

# Разработка высокоэффективных тканевых защитных преград с использованием суперкомпьютерных вычислений\*

Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников

Южно-Уральский государственный университет

Работа посвящена разработке высокоэффективных тканевых защитных преград с использованием суперкомпьютерных технологий. Проведены численные эксперименты по исследованию масштабируемости задач динамического взаимодействия индентора с тканевыми защитными преградами, расположенными на регистрирующей среде с применением пакета программ LS-DYNA. Даны рекомендации по использованию градиентных структур при проектировании тканевых преград для увеличения их защитных свойств.

## 1. Введение

Бронежилеты по стойкости к воздействию средств поражения подразделяют на классы. В ГОСТ Р 50744-95 представлено 10 классов различных по конструкции бронежилетов: легкие (1 и 2 класса), представляющие собой слоистые тканевые бронепластины (защитные преграды) различной толщины; и комбинированные (от 3 до 6а класса), в которых слоистая тканевая бронепластина усилена с лицевой стороны жесткими элементами из металла или керамики [1]. Современные тенденции проектирования комбинированных бронежилетов высоких уровней защиты требуют, чтобы металл или керамика пробивались, притупляя или разрушая сердечники пуль, снижали их скорость до уровня, соответствующего надежной работе тыльной тканевой бронепластины. Таким образом, тканевые бронепластины, как важный элемент конструкции, должны обеспечить одинаково допустимое травмирование тела человека в бронежилетах любых уровней защиты. Так как объектом исследования в работе является многослойная тканевая бронепластина, то среди уровней угроз в 1-ом и 2-м классах самым опасным средством поражения является пистолет ТТ с пулями массой 5,5 г, калибром 7,62, стальным сердечником и максимальной скоростью 445 м/с.

Согласно американскому стандарту NIJ Standard-0101.06 сертификационные испытания бронежилетов проводят в 2 этапа [2]. На первом этапе определяют баллистический предел  $V_{50}$  – это скорость пули, при которой бронежилет пробивается с вероятностью 50 %. На втором этапе бронежилет располагают на регистрирующей среде (техническом пластилине: Roma Plastilina No.1) проводят обстрел и определяют глубину вмятины в пластилине, которая не должна превышать 44 мм (рис. 1). Всего при сертификационных испытаниях требуется произвести 168 выстрелов в 18 бронепластин.

Тканевые бронепластины могут содержать несколько десятков слоев высокопрочных тканей из арамидных нитей Кевлар (США) или Русар® (Россия) различного типа переплетения (саржа, сатин, полотно и др.) (рис. 2). При ударе пуль в тканевой бронепластине возникают сложные физические явления: динамическое деформирование с распространением ударных волн, большие прогибы, образование и исчезновение множественных фрикционных контактов, вытягивание и разрушение нитей и др. Все это существенно затрудняет теоретический анализ проблемы локального ударного взаимодействия тканевой бронепластины с индентором. Поэтому в настоящее время при разработке новых конструкций бронежилетов, отличающихся меньшей массой и стоимостью, высокой надежностью, опираются, в основном, на натурный многофакторный эксперимент, что приводит к удлинению сроков проектирования и увеличению стоимости этапа доводки (и изделия в целом), не позволяет выявить влияние различных факторов на прочность и уровень травмирования.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-07-96007-р\_урал\_а).



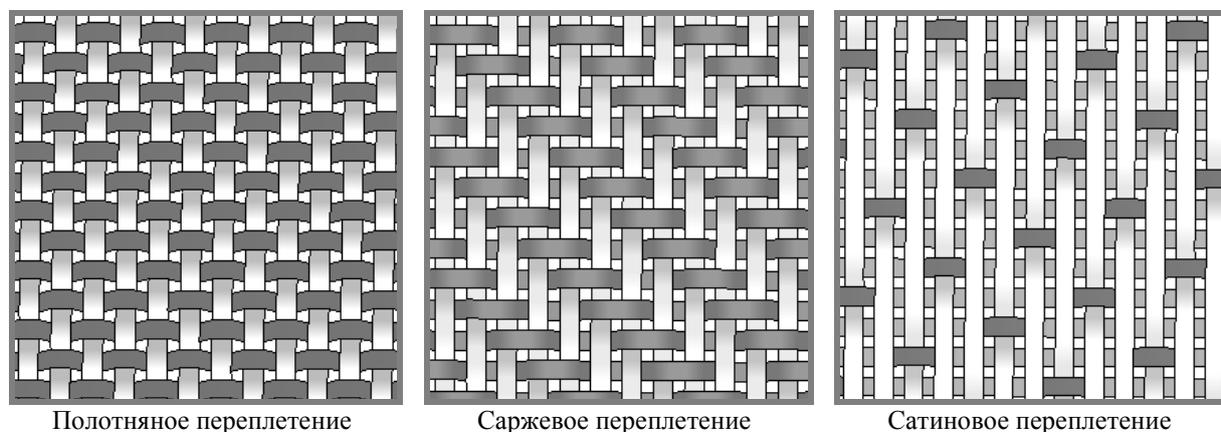
Определение баллистического предела  $V_{50}$

Определение глубины вмятины в регистрирующей среде

1 – многослойная тканевая бронепластина; 2 – регистрирующая среда; W – фактический прогиб (max 44 мм);  $V_0$  – начальная скорость пули;  $V_k$  – скорость пули после пробоя.

