

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ПЕРЕПЛЕТЕНИЯ НИТЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ ТКАНЕВЫХ ПРЕГРАД ПРИ ЛОКАЛЬНОМ УДАРЕ

*Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников*

Приведены результаты моделирования динамического взаимодействия индентора и тканевых преград различных размеров с тремя типами переплетения нитей, с возможностью разрушения нитей, а также без разрушения. Проведена верификация модели, сравнение с экспериментальными данными. Определены механические характеристики арамидных нитей.

*Ключевые слова:* тканевая преграда, удар, конечно-элементная модель, тип переплетения, нить.

### Введение

Многослойные тканевые преграды применяются в различных отраслях, например, в самолето- и автомобилестроении. Элементы конструкций из таких материалов могут быть подвержены интенсивному локальному нагружению – удар гравием со взлетно-посадочной полосы в нижнюю часть крыльев самолетов, удар гравием с дороги в автомобиль. Элементы обшивки боевого самолета могут быть подвержены ударам пуль или снарядов. При интенсивном локальном нагружении лучше работают непропитанные многослойные тканевые преграды. Такая схема использована в бронежилетах.

Бронежилеты 1-го и 2-го классов – тканевые, бронежилеты более высокого класса имеют в своем составе кроме тканевых преград еще и металлические или керамические пластины [1]. Наиболее интересными для изучения являются тканевые преграды бронежилетов 2-го класса, так как они имеют в своем составе максимальное количество слоев баллистических тканей (до 90). Бронежилеты 2-го класса предназначены для защиты от пуль пистолетов ТТ и ПСМ, большее разрушающее воздействие наносят пули пистолета ТТ, которые имеют калибр 7,62 и максимальную скорость 445 м/с. Типичный размер тканевой преграды бронежилета составляет 30×30 см. В американских бронежилетах в основном используют ткани с полотняным переплетением, в отечественных – с саржевым переплетением. В последнее время в отечественных бронежилетах применяют также ткани с полотняным и сатиновым переплетениями. В тканях для бронежилета широко используют арамидные нити (за рубежом это Кевлар, в России Русар®). Основной задачей при проектировании многослойных тканевых преград является минимизация их массы при сохранении заданного уровня защиты. Для того чтобы спроектировать новую высокоэффективную конструкцию тканевого бронежилета, необходимо знать, как работают все его элементы: баллистические ткани и нити в тканях.

При динамическом взаимодействии индентора с тканевой преградой возникают сложные физические явления: большие перемещения и деформации, вытягивание нитей, разрушение и т. д. Теоретический анализ взаимодействия тканевой преграды и индентора довольно сложен, поэтому исследования в этой области проводятся, как правило, экспериментальными методами [2].

Моделирование тканевых структур прошло несколько стадий развития. Фундаментальной работой в области исследования прочности при интенсивных кратковременных нагрузках является работа Х.А. Рахматулина 1961 года [3], где рассмотрен удар по прямой гибкой деформируемой незакрепленной нити бесконечной длины (аналитическое решение). 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 суперкомпьютерные модели, где моделируется каждая нить, так как это позволяет получить более точные и адекватные результаты [6–8]. Они ориентированы в основном на пакет конечно-элементного анализа LS-DYNA.

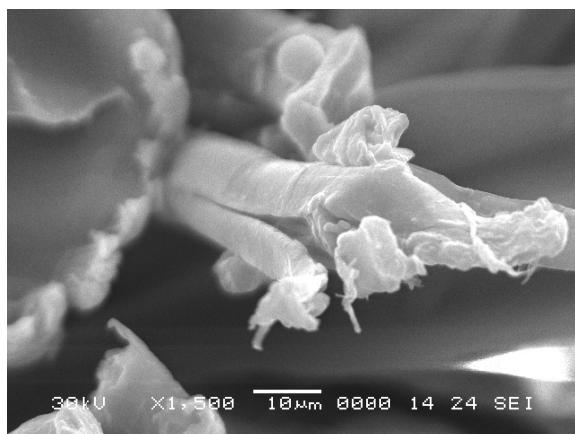
В ряде работ используют оболочечную дискретизацию отдельных нитей [9]. Линзообразное поперечное сечение отдельной нити моделируют несколькими смежными оболочечными элементами с различными толщинами. Однако в таких моделях оболочечные элементы с различными

толщинами имеют разрыв в соответствующих граничных условиях и затруднена формулировка условий контакта нитей. Нити в ткани разбивают также и на объемные конечные элементы [9]. Преимущество дискретизации объемными элементами перед оболочечными с разными толщинами – это сглаживание плоскости поперечного сечения. Однако такие модели тканей при реальных размерах бронежилетов порядка  $30 \times 30$  см имеют чрезвычайно большую размерность, что не позволяет рассчитывать слоистые тканевые преграды с немногими слоями ткани даже с использованием современных суперкомпьютеров.

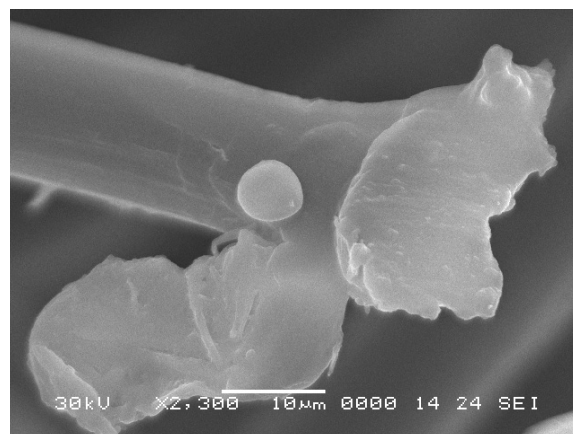
Таким образом, задачей исследования было создать малопараметрическую модель ткани, которая бы позволила рассчитать на суперкомпьютере бронежилеты реальных размеров ( $30 \times 30$  см) с реальным количеством слоев; исследовать влияние типа переплетения нитей, а также размера ткани на прочность тканевых преград при локальном ударе.

