

**МЕТОДИКА 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ***

**METHOD FOR 3D MODELING
OF THREE-DIMENSIONAL ORTHOGONAL FABRICS**

А.П. ГРЕЧУХИН, А. ХАБИБУЛЛОЕВ, П.Н. РУДОВСКИЙ, И.В. СТАРИНЕЦ, А.В. КУЛИКОВ
A.P. GRECHUKHIN, A. KHABIBULLOEV, P.N. RUDOVSKY, I.V. STARINETS, A.V. KULIKOV

(Костромской государственной университет)

(Kostroma State University)

E-mail: niskstu@yandex.ru

В статье представлен расчет основных технологических и геометрических параметров трехмерных ортогональных тканей. Полученные параметры необходимы для создания объемных моделей, учитывающих форму нити и объемную долю волокна в них. Для построения модели необходима информация о размерах поперечных сечений нитей в горизонтальном направлении. Размеры поперечных сечений нитей в вертикальном направлении определяются по предложенной методике. Зная поверхностную плотность ткани и ее толщину, можно рассчитать погрешность проектирования и внести соответствующую коррекцию во входные данные. На основе рассчитанных таким образом параметров строится трехмерная модель ткани для дальнейшего использования в расчетных комплексах.

The article presents the calculation of the parameters of three-dimensional orthogonal fabrics for the further creation of three-dimensional models. The models take into account the shape of the thread and the volume fraction of the fiber in them. To build a model, it is necessary to determine or set the dimensions of the cross-sections of the threads horizontally, starting from which vertical cross-sections of the threads can be obtained. Knowing the surface density of the fabric and its thickness, the design error is determined and the input data is corrected. Based on the calculated data, a three-dimensional model of the fabric is constructed for further use in calculation complexes.

Ключевые слова: трехмерная ортогональная ткань, трехмерная модель, поперечное сечение.

Keywords: three-dimensional orthogonal fabric, three-dimensional model, cross-section.

Введение

В статье представлен расчет необходимых параметров для построения 3D-моделей трехмерных ортогональных тканей.

Данный тип текстильных изделий получил большое распространение в качестве средств бронезащиты и армирующих основ композитов [1...4].

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

3D-модели тканей необходимы для дальнейшего прогнозирования средствами конечно-элементного моделирования свойств изделий, получаемых на их базе [5].

На основе технологии получения трехмерных ортогональных тканей с перевязкой одной системой нитей в зоне формирования [6] разработана технология многоуточного формирования данных тканей. При этом нити двух уточных систем прокладываются петлей в зоне формирования. В [7] определены рациональные параметры системы заправки нитей при формировании такой ткани, а в [8] установлены основные факторы, влияющие на плотность расположения нитей горизонтального и вертикального ут-

ков. Для их учета в последующем можно использовать методы, изложенные в [9], [10].

На основе методики расчета поверхностной плотности трехмерных ортогональных тканей, изложенной в работе [11], возможно не только рассчитать поверхностную плотность ткани, но и определить все необходимые параметры для построения 3D-модели. При этом основой методики являются положения, изложенные в [12], [13].

Методы

Исследовали несколько образцов тканей. Определены параметры для создания трехмерных моделей 3D-ортогональных тканей из арамидных нитей с учетом объемной доли волокна в материале. Исходные данные представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры	Обозначение	Образец 1	Образец 2
Количество слоев нитей основы	K_v	8	8
Количество нитей вертикальной системы	K_{vv}	75	75
Расстояние между нитями основы, мм	L_o	4	4
Расстояние между нитями утка, мм	L_{yg}	2,20	2,01
Ширина ткани, мм	B_g	300	300
Плотность материала нити, кг/м ³	ρ	1440	1440
Линейная плотность основных нитей, текс	T_o	644	644
Линейная плотность уточных горизонтальных нитей, текс	T_g	322	322
Линейная плотность уточных вертикальных нитей, текс	T_v	322	161
Объемная доля волокна в нити, мм	V_f	0,85	0,85

Общий вид восьмислойной ткани (образец 1 в табл.1) в разрезе вдоль утка представлен на рис.1.

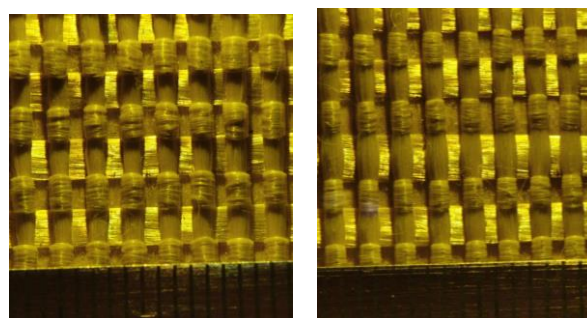


Рис. 1

Образцы арамидной ткани (вид сверху) представлены на рис. 2 (а – нити вертикального утка 644 текс, б – нити вертикального утка 322 текс.).

