

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТКАНЕВЫХ БРОНЕПАНЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников

DESIGN OF NEW CONSTRUCTIONS OF TEXTILE ARMOR PANEL USING SUPERCOMPUTING

N. Yu. Dolganina, S.B. Sapozhnikov

Рассматривается проектирование новых конструкций тканевых бронепанелей с использованием суперкомпьютерных вычислений. Проведены численные эксперименты по исследованию масштабируемости задач динамического взаимодействия индентора с тканевыми защитными преградами, расположенными на регистрирующей среде с применением пакета программ LS-DYNA. Были даны рекомендации по увеличению защитных свойств бронепанелей.

Ключевые слова: тканевая бронепанель, регистрирующая среда, удар, конечно-элементная модель, суперкомпьютерное моделирование.

Design of new constructions of textile armor panel using supercomputing is considered. Numerical experiments were conducted to study the scalability of problems devoted to the dynamic interaction of an indenter with textile armor panels which are located on the backing material by the finite element analysis in the framework of the LS-DYNA software package. Recommendations to increase the protective properties of armor panels have been given.

Keywords: textile armor panel, backing material, impact, FEA model, supercomputer simulation.

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 бронепанели различной толщины; и комбинированные (от 3 до 6а класса), в которых слоистая тканевая бронепанель 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 бронепанели. Таким образом, тканевые бронепанели, 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 бронепанель, то среди уровней угроз в 1-м 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. Всего при сертификационных испытаниях требуется произвести 168 выстрелов в 18 бронепанелей.

Тканевые бронепанели могут содержать несколько десятков слоев высокопрочных тканей из арамидных нитей Кевлар (США) или Русар (Россия) различного типа переплетения (саржа, сатин, полотно и др.) (рис. 1). При ударе пулей в тканевой бронепанели 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 бронепанели 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 позволяя выявить влияние различных факторов на прочность и уровень травмирования.

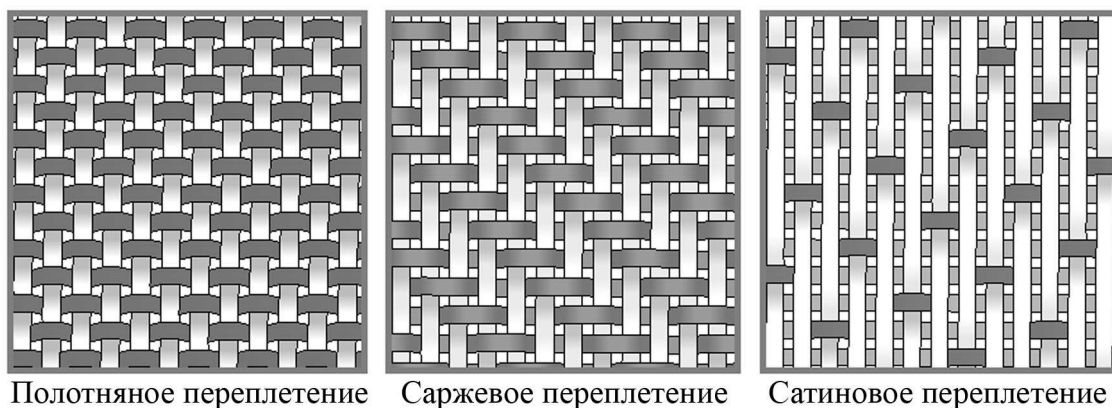


Рис. 1. Типы переплетения нитей

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.

В ряде работ используют оболочечную дискретизацию отдельных нитей [7]. Линзообразное поперечное сечение отдельной нити (рис. 2) моделируют несколькими смежными оболочечными элементами с различными толщинами. 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 [8]. Преимущество дискретизации объемными элементами перед оболочечными с разными толщинами – это

сглаживание плоскости поперечного сечения. Однако такие модели тканей при реальных размерах бронежилетов порядка 30×30 см имеют чрезвычайно большую размерность, что не позволяет рассчитывать слоистые тканевые бронепанели 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 (30×30 см) с реальным количеством слоев (десятки) для замены большего числа натуральных экспериментов виртуальными.