### Определение механических характеристик арамидных нитей

Для того чтобы создать адекватную модель тканевой преграды, необходимо знать ее механические свойства. Модуль упругости и предел прочности арамидных нитей Русар® были определены на универсальной испытательной машине Instron 5882. Концы нити наматывали на неподвижные ролики радиусом  $r = 1,5$  см, которые вставляли в захваты испытательной машины. Область контакта нити с роликом склеивали цианоакрилатным клеем, чтобы избежать проскальзывания. Длина свободной нити составляла 5 см, скорость движения траверсы при растяжении 100 мм/мин. Было получено, что арамидные нити ведут себя упруго вплоть до разрушения. Определен модуль упругости  $E = 140 \pm 5$  ГПа и предел прочности  $\sigma_B = 3,0 \pm 0,16$  ГПа. Механические свойства нитей необходимо знать не только при растяжении, но и при растяжении с изгибом. В работе [10] показано, что в диапазоне реальных значений диаметров  $d = 5 \dots 10$  мм (что соответствует кривизне головной части пуль пистолетов ТТ и ПМ) прочность нитей при растяжении с изгибом вокруг ролика практически не отличается от прочности при растяжении. Электронная микроскопия волокон нитей после разрушения показала, что прочные нити имели округлые «оплавленные» концы, а слабые – расслоенные (рис. 1). Прочность более темных по цвету нитей была в среднем на 10 % ниже прочности светлых нитей.



Расслоенные концы волокон



«Оплавленные» концы волокон

Рис. 1. Электронная микроскопия волокон арамидных нитей после разрушения

### Геометрическая и физическая сторона моделирования тканевых преград

В работе рассмотрены ткани полотняного, саржевого и сатинового переплетений. Для того чтобы снизить размерность задачи локального динамического нагружения тканевой преграды реальных размеров порядка  $30 \times 30$  см, геометрия нитей была предельно упрощена. Нити в модели имеют относительную свободу перемещения, имеют прямоугольное поперечное сечение и представлены одним оболочечным элементом по ширине. Криволинейная ось нити была заменена ломаной, с прямолинейными горизонтальными участками и наклонными ( $34^\circ$  к горизонтальному участку нити). Повторяющиеся элементы тканей показаны на рис. 2, 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.

Для решения задачи динамического взаимодействия тканевой преграды и жесткого индентора с помощью пакета программ LS-DYNA геометрия и сетка конечных элементов (рис. 3) были созданы в пакете ANSYS с последующей коррекцией.

Реальная арамидная нить Русар® состоит из нескольких сотен элементарных волокон диаметром 12–15 мкм, которые имеют крутку  $100 \text{ м}^{-1}$  (зарубежные нити, как правило, некрученные). Для материала нити наиболее близкой является модель ортотропного упругого тела, в которой высокая жесткость имеет место в продольном направлении нити и на несколько порядков меньшая в поперечном и сдвиговом направлениях. Нити моделировали оболочечными элементами с одной точкой интегрирования по толщине Бельчко-Вонга-Чанга (тип 10) [11]. Принято, что разрушение нити происходит при достижении в ней величины первого главного напряжения  $\sigma_1 = 3 \text{ ГПа}$ . Эта величина соответствует средней прочности исследованных арамидных нитей. В пакете программ LS-DYNA представлено более сотни моделей материала [11], 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 3 ГПа. Характеристики нитей для ввода в программу LS-DYNA: толщина нити  $T = 100 \text{ мкм}$ , ширина нити  $D = 500 \text{ мкм}$ , модули упругости  $E_x = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  и  $E_y = 1,4 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ , плотность  $\rho = 1440 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент Пуассона  $\mu_{xy} = 0,3$ , модули сдвига  $G_{xy} = G_{yz} = G_{zx} = 1,4 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ .

