

УДК 677.024

**МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ  
ТКАНИ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НИТЕЙ\***

**A METHOD OF CONSTRUCTING THREE-DIMENSIONAL MODELS  
OF WOVEN FABRICS OF CARBON FIBERS**

*А.П. ГРЕЧУХИН, Д.В. ЗАЙЦЕВ, С.Н. УШАКОВ, П.Н. РУДОВСКИЙ*  
*A.P. GRECHUKHIN, D.V. ZAITSEV, S.N. USHAKOV, P.N. RUDOVSKIY*

(Костромской государственной университет)  
(Kostroma State University)  
E-mail: [niskstu@yandex.ru](mailto:niskstu@yandex.ru)

*В статье представлена методика построения трехмерной модели ткани, состоящей из множества поверхностей, моделирующих нити основы и утка, полученных на основе уравнений поверхностей, задающих контуры нитей. Профиль опорного сечения нити определяется путем расчета координат их центров, по которым рассчитываются координаты точек сопряжения прямых с кривыми. Для ткани из углеродных нитей дополнительно установлены размеры поперечника нитей основы и утка, и на основе полученных ранее значений рассчитана трехмерная модель участка ткани.*

*The article presents the algorithm for the calculation of the ordinates of warp and weft on the basis of which are calculated the coordinates of the junction points of straight with curves that describe the profile of the support section of the thread. Then, on the basis of the equations of the surfaces defining the contours of the*

---

\* Работа выполнена в рамках реализации проекта 11.9627.2017/БЧ.

*threads, built a three-dimensional model of tissue consisting of multiple surfaces that simulate the warp and weft. For fabric of carbon fibers is additionally measured the size of the diameter of warp and weft and on the basis of the previously obtained values of the calculated three-dimensional model of the tissue segment.*

**Ключевые слова:** трехмерная модель ткани, координаты центров нитей, углеродная нить.

**Keywords:** three-dimensional model of the tissue, the coordinates of the centers of strands of filaments, carbon filament.

Одной из основных концепций в проектировании и моделировании изделий сегодня является применение технологии цифровых прототипов. Данная технология по современным меркам должна объединять в себе как математическую модель для описания объекта [1], его физических свойств и процессов, так и графическую трехмерную визуализацию [2], [3]. Трехмерные модели являются не только частью системы проектирования, но и используются в дальнейших расчетах напряженно-деформированного состояния ткани или композита на его основе [4...6]. Подход к построению трехмерной модели нити в ткани на основе кусочно-непрерывных функций изложен в работах [2], [3]. Для построения трехмерной модели ткани на основе кусочно-непрерывных функций необходимо задаться координатами центров нитей основы и утка в местах пересечения с другой системой нитей. В [7...10] представлена методика для нахождения таких координат в пределах раппорта ткани. Ограничивает применение методики то, что толщина нитей основы и утка в раппорте принимается одинаковой. Кроме того, невозможно получать трехмерные модели тканей с различными геометрическими параметрами для каждой ячейки переплетения. Это не позволяет моделировать структуру ткани при приложении различных нагрузок. В настоящей статье представлена методика построения трехмерной модели однослойной ткани, лишенная указанных недостатков.

Предлагаемая методика строится на основе алгоритма определения координат центров нитей в местах пересечения для всего моделируемого участка. Весь расчет можно проводить от центров первой нити

основы или первой нити утка. В данной статье мы использовали в качестве начальной нити нить утка. Схема для расчета координат центров нитей основы и утка представлена на рис. 1.