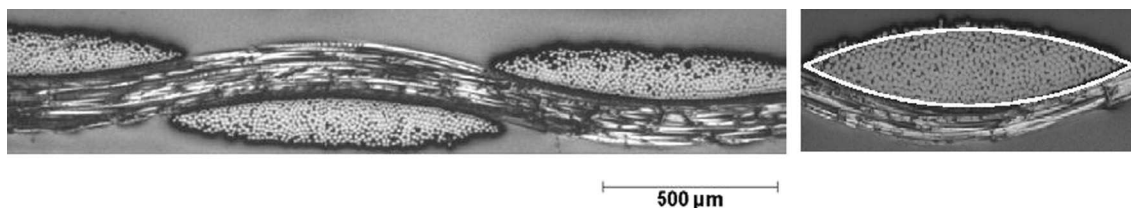


Рис. 2. Фотография баллистической ткани, разрезанной в плоскости

В настоящей статье мы рассматриваем моделирование динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами размером 30×30 см с разным количеством слоев на вычислительном кластере «СКИФ Урал» и суперкомпьютере «СКИФ – Аврора ЮУрГУ». Статья организована следующим образом. В разделе 1 приведена постановка задачи. В разделе 2 описываются методы исследования, и приводится описание задачи. В разделе 4 обсуждаются результаты проведенных численных экспериментов. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

1. Постановка задачи

Проведено суперкомпьютерное моделирование натуральных экспериментов, которые проводятся при сертификации бронежилетов [2]:

- выстрелы под углом 30° к нормали поверхности ткани;
- определение баллистического предела;
- удар пульей в тканевую преграду, расположенную на пластилиновом основании.

При этом были рассмотрены тканевые преграды трех типов переплетения (рис. 1) состоящих из разного количества слоев ткани размером 30×30 см. В работе использована араидная 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.

2. 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. 3). Повторяющиеся элементы тканей показаны на рис. 3, 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. 4).

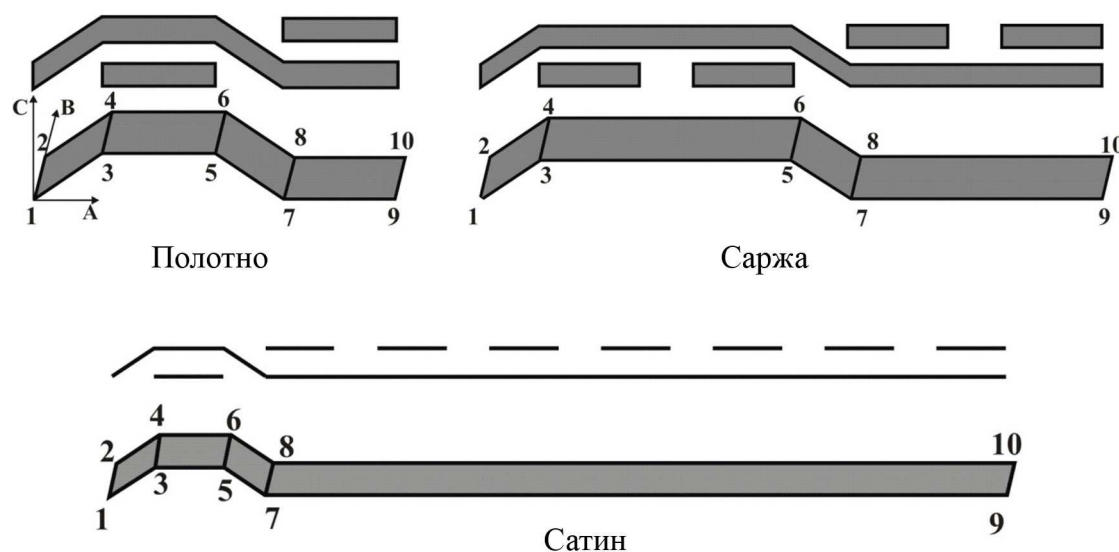


Рис. 3. Повторяющиеся элементы

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 напряжения пределу прочности нитей (3 ГПа). Характеристики нитей для ввода в программу LS-DYNA: толщина нити $T = 100$ мкм, ширина нити $D = 500$ мкм, модули упругости $E_x = 1,4 \cdot 10^5$ МПа и $E_y = 1,4 \cdot 10^3$ МПа, плотность $\rho = 1440$ кг/м³, коэффициент Пуассона $\mu_{xy} = 0,3$, модули сдвига $G_{xy} = G_{yz} = G_{zx} = 1,4 \cdot 10^3$ МПа.

