

УДК 677.019

**Разработка методики определения пространственного
расположения нити в трехмерной ткани¹**

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.

¹ 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).

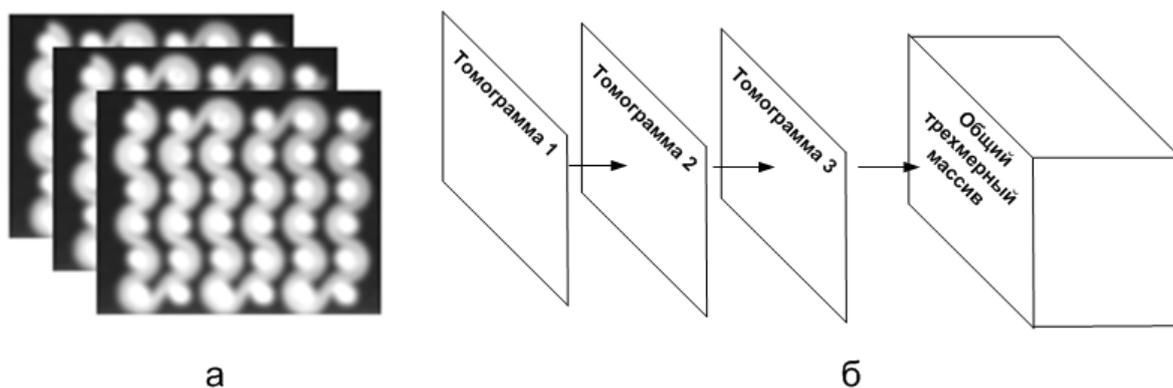


Рис.1. Синтез трехмерного массива пикселей (а – томограммы тканей; б – принцип синтеза массива)

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.

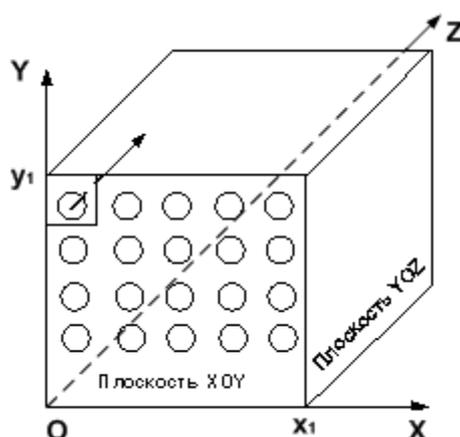


Рис.2. Расположение первых поперечных сечений одной из систем нитей в трехмерном массиве.

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).

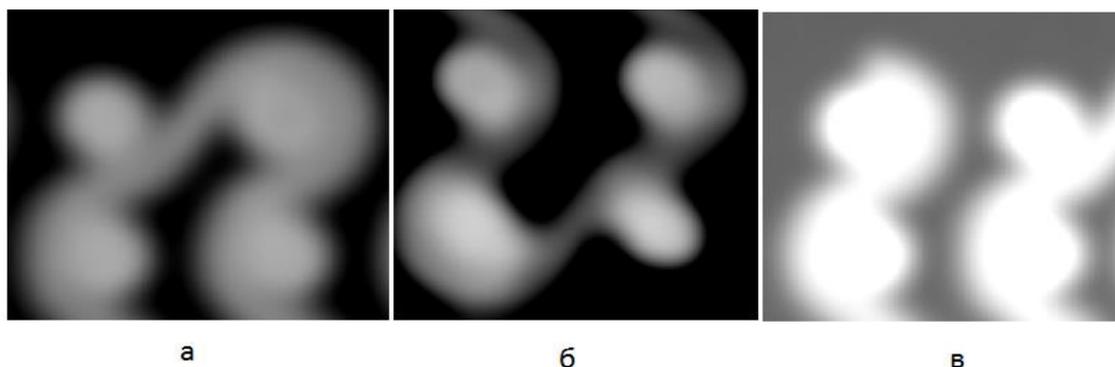


Рис.3. Томограммы трехмерной ткани (а – томограмма со средней контрастностью; б – томограмма с искаженными образами, в – томограмма с избыточной яркостью)

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).

