

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ 3D-ОРТОГОНАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ  
ДЛЯ КОМПОЗИТОВ В СОСТАВЕ БРОНЕЖИЛЕТА\***

**TECHNOLOGY OF FORMING 3D ORTHOGONAL FABRICS  
FOR COMPOSITES AS PART OF BULLETPROOF VEST**

*А.П. ГРЕЧУХИН, А. ХАБИБУЛЛОЕВ, П.Н. РУДОВСКИЙ, М.Д. РУДКОВСКИЙ*  
A.P. GRECHUKHIN, A. KHABIBULLOEV, P.N. RUDOVSKY, M.D. RUDKOVSKIY

(Костромской государственной университет)

(Kostroma State University)

E-mail: niskstu@yandex.ru

*В статье рассматриваются вопросы технологии формирования трехмерных ортогональных тканей для использования в составе средств индивидуальной бронезащиты. Указаны преимущества по сравнению с существующими технологическими решениями. Представлены подходы к виртуальному испытанию композитов на базе трехмерных ортогональных тканей и сравнению их с типовыми материалами. На основе численного моделирования установлено, что использование нити вертикального утка, сопоставимой по линейной плотности с нитями основы, и горизонтального утка улучшило способность ткани гасить кинетическую энергию пули. Подходы к созданию трехмерных текстильных материалов для использования в составе композита или в виде ткани должны отличаться. Для изделия в виде ткани вертикальные нити должны иметь минимальную линейную плотность, а для изделия в виде композита необходимо в дальнейшем определить оптимальное соотношение линейных плотностей нитей за счет более качественного численного моделирования и определить диапазон используемых линейных плотностей пряж для проведения натурных испытаний. Таким образом, на основе численного моделирования свойств 3D-ортогональных тканей возможно создание оптимального по свойствам продукта.*

*The article deals with the issues of technology for the formation of three-dimensional orthogonal tissues for use in the composition of personal armor protection. Advantages in comparison with existing technological solutions are indicated. Approaches to the virtual testing of composites based on three-dimensional orthogonal fabrics and their comparison with standard materials are presented. Based on numerical modeling, it was found that the use of a vertical weft thread, comparable in linear density with the warp and horizontal weft threads, improved the ability of the fabric to extinguish the kinetic energy of the bullet. Approaches to the creation of three-dimensional textile materials for use as part of a composite or in the form of a fabric should differ. For a product in the form of fabric, vertical threads should have a minimum linear density, and for a product in the form of a composite, it is necessary to further determine the optimal ratio of linear thread densities due to better numerical modeling and determine the range of linear yarn densities used for*

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20089, <https://rscf.ru/project/22-29-20089/>

*field tests. Thus, based on numerical modeling of the properties of 3D orthogonal fabrics, it is possible to create an optimal product in terms of properties.*

**Ключевые слова:** трехмерная ортогональная ткань, параметры ткани, композит, пуля, 3D-модель ткани, бронезащита.

**Keywords:** three-dimensional orthogonal fabric, fabric parameters, composite, bullet, 3D model of fabric, armor protection.

### *Введение*

Трехмерные цельнотканые материалы исследуются уже продолжительное время. При этом существует множество обоснований того, почему данные материалы имеют преимущества перед слоистыми изделиями, полученными склеиванием однослойных и многослойных тканей небольшой толщины. В последнее время производители начинают внедрение новых материалов на основе трехмерных тканей, так как двумерные текстильные материалы уже не позволяют добиться существенных преимуществ в прочности и снижении веса. Наиболее известным из таких технических решений являются авиационные двигатели LEAP, в производстве которых используются цельнотканые трехмерные изделия [1].

Более того, существует несколько принципиально различных технологических вариантов создания трехмерных текстильных изделий – классические многослойные ткани, слоисто-каркасные ткани, трехмерные ортогональные ткани и т.д. Поэтому говорить о преимуществах трехмерных тканых материалах надо не просто в контексте 3D-структуры, а в контексте вида нагрузки, типа переплетения и технологии изготовления.

3D-текстильный материал в различном виде (ткань и композит) по-разному работает при нагружении. Например, в исследовании [5] указано на важную роль армирования в третьем направлении на повышение ударной прочности композитного изделия. В то же время в работе [3] делается вывод о том, что нить, формирующая третье направление, гасит только 1 % энергии удара (по лицевой стороне ткани), и она должна быть максимально тонкой.