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 бронепанелью 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 $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ и модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

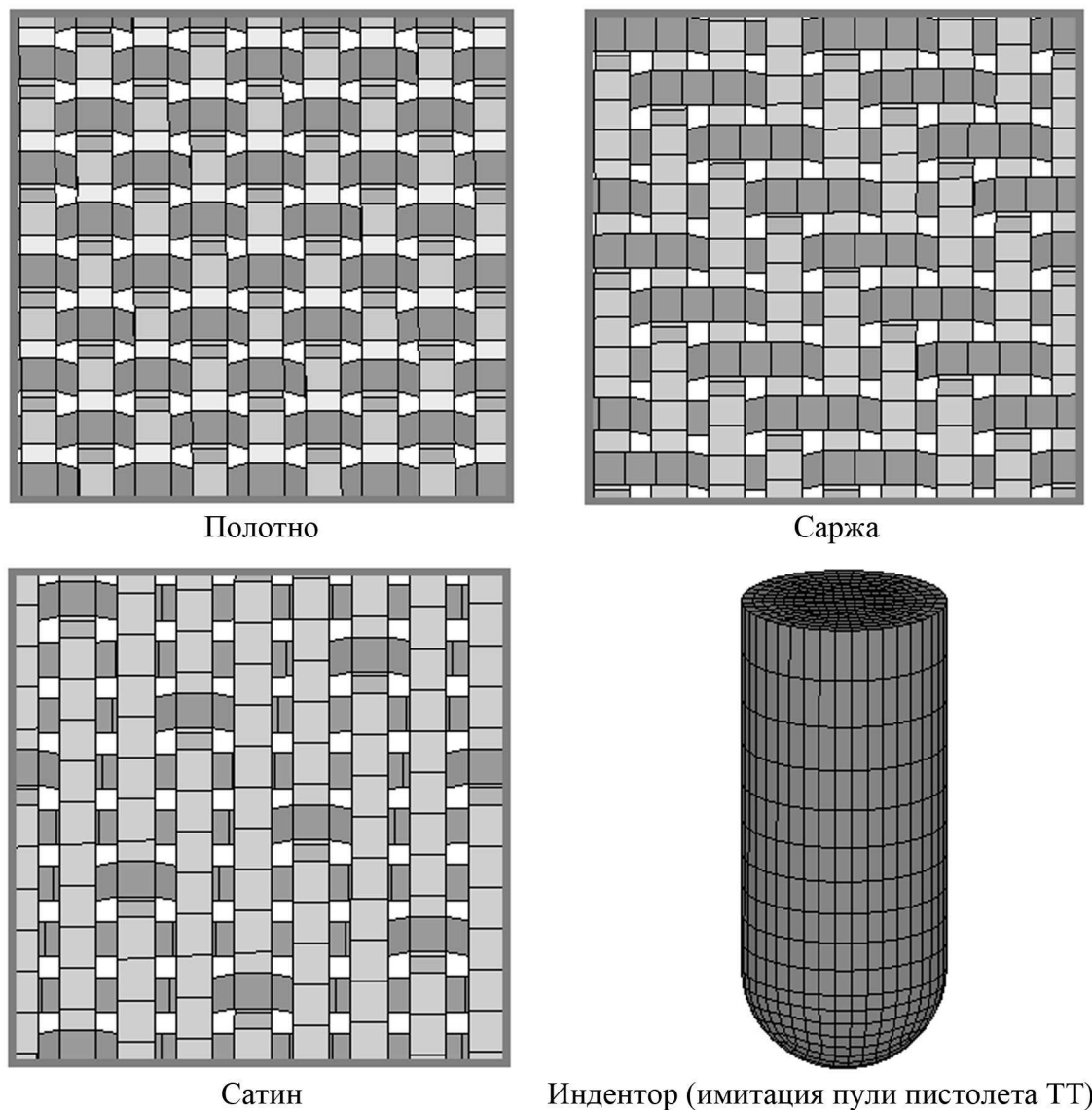


Рис. 4. Сетка конечных элементов

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

3. Результаты исследований и их анализ

Расчеты были проведены на высокопроизводительном вычислительном кластере «СКИФ Урал» [13], а также на суперкомпьютере «СКИФ – Аврора ЮУрГУ» [14].

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

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 30×30 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 натуральных испытаний были проведены расчетные исследования по замеру скорости после пробоя 10 слоев ткани сатинового переплетения размером 30×30 см индентором сферической формы диаметром 8 мм, массой 2 г. В этих расчетах для экономии машинных ресурсов предложена концепция замены многослойной тканевой бронепанели (10 слоев) на эквивалентную по массе двух- или трехслойную бронепанель (рис. 5). 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 %.

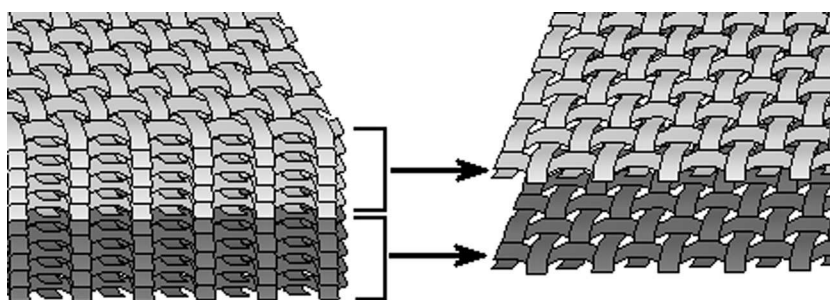


Рис. 5. Замена многослойной бронепанели эквивалентной по массе двухслойной бронепанелью

На кластере «СКИФ Урал» были проведены расчеты по обстрелу инденторами (имитация пули пистолета ТТ) четырех различных тканевых бронепанелей размером 30×30 см с удельной массой 10 кг/м^2 , расположенных на основании из технического пластилина. Скорость удара 445 м/с. Реальная многослойная (60 слоев) бронепанель была заменена пятью эквивалентными по массе слоями (это максимальное количество слоев, которое удалось рассчитать).

- В первом случае была рассмотрена бронепанель, состоящая только из тканей полотняного переплетения.
- Во втором – из тканей саржевого переплетения.
- Третья бронепанель 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.

Было проведено измерение глубины вмятины, оставленной четырьмя различными бронепанелями в основании из технического пластилина. В результате было получено, что минимальный размер вмятины получается при использовании четвертого типа бронепанели (рис. 6).