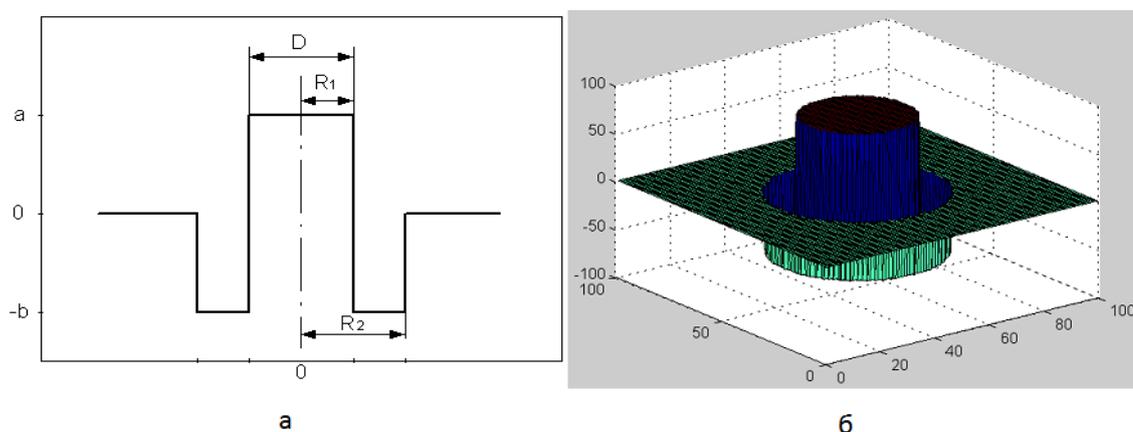


Рис.4 Конструирование функции вейвлета (а – исходный вейвлет FHAT; б – полученный двумерный вейвлет)

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.

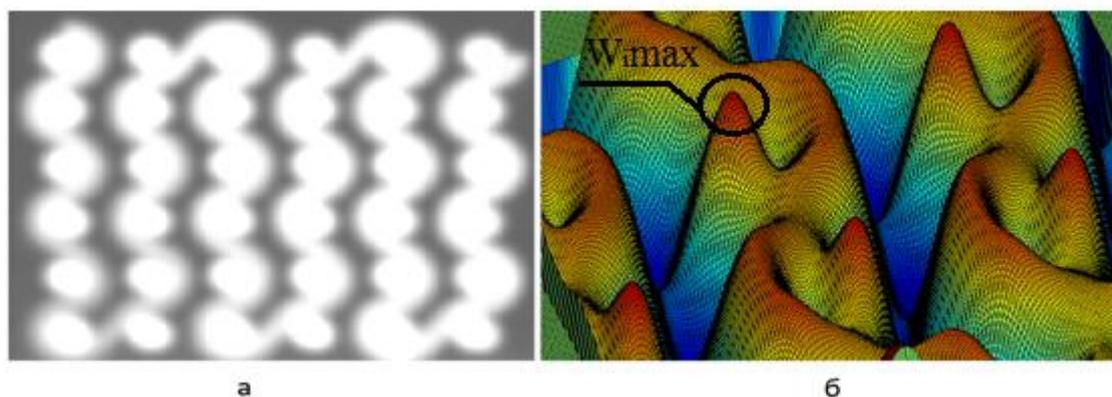


Рис.5. Распознавание поперечных профилей нитей на томограмме (а – исходная томограмма; б – поле вейвлет-коэффициентов, соответствующее данной томограмме)

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).