В отличие от прочих трехмерных текстильных материалов в 3D-ортогональных

тканях нити располагаются практически без изгибов [4]. В результате этого изделия имеют повышенную на 15...20% прочность к ударным воздействиям. Повышение прочности обеспечивается за счет того, что энергия удара или силовое воздействие на материал распространяется на большую площадь [5...9].

В Костромском государственном университете разработана технология формирования 3D-ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [10]. В [11] предложены оптимальные параметры заправки станка, а в [12] исследовано влияние параметров заправки на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей. На основе разработанной технологии возможно создание 3D-ортогональных тканей со сложной формой поперечного сечения. При этом нити двух уточных систем прокладываются петлей в зоне формирования. Область применения 3D-ортогональных тканей различна. Поэтому предлагаемую технологию возможно использовать для получения широкого ассортимента изделий различного назначения. Это могут быть средства индивидуальной бронезащиты или конструкционные материалы, в которых 3D-ортогональные ткани используются в качестве армирующего наполнителя. Однако существующие технологические решения для производства таких текстильных изделий имеют ряд недостатков: сложная система перевязки изделия по контуру, невысокая плотность расположения нитей или расположение вертикальных слоев под углом, малая производительность оборудования. При этом нить, которая связывает слои, как правило, имеет низкую линейную плотность.

Целью настоящей работы является разработка технологии формирования 3D-ортогональной ткани для использования в качестве элементов средств индивидуальной бронезащиты, лишенной указанных недостатков.

В представленной работе численными методами анализируются различные варианты изготовления изделий на базе 3D-ортогональных тканей для использования в составе средств индивидуальной бронезащиты.

#### Методы

Для устранения недостатков технологического процесса разработана новая технология формирования 3D-ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [10], которая имеет следующие преимущества:

1. Ортогональные 3D-ткани по предлагаемой технологии обладают большей плотностью расположения слоев нитей по сравнению с существующей технологией.

2. Исключена встречная система нитей при прокладывании вертикальной системы утка – это упрощает конструкцию и позволяет вырабатывать изделия сложного профиля.

3. Расположение механизма прокладки нити в зоне "бердо-ткань" позволяет реализовать технологии создания тканей переменного профиля.

4. По сравнению с прочими 3D-тканями позволяют одновременно прокладывать до 20 уточных нитей одновременно, что существенно повышает производительность оборудования.

Опытный образец оборудования для получения ортогональных 3D-тканей представлен на рис. 1.



Рис. 1

Как отмечалось ранее, линейная плотность нити, формирующей третье направление ткани (связывающая горизонтальные слои), по-разному влияет на способность ткани противостоять ударному воздействию в зависимости от того, в каком виде используется 3D-ортогональное изделие – в виде ткани или в виде композита.

В данной работе проведено сравнение трех вариантов изделий в виде композита с использованием в качестве армирующего наполнителя: многослойного пакета ткани полотняного переплетения (9 слоев) и двух вариантов 3D-ортогональной ткани с различной линейной плотностью нитей вертикального утка.

Наиболее эффективным инструментом для сравнения являются программные комплексы, реализующие метод конечных элементов и задачу в явной постановке.

Для моделирования использовали параметры нитей, представленные в табл. 1. Принимали материал нити ортотропным. Трансверсальные модули упругости и модули сдвига материала нити принимались на порядок меньше основного модуля упругости [13...15]. Линейная плотность нитей 300 текс, волокнистый состав – арамидное волокно. Основные характеристики нитей соответствуют арамидным волокнам.

Таблица 1

Модули упругости, ГПа	
$E_x$	140
$E_y$	14
$E_z$	14
Модули сдвига, ГПа	
$G_{xy}$	14
$G_{yz}$	14
$G_{zx}$	14
Удлинение при разрыве, %	3,5

Для связующего использовали следующие основные параметры: модуль упругости  $E=3$  ГПа, разрывное удлинение  $\varepsilon=4\%$ , предел прочности при разрушении  $\sigma = 120$  МПа, допускаемое напряжение  $\sigma = 200$  МПа.

