

УДК 677.076.4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ВОЛОКОН
В УГЛЕРОДНЫХ НЕТКАНЫХ СТРУКТУРАХ
СРЕДСТВАМИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ**

**MEASUREMENT OF FIBER ORIENTATION
IN CARBON NONWOVEN STRUCTURES
USING FOURIER TRANSFORM**

С.В. ЕРШОВ, Е.Н. КАЛИНИН, Т. ТИДТ
S.V. ERSHOV, E.N. KALININ, T. TIEDT
E-mail: ttp@ivgpu.com

(Ивановский государственный политехнический университет. Текстильный институт,
Институт текстильной техники Технического университета, г. Ахен (Германия))
(Ivanovo State Polytechnic University. Textile Institute,
Institut für Textiltechnik of RWTH Aachen University (Germany))

В статье представлены результаты разработки программного комплекса для определения направленности волокон в нетканых структурах средствами MATLAB. Точность вычислений и достоверность получаемых данных подтверждена результатами анализа программно-сгенерированных образов нетканой структуры с заданными параметрами расположения волокон. Сделан вывод о возможности использования разработанного программного комплекса для анализа реальных образцов нетканых структур из углеродных волокон.

The article presents the software system for measurement of fiber orientation in nonwoven structures which was implemented in the software MATLAB. The results of artificial nonwoven image analysis indicate that the developed MATLAB

software system is accurate, reliable and can be used for analysis of real carbon nonwoven samples.

Ключевые слова: направленность волокон в нетканой структуре, метод анализа изображений, преобразование Фурье.

Keywords: fiber orientation in nonwoven structure, image analysis, Fourier transform.

Основой синтеза композиционного материала на волокнистой основе, как конструкционного материала с заданными функциональными характеристиками, являются технологические процессы по формированию структуры нетканого материала (матрицы композита) с заданным расположением (направленностью) волокон.

Цель работы заключается в разработке компьютерной системы для оценки направленности волокон в структуре матрицы композита (нетканого материала) с последующим прогнозом мультиаксиальных физико-механических свойств синтезированного композитного материала.

В соответствии с целью работы для определения направленности волокон в нетканом материале нами использован метод анализа изображений, в основе которого лежит преобразование Фурье [1], [3..5], позволяющий вести обработку цифровых сигналов с использованием дискретного типа преобразования Фурье (ДПФ), а именно – его варианта с ускоренной процедурой вычислений – быстрого преобразования Фурье (БПФ) [6].

Каждое изображение волокнистой структуры, которое представляет собой двумерный сигнал, в процессе численного анализа было подвергнуто частотным преобразованиям процедурой БПФ с разложением по спектру – преобразование изображения в область частот, что определяло точность и достоверность результатов процедуры при наличии шума в изображениях и в ситуациях, когда отдельные участки исследуемых образцов характеризовались высокой плотностью волокон.

Процедура вычисления БПФ при анализе нетканой структуры волокнистого материала реализована в разработанном

нами программном комплексе в системе MATLAB.

Так как изображение (образ) структуры нетканого материала передается оттенками серого цвета и характеризуется переходами яркости от светлого к темному и от темного к светлому, то волокна, образующие структуру нетканого материала, представляются как светлые линии на темном фоне (или наоборот). Для формирования спектра изображения взято одномерное преобразование Фурье от каждой строки изображения, а затем – та же самая процедура выполнена с каждым столбцом численного массива из полученных данных.

В полученном спектре сигнала низкочастотными компонентами определяются те части изображения, где яркость практически не изменяется, а высокочастотные компоненты выявляют изменения в интенсивности пикселей. Таким образом, если волокна преимущественно расположены в каком-либо определенном направлении в нетканом материале, то величина интенсивности пикселей в этом направлении будет низкой, а интенсивность пикселей в перпендикулярном направлении будет высокой.

В двумерной системе координат БПФ описывается следующим выражением [2]:

$$F_f(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp[-j2\pi(ux + vy)] dx dy, (1)$$

где $f(x, y)$ – изображение нетканой структуры; $F(u, v)$ – преобразование Фурье; u – характеризует величину интенсивности в направлении оси x ; v – характеризует величину интенсивности в направлении оси y ; j – мнимая единица.

В разработанном нами программном комплексе для анализа направленности

волокон в нетканом материале процедура вычисления БПФ осуществлена набором функций MATLAB [7]. Изображение нетканого материала с разрешением ($M \times N$) пикселей распознается в виде матрицы f , к которой для вычисления БПФ применяется следующая последовательность операций:

```
>> F=fft2(f); %Вычисление БПФ
```

```
>> Fc=fftshift(F); %Перемещение начала координат в центр частотной области
```

```
>> S=log(1+abs(Fc)); %Получение спектра изображения
```

```
>> imshow(S) %Вывод на экран
```

Распределение интенсивности пикселей получаемого в результате вычислений спектра S характеризует расположение волокон в исходном изображении нетканой структуры материала (рис. 1...4, А, Б).