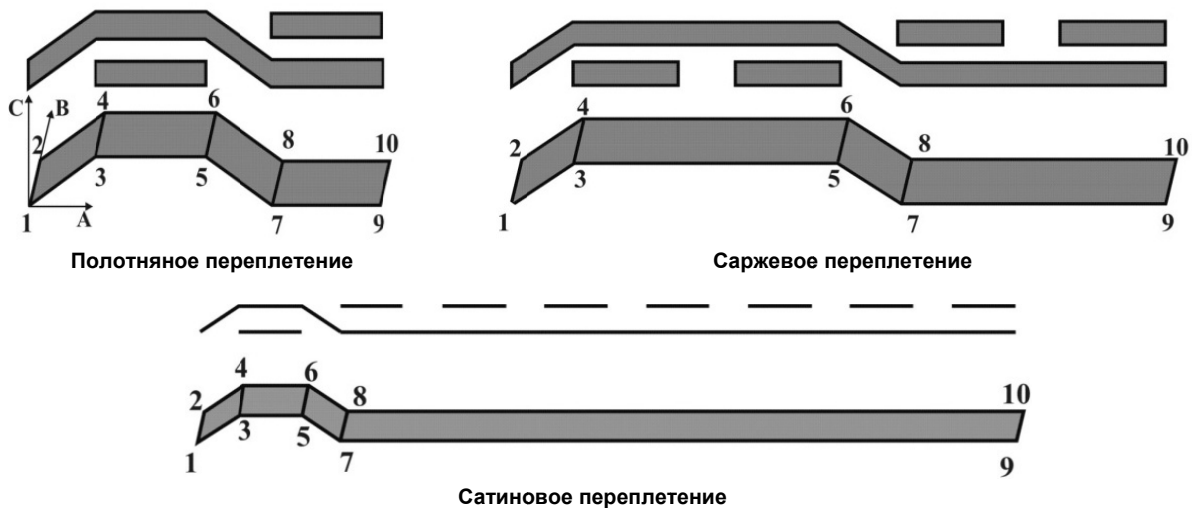


Рис. 2. Повторяющийся элемент

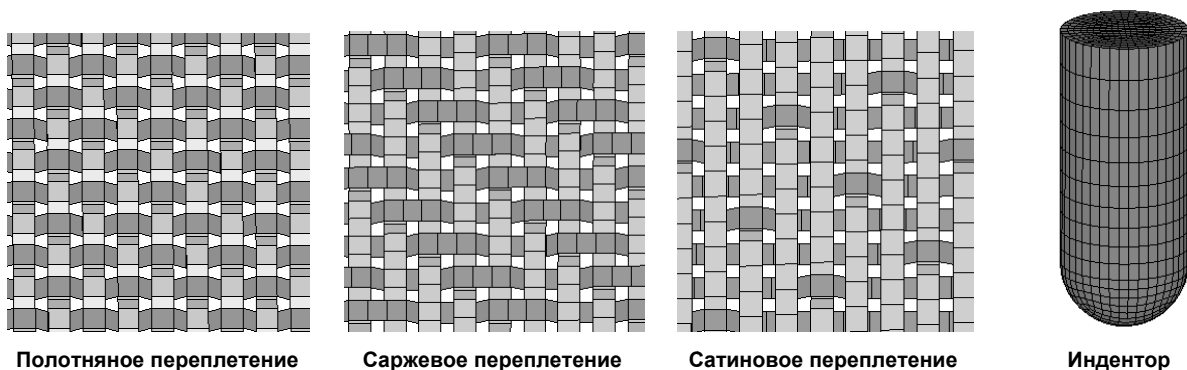


Рис. 3. Сетка конечных элементов

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 [12].

Модель индентора (имитация пули пистолета ТТ: диаметр 7 мм, длина 16,5 мм, масса 5,5 г, начальная скорость 445 м/с) и сетка конечных элементов были созданы в ANSYS (рис. 3). Пуля пистолета ТТ со стальным сердечником при взаимодействии с тканевой преградой при скоростях до 500 м/с не разрушается и не имеет пластических деформаций, поэтому для сокращения времени расчетов для индентора был выбран материал \*MAT\_RIGID (жесткое тело) с плотностью  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$  и модулем упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ .

### Верификация модели нити как элемента тканевой преграды

Элементом тканевой преграды является нить и только для нее существует аналитическое решение. В работе Х.А. Рахматулина [3] приведены теоретические решения следующих задач:

- 1) точечный удар по прямой гибкой деформируемой незакрепленной нити бесконечной длины (скорость удара  $V_0$  – постоянна) (рис. 4);
- 2) удар по прямой гибкой деформируемой незакрепленной нити бесконечной длины телом округлой формы (скорость удара  $V_0$  – постоянна) (см. рис. 4).

Для верификации модели нити как элемента ткани задачи Х.А. Рахматулина были решены методом конечных элементов (МКЭ) в программе LS-DYNA:

- 1) точечный удар по гибкой деформируемой незакрепленной нити длиной 0,3 м (скорость удара постоянна и равна  $V_0 = 445 \text{ м/с}$ );
- 2) удар по прямой гибкой деформируемой незакрепленной нити длиной 0,3 м цилиндром диаметром  $d = 7 \text{ мм}$  (масса цилиндра на три порядка выше массы нити) с заданными коэффициентами сухого трения между нитью (0,001; 0,4; 0,9) и цилиндром (скорость удара  $V_0 = 445 \text{ м/с}$ ).

Модуль упругости нити в продольном направлении  $E_x = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , коэффициент Пуассона  $\mu_{xy} = 0,3$ ; плотность нити  $\rho = 1440 \text{ кг/м}^3$ . Ширина нити 500 мкм и толщина 100 мкм. Нить была разбита на оболочечные конечные элементы с одной точкой интегрирования по толщине. Размер конечного элемента равен 500 мкм. Для обеспечения устойчивого решения было принято задать модули упругости материала нити в поперечном и сдвиговом направлениях на два порядка меньше модуля упругости в продольном направлении, коэффициенты Пуассона  $\mu_{xz}$ ,  $\mu_{zy}$  были вычислены из соотношений теории ортотропной упругости.

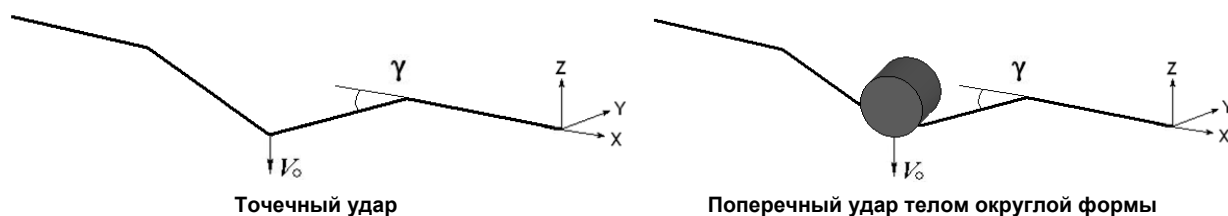


Рис. 4. Задачи Х.А. Рахматулина

При ударе по нити в точке с постоянной скоростью первое главное напряжение в нити возрастает до определенной величины и остается постоянным, пока волна Римана (ударная) не дойдет до конца нити и вернется, разгрузив нить (рис. 5).