Параметры ткани полотняного переплетения представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Линейная плотность пряж	
Основа, текс	300
Уток, текс	300
Плотность слоев по основе, шт/см	10
Плотность слоев горизонтального утка, шт/см	7,4
Поверхностная плотность ткани (9 слоев), кг/м <sup>2</sup>	5,022

При построении геометрической 3D-модели ткани – аналога полотняного переплетения – нити основы в поперечном сечении моделировались эллипсами с размерами полуосей 0,15×0,5 мм. Это дает площадь поперечного сечения нити 0,236 мм<sup>2</sup>. Если принять, что нить имеет объемную долю волокна около 90% и плотность 1440 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует арамидным волокнам, то линейная плотность нити составит около 300 текс. Нити утка в поперечном сечении моделировались прямоугольниками с площадью поперечного сечения 0,236 мм<sup>2</sup>. Параметры девятислойной 3D-ортогональной ткани представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Линейная плотность пряж:	
Основа, текс	300
Горизонтальный уток (в два сложения), текс	150×2
Вертикальный (в два сложения), текс	60×2
Кромка, текс	300
Плотность слоев по основе, шт/см	6,66
Плотность слоев горизонтального утка, шт/см	7,7
Поверхностная плотность (10 слоев), кг/м <sup>2</sup>	4,894

Построение 3D-модели ткани – аналога полотняного переплетения – осуществляли следующим образом. Строилась средняя линия нитей. Допускали, что уточные нити выпрямлены полностью, основа их огибает. Поперечное сечение нити представлено в виде эллипса с параметрами, указанными выше. Далее методом экструзии (перемещение поперечного сечения вдоль средней линии нити) получаем твердотельную модель нити. Затем получали совокупность нитей, из которых формировалась твердотельная 3D-модель 3D-ортогональной ткани.

Для моделирования композита с использованием в качестве армирующей основы ткани полотняного переплетения и 3D-ортогональные ткани было использовано упрощение – поперечные сечения нитей были представлены в виде прямоугольников, площадь поперечного сечения составляла 0,236 мм<sup>2</sup>. Это обусловлено тем, что при моделировании связующего пространство вокруг нити требует разбиения на количество элементов, превышающее 60 млн. штук для моделируемого образца 100×100 мм. Для модели ткани, где нити представлены в виде прямоугольников, требуется существенно меньшее количество, 20...30 млн., конечных элементов.

Для расчетов массу пули принимали 6 г и скорость 450 м/с, что соответствует кинетической энергии 607 Дж. Это соответствует ГОСТ 34282–2017 для расчета по классу бронезащиты БР-3 [17].

Для моделирования использовали ПО LS-Dyna. В расчетах использовали упрощенную модель пули MAT\_001 (elastic) [16], так как разрушения материала пули от такого малого количества слоев не произойдет. Для нитей выбран материал MAT\_221 mat\_orthotropic\_simplified\_damage) [14]. Принимали, что материал нити подчиняется закону Гука. Критерий разрушения материала установлен по предельным значениям деформации в направлении оси материала нити (3,5%). Геометрия, моделирующая нить, разбивалась на конечные элементы гексаэдры, а материал связующего – на тетраэдры. Связующее моделировалось как тело, заполняющее все свободное пространство между нитями.

В эксперименте моделировали ¼ реального образца. Это связано с симметричностью задачи.

Моделировали 3 типа композита – на основе ткани полотняного переплетения, на основе 3D-ортогональной ткани, на основе 3D-ортогональной ткани с увеличенной толщиной нитей вертикального утка (равной линейной плотности нитей основы).

Результат взаимодействия пули и композита на основе 3D-ортогональной ткани и ткани полотняного переплетения представ-

лен на рис. 2 (а – полотно, б – 3D-ортогональная, 10 слоев, в – 3D-ортогональная, 10 слоев (увеличенные вертикальные нити)).