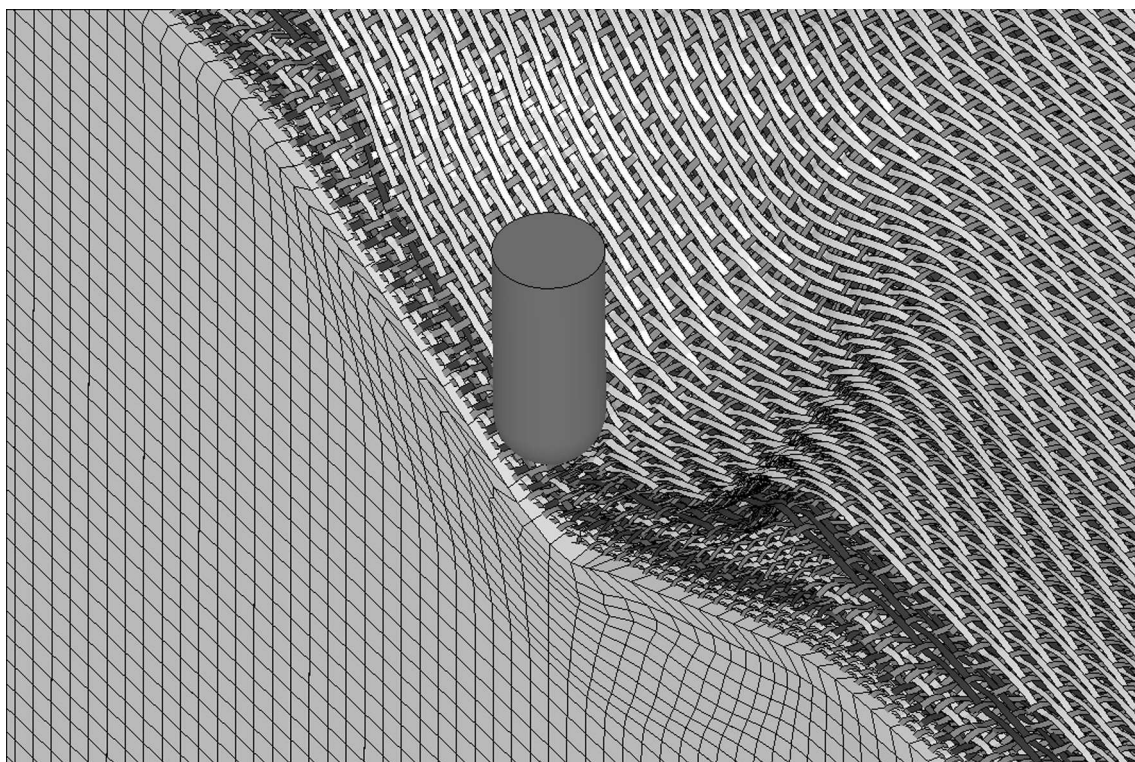


Рис. 6. Бронепанель: сатин – саржа – полотно после удара

Затем был проведен расчет пятой бронепанели (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 этой же бронепанели без зазора. Очевидно, силы трения нитей в наружных слоях совершили большую работу.

Общая рекомендация такова: для повышения эффективности работы бронежилетов необходимо использовать градиентные структуры. В них верхние слои должны иметь меньшую искривленность нитей (например, сатиновое переплетение), 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 бронежилета, рационально выполнить зазор, чтобы дополнительно снизить скорость пули за счет потерь на трение при вытягивании нитей в наружных слоях.

Максимальное количество конечных элементов было в задаче, где вся бронепанель состояла из тканей полотняного переплетения, и оно равнялось 2 973 960. График ускорения для данной задачи, решенной на вычислительном кластере «СКИФ Урал» и суперкомпьютере «СКИФ – Аврора ЮУрГУ» представлен на рис. 7, а время расчета в табл. 1.