Сравнение результатов решения МКЭ с решением Х.А. Рахматулина показало, что различие полученных напряжений  $\sigma$ , времени, за которое волна Римана дойдет до конца нити и вернется  $t$ , угла наклона  $\gamma$  не превышает 1 % и обусловлено конечностью размеров элементов. Решение МКЭ с высокой степенью точности соответствует решению Х.А. Рахматулина, т. е. МКЭ дает достоверные результаты.

При ударе по прямой нити телом округлой формы в первоначальный момент времени напряжения возрастают и становятся выше напряжений, полученных при точечном ударе (рис. 6), это связано со сверхзвуковым ударом. Первоначальный участок напряжений совпадает с теоретическим решением Х.А. Рахматулина:  $e = (V_0 \cdot t)/r$ , где  $e$  – деформация,  $V_0$  – скорость удара,  $t$  – время,  $r = 3,5 \text{ мм}$  – радиус индентора. В решении Х.А. Рахматулина проскальзывание между нитью и индентором отсутствует и напряжения возрастают до момента, пока угол  $\gamma$  не станет равным  $24^\circ$  (величина угла при точечном ударе) (см. рис. 4). В решении МКЭ существует проскальзывание между нитью и индентором, поэтому напряжения не возрастают до теоретических значений.

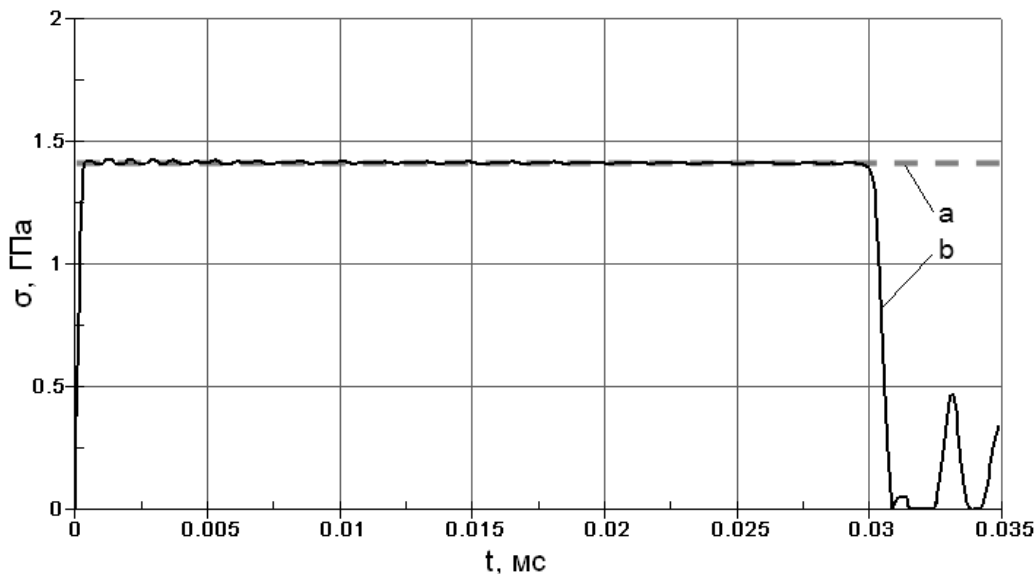


Рис. 5. График зависимости первых главных напряжений от времени (точечный удар): а – решение МКЭ (прямая нить); б – решение Х.А. Рахматулина

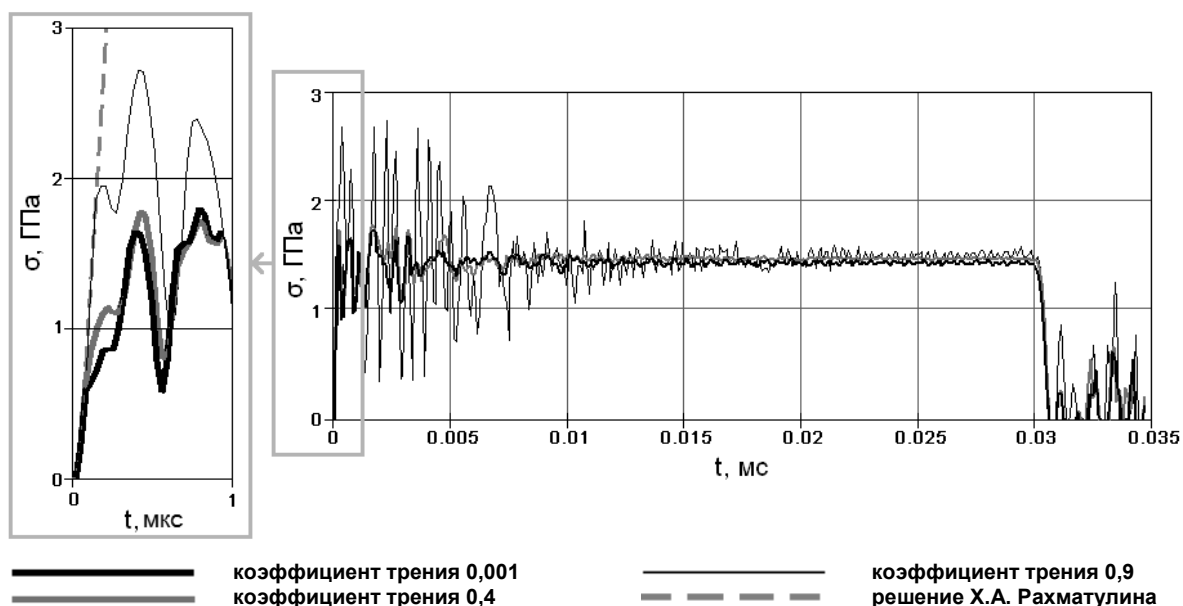


Рис. 6. График зависимости первых главных напряжений от времени (удар цилиндром)

**Динамическое взаимодействие индентора с тканевой преградой (нити разрушаются)**

Все расчеты были проведены на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ», оснащенном 480 вычислительными узлами с двумя процессорами Intel Xeon X5680 (6 ядер по 3.33 GHz) и оперативной памятью 15.36 ТВ [13].