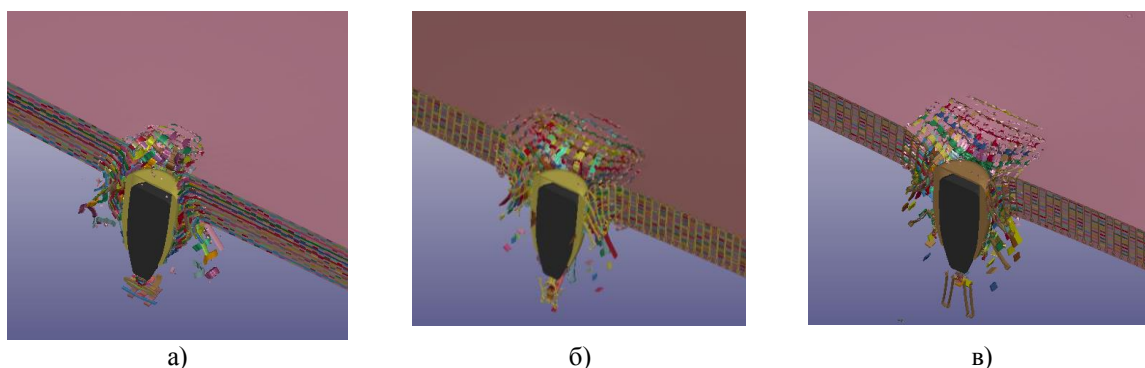


Рис. 2

### Результаты и обсуждение

График изменения кинетической энергии пули по времени для изучаемых образцов представлен на рис. 3.

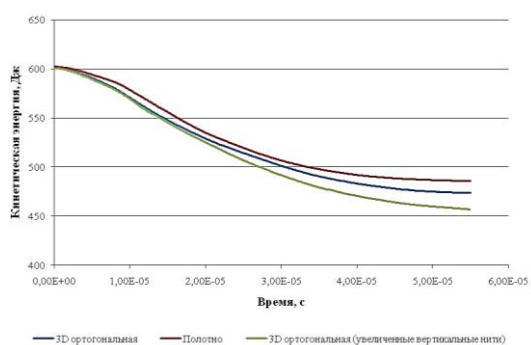


Рис. 3

Через 52 мкс после начала взаимодействия с композитом на основе ткани полотняного переплетения кинетическая энергия пули составила 485,58 Дж, для композита на основе 3D-ортогональной ткани – 473,39 Дж, а для композита на основе 3D-ортогональной ткани с увеличенными вертикальными нитями – 456,74 Дж. При использовании 3D-ортогональных тканей в качестве армирующей основы падение кинетической энергии пули больше на величину от 10 до 23%.

### ВЫВОДЫ

1. Разработаны новые структуры 3D-ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования и технология их формирования.

Результат расчета представлен путем совмещения образца вдоль оси симметрии.

2. На основе численного моделирования установлено, что использование нити вертикального утка, сопоставимой по линейной плотности с нитями основы и горизонтального утка, улучшило способность ткани гасить кинетическую энергию пули.

3. Подходы к созданию трехмерных текстильных материалов для использования в составе композита или в виде ткани должны отличаться.

4. Для изделия в виде ткани вертикальные нити утка должны иметь минимальную линейную плотность, а для изделия в виде композита необходимо в дальнейшем определить оптимальное соотношение линейных плотностей нитей за счет более качественного численного моделирования и определить диапазон используемых линейных прядей для проведения натурных испытаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2015, № 9. P.75...83.
2. Yu Y.M., Wang X.J., Lim C.W. Ballistic impact of 3d orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation // International Journal of Engineering and Applied Sciences. – Vol. 1, 2009. P. 1...18.
3. Shi W., Hu H., Sun B., Gu B. Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // Journal of the Textile Institute. – Vol. 110, 2011. P.875...889.

