

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОУТОЧНОГО
3D-ОРТОГОНАЛЬНОГО ТКАЧЕСТВА**

**DEVELOPMENT OF NEW SPATIALLY REINFORCED MATERIALS
BASED ON 3D ORTHOGONAL FABRIC TECHNOLOGY**

*А.П. ГРЕЧУХИН, П.Н. РУДОВСКИЙ, А. ХАБИБУЛЛОЕВ,
А.В. КУЛИКОВ, И.В. СТАРИНЕЦ*

*A.P. GRECHUKHIN, P.N. RUDOVSKY, A. HABIBULLOEY,
A.V. KULIKOV, I.V. STARINETS*

(Костромской государственной университет)

(Kostroma State University)

E-mail: niskstu@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы технологии 3D-ортогональных тканей, моделирования их строения и прогнозирования свойств. Представлен новый способ формирования 3D-ортогональной ткани. Отличительная особенность технологии – отсутствие встречных систем перевязочных нитей, что позволяет существенно увеличить производительность процесса ткачества.

The article deals with the technology of 3D orthogonal fabrics, modeling their structure and predicting properties. A new method for forming a 3D orthogonal fabric is presented. A distinctive feature of the technology is the absence of counter systems of dressing threads, which can significantly increase the productivity of the weaving process.

Ключевые слова: 3D-ортогональная ткань; ткацкий станок; армирующий наполнитель; композиты; пулезащита; арамидное волокно; углеродное волокно.

Keywords: 3D orthogonal fabric; loom; reinforcing filler, composites, bullet protection; aramid fiber; carbon fiber.

Введение

В предлагаемом исследовании изучена возможность высокопроизводительной технологии получения трехмерных ортогональных тканых волокнистых армирующих наполнителей. Такая технология подразумевает использование минимум трех систем нитей, которые располагаются перпендикулярно друг к другу в отличие от обычной ткацкой технологии. Это нити

основы, утка и Z-утка. Основные нити располагаются вдоль образца, а остальные системы нитей ортогонально им. Технология ортогонального трехмерного ткачества позволяет значительно повысить производительность при выработке материала, т.к. существует возможность обеспечить одновременно прокладывание нескольких нитей в отличие от обычной ткацкой технологии.

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

Известно, что 3D-ортогональные ткани обладают большей прочностью (15...20 %) за счет того, что энергия удара или силовое воздействие на материал распространяется на большую площадь [1], [2].

Анализ системы заправки нитей известных ранее способов формирования трехмерной ортогональной ткани [3–10] показал, что расположение механизма прокладывания вертикальных уточных нитей в зоне "бердо – устройство для сматывания нитей основы" может привести к "растаскиванию" нитей и отходу их от зоны формирования. Это приводит к необходимости прикладывать к берду значительные усилия для создания необходимой плотности ткани. При этом требуемая плотность слоев может быть не достигнута. Такой факт может стать решающим ограничением при формировании изделий сложного профиля.

Методы исследования

Нами предложена технология формирования ткани, при которой прокладывание утка производится в зоне "бердо – опушка ткани". Такая технология является рациональной для разрабатываемой системы заправки нитей. Отличие технологии состоит в том, что бердо совершает два движения – по вертикали и по горизонтали [11] (рис. 1).

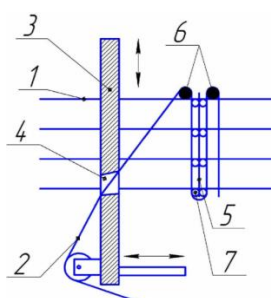


Рис. 1

Вертикальные нити утка 2 прокладываются бердом 3 в вертикальном направлении за счет того, что зуб берда имеет отверстия 4, в которые пробираются нити вертикального утка 2. После этого прокладывают кромочную нить 6, фиксирующую вертикальную систему уточных нитей 2 с противоположной стороны ткани. Затем возвращают бердо 3 в исходное положение

по вертикали и перемещают горизонтальные уточные нити 7 в горизонтальном направлении. Эти нити фиксируют с помощью кромочной нити 5 и возвращают уточные горизонтальные нити в исходное положение. На последнем этапе осуществляют перемещение бердом 3 участков проложенных нитей утка к опушке ткани в горизонтальном направлении. Описанный цикл формирования ткани повторяют.