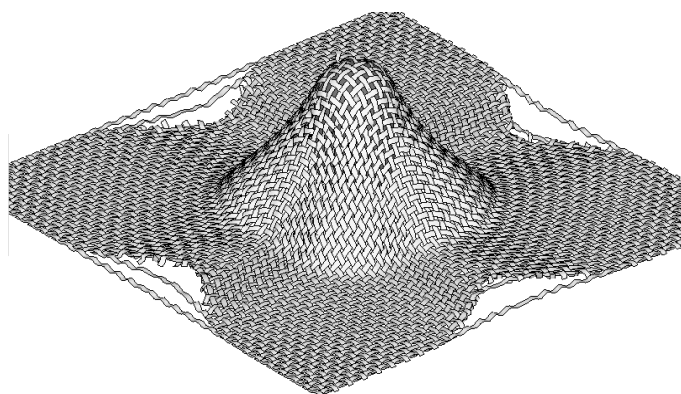
Было рассмотрено динамическое взаимодействие индентора с одним слоем баллистической ткани полотняного, саржевого, сатинового переплетений, размером 5×5, 10×10, 20×20, 30×30 см. Удар проводили в центр ткани под прямым углом к поверхности ткани, края ткани не были закреплены. В расчетах рассматривали потерю скорости индентора при пробое одного слоя ткани. Критерием эффективности тканевой преграды, является отношение изменения скорости индентора  $\Delta V$  к массе преграды  $M$ :  $k = \Delta V/M$  (см. таблицу).

При решении задачи динамического взаимодействия индентора с тканями различных размеров и типов переплетения с учетом разрушения нитей было получено, что ткани размером 5×5 см не пробиваются (рис. 7, 8). Изменение скорости индентора во времени при динамическом взаимодействии с тканью размером 5×5 см приведено на рис. 9.

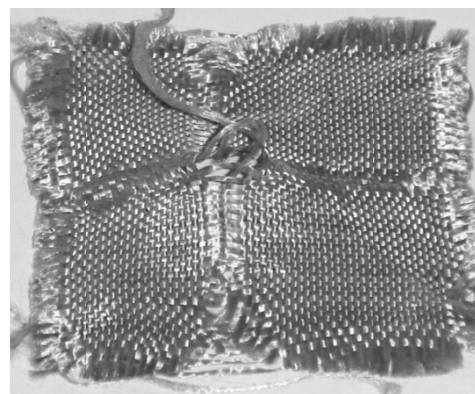
## Контроль и испытания

Зависимости коэффициента эффективности  $k$  от различных условий испытаний

Размер, см	Ткань	$M$ , г	$\Delta V$ , м/с	$k$
5×5	Полотно	0,479	16,19	33,74
	Саржа	0,463	13,37	28,87
	Сатин	0,454	6,69	15,31
10×10	Полотно	1,92	12,34	6,430
	Саржа	1,85	12,40	6,690
	Сатин	1,81	8,270	4,540
20×20	Полотно	7,15	9,940	1,388
	Саржа	6,88	11,82	1,717
	Сатин	6,78	8,080	0,840
30×30	Полотно	16,8	9,140	0,543
	Саржа	16,0	11,81	0,736
	Сатин	15,9	7,88	0,494

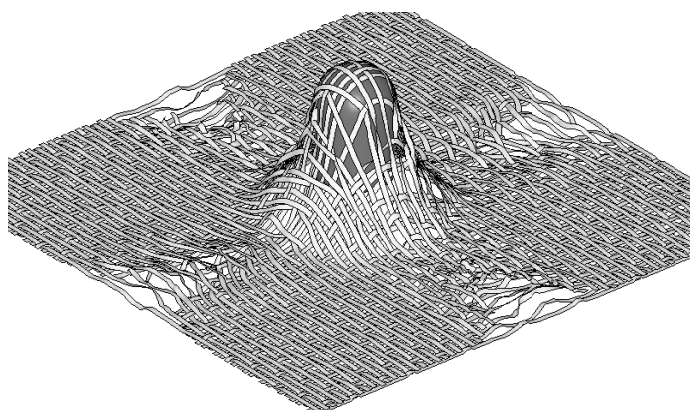


Расчет

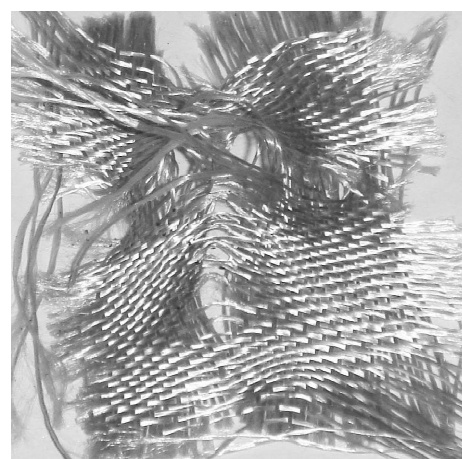


Эксперимент

Рис. 7. Характер деформирования ткани размером 5×5 см (полотно)



Расчет



Эксперимент

Рис. 8. Характер деформирования ткани размером 5×5 см (сатин)

Ткани размером 10×10, 20×20, и 30×30 см пробиваются при динамическом взаимодействии с индентором. Картины пробоя и изменение скорости индентора во времени при пробое у тканей этих размеров качественно похожи (рис. 9–11).