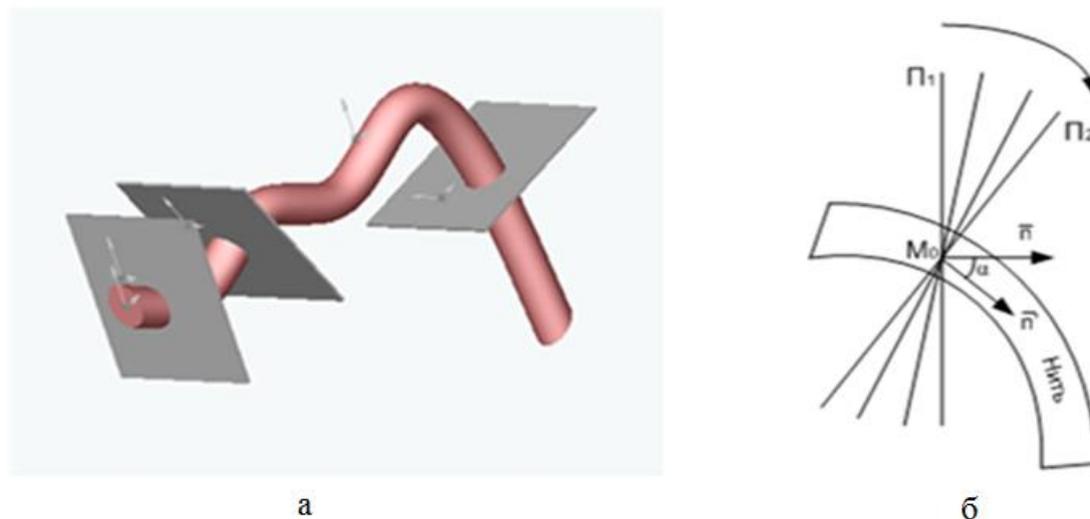


Рис.6. Расположение плоскостей распознавания (а – перпендикулярные плоскости в различных точках нити; б – ряд плоскостей, проходящих через одну точку)

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,

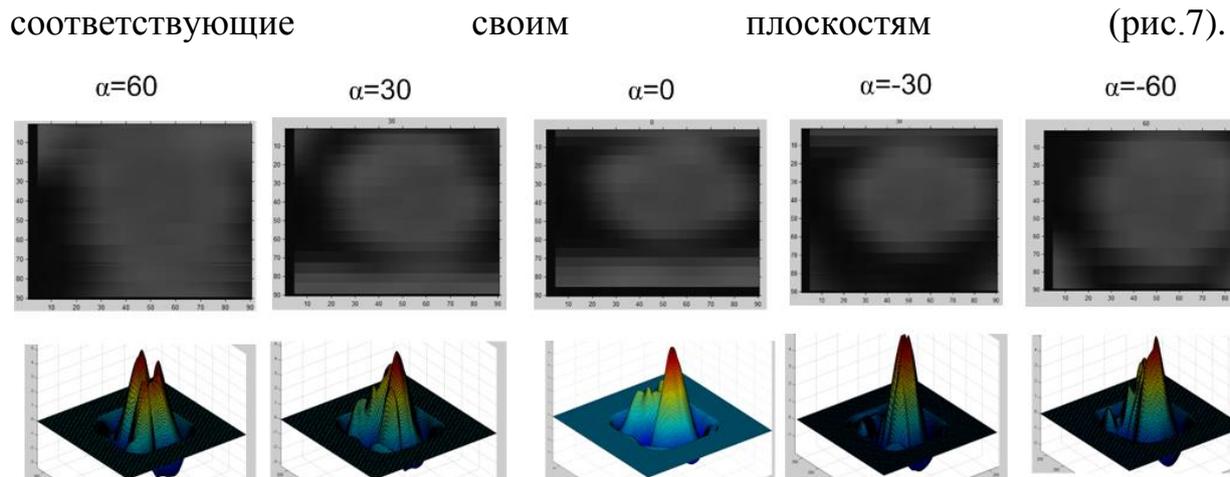


Рис.7 Ряд плоскостей распознавания, проходящих через одну прямую под разными углами и соответствующие им поля вейвлет-коэффициентов.

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).