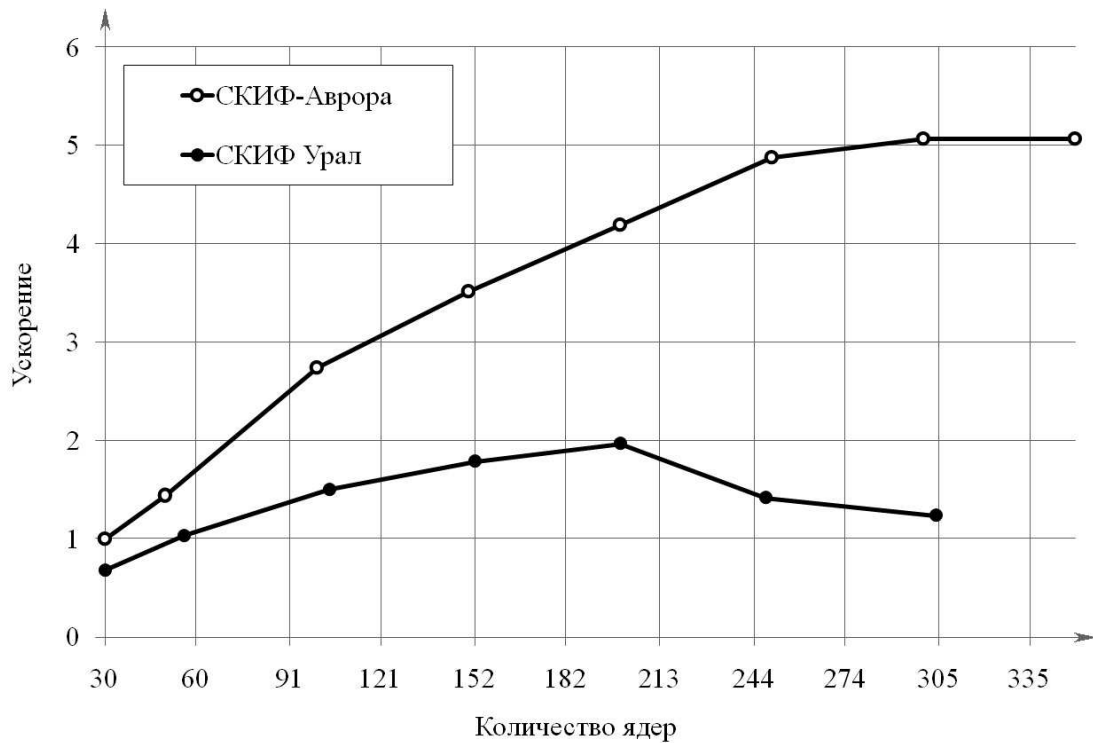


Рис. 7. Ускорение

Таблица 1

Время расчета

Количество ядер	Время расчета на «СКИФ – Аврора ЮУрГУ», с	Время расчета на «СКИФ Урал», с
30	13 368	19 536
50	9 308	–
56	–	12 959
100	4 874	–
104	–	8 886
150	3 797	–
152	–	7 491
200	3 188	6 803
248	–	9 437
250	2 738	–
300	2 636	–
304	–	10 831
350	2 636	–

На графике ускорения видно, что при расчете на вычислительном кластере «СКИФ Урал» падение ускорения наблюдается при распределении задачи более чем на 200 процессорных ядер, а при расчете на суперкомпьютере «СКИФ – Аврора ЮУрГУ» – при распределении задачи более чем на 300 процессорных ядер. Проведенные эксперименты показали, что во всех случаях время расчета задачи на суперкомпьютере «СКИФ – Аврора ЮУрГУ» значительно ниже времени расчета на вычислительном кластере «СКИФ Урал».

4. 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 30×30 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 бронепанели эквивалентной по массе двух- или трехслойной бронепанелью, 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 бронежилетов 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 бронежилета нужно сделать зазор, чтобы снизить скорость пули за счет вытягивания нитей в наружных слоях.

6. Результаты данных исследований были внедрены в ЗАО «ФОРТ Технологии» (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 бронежилета и его себестоимости.

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-07-96007-р_урал_a)

Статья рекомендована к публикации программным комитетом международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии 2011».

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, 2. Утвержден в сент. 1988 г., мае 2002. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2003. – 8 с.
2. National Institute of Technology Standard, NIJ Standard 0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor, July 2008.

3. Рахматуллин, Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматуллин, Ю.А. Демьянов. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 339 с.