Отличительная особенность технологии – отсутствие встречных систем перевязочных нитей (binder, z-yarn). Перевязка осуществляется одной системой нитей (вертикальный уток). Это дает возможность более плотной укладки слоев, позволяет использовать перевязочные нити в качестве армирующих (увеличить их линейную плотность) и применять технологию для получения изделий сложного и переменного профиля. При этом достигается трехмерное равномерное армирование материала, т.к. перевязочные нити могут быть по линейной плотности одинаковыми с нитями основы и горизонтального утка.

Для реализации предложенной технологии разработаны методы прогнозирования структуры 3D-ортогональных тканей и создания их геометрических 3D-моделей для виртуального моделирования свойств.

Получены зависимости, позволяющие прогнозировать параметры трехмерных ортогональных тканей для подготовки станка к заправке.

Учтена специфика технологии, когда нити утка прокладываются петлей, а также заложена возможность предварительного расчета параметров ткани с учетом объемной доли волокна в комплексной нити.

Сравнение результатов расчета со значениями, полученными экспериментально, показало, что погрешность определения основных параметров не превышает 6%.

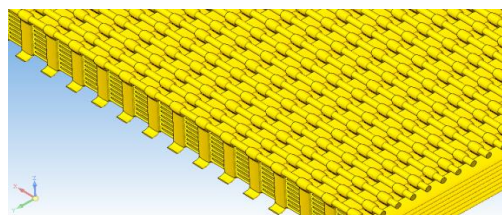


Рис. 2

На основе прогноза структуры ткани создается 3D-модель для последующего расчета (рис. 2).

Разработанная методика позволяет прогнозировать коэффициент заполнения объема проектируемой и создаваемой ткани волокнистым материалом (объемная плотность создаваемой ткани) и прочностные свойства конечного продукта, что имеет большое значение при создании наполнителей полимерных композиционных материалов.

Далее создается модель для прочностного расчета и выполняется расчет в САЕ-системах, проводится сравнение с аналогами или выбирается оптимальный вариант для дальнейшего изготовления на оборудовании [12].

При этом моделируется как композит на основе 3D-ортогональных тканей, так и изделия в виде ткани (рис. 3).

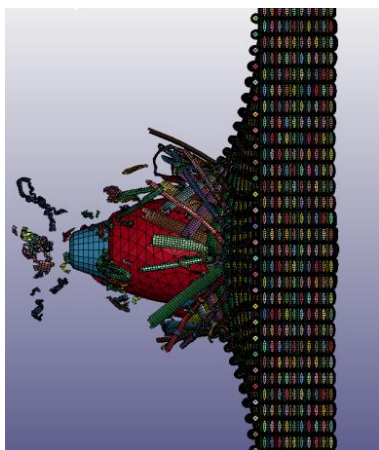


Рис. 3

После этого проектируется технологический процесс изготовления 3D-ортогональной ткани на основе технологии с перевязкой ткани по контуру в зоне формирования с многократным воздействием и многоуточным формированием, что позволяет создавать плотные, перевязанные по периметру сложно-профильные изделия и изделия с переменным профилем.

Спроектированы и изготовлены опытные образцы оборудования для формирования 3D-ортогональных тканей.

На рис. 4 представлен станок для формирования тканей из арамидных нитей.



Рис. 4

На рис. 5 представлен станок для формирования тканей из углеродных нитей.