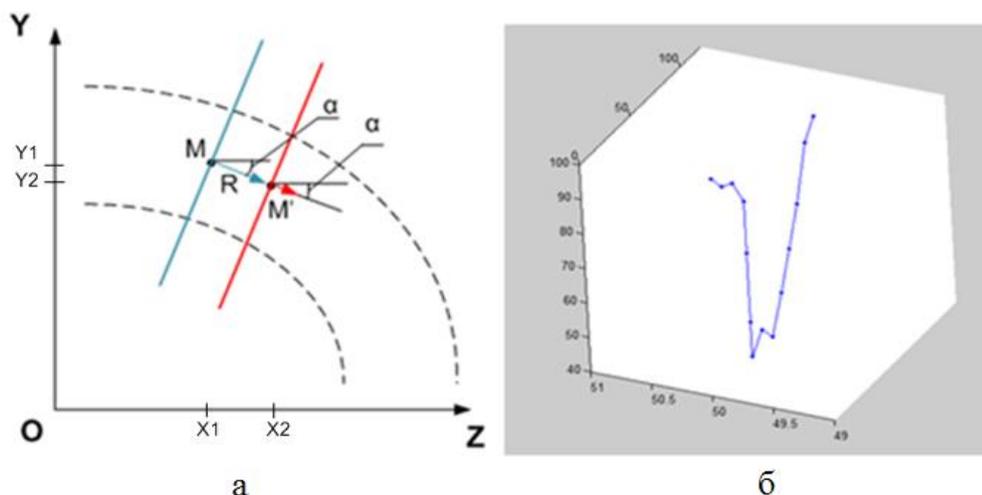


Рис.8 Получение точек центров поперечных сечений нити, расположенной в пространстве (а – схема движения от точки к точке; б – фрагмент пространственной матрицы центров поперечных сечений нити)

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;

α – 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.

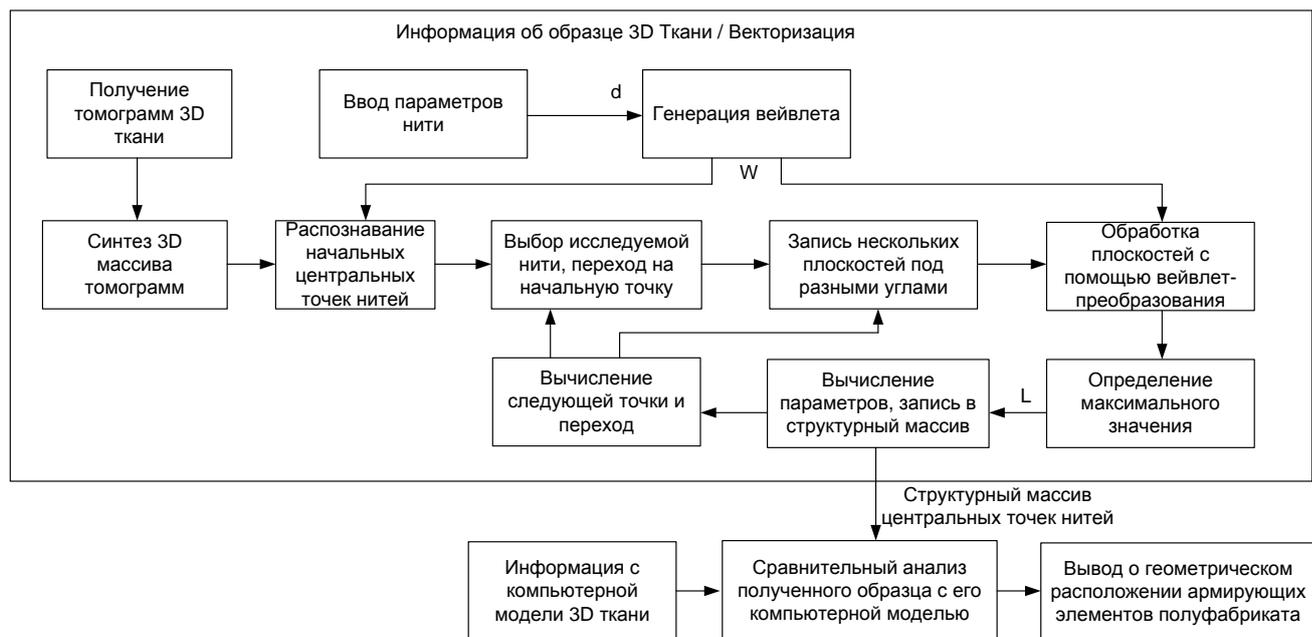


Рис.9 Схема методики анализа геометрического расположения элементов армирующего полуфабриката.

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.