**Рис. 1.** Сертификационные испытания бронежилетов

Моделирование тканевых структур прошло несколько стадий развития. Фундаментальной работой в области исследования прочности при интенсивных кратковременных нагрузках является работа Х.А. Рахматулина 1961 года, где рассмотрен удар по прямой гибкой деформируемой незакрепленной нити бесконечной длины (аналитическое решение) [3]. Интенсивное развитие моделирования тканевых структур началось с развитием вычислительной техники и соответствующих прикладных программ. Вначале ткань заменяли ортотропной пластиной [4], затем сетками из ортотропных нитей со связанными узлами [5]. В последнее десятилетие развиваются модели, где моделируется каждая нить [6]. Они ориентированы на пакет конечно-элементного анализа LS-DYNA.



**Рис. 2.** Типы переплетения нитей

В ряде работ используют оболочечную дискретизацию отдельных нитей [7]. Линзообразное поперечное сечение отдельной нити (рис. 3) моделируют несколькими смежными оболочечными элементами с различными толщинами (рис. 4). Однако в таких моделях оболочечные элементы с различными толщинами имеют разрыв в соответствующих граничных условиях и затруднена формулировка условий контакта нитей.

Нити в ткани разбивают также и на объемные конечные элементы (рис. 4) [8]. Преимущество дискретизации объемными элементами перед оболочечными с разными толщинами – это сглаживание плоскости поперечного сечения. Однако такие модели тканей при реальных размерах бронежилетов порядка 30x30 см имеют чрезвычайно большую размерность, что не позволяет рассчитывать слоистые тканевые бронепластины с немногими слоями ткани даже с использованием современных суперкомпьютеров.

Таким образом, задачей исследования было создать малопараметрическую модель ткани, которая бы позволила рассчитать на суперкомпьютере бронежилеты реальных размеров

(30x30 см) с реальным количеством слоев (десятки) для замены большего числа натуральных экспериментов виртуальными.

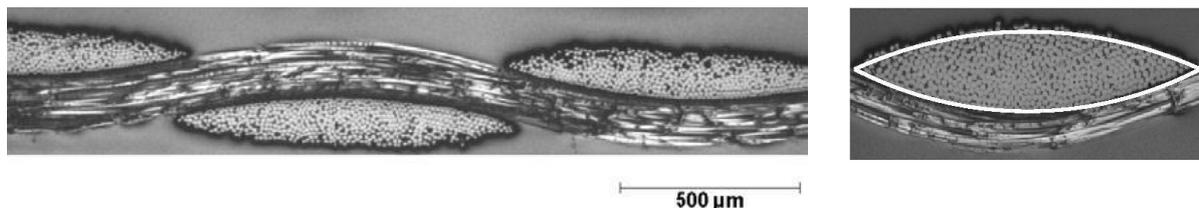
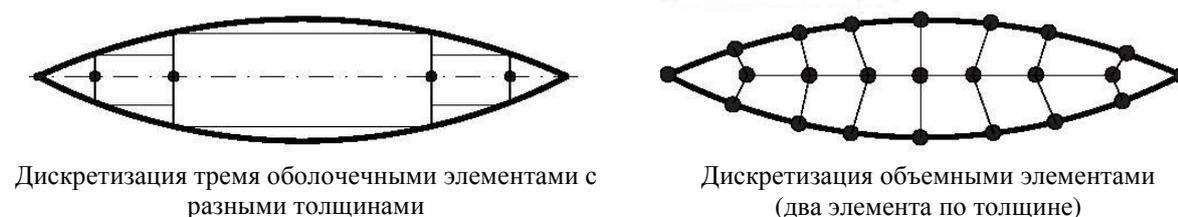


Рис. 3. Фотография баллистической ткани, разрезанной в плоскости



Дискретизация тремя оболочечными элементами с разными толщинами

Дискретизация объемными элементами (два элемента по толщине)

Рис. 4. Дискретизация нитей

В настоящей статье мы рассматриваем моделирование динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами размером 30x30 см с разным количеством слоев на вычислительном кластере «СКИФ Урал». Статья организована следующим образом. В разделе 2 приведена постановка задачи. В разделе 3 описываются методы исследования, и приводится описание задачи. В разделе 4 обсуждаются результаты проведенных экспериментов на вычислительном кластере. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

## 2. Постановка задачи

Проведено суперкомпьютерное моделирование натуральных экспериментов, которые проводятся при сертификации бронежилетов:

- согласно американскому стандарту NIJ Standard-0101.06 часть выстрелов должно быть сделано под углом  $30^\circ$  к нормали поверхности ткани [2];
- определение баллистического предела;
- удар пуль в тканевую преграду, расположенную на пластилиновом основании.

При этом были рассмотрены тканевые преграды трех типов переплетения (рис. 2) состоящих из разного количества слоев ткани размером 30x30 см. В работе использована арамидная ткань Русар®. В расчетной модели нити имеют относительную свободу перемещения с возможностью вытягивания с учетом сухого трения. Рассматривали нити, которые имеют прямоугольное поперечное сечение и были представлены одним оболочечным элементом по ширине с одной точкой интегрирования по толщине и выполнены из ортотропного материала с малыми поперечно-сдвиговыми свойствами. Нити в расчетной модели могли разрушаться. В одних расчетах края ткани не были закреплены, в других тканевая преграда располагалась на неподвижном пластилиновом основании. В расчете индентор имел форму цилиндра с полусферическим основанием диаметром 7 мм, массой 5,5 г, с начальной скоростью 445 м/с (имитация пули пистолета ТТ) и был выполнен из абсолютно жесткого материала.