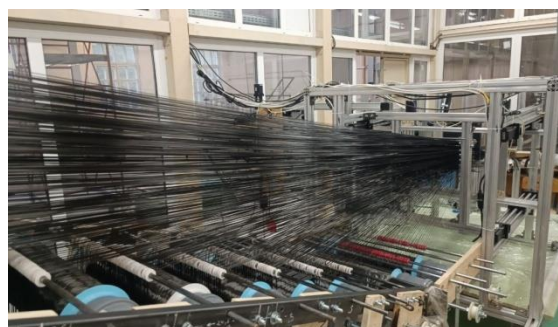


Рис. 5

Образец выработанной восьмислойной ткани из арамидных нитей представлен на рис. 6.



Рис. 6

Прокладывание всех восьми уточных нитей осуществлялось одновременно. Созданный материал представляет собой цельнотканое 3D-текстильное изделие, армированное в трех направлениях в каждой точке перекрещивания нитей, созданное по многоуточной технологии.

Полученную 3D-ортогональную ткань из арамидных нитей с поверхностной плотностью $4,7 \text{ кг/м}^2$ испытывали на пробитие пульей калибра 5,45 мм. В качестве контрольного образца использовали пакет из восьми слоев ткани полотняного пере-

плетения той же поверхностной плотности. В процессе испытаний измеряли скорость пули на входе в образец и на выходе из него. Начальная скорость пули составляла 895 м/с. Вид образцов после испытания представлен на рис. 7 (а – ткань полотняного переплетения, б – 3D-ортогональная ткань).

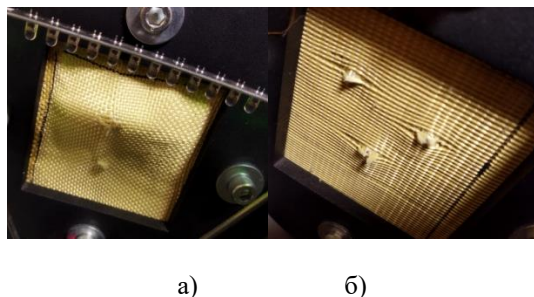


Рис. 7

По результатам эксперимента падение скорости пули после пробития пакета тканей полотняного переплетения составило 50 м/с, а 3D-ортогональной ткани – 60 м/с. Зная потерю кинетической энергии при прохождении образца, можно рассчитать необходимую толщину пакета тканей для полного гашения скорости пули. Для 3D-ортогональной ткани необходим пакет из восьми слоев, в то время как для ткани полотняного переплетения пакет должен состоять из 10 слоев, аналогичных используемым в процессе эксперимента. Однако важнейшим отличием стало существенно меньшее вспучивание ткани в области поражения, что, по нашему мнению, должно снизить риск травматизма.

ВЫВОДЫ

1. Предложена технология формирования ткани, при которой прокладывание утка производится в зоне "бердо – опушка ткани".

2. Разработаны методы прогнозирования структуры 3D-ортогональных тканей и создания их геометрических 3D-моделей для виртуального моделирования свойств.

3. Разработанная методика позволяет прогнозировать коэффициент заполнения объема проектируемой и создаваемой ткани волокнистым материалом (объемная

плотность создаваемой ткани) и прочностные свойства конечного продукта.

4. Результаты испытаний на пробитие образцов восьмислойной 3D-ортогональной ткани из арамидных нитей показали, что снижение скорости пули по сравнению с пробитием восьми слоев полотняной ткани составляет около 10 м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Xiwen Jia, Baozhong Sun, Bohong Gu. 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) 965–987 (2010).

2. Гречухин А.П., Хабибуллоев А., Рудовский П.Н., Рудковский М.Д. Технология формирования 3D-ортогональных тканей для композитов в составе бронезилената // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 6. С. 77...83.

3. US Patent № 5924459 Airjetmachine and diagonal Z-loopfabric pattern for three-dimensional fabric // Rowland G. Evans (Washington, DC) – 02.07.97.

4. 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.

5. 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.

6. Зайцев Д.В., Гречухин А.П., Рудовский П.Н. Система заправки при формировании 3D-ортогонального тканого материала // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2017. №3. С. 154...156.

