

**УДК 677.019**

**Разработка методики определения пространственного  
расположения нити в трехмерной ткани<sup>1</sup>**

Ивановский Владимир Александрович

**Аннотация.** В рамках автоматизации контроля качества изделий из композитных материалов разработана методика распознавания армирующих элементов в структуре трехмерной ткани. В качестве способа получения информации о готовом армирующем полуфабрикate применен метод компьютерной томографии. Предложенная методика основана на распознавании нити по ее сечениями на поперечных плоскостях распознавания.

**Ключевые слова.** Композитные материалы, трехмерные ткани, автоматизация контроля качества.

На сегодняшний день существует задача создания цельнотканых трехмерных армирующих структур для производства композитных материалов [1,2].

Заявленные свойства изделий из композитных материалов, в которых используются трехмерные цельнотканые армирующие наполнители, в значительной степени зависят от правильного геометрического расположения армирующих элементов, так как их ориентация должна строго соответствовать направлениям сил внешнего нагружения [3,4].

Армирующий наполнитель таких изделий представляет собой трехмерную ткань со сложной внутренней структурой, исключающий контроль расположения армирующих элементов визуальными методами.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. С.Н.Титова

В свою очередь, изделия из композитных материалов с цельноткаными трехмерными структурами находят все большее применение, а контроль качества таких изделий, особенно в авиакосмической отрасли, становится все более актуальным.

Основной идеей решения задачи контроля геометрического расположения элементов структуры изготовленной трехмерной ткани является проведение сравнительного анализа с ее компьютерной моделью.

С этой целью предлагается методика распознавания каждого армирующего элемента (нити) и определения ее пространственного геометрического расположения.

Исследования существующих, неразрушающих методов получения информации о внутренней структуре показали, что наиболее подходящим в данном случае является метод компьютерной томографии [5,6]. Применение данного метода позволило получить ряд томограмм готового тканого полуфабриката, дающих возможность синтезировать из них трехмерный массив значений оттенков серого цвета, т.е. изображение трехмерной ткани в растровом виде. Векторизация полученного трехмерного массива, т.е. выделение из этого массива армирующих нитей в векторном виде, позволяет разработать методику сравнения пространственного расположения трехмерной ткани с ее компьютерной моделью.

Синтез трехмерного растрового массива заключается в компоновке в один трехмерный массив всех томограмм исследуемого объекта (рис.1а, 1б).

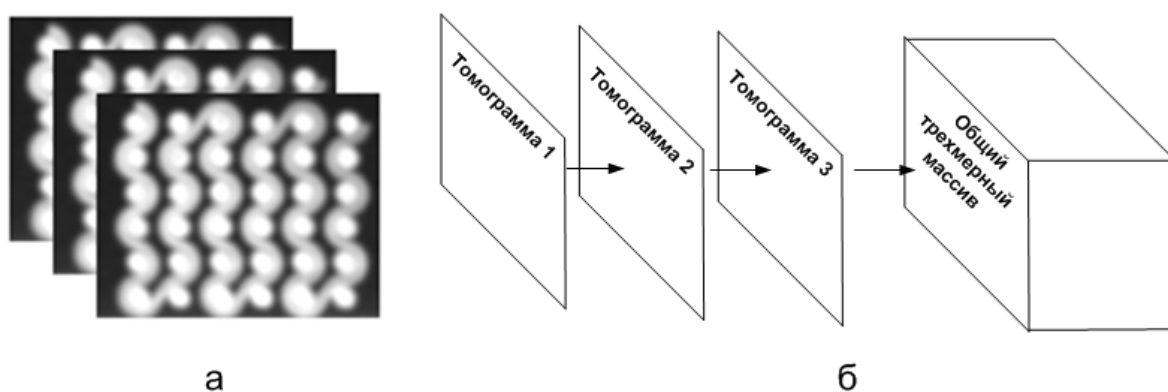


Рис.1.Синтез трехмерного массива пикселей (а – томограммы тканей; б – принцип синтеза массива)

Далее необходимо выбрать нить для ее распознавания в этом массиве (рис.2). Для этого должны быть распознаны первые поперечные сечения в одной из систем нитей.