## 3. Методы исследования

Чтобы снизить размерность задачи при расчете, геометрия нитей была предельно упрощена. Криволинейная ось нити была заменена ломаной, с прямолинейными горизонтальными и наклонными участками (рис. 5). Повторяющиеся элементы тканей показаны на рис. 5, где отмечены номера ключевых точек, координаты которых были введены в программу ANSYS, после чего по ключевым точкам были заданы соответствующие поверхности. Далее набор поверхностей был размножен до получения необходимых размеров модели, после чего была построена сетка конечных элементов (рис.6).

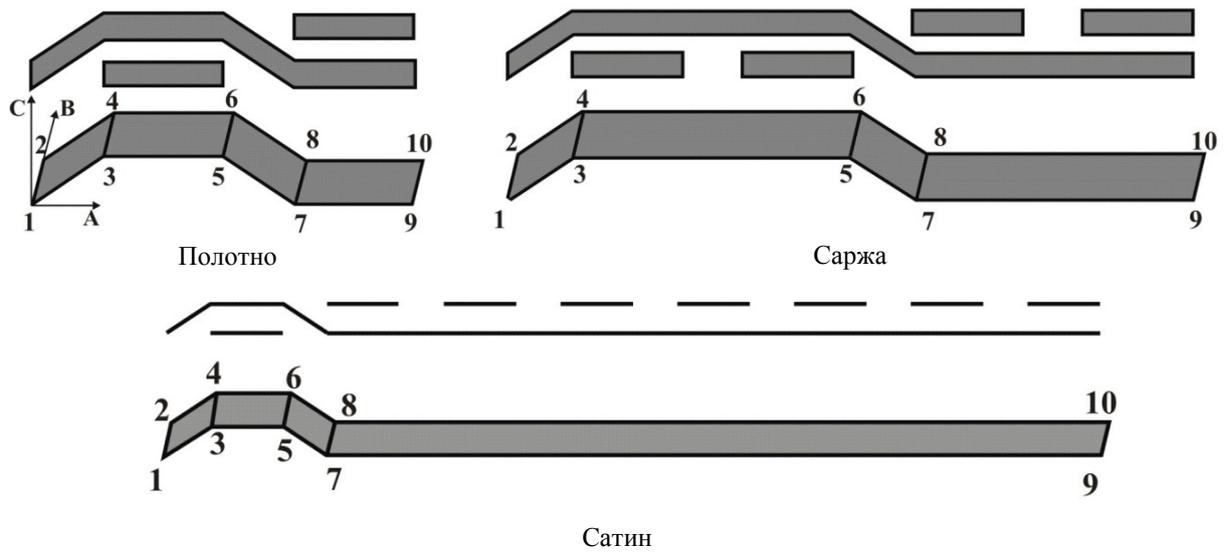


Рис. 5. Повторяющиеся элементы

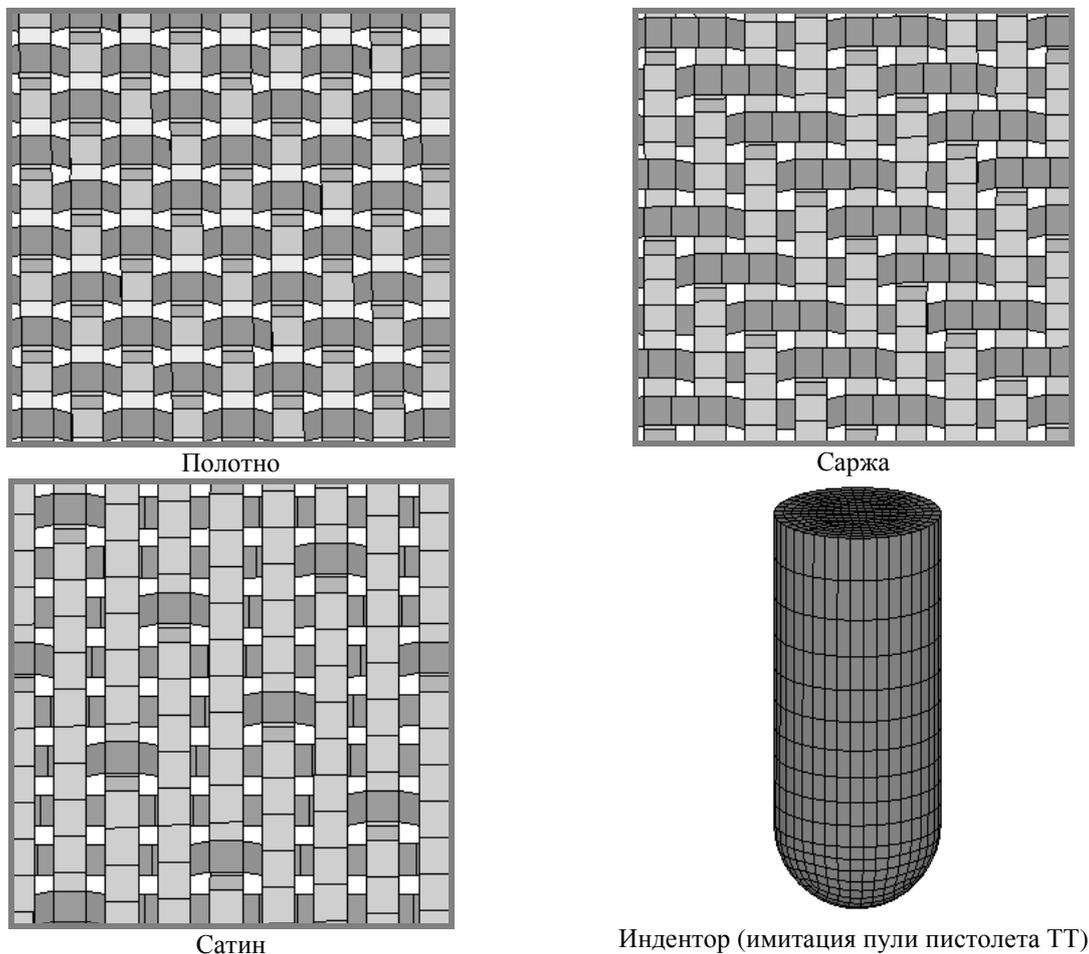


Рис. 6. Сетка конечных элементов

В пакете программ LS-DYNA представлено более сотни моделей материала [9], наиболее интересными для нас были малопараметрические модели, их анализ показал, что для нитей наиболее подходит материал \*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE, позволяющий задать ортотропные свойства нитей и учесть разрушение при достижении первого главного на-

пряжения пределу прочности нитей (3 ГПа). Характеристики нитей для ввода в программу LS-DYNA приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики нитей

Параметр	Обозначение	Величина
Толщина нити, мкм	$T$	100
Ширина нити, мкм	$D$	500
Модули упругости, МПа	$E_x$	$1,4 \cdot 10^5$
	$E_y$	$1,4 \cdot 10^3$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	1 440
Коэффициент Пуассона	$\mu_{xy}$	0,3
Модули сдвига, МПа	$G_{xy}$	$1,4 \cdot 10^3$
	$G_{yz}$	$1,4 \cdot 10^3$
	$G_{zx}$	$1,4 \cdot 10^3$

В конечно-элементной модели ткани нити имеют относительную свободу перемещения и возможность вытягивания с учетом сухого трения. Контакт объектов моделировали командой \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE с коэффициентом сухого трения 0,4, характерным для арамидных нитей [10].

Материал технического пластилина считали упругопластическим с зависимостью предела текучести от скорости деформирования. Из списка материалов, заложенных в библиотеку пакета LS-DYNA, для технического пластилина был выбран \*MAT\_STRAIN\_RATE\_DEPENDENT\_PLASTICITY, который позволяет учесть зависимость предела текучести от скорости деформирования в табличном виде.

Механические свойства нитей и тканей определены экспериментально на универсальной испытательной машине Instron 5882. Из экспериментов на низкоскоростной удар были получены механические свойства технического пластилина [11].