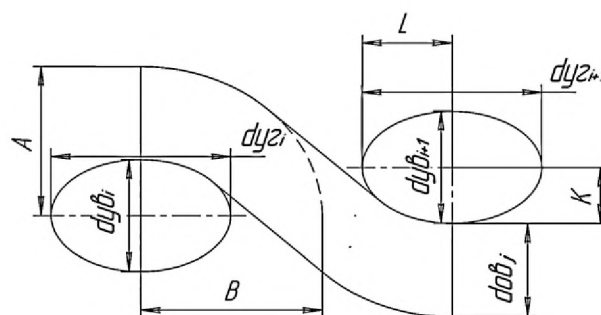


Рис. 1

На рис. 1 обозначено:  $A$  – вертикальная полуось,  $B$  – горизонтальная полуось эллипса для текущей нити, над которой он строится;  $K$  – вертикальная полуось,  $L$  – горизонтальная полуось эллипса для сечения соседней нити, находящейся справа от текущей нити;  $dov$ ,  $dov$  – вертикальные диаметры нитей утка и основы соответственно,  $dog$ ,  $dog$  (на рисунке не показано) – горизонтальные диаметры нитей утка и основы.

Фрагмент блок-схемы алгоритма для расчета ординат центров нитей основы и утка в местах пересечения приведен на рис. 2.

Исходными данными для расчета являются: значения высот волн изгиба нитей основы  $h_0$  и утка  $h_u$ , диаметры  $dov$ ,  $dog$ ,  $dov$  и  $dog$  нитей основы и утка в ткани, тип текущего перекрытия – основное или уточное, которое определяется матрицей  $\Pi_{i,j}$  с элементами, равными единице для основного перекрытия и нулю для уточного. При этом  $i = 0...n$ ,  $j = 0...m$  ( $i$  – текущий номер нити утка,  $j$  – текущий номер нити

основы,  $n$  – количество нитей утка,  $m$  – количество нитей основы).

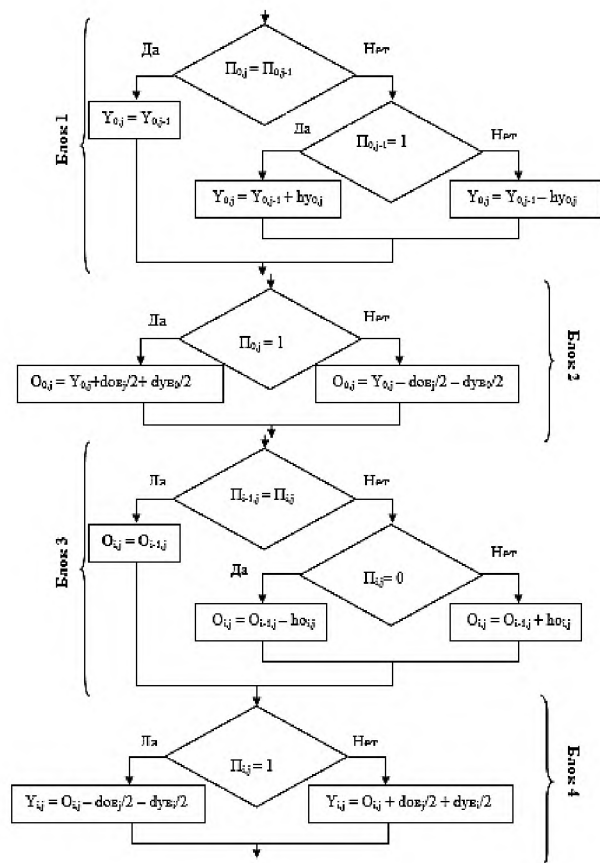


Рис. 2

Сначала рассчитываются ординаты центров первой нити утка в местах перекрещивания с нитями основы (Блок 1 на рис. 2). Их можно рассчитать, исходя из логического условия, которое выглядит следующим образом: если кодировка переплетения в пределах первой уточной нити одинаковая ( $\Pi_{i,j} = \Pi_{i,j-1}$  при  $i = 0, j = 1 \dots m$ ), тогда значение ординаты центра нити остается таким же, как и предыдущее; если нет, то если текущее перекрытие является уточным, ордината текущего центра будет больше на значение высоты волны изгиба нити утка, если основным, то меньше на указанное значение. Начальное значение (ординату первого центра) принимаем равным нулю ( $Y_{0,0} = 0$ ).