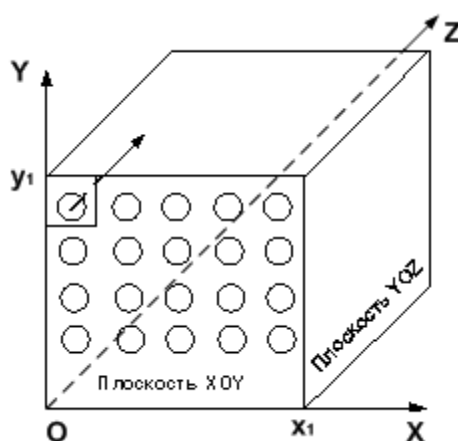


Рис.2.Расположение первых поперечных сечений одной из систем нитей в трехмерном массиве.

Однако, трехмерные ткани имеют сложную структуру с пересечением нитей в различных направлениях. В результате, на томограммах образы поперечников нитей не всегда понятны и различимы даже человеку (рис.3а). Так же образ поперечника нити может быть в какой-либо мере искажен вследствие ее частичной деформации (рис.3б), может быть различная яркость и контрастность изображений нитей (рис.3в).

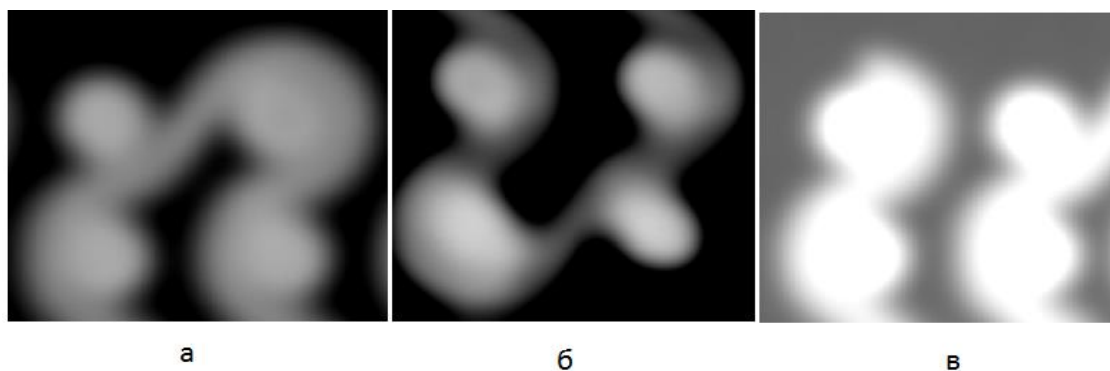


Рис.3. Томограммы трехмерной ткани (а – томограмма со средней контрастностью; б – томограмма с искаженными образами, в – томограмма с избыточной яркостью)

Для решения нашей задачи требуется распознать профили сечений нитей.

Одним из эффективнейших средств при анализе данных, в том числе и двумерных (изображений), является вейвлет-преобразование [7–9].

Для выделения образа поперечника нити предлагается использование двумерного вейвлет-преобразования в частном виде – с фиксированным масштабом вейвлета. Так как профиль поперечника нити близок к кругу, то можно использовать двумерный вейвлет, поверхность которого образована при помощи вращения вейвлета FHAT (French Hat) (рис.4а) вокруг своей оси (рис.4б).