Стальной индентор при взаимодействии с тканевой пластиной при скоростях до 600 м/с не разрушается и не имеет пластических деформаций, поэтому для сокращения времени расчетов для него был выбран материал \*MAT\_RIGID (жесткое тело) с плотностью  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup> и модулем упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па.

Верификация моделей ткани и технического пластилина была проведена ранее в работе [11], результаты численных расчетов отлично согласуются с экспериментальными исследованиями. Способы декомпозиции модели тканевой преграды при расчете на суперкомпьютере рассмотрены в нашей работе [12], минимальное время расчета получается при разбиении модели на прямоугольные области, проходящие через всю толщину бронепластины.

#### 4. Результаты исследований и их анализ

Расчеты были проведены на высокопроизводительном вычислительном кластере «СКИФ Урал» [13], оснащенном 166 вычислительными узлами с 2 процессорами Intel Xeon E5472 (4 ядра по 3.0 ГГц) и 8 ГБ оперативной памяти на каждом узле.

Вначале было проведено моделирование динамического взаимодействия одного слоя ткани размером 30x30 см сатинового переплетения с индентором, имитирующим пулю пистолета ТТ и ударяющим в центр ткани под углами 0-60° к нормали (при этом нити не разрушались) (рис. 7).

Было получено, что наиболее опасным случаем является удар под углом 30°. Были также проведены расчеты при отсутствии трения между индентором и тканью, получено, что при этом самым опасным случаем является удар под 0° к нормали.

Для определения баллистического предела  $V_{50}$  были проведены экспериментальные исследования динамического нагружения 10 слоев ткани сатинового переплетения размером 30x30 см шариком диаметром 8 мм, массой 2 г. Скорость шарика варьировалась от 200 до 600 м/с. Были измерены начальная скорость шарика и скорость после пробоя.

После проведения натурных испытаний были проведены расчетные исследования по замеру скорости после пробоя 10 слоев ткани сатинового переплетения размером 30x30 см инден-

тором сферической формы диаметром 8 мм, массой 2 г. В этих расчетах для экономии машинных ресурсов предложена концепция замены многослойной тканевой бронепластины (10 слоев) на эквивалентную по массе двух- или трехслойную бронепластину (рис. 8). Модельные слои имели увеличенную, по сравнению с реальными, толщину (и массу) нитей. Различие расчетных и экспериментальных данных баллистического предела и остаточных скоростей для всех случаев не превысило 4%.