Ординаты центров нитей основы (Блок 2 на рис. 2) в местах пересечений их с первой нитью утка ( $i = 0, j = 0 \dots m$ ) находим из логического условия: если текущее перекрытие основное, то ордината центра нити

будет больше ординаты центра нити утка на величину суммы вертикальных диаметров, если перекрытие уточное, то меньше ординаты центра утка на величину суммы вертикальных диаметров.

Далее (Блок 3 на рис. 2) рассчитываем ординаты центров нитей основы в местах пересечений с нитями утка на всем раппорте построения модели. Рассуждаем следующим образом: если кодировка переплетения в пределах нити основы одинаковая, то значение ординаты центра нити остается таким же, как и предыдущее, если нет, а перекрытие уточное, то ордината центра нити будет меньше предыдущего значения на величину высоты волны изгиба нити основы на данном интервале изгиба; если основное, то больше предыдущего значения на величину высоты волны изгиба нити основы. В третьем и четвертом блоках текущие номера нитей изменяются в пределах:  $i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$ .

Далее рассчитываем значения ординат противоположной системы нитей (нитей утка). Центры нитей утка в местах пересечений их с нитями основы находим (Блок 4 на рис. 2) из логического условия: если текущее перекрытие основное, то ордината центра нити утка будет меньше ординаты центра основы на величину суммы вертикальных диаметров нитей; если перекрытие уточное, то больше ординаты центра основы на величину суммы вертикальных диаметров.

Параметры  $A, B, K, L$  зависят от типа перекрытия (основное или уточное). Для каждого участка изгиба нитей основы центр текущей уточной нити является началом координат. Поэтому к ним применяем следующее логическое условие (на примере построения верхней части профиля нити):

- если текущее перекрытие основное, то

$$A_{i,j} = d_{yvj}/2 + d_{ovj}, \quad (1)$$

$$B_{i,j} = d_{yvj}/2 + d_{ovj}, \quad (2)$$

- если текущее перекрытие уточное, то

$$A_{i,j} = -d_{yvj}/2, \quad (3)$$

$$B_{i,j} = d_{yvj}/2, \quad (4)$$

- если следующее перекрытие основное, то

$$K_{i,j} = dy_{v_{i+1}}/2 + do_{v_j}, \quad (5)$$

$$L_{i,j} = dy_{\Gamma_{i+1}}/2 + do_{v_j}, \quad (6)$$

- если следующее перекрытие уточное, то

$$K_{i,j} = -dy_{v_{i+1}}/2, \quad (7)$$

$$L_{i,j} = dy_{\Gamma_{i+1}}/2. \quad (8)$$

Далее рассчитываем координаты точек сопряжения прямых с кривыми, которые описывают профиль опорного сечения нити (в наших расчетах мы использовали эллипс) [11], проводим вычисления для всех основных и уточных нитей. Затем на основе уравнений поверхностей, задающих контуры нитей [2], [3], строя множество поверхностей, моделирующих нити основы и утка, получаем трехмерную модель ткани.

Пример реализации методики и визуализации результатов моделирования представлен для ткани из углеродных нитей. Для этого дополнительно измерены диаметры поперечников нитей основы и утка, ранее получены значения высот волн изгиба нитей [1], и с учетом основного геометрического свойства ткани рассчитана трехмерная модель участка ткани. Трехмерная модель углеродной ткани полотняного переплетения представлена на рис. 3.

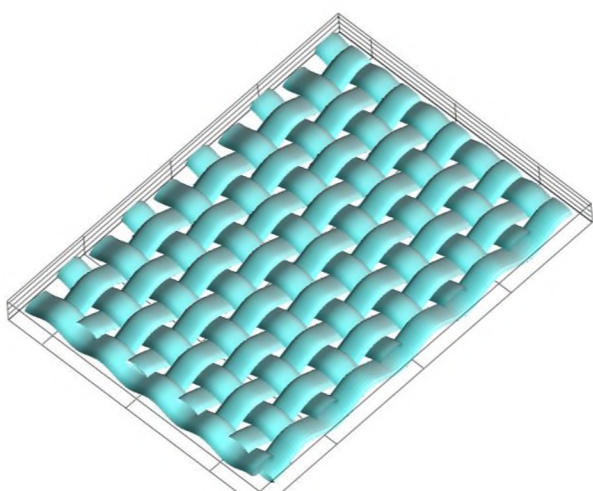


Рис. 3

Пример построения трехмерной модели углеродной ткани для переплетения саржа 1/3 представлен на рис. 4.