4. Lim, C.T. Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor / C.T. Lim, V.P.W. Shim, Y.H. Ng // *International J. of Impact Engineering*. – 2003. – V. 28, № 1. – P. 13 – 31.
5. Tan, V.B.C. Experimental and numerical study of the response of flexible laminates to impact loading / V.B.C. Tan, V.P.W. Shim, T.E. Tay // *International J. of Solids and Structures*. – 2003. – V. 40, № 23. – P. 6245 – 6266.
6. Chocron, S. 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. – V. 70, № 13. – P. 2012 – 2022.
7. Blankenhorn, G. Improved Numerical Investigations of a Projectile Impact on a Textile Structure / G. Blankenhorn, K. Schweizerhof, H. Finckh // *4th 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. Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric / H. Talebi, S.V. Wong, A.M.S. Hamouda // *Composite Structures*. – 2009. – V. 87, № 4. – P. 314 – 320.
9. LS-DYNA Keyword user's manual. v.970. LSTC, 2003. – 1564 p.
10. Martinez, M.A. Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics / M.A. Martinez, C. Navarro, R. Cortes, J. Rodriguez, V. Sanchez-Galvez // *J. of materials science*. – 1993. – V. 28, № 5. – P. 1305 – 1311.
11. Долганина, Н.Ю. Оценка баллистического предела и прогиба многослойных тканевых пластин при ударе индентором / Н.Ю. Долганина // *Вестн. ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2010. – Вып. 15, № 10(186). – С. 17 – 23.
12. Долганина, Н.Ю. Моделирование ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека на вычислительном кластере «СКИФ Урал» / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников, А.А. Маричева // *Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии*. – 2010. – Т. 11, № 1. – С. 117 – 126.
13. Высокопроизводительный вычислительный кластер «СКИФ Урал»
URL: http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_ural/ (дата обращения: 20.07.2011).
14. Суперкомпьютер «СКИФ – Аврора ЮУрГУ»
URL: http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/ (дата обращения: 20.07.2011).