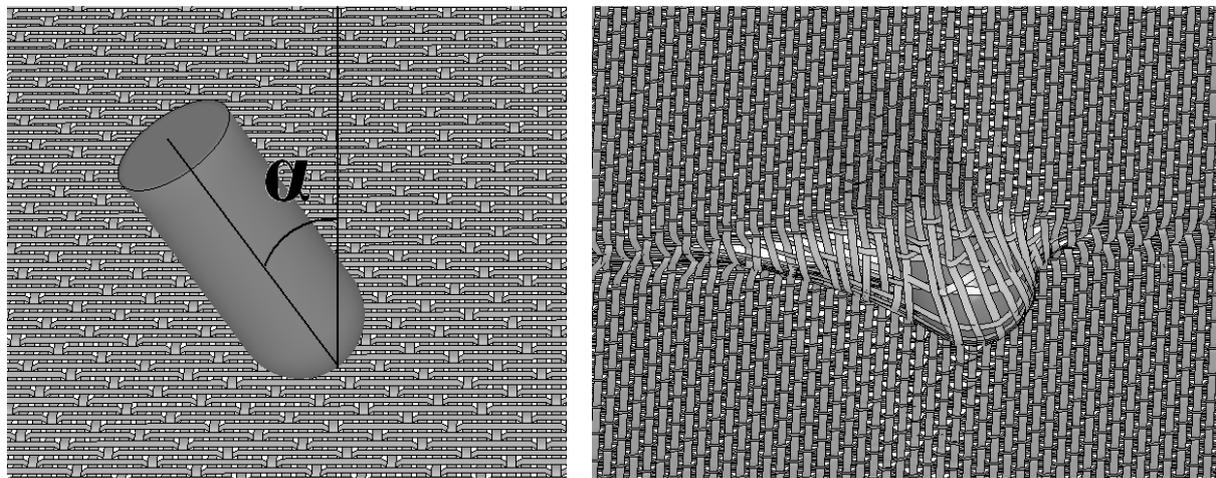


Рис. 7. Удар индентором в ткань под углом  $30^\circ$  к нормали

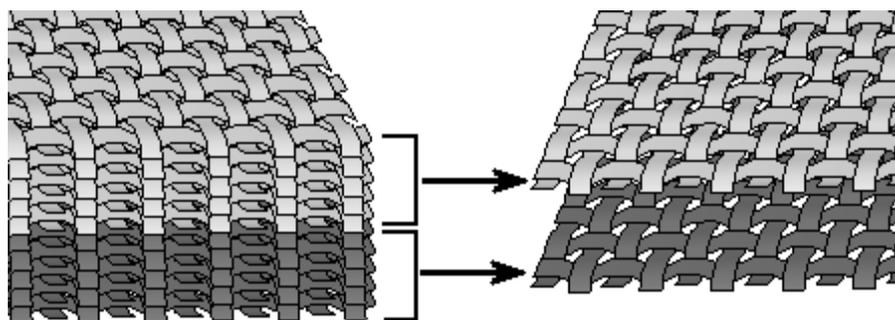


Рис. 8. Замена многослойной бронепластины эквивалентной по массе двухслойной бронепластиной

На рис. 9 показан пробой 2-х эквивалентных слоев ткани сатинового переплетения.

На кластере «СКИФ Урал» были проведены расчеты по обстрелу инденторами (имитация пули пистолета ТТ) четырех различных тканевых бронепластин размером 30x30 см с удельной массой  $10 \text{ кг/м}^2$ , расположенных на основании из технического пластилина. Скорость удара 445 м/с. Реальная многослойная (60 слоев) бронепластина была заменена 5-ю эквивалентными по массе слоями (это максимальное количество слоев, которое удалось рассчитать).

- В первом случае была рассмотрена бронепластина, состоящая только из тканей полотняного переплетения.
- Во втором – из тканей саржевого переплетения.
- Третья бронепластина имела 1/3 (по массе) наружных слоев полотняного переплетения, 1/3 средних слоев саржевого и 1/3 нижних – сатинового переплетения.
- Четвертая – 1/3 наружных слоев сатинового переплетения, 1/3 средних слоев саржевого и 1/3 нижних полотняного переплетения (рис. 10).

Было проведено измерение глубины вмятины оставленной четырьмя различными бронепластинами в основании из технического пластилина. В результате было получено, что минимальный размер вмятины получается при использовании 4-го типа бронепластины (рис. 11).

Затем был проведен расчет пятой бронепластины (аналог четвертой), в которой 1/3 верхних слоев сатинового переплетения располагались с зазором в 5 мм (выше остальных слоев на 5 мм). Было получено, что глубина вмятины меньше на 15%, чем при использовании этого же

пакета без зазора. Очевидно, силы трения нитей в наружном пакете совершили большую работу.

