\)00054-Z](https://doi.org/10.1016/0734-743X(94)00054-Z)

151. Park, J.-J. Finite-element analysis of cylindrical-void closure by flat-die forging / J.-J. Park // *ISI International*. – 2013. – Vol. 53, No. 8. – P. 1420-1426.

152. Performance of natural rubber coated fabrics under ballistic impact / M.R. Ahmad, W.Y.W. Ahmad, J. Salleh, A. Samsuri // *Malaysian Polymer Journal*. – 2007. – Vol. 2, No. 1. – P. 39-51.

153. Phoenix, S.L. A new membrane model for the ballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems / S.L. Phoenix, P.K. Porwal // *International Journal of Solids and Structures*. – 2003. – Vol. 40. – P. 6723-6765. DOI: [10.1016/S0020-7683\(03\)00329-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00329-9)

154. Physical and numerical modelling of ram extrusion of paste materials: conical die entry case / I. Aydin, F.R. Biglari, B.J. Briscoe, C.J. Lawrence, M.J. Adams // *Computational Materials Science*. – 2000. – Vol. 18. – P. 141-155.

155. Rheological characterization of next-generation ballistic witness materials for body armor testing / R. Tao, K.D. Rice, A.S. Djakeu, R.A. Mrozek, S.T. Cole, R.M. Freeney, A.M. Forster // *Polymers*. – 2019. – Vol. 11. – P. 447-463. DOI: [10.3390/polym11030447](https://doi.org/10.3390/polym11030447)
156. Roy, R. Comparative study of p-aramid based soft and stiff composite panels for protective application / R. Roy, A. Majumdar, B. S. Butola // *Fibers and Polymers*. – 2019. – Vol.20, No.2. – P. 406-412. DOI: [10.1007/s12221-019-8733-2](https://doi.org/10.1007/s12221-019-8733-2)
157. Sapozhnikov, S.B. Fragment ballistic performance of homogenous and hybrid thermoplastic composites / S.B. Sapozhnikov, O.A. Kudryavtsev, M.V. Zhikharev // *International Journal of Impact Engineering*. – 2015. – Vol. 81. – P. 8-16.
158. Segawa, A. Rolling-deformation characteristics of clad materials determined by model experiment and numerical simulation: experimental rolling tests using plasticine / A. Segawa, T. Kawanami // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1995. – Vol. 47. – P. 375-384.
159. Shaktivesh. Ballistic impact behavior of 2D plain weave fabric targets with multiple layers: Analytical formulation / Shaktivesh, N.S. Nair, N.K. Naik // *International Journal of Damage Mechanics*. – 2015. – Vol. 24, No. 1. – P. 116-150. DOI: [10.1177/1056789514524074](https://doi.org/10.1177/1056789514524074)
160. Shear thickening fluid impregnated ballistic fabric composites for shock wave mitigation / A. Haris, H.P. Lee, T.E. Tay, V.B.C. Tan // *International Journal of Impact Engineering*. – 2015. – Vol. 80. – P. 143-151.
161. Smith, J.C. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading: Part V: Wave propagation in long textile yarns impacted transversely / J.C. Smith, F.L. McCrackin, H.F. Schiefer // *Textile Research Journal*. – 1958. – Vol. 28, No. 4. – P. 288-302. DOI: [10.1177/004051755802800402](https://doi.org/10.1177/004051755802800402)
162. Sockalingam, S. Modeling the fiber length-scale response of Kevlar KM2 yarn during transverse impact / S. Sockalingam, J.W. Gillespie Jr, M. Keefe // *Textile Research Journal*. – 2017. – Vol. 87, No. 18. – P. 2242-2254. DOI: [10.1177/2F0040517516669074](https://doi.org/10.1177/2F0040517516669074)