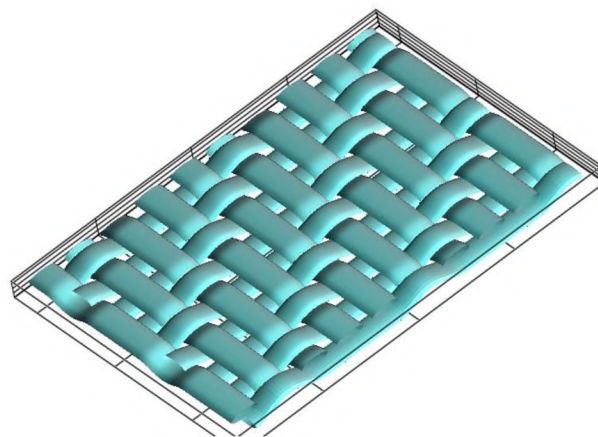


Рис. 4

Следует отметить, что при моделировании рассмотренных углеродных тканей значения высот волн изгиба нитей основы и утка для каждой ячейки переплетения являются постоянными.

Преимущество разработанной методики состоит в том, что с ее помощью можно получать трехмерные модели строения ткани с различными геометрическими параметрами каждой ячейки переплетения, что позволяет моделировать трехмерную структуру ткани при приложении различных нагрузок. Полученные трехмерные модели в совокупности с методами расчета параметров строения тканей [1] могут быть адаптированы для решения задач прогнозирования физико-механических свойств композитов на волокнистой основе [4...6], [12], [13].

## ВЫВОДЫ

Разработана методика построения трехмерной модели строения ткани с различными геометрическими параметрами каждой ячейки переплетения, апробированная на примере построения трехмерной модели ткани из углеродных нитей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гречухин А.П. Математическая модель строения ткани из углеродных нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 5. С. 94...100.
2. Гречухин А.П., Селиверстов В.Ю. Трехмерная модель формы нити в однослойной ткани полотняного переплетения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, №5. С. 62...64.

3. *Зайцев Д.В., Гречухин А.П.* Компьютерное трехмерное моделирование строения ткани полотняного переплетения на различных этапах формирования // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 4. С. 85...88.

4. *Любимов А.К., Кожанов Д.А.* Моделирование вида структурного элемента гибких тканых композитов при статическом растяжении с применением метода конечных элементов в ANSYS // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. Т. 8, № 1. С. 113...120.

5. *Кожанов Д.А.* Особенности конечно-элементного моделирования вида структурного элемента гибких тканых композитов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2016, № 1 (237). С. 7...15.

6. *Кожанов Д.А., Любимов А.К.* Итерационная модель деформирования гибкого тканного композита // В сб.: Современные концепции научных исследований / Мат. IV Междунар. научн.-практ. конф. / Под ред. Н.В. Пшениснова. – Нижегородский филиал МИИТ, 2015. С. 220...224.

7. *Толубеева Г.И.* Методика расчета уработок нитей во фронтальной плоскости однослойной ткани по ее заправочным данным и высоте волны изгиба основы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 3. С. 48...53.

8. *Толубеева Г.И.* Пример расчета уработок нитей основы и утка и построение их профилей в ткани полотняного переплетения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 2. С. 53...58.

9. *Толубеева Г.И.* Методика расчета уработок нитей в горизонтальной плоскости однослойной ткани по ее заправочным данным и высоте волны изгиба основы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 5. С. 64...70.