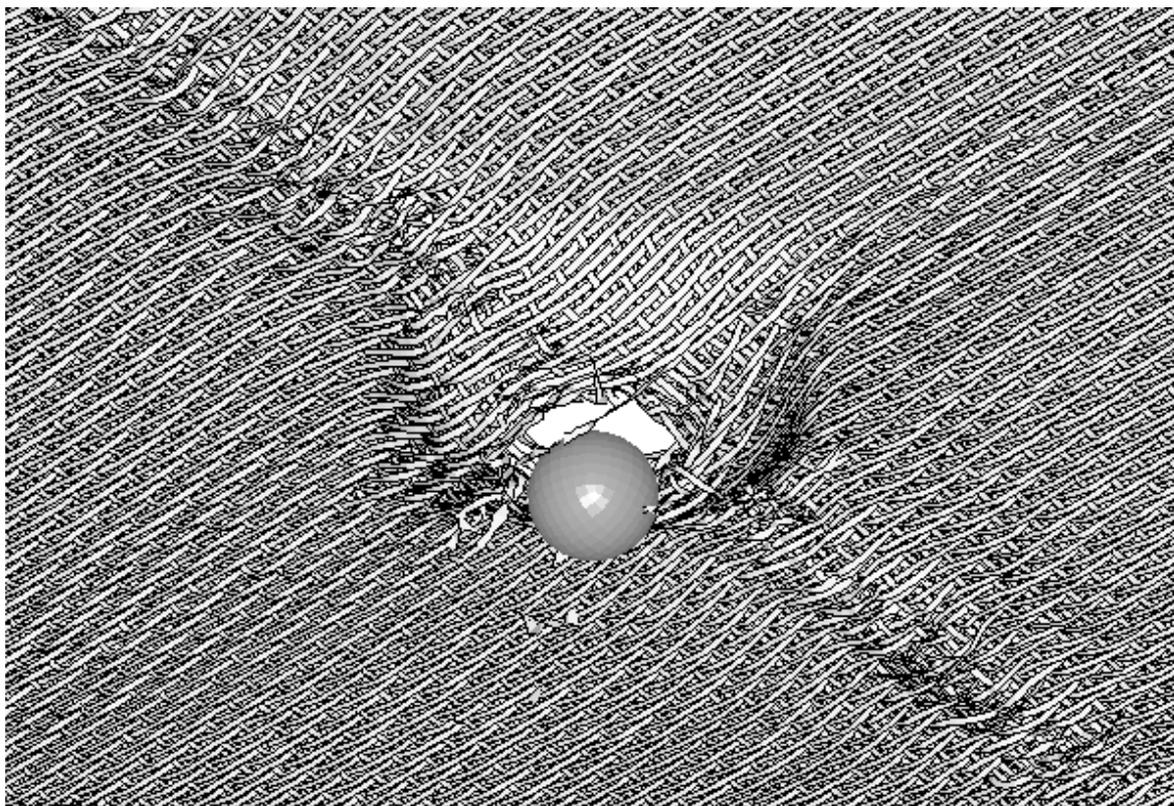


Рис. 9. Картина пробоя двух эквивалентных слоев ткани размером 30х30 см сатинового переплетения

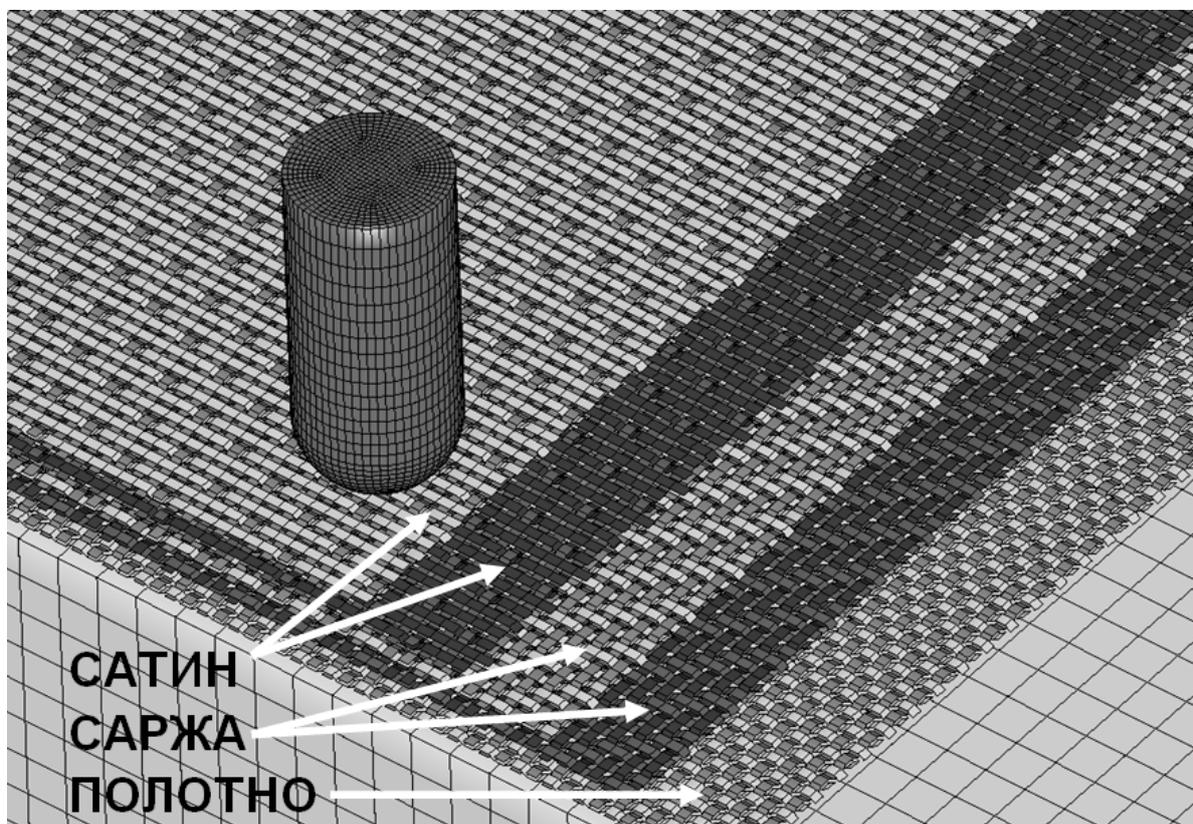
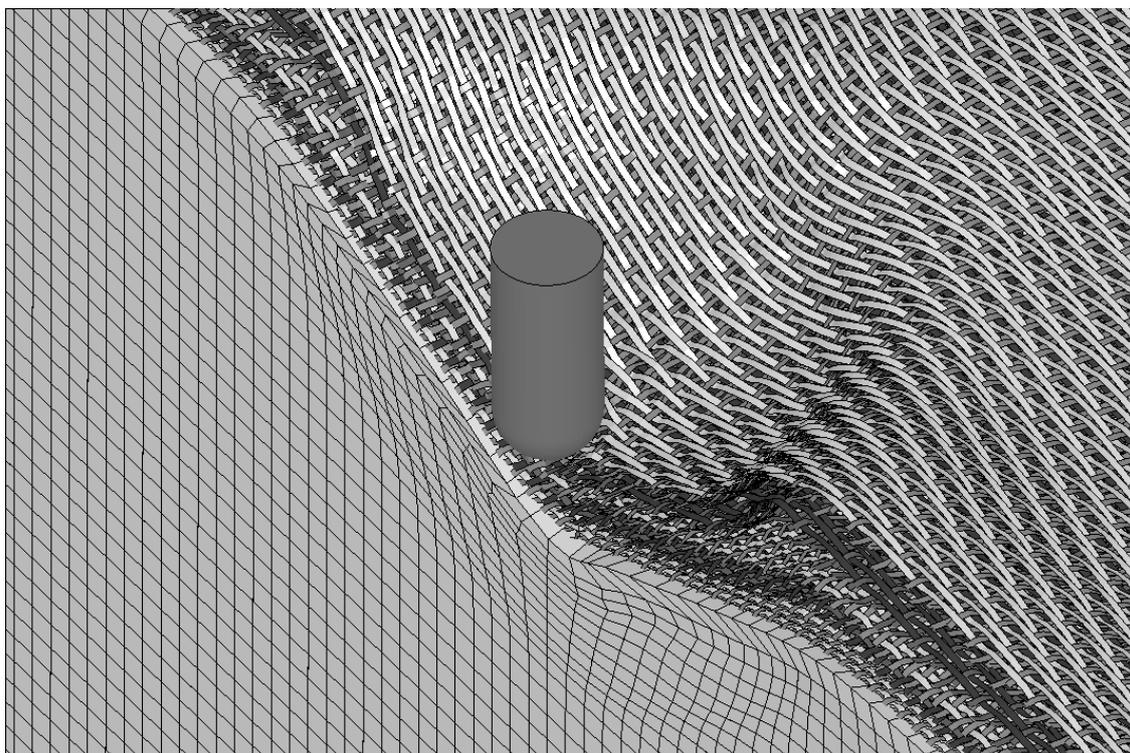