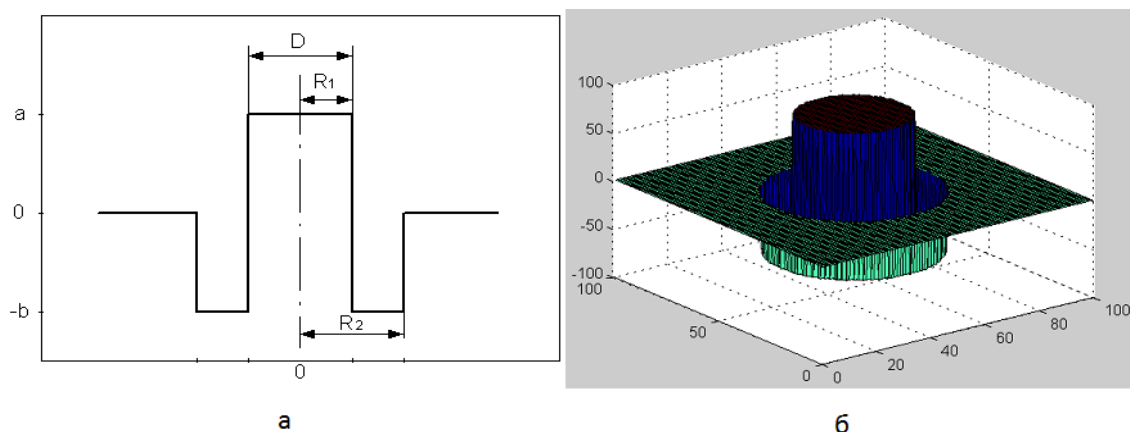


Рис.4 Конструирование функции вейвлета (а – исходный вейвлет FHAT; б – полученный двумерный вейвлет)

При этом его проектирование предлагается осуществить в зависимости от вводимого заранее условного диаметра используемых в изделии нитей.

Предположим условный диаметр нити  $d$ . Тогда радиус положительной части вейвлета принимаем  $R_1 = D/2$ , радиус отрицательной его части будет  $R_2 = 1,5R_1$ . Поверхность вейвлета размещаем на двумерной матрице размерами  $N \times M$ . Задаем  $N=M=2 \cdot D$ . Размещаем центр поверхности вейвлета в центре двумерной матрицы. Расстояние каждой точки до центра вейвлета вычисляем по следующей формуле:

$$R_i(x, y) = \sqrt{|x - x_0|^2 + |y - y_0|^2}.$$

Формула функции вейвлета примет следующий вид:

$$\psi_i(x, y) = \begin{cases} a, & R_i(x, y) \leq R_1 \\ -b, & R_1 < R_i(x, y) \leq R_2 \\ 0, & R_i(x, y) > R_2 \end{cases}$$

Принимаем значение  $a$  равным максимальному значению оттенка серого цвета. Значение  $b$  вычисляем по формуле:

$$b = \frac{S_{R1} \cdot a}{S_{R2} - S_{R1}},$$

где  $S_{R1} = \pi \cdot R_1^2$ ,  $S_{R2} = \pi \cdot R_2^2$

С целью ускорения процесса вычисления вейвлет-преобразования представляется целесообразным обрабатывать поочередно фрагменты томограммы размерами равными размерам матрицы вейвлет-функции ( $N \times M$ ) с координатами центра фрагмента  $(x_s, y_s)$ . Тогда, с учетом того, что масштаб вейвлета остается постоянным и смещения функции вейвлета не происходит, а смещается исследуемая область в матрице томограммы, формула вейвлет-преобразования будет следующей:

$$W(x_s, y_s) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} \psi(x, y) f(x, y)$$

где  $f(x, y)$  – двумерная матрица единичного обрабатываемого фрагмента.

$$x_s = 0, 1, 2 \dots K, \quad y_s = 0, 1, 2 \dots P$$

$K, P$  – координаты окончания матрицы изображения томограммы.

Для устранения краевых эффектов к матрице изображения томограммы добавляется матрица нулевых значений.

На рисунке 5а отображена первая томограмма исследуемой ткани. На рисунке 5б отображен фрагмент результата вейвлет-преобразования  $W(x_s, y_s)$ . Отчетливо видны пики значений ( $W_{i\max}$ ) в местах прохождения нитей, расположенных перпендикулярно изображению. Эти максимальные значения являются центрами поперечников нитей данной системы.