На основе анализа изображений (рис. 2) определены поперечники нитей – поперечник по горизонтали горизонтальных нитей утка, поперечник по горизонтали нитей ос-

новы, поперечник по горизонтали вертикальных нитей утка. Затем по формулам (22), (23) в работе [7] определяем вертикальные диаметры с учетом объемной доли волокна в материале нити и формы поперечного сечения нити. По полученным данным можно рассчитать толщину ткани и поверхностную плотность.



а)

б)

Рис. 2

Сравнение результатов расчета с полученными экспериментально позволяет оценить точность расчетов вертикальных диаметров нитей, которые без специфических методов исследования, таких как разрушение образца или томография, определить нельзя.

При построении 3D-модели ткани форма сечения нитей основы и утка принимались в виде эллипса, а кромочных нитей – в виде окружности. Дополнительно введены параметры, характеризующие уточные нити горизонтального утка с тыльной стороны ткани (в данном примере восьмого

слоя), т.к. линейную плотность данных нитей целесообразно варьировать для вертикального расположения петли вертикального утка. При формировании образцов использована нить повышенной линейной плотности (966 текс) для того, чтобы избежать неравномерного расположения нитей утка по толщине ткани.

Результаты и обсуждение

Данные для создания 3D-модели, полученные по предлагаемой методике, представлены в табл.2. В скобках представлены экспериментальные данные.

Т а б л и ц а 2

Параметр	Обозначение	Образец 1	Образец 2
Расчетные данные			
Толщина ткани, мм	B	6,49 (6,51)	6,27 (6,25)
Масса нити вертикального утка в 1 м ² ткани, кг	M _v	0,659	0,353
Масса нити горизонтального утка в 1 м ² ткани, кг	M _g	2,507	2,742
Масса нити основы в 1 м ² ткани, кг	M _o	1,288	1,288
Масса кромочных нитей, фиксирующих вертикальный уток в 1 м ² ткани, кг	M _k	0,295	0,323
Поверхностная плотность ткани, кг/м ²	M	4,750 (4,827)	4,705 (4,791)
Уработка уточных горизонтальных нитей, %	a _{yg}	99,64	99,67
Уработка уточных вертикальных нитей, %	a _{yv}	77,83	77,4
Поперечник по вертикали вертикальных нитей утка, мм	d _{yvv}	0,403	0,225
Поперечник по вертикали горизонтальных нитей утка в ткани, мм	d _{ygv}	0,372	0,374
Поперечник по вертикали нитей основы в ткани, мм	d _{ov}	0,287	0,28
Исходные данные (замеры на ткани)			
Поперечник по вертикали 8-й горизонтальной нити утка, мм	d _{ygv8}	0,558	0,561
Поперечник по горизонтали вертикальных нитей утка в ткани, мм	d _{yvg}	1,662	1,492
Поперечник по горизонтали нитей основы в ткани, мм	d _{og}	2,338	2,510
Поперечник по горизонтали 8-й горизонтальной нити утка, мм	d _{ygg8}	1,8	1,79
Поперечник по вертикали вертикальной кромочной нити, мм	d _{krvv}	0,818	0,818
Поперечник по горизонтали вертикальных кромочных нитей, мм	d _{krvg}	0,818	0,818

Отклонения между расчетными и экспериментальными данными в табл. 2 не превышают 2%.

Поверхностная плотность изделия будет существенно зависеть от плотности по утку. Однако, в случае использования комплексных нитей и специфики 3D-ортогональной ткани, при прочих равных усло-

виях, изменение плотности по утку приведет к изменению поперечника утка по горизонтали и вертикали (поперечник по горизонтали уменьшится, а по вертикали увеличится). Учитывая это, построим зависимость поверхностной плотности ткани от плотности по утку (рис.3) с учетом данных табл. 2 и формул, изложенных в работе [11].