Рис. 10. Бронепластина: сатин-саржа-полотно

Максимальное количество конечных элементов было в задаче, где вся бронепластина состояла из тканей полотняного переплетения и оно равнялось 2 973 960. График ускорения для данной задачи представлен на рис. 12, а время расчета в табл. 2. Данную задачу удалось считать максимум на 80 ядрах.

Общая рекомендация такова: для повышения эффективности работы бронезилетов необходимо использовать градиентные структуры. В них верхние слои должны иметь меньшую искривленность нитей (например, сатин), напряжения в нитях тканей такого переплетения меньше, чем в тканях с саржевым и полотняным переплетениями; коэффициент трения в верхних слоях должен быть снижен, чтобы уменьшить влияние на прочность нитей сверхзвукового удара в начальной фазе контакта с индентором; тыльные слои должны быть выполнены из тканей с максимальной искривленностью, например, с полотняным переплетением и высоким коэффициентом трения между нитями, чтобы увеличить энергию на вытягивание нитей; между наружными и тыльными слоями бронезилета, рационально выполнить зазор, чтобы дополнительно снизить скорость пули за счет потерь на трение при вытягивании нитей в наружных слоях.



**Рис. 11.** Бронепластина: сатин-саржа-полотно после удара

**Таблица 2.** Время расчета

№	Количество ядер	Время расчета, сек
1	24	69 735
2	32	63 637
3	40	55 811
4	48	44 176
5	56	38 402
6	64	31 965
7	72	29 432
8	80	27 846