Анализ полученных данных показал, что: потеря скорости в случае тканей с сатиновым переплетением во всех случаях ниже, так как индентор раздвигает нити; ткани размером больше, чем 5×5 см саржевого и полотняного переплетений пробиваются, причем потеря скорости в случае саржевого переплетения выше, чем в случае полотняного на 1...22 % в зависимости от размера ткани.

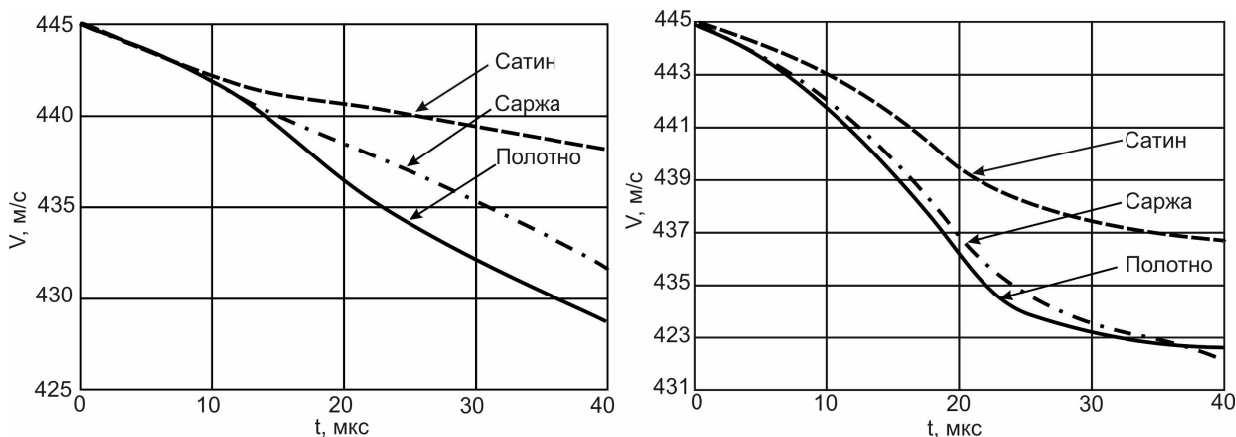
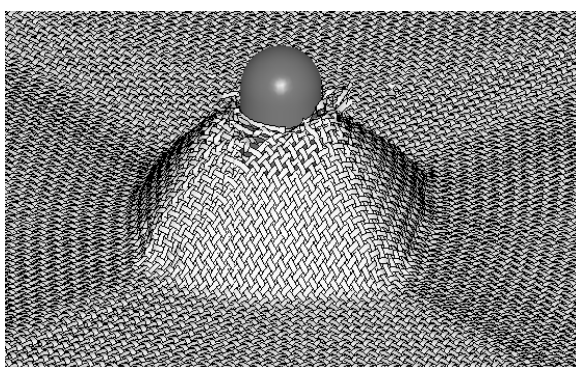
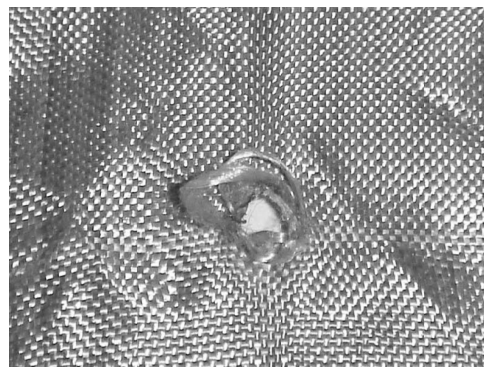


Рис. 9. Изменение скорости индентора во времени при динамическом взаимодействии с тканью (слева 5×5 см, справа 10×10 см)

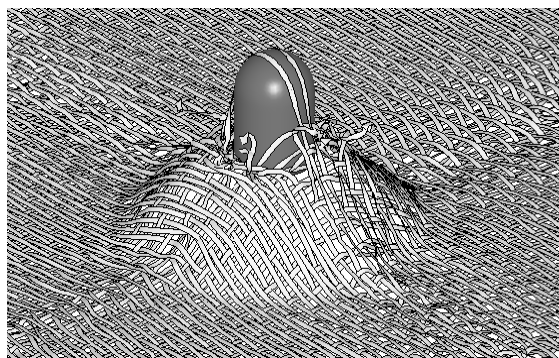


Расчет



Эксперимент

Рис. 10. Картина пробоя ткани размером 30×30 см (полотно)



Расчет



Эксперимент

Рис. 11. Картина пробоя ткани размером 30×30 см (сатин)

**Динамическое взаимодействие индентора с тканевой преградой (нити не разрушаются)**

Рассмотрено динамическое взаимодействие индентора с одним слоем ткани полотняного, саржевого, сатинового переплетений, размером 5×5, 10×10, 20×20, 30×30 см (нити не разрушаются). Удар проводили в центр ткани под прямым углом к поверхности ткани, края ткани не были закреплены. Расчет динамики деформирования ткани был проведен до времени  $t = 60$  мкс, за которое волна Римана успеет пройти от центра ткани до края и вернуться назад.

Для примера на рис. 12 приведен характер деформирования ткани полотняного переплетения размером 10×10 см в момент времени  $t = 40$  мкс.

Для оценки прочности нитей при ударе по тканевым преградам результаты расчетов были обработаны и получены зависимости первых главных напряжений от времени (рис. 13).