4. KadirBilisik, Mansour H. Mohamed. Multiaxial Three-Dimensional Flat Woven Preforms – Tube Carrier Weaving. *Textile Research Journal*. – Vol 80(8)/2010: 696–711 DOI: 10.1177/0040517509340602.
5. Huang G., Zhong Z.L. Tensile behavior of 3Dwoven composites by using different fabric structures // *MaterDes*. – 23(7), 2002. 671...674.
6. Xiwen Jia., Baozhong Sun, BohongGu. Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into 3D orthogonal woven composite: a finite element study at microstructure level // *Journal of Composite Materials*. – 45(9), 2010. P.965...987.
7. Bilisik K., Karaduman N.S., Bilisik N.E. 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. *Non-woven Fabrics*. Intec. – 2016. P. 81...141.
8. Xiwen Jia, Zihui Xia, BohongGu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells / JiaXiwen, Xia Zihui, GuBohong // *International Journal of Damage Mechanics*. – Vol. 24, 2015. P. 338...362.
9. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites // *Journal of industrial textiles*. – Vol. 45, 2016. P. 978...994.
10. Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Зайцев Д.В., Тихомиров Л.А. Способ формирования 3D-ортогонального тканого волокнистого материала // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2016, № 6. С. 118...122.
11. Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Рудовский П.Н., Палочкин С.В. Определение рациональных параметров системы заправки нитей при формировании трехмерного ортогонального тканого волокнистого материала // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2018, № 5. С. 111...115.
12. Ушаков С.Н., Гречухин А.П., Рудовский П.Н., Палочкин С.В. Влияние величины смещения слоя горизонтального утка на плотность расположения вертикальных слоев нитей при формировании трехмерных ортогональных тканей // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2018, № 6. С.96...100.
13. Dolganina N., Ignatova A., Sapozhnikov B., Shabley A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction // *PNRPU Mechanics Bulletin* 4. – 2017. P. 121...137.
14. Yang C., Tran P., Ngo T., Mendis P., Humphries W. Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subjected to ballistic impact // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 553, 2014. P.757...762.
15. Lee B., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to ballistic impacts // *Advanced composite materials*. – Vol. 21, 2012. P.177...192.
16. LS-DYNA keyword user's manual volume II. Material models – Livermore.: Livermore Software Technology Corporation. – 2018.
17. ГОСТ 34282–2017. Защита броневая автомобилей. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2017.
1. Donetskiy K.I., Raskutin A.E., Khilov P.A., Lukyanenko Yu.V., Bellini P.G., Korotygin A.A. Volumetric textile preforms used in the manufacture of polymer composite materials (review) // *Proceedings of VIAM*. – 2015, No. 9. P.75...83.
2. Yu Y.M., Wang X.J., Lim C.W. Ballistic impact of 3d orthogonal woven composite by a spherical bullet: experimental study and numerical simulation // *International Journal of Engineering and Applied Sciences*. – Vol. 1, 2009. P. 1...18.
3. Shi W., Hu H., Sun B., Gu B. Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballistic penetration of hemispherical-cylindrical projectile // *Journal of the Textile Institute*. – Vol. 110, 2011. P.875...889.
4. KadirBilisik, Mansour H. Mohamed. Multiaxial Three-Dimensional Flat Woven Preforms – Tube Carrier Weaving. *Textile Research Journal*. – Vol 80(8)/2010: 696–711 DOI: 10.1177/0040517509340602.
5. Huang G., Zhong Z.L. Tensile behavior of 3Dwoven composites by using different fabric structures // *MaterDes*. – 23(7), 2002. 671...674.
6. Xiwen Jia., Baozhong Sun, BohongGu. Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into 3D orthogonal woven composite: a finite element study at microstructure level // *Journal of Composite Materials*. – 45(9), 2010. P.965...987.
7. Bilisik K., Karaduman N.S., Bilisik N.E. 3D fabrics for technical textile applications. In: Jeon HY, editor. *Non-woven Fabrics*. Intec. – 2016. P. 81...141.
8. Xiwen Jia, Zihui Xia, BohongGu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells / JiaXiwen, Xia Zihui, GuBohong // *International Journal of Damage Mechanics*. – Vol. 24, 2015. P. 338...362.
9. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar epoxy composites // *Journal of industrial textiles*. – Vol. 45, 2016. P. 978...994.
10. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Zaitsev D.V., Tikhomirov L.A. Method for forming a 3D orthogonal woven fibrous material // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2016, No. 6. P. 118...122.
11. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Rudovsky P.N., Palochkin S.V. Determination of rational parameters of the threading system during the formation of a three-dimensional orthogonal woven fibrous material // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2018, No. 5. P. 111...115.
12. Ushakov S.N., Grechukhin A.P., Rudovsky P.N., Palochkin S.V. Influence of the offset value of the horizontal weft layer on the density of vertical layers of threads in the formation of three-dimensional orthogonal fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2018, No. 6. P.96...100.

13. Dolganina N., Ignatova A., Sapozhnikov B., Shabley A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction // PNRPU Mechanics Bulletin 4. – 2017. P. 121...137.

14. Yang C., Tran P., Ngo T., Mendis P., Humphries W. Effect of textile architecture on energy absorption of woven fabrics subjected to ballistic impact // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 553, 2014. P.757...762.

15. Lee B., Kim C.-G. Computational analysis of shear thickening fluid impregnated fabrics subjected to

ballistic impacts // Advanced composite materials. – Vol. 21, 2012. P.177...192.

16. LS-DYNA keyword user`s manual volume II. Material models – Livermore.: Livermore Software Technology Corporation. – 2018.

ГОСТ 34282–2017. Защита броневая автомобилей. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2017.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования тканей и трикотажа. Поступила 08.11.21.

---