References

1. GOST R 50744 – 95. Armor clothes. Classification and general technical requirements [Broneodezhda. Klassifikatsiya i obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya]. *Prin. Postanovleniyem Gosstandarta Rossii ot 27.02.95 № 82. Vved. s izm. № 1, 2. Utverzhden v sent. 1998 g., maye 2002*. Moscow: IPK izd-vo standartov, 2003. 8 p.
2. Ballistic resistance of body armor. National Institute of Justice, NIJ Standard-0101.06, 2008.
3. Rakhmatullin Kh.A., Demyanov Yu.A. *Prochnost pri intensivnykh kratkovremennykh nagruzkakh* [Strength at intense short-term loads]. Moscow: GIFML, 1961. 299 p.
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, no. 1, pp. 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, no. 23, pp. 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, vol. 70, no. 13, pp. 2012 – 2022.
7. Blankenhorn G., Schweizerhof K., Finckh H. Improved Numerical Investigations of a Projectile Impact on a Textile Structure. *4th European LS-DYNA Users Conference*. Ulm, 2003, pp. 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, pp. 314 – 320.
9. LS-DYNA Keyword user's manual. v.970. LSTC, 2003. – 1564 p.
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, no. 5, pp. 1305 – 1311.
11. Dolganina N.Yu. Evaluation of ballistic limit and multilayer fabric plate deflection under indenter impact [Otsenka ballisticheskogo predela i progiba mnogosloynnykh tkanevykh plastin pri udare indentorom]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroyeniye»*. 2010, vol. 15, no. 10(186), pp. 17 – 23.
12. Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B., Maricheva A.A. Modeling of impact processes in a textile armor and in a human body on a SKIF Ural computational cluster [Modelirovaniye udarnykh protsessov v tkanevykh bronezhiletakh i tele cheloveka na vychislitel'nom klasterе «SKIF Ural»]. *Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye: Novyye vychislitel'nyye tekhnologii*. 2010, vol. 11, no. 1, pp. 117 – 126.
13. *Vysokoproizvoditel'nyy vychislitel'nyy klaster «SKIF Ural»* [High-performance computational cluster «SKIF Ural»]. Available at: http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_ural/ (accessed 20 July 2011).
14. *Superkompyuter «SKIF – Aurora YuUrGU»* [Supercomputer «SKIF – Aurora YuUrGU»]. Available at: http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/ (accessed 20 July 2011).

Наталья Юрьевна Долганина, кандидат технических наук, Лаборатория суперкомпьютерного моделирования, Южно-Уральский государственный университет (Россия, г. Челябинск), dnu001@mail.ru.

Natalya Yuryevna Dolganina, Candidate of Engineering Sciences, Laboratory of Supercomputer Modeling, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk), dnu001@mail.ru.

Сергей Борисович Сапожников, доктор технических наук, профессор, кафедра «Прикладная механика, динамика и прочность машин», Южно-Уральский государственный университет (Россия, г. Челябинск), ssb@susu.ac.ru

Sergey Borisovich Sapozhnikov, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Department of Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk), ssb@susu.ac.ru

Поступила в редакцию 25 июля 2011 г.