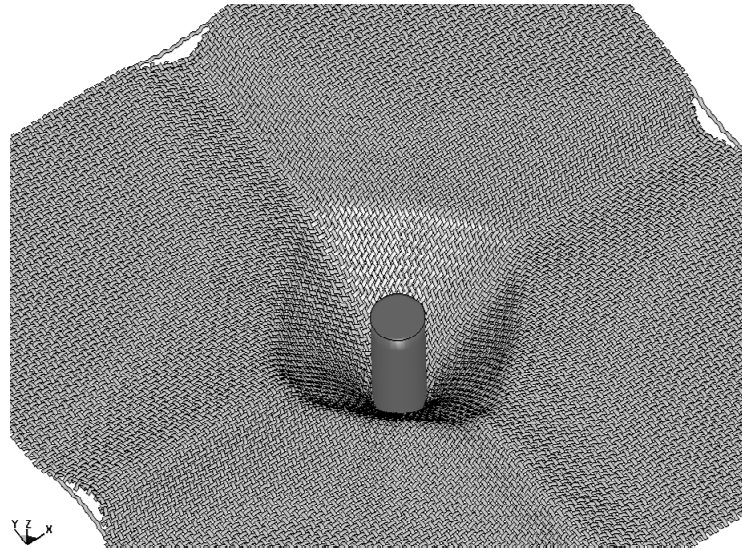


Рис. 12. Характер деформирования ткани полотняного переплетения

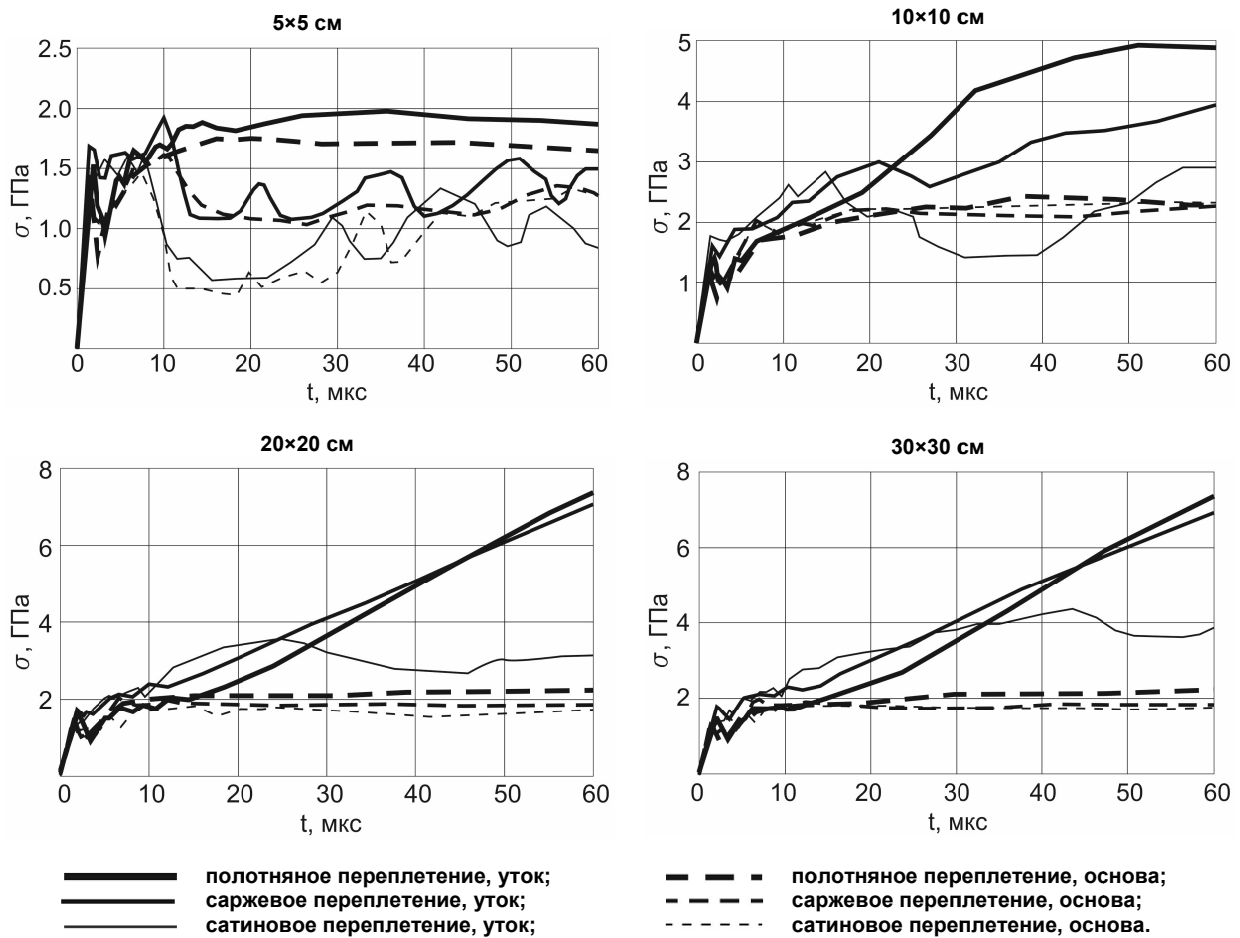


Рис. 13. Зависимости первых главных напряжений в нитях от времени

Анализ полученных данных показал, что:

- напряжения в нитях образцов размером 5×5 см любого типа переплетения не превышают величину предела прочности (3 ГПа);
- напряжения в нитях ткани размером больше 5×5 см растут со временем и оказываются больше среднего предела прочности через 15–30 мкс после начала контакта;



– в процессе нагружения в нитях текстильных материалов наблюдаются осцилляции напряжений, вызванных наличием узлов переплетений, в которых происходит распрямление нитей и возникает трение;

– наименьшие напряжения возникают в тканях сатинового переплетения;

– в уточных нитях первые главные напряжения значительно выше, чем в нитях основы. Это происходит из-за того, что нити утка преобладают с лицевой стороны ткани, а основные нити – с изнаночной, поэтому при ударе индентором с лицевой стороны, вначале нагружаются уточные нити, которые берут на себя значительно больше энергии.