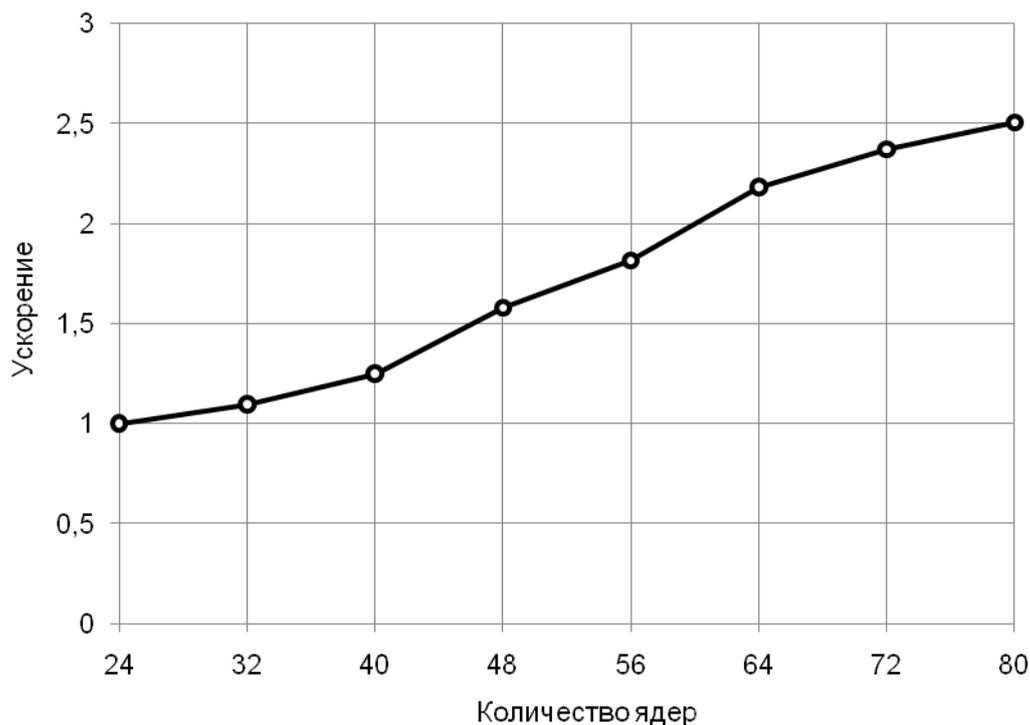


Рис. 12. Ускорение

## 5. Заключение

1. Разработаны малопараметрические модели тканевых структур, позволившие построить простейшую адекватную модель ткани с плоским переплетением (полотно, саржа, сатин).

2. Рассмотрены несколько случаев динамического нагружения индентором одного слоя ткани сатинового переплетения размером 30x30 см под разными углами к нормали. Самым опасным оказался случай в 30° к нормали, но если снизить до нуля коэффициент трения между тканью и индентором, то самым опасным будет случай нагружения по нормали.

3. Для более эффективного использования компьютерных ресурсов впервые была предложена концепция замены группы слоев в многослойной тканевой бронепластине эквивалентной по массе двух- или трехслойной бронепластиной, в которой слои имеют возможность разрушения.

4. Численные и экспериментальные данные при определении баллистического предела хорошо согласуются между собой (разница не превышает 4% для всех рассмотренных случаев).

5. При разработке новых более эффективных по запреградной энергии бронезилетов необходимо использовать градиентные структуры: в верхних слоях нити должны быть минимально искривлены, т.к. напряжения в более прямых нитях ниже, чем в более искривленных; коэффициент трения в верхних слоях должен быть снижен, чтобы уменьшить влияние сверхзвукового удара; тыльные слои должны быть выполнены из тканей с сильно искривленными нитями и высоким коэффициентом трения, чтобы увеличить энергию на вытягивание нитей; между наружными и тыльными слоями бронезилета нужно сделать зазор, чтобы снизить скорость пули за счет вытягивания нитей в наружных слоях.

6. Результаты данных исследований были внедрены в ЗАО «ФОРТ Технология» (г. Москва). Экономический эффект реализации расчетного проекта для предприятия выражается в одновременном снижении расходов на экспериментальную отработку за счет переноса центра тяжести на виртуальное прототипирование, а в итоге – на получение снижения массы бронезилета и его себестоимости.

## Литература

1. ГОСТ Р 50744 – 95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. Прин. Постановлением Госстандарта России от 09.09.98 № 345. Введ. с изм. № 1 (01.01.1999). – М., 1995.
2. National Institute of Technology Standard, NIJ Standard 0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor, July 2008.
3. Рахматуллин Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 339 с.
4. Lim C.T., Shim V.P.W., Ng Y.H. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor // *International Journal of Impact Engineering*. 2003. Vol. 28. P. 13-31.
5. Tan V.B.C., Shim V.P.W., Tay T.E. Experimental and numerical study of the response of flexible laminates to impact loading // *International Journal of Solids and Structures*. 2003. Vol. 40. P. 6245-6266.
6. Chocron S., Figueroa E., King N., Kirchdoerfer T., Nicholls A.E., Sagebiel E., Weiss C., Freitas C.J. Modeling and validation of full fabric targets under ballistic impact // *Composites Science and Technology*. 2010.
7. Blankenhorn G., Schweizerhof K., Finckh H. Improved Numerical Investigations of a Projectile Impact on a Textile Structure // 4<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference: Proceedings of the European Users Conference (22-23 May 2003, Ulm). 2003. P. G-I-07 – G-I-14.
8. Talebi H., Wong S.V., Hamouda A.M.S. Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric // *Composite Structures*. 2009. Vol. 87. No. 4. P. 314-320.
9. LS-DYNA Keyword user's manual. v.970. LSTC, 2003. - 1564p.
10. Martinez M.A., Navarro C., Cortes R., Rodriguez J., Sanchez-Galvez V. Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics // *Journal of materials science*. – 1993. – Vol. 28. – P. 1305 – 1311.
11. Долганина, Н.Ю. Оценка баллистического предела и прогиба многослойных тканевых пластин при ударе индентором // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2010. – Вып. 15. – № 10(186). – С. 17 – 23.
12. Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б., Маричева А.А. Моделирование ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека на вычислительном кластере «СКИФ Урал» // *Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии*. – 2010. – Т. 11. – С. 117 – 126.
13. Высокопроизводительный вычислительный кластер «СКИФ Урал»: [[http://supercomputer.susu.ru/computers/ckif\\_ural/](http://supercomputer.susu.ru/computers/ckif_ural/)].