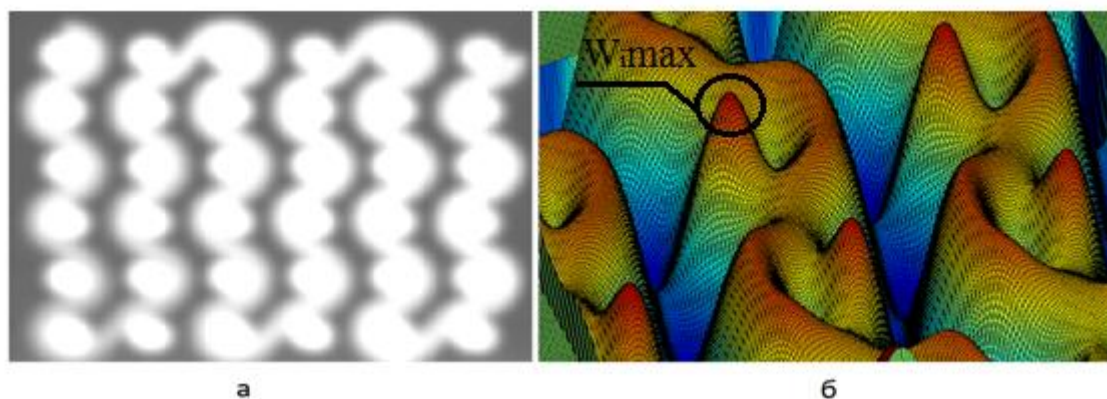


Рис.5. Распознавание поперечных профилей нитей на томограмме (а – исходная томограмма; б – поле вейвлет-коэффициентов, соответствующее данной томограмме)

Выделив таким образом поперечные сечения нитей необходимой системы и определив их центра по максимумам вейвлет-коэффициентов, мы имеем возможность выбрать одну из нитей и распознавать ее вдоль ее направления, определяя и записывая при этом центра поперечных распознанных сечений. Для этого предлагается способ определения нити и ее параметров, основанный на корректировке угла наклона плоскости, на которой производится распознавание поперечного сечения нити, в зависимости от направления ее следования (рис.6а).

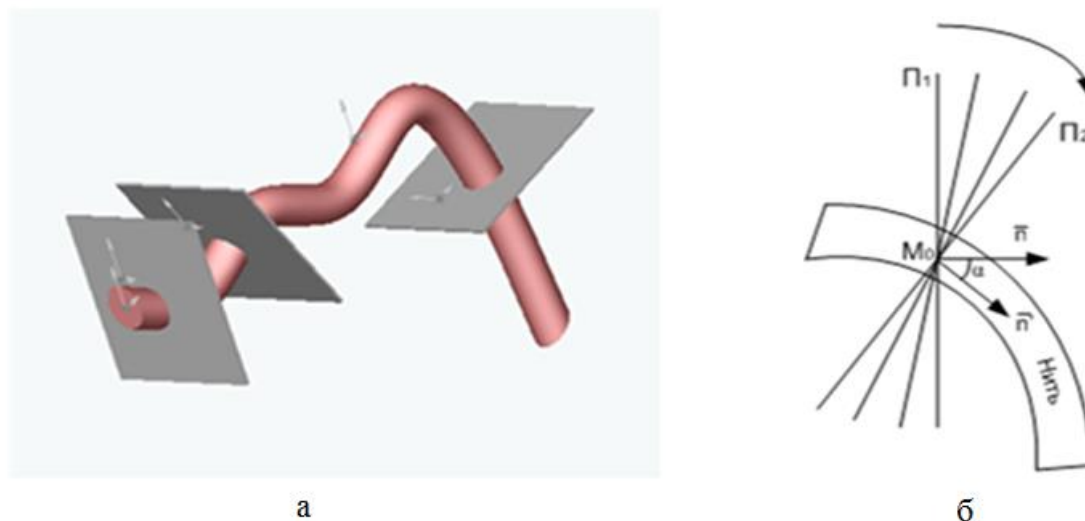


Рис.6. Расположение плоскостей распознавания (а – перпендикулярные плоскости в различных точках нити; б – ряд плоскостей, проходящих через одну точку)

Предлагаемый способ базируется на исследовании нескольких плоскостей распознавания, проходящих через одну точку, и выборе той плоскости, на которой наиболее оптимально выражен профиль нити, т.е. наиболее похож на исходный, находящийся на плоскости, перпендикулярной направлению нити.