#### **Заключение**

Определены механические характеристики арамидных нитей Русар®. Получено, что нить ведет себя упруго вплоть до разрушения с модулем упругости  $E = 140 \pm 5$  ГПа и пределом прочности  $\sigma_B = 3,0 \pm 0,16$  ГПа.

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

В пакете программ LS-DYNA получено решение задачи динамического деформирования и разрушения одного слоя ткани полотняного, саржевого и сатинового переплетений размерами  $5 \times 5$ ,  $10 \times 10$ ,  $20 \times 20$ ,  $30 \times 30$  см. Индентор имел скорость 445 м/с. При исследовании ударного нагружения тканевых преград без учета разрушения нитей получено, что темп роста первых главных напряжений зависит от характера переплетения нитей, а также размера ткани (больше размер – выше уровень напряжений в ней).

При исследовании ударного нагружения тканевых преград с учетом разрушения нитей получено, что ткани размером  $5 \times 5$  см не пробиваются. Ткани размером больше, чем  $5 \times 5$  см саржевого и полотняного переплетений пробиваются, причем потеря скорости в случае саржевого переплетения выше, чем в случае полотняного на 1...22 % в зависимости от размера ткани. Потеря скорости в случае тканей с сатиновым переплетением во всех случаях ниже, так как индентор раздвигает нити.

При ударе индентором в ткань размером  $5 \times 5$  см (нити в модели могут разрушаться) коэффициент эффективности  $k$  максимальный в случае с полотняным переплетением нитей. Это связано с тем, что ткани размером  $5 \times 5$  см не пробиваются, а ткань с полотняным переплетением имеет максимальный вес и, следовательно, лучше тормозит индентор. При ударе в ткань размером больше чем  $5 \times 5$  см коэффициент эффективности максимальный в случае с саржевым переплетением нитей. В данном случае ткани пробиваются и влияние массы ткани не так значительно, как тип переплетения нитей. Максимально эффективно при локальном ударе работают прямые нити, так как напряжения в таких нитях после первоначального момента контакта не растут со временем, как в искривленных нитях, которые входят в состав тканей. В тканях с полотняным переплетением нити максимально искривлены, в тканях с сатиновым переплетением минимально, искривленность нитей в тканях с саржевым переплетением средняя. Ткани с сатиновым переплетением (с минимально искривленными нитями) работают хуже тканей с саржевым переплетением из-за того, что индентор раздвигает нити. Результаты расчетов справедливы для одного слоя ткани. При увеличении количества слоев результаты могут быть другими. Для преграды, состоящей из нескольких слоев ткани, с сатиновым переплетением уже возможно будет оценить ее эффективность, так как нити не будут раздвигаться из-за взаимодействия слоев тканей в преграде.

**Представленная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-08-31184 мол\_а).**

#### **Литература**

1. ГОСТ Р 50744–95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. Прин. Постановлением Госстандарта России от 27.02.95 № 82. – Введ. с изм. № 1, 2. Утвержден в сент. 1998 г., мае 2002. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2003. – 8 с.

2. Бова, В.Г. Концепция построения мягкого бронежилета для максимальной реализации свойств арамидных нитей / В.Г. Бова // Рабочая одежда и средства индивидуальной защиты. – 2001. – № 2 (10). – С. 11–15.

3. Рахматулин, Х.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, Ю.А. Демьянов. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 399 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 Journal of Impact Engineering*. – 2003. – Vol. 28, No. 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 Journal of Solids and Structures*. – 2003. – Vol. 40, No. 23. – P. 6245–6266.
6. 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.
7. 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. – С. 117–126.
8. Долганина, Н.Ю. *Проектирование новых конструкций тканевых бронепанелей с использованием суперкомпьютерных вычислений* / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование»*. – 2011. – Вып. 10. – № 37 (254). – С. 71–81.
9. *Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric* / C. Ha-Minh, A. Imad, T. Kanit, F. Boussu // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2013. – No. 69. – P. 32–39.
10. *Методы исследования прочностных характеристик высокомодульных нитей и тканых материалов: учеб. пособие* / С.Б. Сапожников, О.С. Буслаева, А.В. Понькин, С.И. Шульженко. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 23 с.
11. *Hallquist, J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual v.970* / J.O. Hallquist. – Livermore Software Technology Corporation, 2003. – 1564 p.
12. *Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics* / M.A. Martinez, C. Navarro, R. Cortes et al. // *Journal of materials science*. – 1993. – Vol. 28. – P. 1305–1311.
13. *Суперкомпьютер «Торнадо ЮУрГУ»*. – <http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/tornado/> (дата обращения: 15.07.2013).

**Долганина Наталья Юрьевна.** Кандидат технических наук, начальник отдела поддержки и обучения пользователей Лаборатории суперкомпьютерного моделирования, доцент кафедры «Системное программирование», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), dnu001@mail.ru.

**Сапожников Сергей Борисович.** Доктор технических наук, профессор, декан заочного инженерно-экономического факультета, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), ssb@susu.ac.ru.

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series “Mechanical Engineering Industry”  
2013, vol. 13, no. 2, pp. 95–104**

---

## STUDY OF THE INFLUENCE OF TYPE WEAVE FOR STRENGTH OF THE TEXTILE ARMOR PANEL AT THE LOCAL IMPACT

*N.Yu. Dolganina, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, dnu001@mail.ru,  
S.B. Sapozhnikov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ssb@susu.ac.ru*

Results of the simulation of the dynamic interaction between the indenter and textile armor panel with the possibility of destruction of yarn, and also without the destruction yarn are considered. Textile armor panel has different types of weave and sizes of fabric. Verification of the model and compared with experimental data is made. Mechanical properties of aramid yarn defined.

*Keywords: textile armor panel, impact, FEA model, type of weave, yarn.*

*Поступила в редакцию 8 июля 2013 г.*