163. Sofuoglu, H. A new technique used in obtaining true stress-true strain curves for constant strain-rates / H. Sofuoglu // *Experimental Techniques*. – 2003. – Vol. 27. – P. 35-37. DOI: [10.1111/j.1747-1567.2003.tb00105.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2003.tb00105.x)
164. Sofuoglu, H. Determination of friction coefficient encountered in large deformation processes / H. Sofuoglu, H. Gedikli // *Tribology International*. – 2002. – Vol. 35. – P. 27-34.
165. Sofuoglu, H. Flow behavior of Plasticine used in physical modeling of metal forming processes / H. Sofuoglu, J. Rasty // *Tribology International*. – 2000. – Vol. 33. – P. 523-529.
166. Sundararajan, G. The localization of plastic flow under dynamic indentation conditions: I. Experimental results / G. Sundararajan, Y. Tirupataiah // *Acta Materialia*. – 2006. – Vol. 54. – P. 565-575. DOI: [10.1016/j.actamat.2005.09.022](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.09.022)
167. Tan, V.B.C. Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates / V.B.C. Tan, X.S. Zeng, V.P.W. Shim // *International Journal of Impact Engineering*. – 2008. – Vol. 35. – P. 1303-1313. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2007.07.010](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.07.010)
168. Tan, V.B.C. Computational simulation of fabric armour subjected to ballistic impacts / V.B.C. Tan, T.W. Ching // *International Journal of Impact Engineering*. – 2006. – Vol. 32. – P. 1737-1751. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2005.05.006](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.05.006)
169. Tabiei, A. Computational micro-mechanical model of flexible woven fabric for finite element impact simulation / A. Tabiei, I. Ivanov // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2002. – Vol. 53. – P. 1259-1276.
170. Tapie, E. Yarn mobility in woven fabrics – a computational and experimental study / E. Tapie, Y.B. Guo, V.P.W. Shim // *International Journal of Solids and Structures*. – 2016. – Vol. 80. – P. 212-226. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.11.005)
171. The influence of the weaving pattern on the interface friction in aramid fabrics under the conditions of the transverse loading / A.P. Beliaev, T.A. Beliakova, P.V. Chistyakov, A.V. Iniukhin, L.A. Kostyreva, P.A. Mossakovsky, Yu.P. Zezin // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – Vol. 145. – P. 120-127.
172. Thordeman, B. *Armour from the Battle of Wisby: 1361* / B. Thordeman. – Chivalry Bookshelf, 2010. – 664 p.

173. Two new penetration models for ballistic clay incorporating strain-hardening, strain-rate and temperature effects / Y.Q. Li, X.-L. Gao, A.J. Fournier, S.A. Sherman // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 151. – P. 582-594. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2018.11.009](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.009)

174. Yang, Y. Influence of fabric architecture on energy absorption efficiency of soft armour panel under ballistic impact / Y. Yang, X. Chen // *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 224. – No. 111015. DOI: [10.1016/j.compstruct.2019.111015](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111015)

175. Yang, Y. Investigation of energy absorption mechanisms in a soft armor panel under ballistic impact / Y. Yang, X. Chen // *Textile Research Journal*. – 2017. – Vol. 87, No. 20. – P. 2475-2486. DOI: [10.1177/2F0040517516671129](https://doi.org/10.1177/2F0040517516671129)

176. Yarn pull-out as a mechanism for dissipation of ballistic impact energy in Kevlar KM-2 fabric, Part I: Quasi-static characterization of yarn pull-out / K.M. Kirkwood, J.E. Kirkwood, Y.S. Lee, R.G. Egres Jr., E.D. Wetzel, N.J. Wagner // *Textile Research Journal*. – 2004. – Vol. 74, No. 10. – P. 920-928. DOI: [10.1177/2F004051750407401012](https://doi.org/10.1177/2F004051750407401012)

177. Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar® KM-2 fabric: Part II: Predicting ballistic performance / J.E. Kirkwood, K.M. Kirkwood, Y.S. Lee, R.G. Egres Jr., N.J. Wagner, E.D. Wetzel // *Textile Research Journal*. – 2004. – Vol. 74, No. 11. – P. 939-948. DOI: [10.1177/2F004051750407401101](https://doi.org/10.1177/2F004051750407401101)

178. Zulauf, J. Rheology of plasticine used as rock analogue: the impact of temperature, composition and strain / J. Zulauf, G. Zulauf // *Journal of Structural Geology*. – 2004. – Vol. 26. – P. 725-737.

179. Zhang, P. General relationship between strength and hardness / P. Zhang, S.X. Li, Z.F. Zhang // *Materials Science and Engineering: Part A*. – 2011. – Vol. 529. – P. 62-73.

180. Zochowski, P. Numerical methods for the analysis of behind armor ballistic trauma / P. Zochowski // 12th European LS-DYNA Conference 2019 (Koblenz, Germany, 14-16 may 2019). – 2019. – URL: https://www.dynalook.com/conferences/12th-european-ls-dyna-conference-2019/high-speed-impact/zochowski_military_institute_of_armament_technology.pdf/view (дата обращения 10.06.2020).

При определении линейной плотности нитей были взвешено 70 арамидных нитей длиной 210 мм.