Уравнение плоскости, в нашем случае, удобно задавать через точку  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  и вектор нормали  $\vec{n}(n_1, n_2, n_3)$  к плоскости.

Тогда уравнение будет иметь следующий вид:

$$n_1(x - x_0) + n_2(y - y_0) + n_3(z - z_0) = 0.$$

В рамках данной работы рассмотрим частный случай – плоскости распознавания, проходящие через одну прямую (рис.6б). Тогда изменение направления вектора вычисляем при помощи матрицы поворота для двумерного пространства:

$$M(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \mp \sin(\alpha) \\ \pm \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix},$$

Исследуем эти плоскости при помощи предложенного вейвлет-преобразования, получаем соответственно поля вейвлет-коэффициентов,

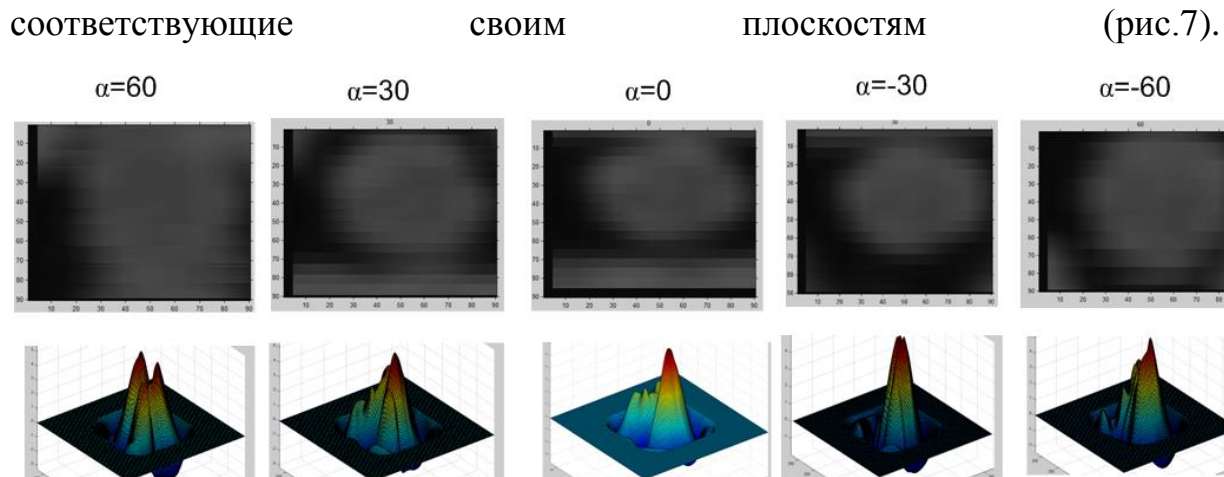


Рис.7 Ряд плоскостей распознавания, проходящих через одну прямую под разными углами и соответствующие им поля вейвлет-коэффициентов.

Как показало исследование, максимальные значения вейвлет-коэффициенты принимают в том случае, если исследуемый образ поперечного сечения нити на плоскости распознавания максимально совпадает с формой верхней поверхности вейвлета, а, следовательно, с формой поперечного сечения исходной нити. Это означает, что данная плоскость перпендикулярна направлению следования нити.

Таким образом, необходимо выбрать максимальное значение на каждом поле коэффициентов,

$$V = \max(W)$$

затем выбрать максимальное из совокупности этих максимумов

$$V(\alpha) = \{V_{\alpha 1}, V_{\alpha 2} \dots V_{\alpha n}\}$$

$$L = \max(V)$$

Определив координаты этой точки, имеем точку центра сечения нити, перпендикулярного направлению следования нити.

$$P = [L(x, y, z), \alpha]$$



Двигаясь по направлению нормального вектора к найденной плоскости, переходим к следующей распознаваемой точке центра поперечного сечения нити (рис.8а).