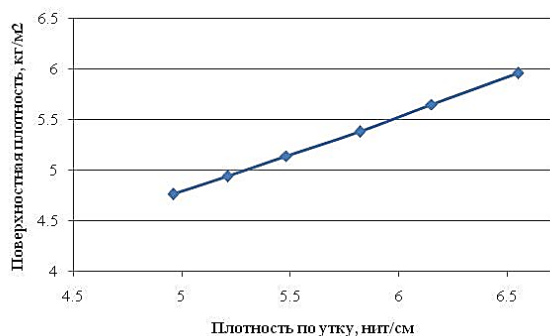


Рис. 3

На основе расчетных данных (рис. 3) возможно осуществление прогнозирования коэффициента заполнения, что позволит без затрат дорогостоящего сырья проводить оптимизацию технологического процесса ткачества. Зависимость коэффициента заполнения от плотности ткани по утку представлена на рис. 4.

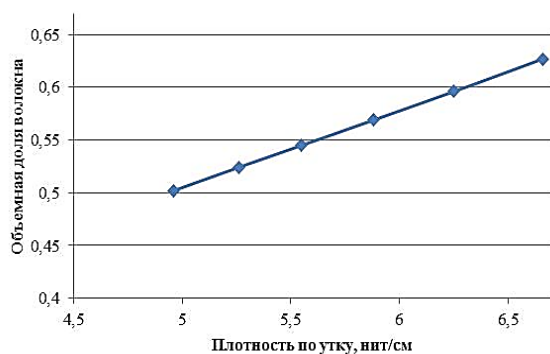


Рис. 4

На основе полученных в табл. 2 значений определены все параметры нитей для построения 3D-модели ткани. Методика создания модели выглядит следующим образом.

Строятся опорные сечения нитей основы, горизонтального утка, кромочных нитей, фиксирующих вертикальный уток и методом выдавливания строится трехмерная модель нитей. Все перечисленные системы нитей прямолинейны. Средняя линия нити вертикального утка строится с учетом расположения кромочной нити и расстояний между нитями горизонтального утка (рис.5).

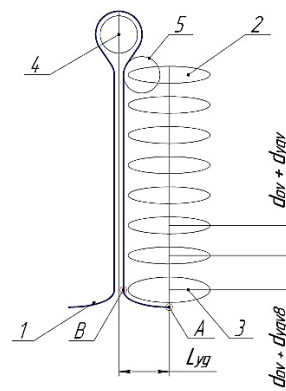


Рис. 5

На рис. 5 представлены следующие обозначения: 1 – нить вертикального утка, 2 – нить горизонтального утка, 3 – нить горизонтального утка с тыльной стороны ткани, 4 – кромочная нить, 5 – вспомогательная окружность (окружность 5 необходима, чтобы снизить кривизну нити (при дальнейшем построении сетки конечных элементов при большой кривизне возможны нарушения порядка расположения узлов элементов для ориентации оси материала нити)), А и В – вспомогательные точки, L_{yg} – расстояние между нитями утка. Участок нити АВ строится как эквидистанта к поперечному сечению уточной нити 3. После этого петля вертикального утка копируется на требуемое для построения 3D-модели расстояние. Затем в поперечной к построенной петле плоскости строится сечение нити вертикального утка, и методом выдавливания вдоль кривой получаем объемную модель нити. После этого располагаем нити по координатам и таким образом получаем совокупность нитей, формирующих 3D-модель ткани. Трехмерная модель ткани (образец 1 в табл. 2) представлена на рис. 6. Изложенные действия могут быть осуществлены как программным, так и ручным способом.

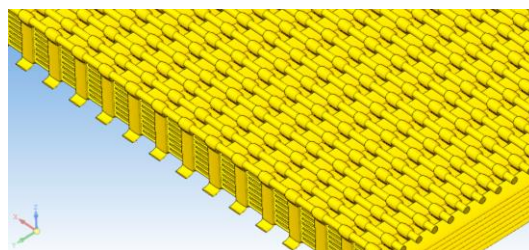


Рис. 6

На основе произведенных расчетов изготовлены зубья берда для опытной установки, реализующей предложенную технологию получения 3D-ортогональных тканей из углеродных и арамидных нитей. На основе проведенных расчетов спроектирована конструктивно-заправочная линия и запрограммированы механизмы горизонтального и вертикального перемещения берда. В развитие этой работы для более точного моделирования процесса формирования тканей необходимо учитывать жесткость нитей при изгибе и поперечном сжатии по методикам, изложенным в [19], [20].