№	Масса, г	№	Масса, г	№	Масса, г	№	Масса, г	№	Масса, г
1	0,0067	16	0,0064	31	0,0064	46	0,0066	61	0,0065
2	0,0065	17	0,0062	32	0,0060	47	0,0063	62	0,0065
3	0,0063	18	0,0064	33	0,0064	48	0,0069	63	0,0066
4	0,0066	19	0,0065	34	0,0064	49	0,0066	64	0,0067
5	0,0063	20	0,0066	35	0,0063	50	0,0066	65	0,0066
6	0,0069	21	0,0068	36	0,0066	51	0,0063	66	0,0062
7	0,0065	22	0,0060	37	0,0058	52	0,0063	67	0,0060
8	0,0065	23	0,0065	38	0,0062	53	0,0062	68	0,0060
9	0,0068	24	0,0058	39	0,0061	54	0,0060	69	0,0065
10	0,0067	25	0,0060	40	0,0057	55	0,0061	70	0,0063
11	0,0060	26	0,0058	41	0,0059	56	0,0063		
12	0,0064	27	0,0061	42	0,0058	57	0,0062		
13	0,0060	28	0,0062	43	0,0067	58	0,0065		
14	0,0063	29	0,0064	44	0,0062	59	0,0063		
15	0,0062	30	0,0060	45	0,0061	60	0,0061		

Статистическая обработка массы нитей показала, что математическое ожидание равно 6,3 мкг, дисперсия – $8,24 \cdot 10^{-8}$ мкг², среднеквадратическое отклонение – 0,29 мкг. По критерию Пирсона экспериментальные данные массы распределены по нормальному закону

$$\chi^2 \leq \chi_{0,05}^2$$

$$3,23 \leq 9,49 \quad (\text{П.1})$$

Таким образом, условие (П.1) выполняется, что говорит о том, что данные не противоречат предположению о нормальном распределении массы арамидных

нитей. Гистограмма мгновенных значений и теоретическая плотность распределения представлена на рисунке П.1. Таким образом, линейная плотность нити равна $0,03 \pm 0,001$ мг/м.

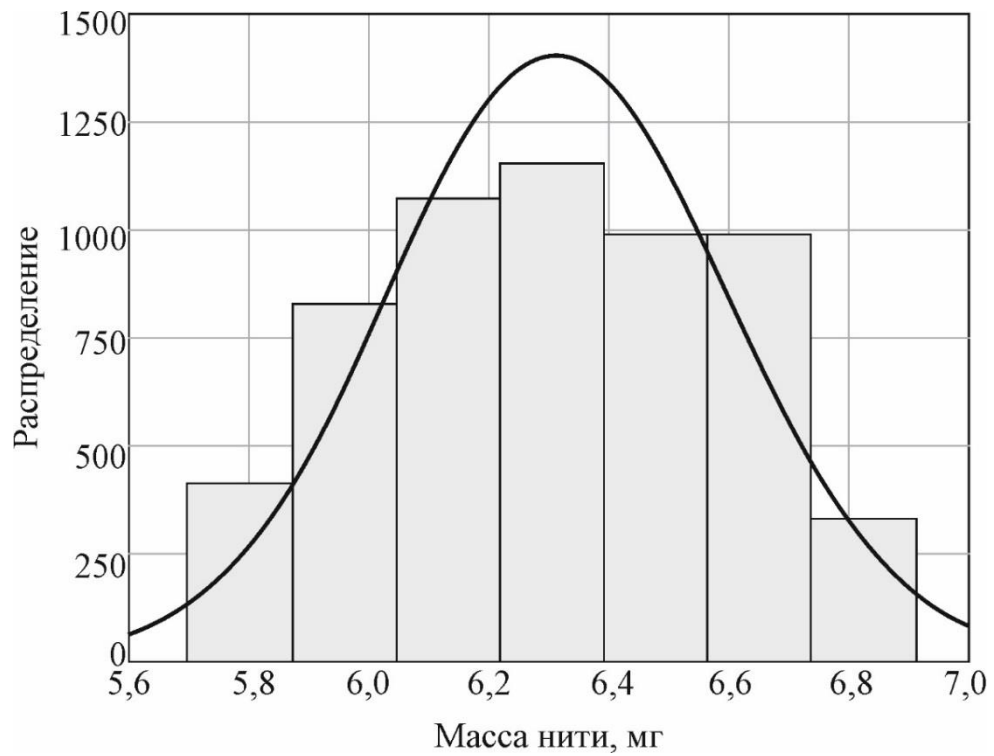


Рисунок П.1. Гистограмма и теоретическая плотность распределения массы нитей



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ФОРТ Технология

Россия, 117342, г. Москва, а/я 17
Тел.: (495) 923-14-17, факс: (499) 922-05-12
e-mail: sales@fort.ru

от 11.03.2020 № 11/03-04

В Диссертационный совет Д 999.211.02

614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаю, что результаты диссертационного исследования Игнатовой А.В. по теме, связанной с локальным ударным воздействием по тканевым структурам, обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы предприятием АО «ФОРТ Технология» при разработке и внедрены в производство новых баллистических структур для средств индивидуальной бронезащиты.

Генеральный директор



С.А. Сахаров