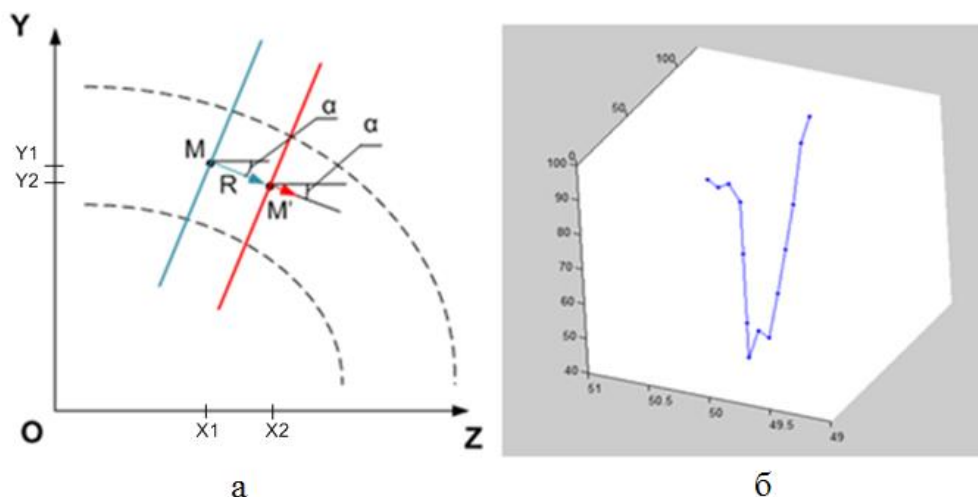


Рис.8 Получение точек центров поперечных сечений нити, расположенной в пространстве (а – схема движения от точки к точке; б – фрагмент пространственной матрицы центров поперечных сечений нити)

Задав шаг перемещения  $R$ , находим следующую точку  $M'$  и снова исследуем несколько плоскостей. В результате, перемещаясь таким образом по всей нити, получаем пространственную матрицу расположения нити в векторном виде (рис.8б).

Распознаваемую нить можно записать следующим образом:

$$N = [S, I, P],$$

где  $S = [S_x, S_y, S_z]$  – системы нитей, расположенных вдоль соответствующих осей;

$I \in [1..n]$  – номер нити в системе,  $n$  - количество нитей в системе;

$P$  – геометрические параметры нити:

$$P = [t, L(x, y, z), \alpha],$$

где  $t$  – порядковый номер центра поперечника нити;

$L(x, y, z)$  – точка центра поперечника нити;

$\alpha$  – угол наклона нормального вектора плоскости распознавания относительно предыдущей плоскости.

На рисунке 9 представлена общая схема предлагаемой методики анализа геометрического расположения элементов армирующего полуфабриката, а так же подробно рассмотрен блок векторного представления нитей.