10. *Толубеева Г.И.* Методика построения профилей нитей основы и утка однослойной ремизной ткани // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 6. С. 69...74.

11. *Гречухин А.П., Селиверстов В.Ю.* Способ построения границ профиля нити в ткани с переменной плотностью расположения нитей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, № 1. С. 46...49.

12. *Бенецкая В.В., Селиверстов В.Ю., Киселев А.М., Рудовский П.Н., Киселев М.В.* Моделирование структуры тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 3. С. 23...28.

13. *Рудовский П.Н., Селиверстов В.Ю., Баскаков Д.А.* Выбор геометрических параметров при конечно-элементном моделировании слоисто-каркасной ткани // Вестник Костромского гос. технолог. ун-та. – 2013, № 1 (30). С. 20...22.

2. *Grechuhin A.P., Seliverstov V.Ju.* Trehmernaja model' formy niti v odnoslojnoj tkani polotnjanogo perepletenija // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2011, №5. S. 62...64.

3. *Zajcev D.V., Grechuhin A.P.* Komp'juternoe trehmerное modelirovanie stroenija tkani polotnjanogo perepletenija na razlichnyh jetapah formirovanija // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, № 4. S. 85...88.

4. *Ljubimov A.K., Kozhanov D.A.* Modelirovanie vida strukturnogo jelementa gibkih tkanyh kompozitov pri staticheskom rastjazhenii s primeneniem metoda konechnyh jelementov v ANSYS // Komp'juternye isledovaniya i modelirovanie. – 2016. T.8, №1. S.113...120.

5. *Kozhanov D.A.* Osobennosti konechno-jelementnogo modelirovanija vida strukturnogo jelementa gibkih tkanyh kompozitov // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki. – 2016, № 1 (237). S. 7...15.

6. *Kozhanov D.A., Ljubimov A.K.* Iteracionnaja model' deformirovanija gibkogo tkannogo kompozita // V sb.: Sovremennye koncepcii nauchnyh issledovanij / Mat. IV Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. / Pod red. N.V. Pshenisnova. – Nizhegorodskij filial MIIT, 2015. S. 220...224.

7. *Tolubeeva G.I.* Metodika rascheta urabotok nitej vo frontal'noj ploskosti odnoslojnoj tkani po ee zapravochnym dannym i vysote volny izgiba osnovy // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, №3. S.48...53.

8. *Tolubeeva G.I.* Primer rascheta urabotok nitej osnovy i utka i postroenie ih profilej v tkani polotnjanogo perepletenija // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, № 2. S.53...58.

9. *Tolubeeva G.I.* Metodika rascheta urabotok nitej v gorizont'al'noj ploskosti odnoslojnoj tkani po ee zapravochnym dannym i vysote volny izgiba osnovy // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, №5. S.64...70.

10. *Tolubeeva G.I.* Metodika postroenija profilej nitej osnovy i utka odnoslojnoj remiznoj tkani // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, № 6. S. 69...74.

11. *Grechuhin A.P., Seliverstov V.Ju.* Sposob postroenija granic profilja niti v tkani s peremnojj plotnost'ju raspolozhenija nitej // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, № 1. S. 46...49.

12. *Beneckaja V.V., Seliverstov V.Ju., Kiselev A.M., Rudovskij P.N., Kiselev M.V.* Modelirovanie struktury tkanej // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2013, № 3. S. 23...28.

13. *Rudovskij P.N., Seliverstov V.Ju., Baskakov D.A.* Vybor geometricheskikh parametrov pri konechno-jelementnom modelirovanii sloisto-karkasnoj tkani // Vestnik Kostromskogo gos. tehnolog. un-ta. – 2013, № 1 (30). S.20...22.

## REFERENCES

1. *Grechuhin A.P.* Matematicheskaja model' stroenija tkani iz uglerodnyh nitej // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, №5. S.94...100.

Рекомендована кафедрой технологии проектирования ткани и трикотажа. Поступила 04.12.17.