7. Гречухин А.П., Хабибуллоев А., Рудовский П.Н., Рудковский М.Д. Методика расчета поверхностной плотности трехмерных ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 4. С. 113...120.

8. WO Patent № WO2015182923A1. Three-dimensional orthogonal fabric for thermoelectricity // Park Sang-koo – 03.12.2015.

9. CN Patent № CN103061004B. Novel structure three-dimensional fabric and weaving method thereof // Zhu Jianxun Qi, Jiasheng Hu Fangtian, Zhou Xubo Tang, Danfen Qiao Zhizhen – 30.07.2014.

10. Хабибуллоев А., Гречухин А.П., Рудовский П.Н., Старинец И.В., Куликов А.В. Расчет параметров берда при формировании трехмерных ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования // *Изв. вузов. Тех-*

нология текстильной промышленности. 2022. № 6. С. 92...97.

11. Патент РФ № 2643659, 02.02.18. Гречухин А.П., Ушаков С.Н., Тихомиров Л.А., Зайцев Д.В., Старинец И.В., Селиверстов В.Ю. Способ формирования трехмерной ортогональной ткани.

12. Гречухин А.П., Хабибulloев А., Рудковский П.Н., Рудковский М.Д. 3D ортогональные ткани для средств индивидуальной бронезащиты // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2021). Иваново, 2021. № 1. С. 28...32.

REFERENCES

1. Xiwen Jia., Baozhong Sun, Bohong Gu. 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) 965–987 (2010).

2. Grechukhin A.P., Khabibulloev A., Rudovsky P.N., Rudkovsky M.D. Technology of formation of 3D-orthogonal fabrics for composites in body armor // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 6. S. 77...83.

3. US Patent No. 5924459 Airjetmachine and diagonal Z-loopfabric pattern for three-dimensional fabric //RowlandG. Evans (Washington, DC) - 07/02/97.

4. 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.

5. Ushakov S.N., Grechukhin A.P., Rudovsky P.N., Palochkin S.V. Influence of the displacement value of the horizontal weft layer on the density of the arrangement of vertical layers of threads during the formation of three-dimensional orthogonal fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. No. 6. P. 96...100.

6. Zaitsev D.V., Grechukhin A.P., Rudovsky P.N. Filling system during the formation of a 3D orthogonal woven material // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2017. No. 3. P. 154...156.

7. Grechukhin A.P., Khabibulloev A., Rudovsky P.N., Rudkovsky M.D. Method for calculating the surface density of three-dimensional orthogonal fabrics with ligation by one system of threads in the formation zone // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 4. P. 113...120.

8. W.O.Patent No. WO2015182923A1. Three-dimensional orthogonal fabric for thermoelectricity// Park Sangkoo – 03.12.2015.

9. CN Patent No. CN103061004B. Novel structure three-dimensional fabric and weaving method thereof // Zhu Jianxun Qi, Jiasheng Hu Fangtian, Zhou Xubo Tang, Danfen Qiao Zhizhen – 07/30/2014.

10. Khabibulloev A., Grechukhin A.P., Rudovsky P.N., Starinets I.V., Kulikov A.V. Calculation of reed parameters during the formation of three-dimensional orthogonal fabrics with ligation by one system of threads in the formation zone // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 6. P. 92...97.

11. RF patent No. 2643659, 02.02.18. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Tikhomirov L.A., Zaitsev D.V., Starinets I.V., Seliverstov V.Yu. Method for forming a three-dimensional orthogonal fabric.

12. Grechukhin A.P., Khabibulloev A., Rudovsky P.N., Rudkovsky M.D. 3D orthogonal fabrics for personal armor protection // Physics of fibrous materials: structure, properties, high technologies and materials (SMARTEX-2021). Ivanovo, 2021. No. 1. S. 28...32.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования ткани и трикотажа Костромского государственного университета. Поступила 07.03.23.