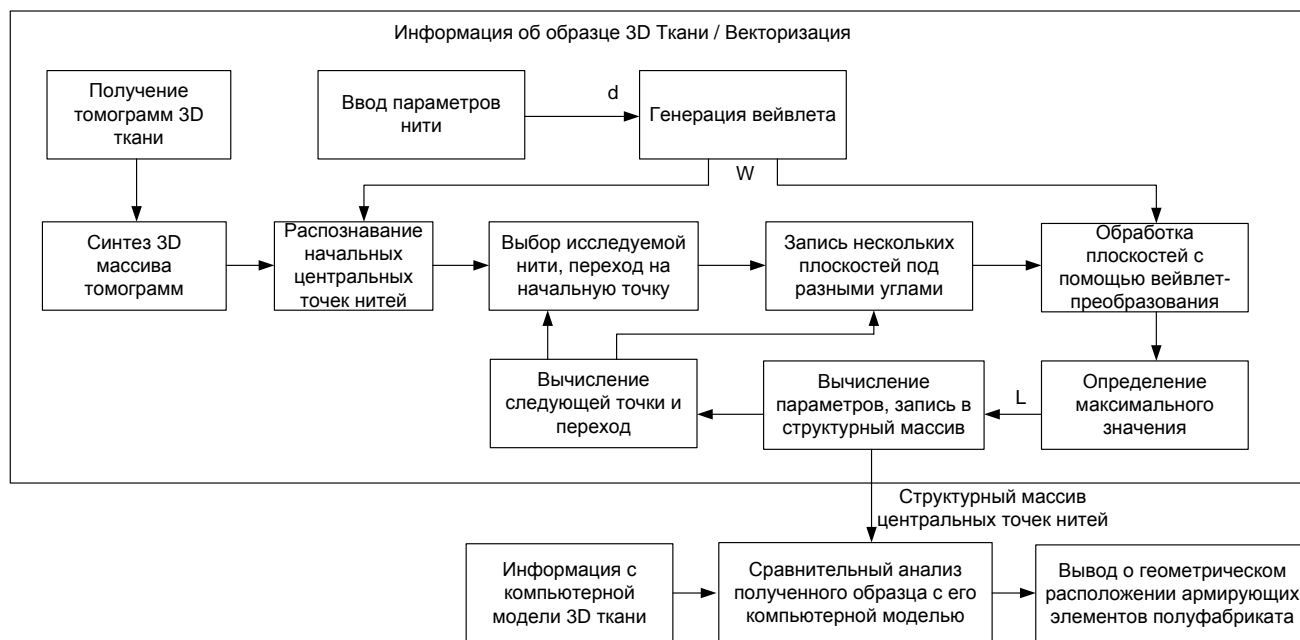


Рис.9 Схема методики анализа геометрического расположения элементов армирующего полуфабриката.

### Выводы.

1. Применение способа распознавания нити по поперечным плоскостям в совокупности с применением методики двумерного вейвлет-преобразования для распознавания поперечных сечений нитей, решает задачу векторного представления нитей.
2. Разработанные способы и методики дают возможность решить основную задачу – сравнить геометрическое расположение элементов армирующего наполнителя с его компьютерной моделью, что в свою очередь позволяет судить о качестве изготовленного изделия.

### Литература.

1. Бенецкая В.В. Моделирование структуры тканей/ В.В. Бенецкая, В.Ю.Селиверстов, А.М.Киселев, П.Н. Рудовский, М.В.Киселев// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, – №3, – С.23 –28.
2. Tong L. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites /L.Tong, A.P.Mouritz, M.K.Bannister//Elsevier – 2002. – 241с.
3. Павлихина И.Ю. Исследование расположения нитей в многослойной ткани облегченного типа/ И.Ю. Павлихина, Р.И. Сумарукова// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, – №4, – С.28 –31.
4. Жигун Е.Г. Влияние искривления волокон на жесткость и прочность композитных материалов/ Е.Г.Жигун// Автореф. дис. ....канд. техн. наук, – Рига, – 1969. – 14с.
5. Ивановский В.А. Развитие систем неразрушающего контроля армирующих тканых структур / В.А. Ивановский// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – №1, – С. 151 – 155.
6. Ивановский В.А. Диагностика армирующих тканых структур при производстве композитных материалов / В.А. Ивановский //Вестник КГТУ. – 2013, – №1(30), – С. 47 – 49.
7. Ивановский В.А. Применение вейвлет-преобразования при определении поперечного профиля нити в структуре трехмерной ткани/ В.А. Ивановский// Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, – №3, – С. 138 – 143.
8. Tsai D.M. Automatic surface inspection using wavelet reconstruction/ D.M. Tsai, B. Hsiao// Pattern Recognition. – 2001. – Vol. 34, – P. 1285 – 1305.
9. Lambert G. Wavelet methods for texture defect detection/ G. Lambert, F. Bock// Proc IEEE Intl. Conf. Image Processing. – 1997. – Vol. 3, – P. 201 – 204.

V.A.Ivanovsky