ВЫВОДЫ

1. На основе методики расчета поверхностной плотности 3D-ортогональных тканей разработана методика построения их трехмерной модели. В результате расчета получены все необходимые данные для построения совокупности трехмерных моделей нитей, формирующих ткань.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilisik K., Karaduman N. S., Bilisik N. E. 3Dfabricsfortechnicaltextileapplications. In: JeonHY, editor. Non-woven Fabrics. Intec. – 2016. P. 81...141.
2. XiwenJia, Zihui Xia, BohongGu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells // International Journal of Damage Mechanics. – 2015. Vol. 24. P. 338...362.
3. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites / Mishra Rajesh, Kumar BeheraBijoya, MilitkyJiri // Journal of industrial textiles.- 2016. Vol. 45. P. 978-994.
4. Рудовский П.Н., Гречухин А.П., Палочкин С.В. Рациональное армирование деталей из композиционных материалов тканями с переменной плотностью по утку // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2015, № 2 (35). С. 21...23.

5. Bandaru, Aswani Kumar, Vikrant V. Chavan, Suhail Ahmad, Ramasamy Alagirusamy and Naresh Bhatnagar. “Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors // International Journal of Impact Engineering. – 89 (2016): 1-13.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Grechukhin A.P., Seliverstov V.Y., Rudovskiy P.N. The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers // Journal of the Textile Institute. – 2017, 108(12), P.2067...2072

10. Grechukhin A.P., Rudovskiy P.N., Sokova G.G., Korabelnikov A.R. Carbon fabric 3D modeling according to nonlinear bending theory // Journal of the Textile Institute. – 2020, 111(10). P. 1511...1517.

11. 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.

12. Grechukhin A.P., Rudovskiy P.N. New geometrical model of woven fabric taking into account the change of its form, size and lateral bending // Fibres and Textiles in Eastern Europe, – 2021, 29(2). P.20...24.

13. Гречухин А.П., Рудовский П.Н. Развитие теории строения и формирования однослойных тканей. – Кострома: Костромской государственной университет, 2017. ISBN: 978-5-8285-0917-1.

REFERENCES

1. Bilisik K., Karaduman N. S., Bilisik N. E. 3D fabrics for technical textile applications. In: JeonHY, editor. Non-woven Fabrics. Intec. - 2016. P. 81...141.
2. Xiwen Jia, Zihui Xia, Bohong Gu. Nonlinear numerical predictions of three-dimensional orthogonal woven composite under low-cycle tension using multiscale repeating unit cells // International Journal of Damage Mechanics. – 2015. Vol. 24. P. 338...362.
3. Rajesh Mishra, Bijoya Kumar Behera, Jiri Militky. Impact simulation of three-dimensional woven kevlar-epoxy composites // Journal of industrial textiles. – 45.P. 978...994.
4. Rudovskiy P.N., Grechukhin A.P., Palochkin S.V. Rational Reinforcement of Composite Parts by

Fabrics with Variable Weft Density // Bulletin of Kostroma State Technological University. – 2015, № 2 (35). P. 21...23.

5. Bandaru, Aswani Kumar, Vikrant V. Chavan, Suhail Ahmad, Ramasamy Alagirusamy and Naresh Bhatnagar. "Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors // International Journal of Impact Engineering. – 89 (2016): 1-13.

6. Russian 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 of formation of three-dimensional orthogonal fabric.

7. Grechukhin A.P., Ushakov S.N., Rudovsky P.N., Palochkin S.V. Definition of rational parameters of threading system when forming a three-dimensional orthogonal woven fibrous material // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2018, № 5. P. 111...115.

8. Ushakov SN, Grechukhin AP, Rudovsky PN, Palochkin SV Influence of the horizontal weft layer displacement value 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, № 6. С. 96...100.

9. Grechukhin, A.P., Seliverstov, V.Y., Rudovskiy, P.N. The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers //

Journal of the Textile Institute. – 2017, 108(12). P.2067...2072

10. Grechukhin, A.P., Rudovskiy, P.N., Sokova, G.G., Korabelnikov, A.R. Carbon fabric 3D modeling according to nonlinear bending theory // Journal of the Textile Institute. – 2020, 111(10). P. 1511...1517.

11. Grechukhin A.P., Khabibuloev A., Rudovsky P.N., Rudkovsky M.D. Calculation methods for surface density of three-dimensional orthogonal fabrics with a single thread system tying in the forming zone // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2021, № 4. P. 113...120.

12. Grechukhin, A.P., Rudovskiy, P.N. New geometrical model of woven fabric taking into account the change of its form, size and lateral bending // Fibres and Textiles in Eastern Europe. – 2021, 29(2). P. 20...24.

13. Grechukhin A.P., Rudovskiy P.N. Development of theory of structure and formation of single-layered fabrics. – Kostroma: Kostroma State University 2017. 171 p. ISBN: 978-5-8285-0917-1.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования ткани и трикотажа. Поступила 16.01.23.