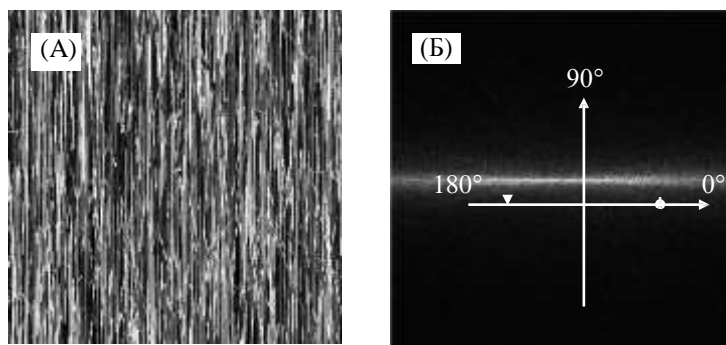


Рис. 1

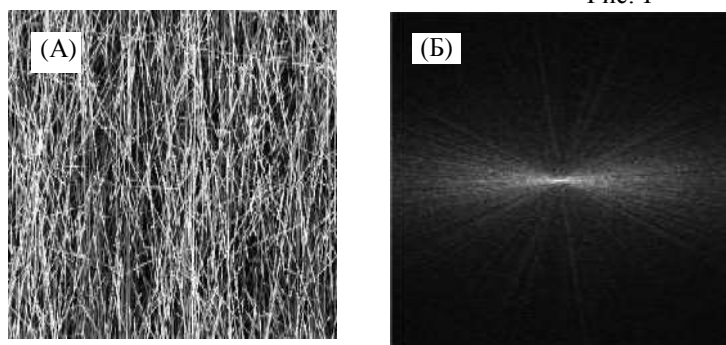


Рис. 2

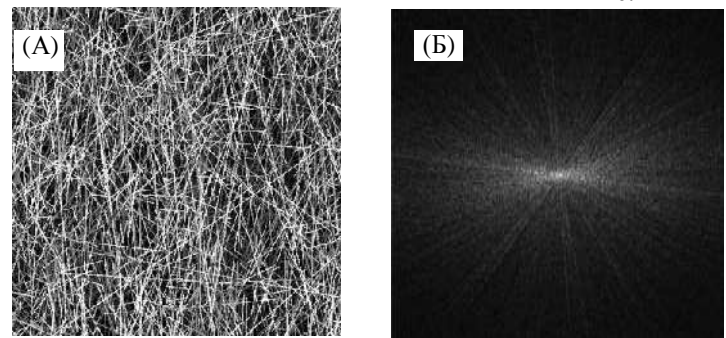


Рис. 3

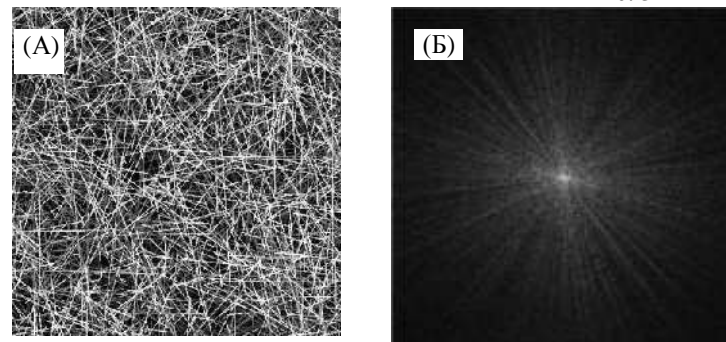
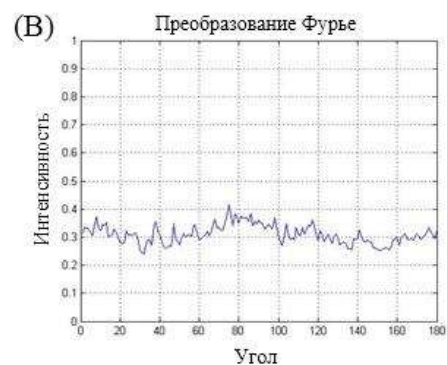
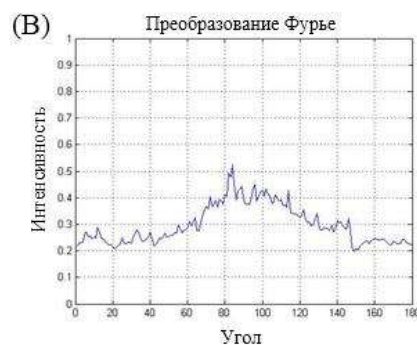
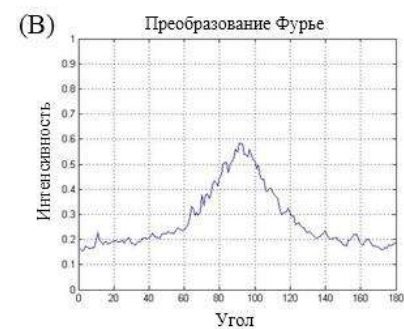
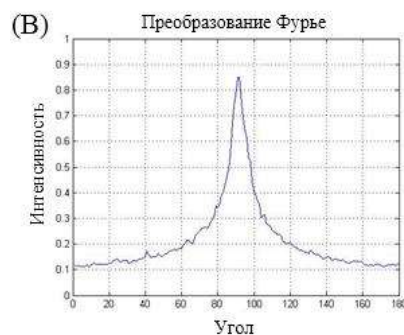


Рис. 4



Для графического представления результатов БПФ в частотной области была выделена окружность радиусом R (рис. 1, Б) с выполнением сложения интенсивностей пикселей $I(\alpha_i)$ вдоль радиусов под углами α_i от 0 до 360° с шагом в 1° и определением среднего значения интенсивности пикселей для каждого радиуса, а так как получаемый спектр изображения нетканой структуры симметричен относительно горизонтальной оси, на график выводятся значения для углов от 0 до 180°. С целью прямого восприятия информации вершины и впадины на графиках (рис. 1...4, В) меняются местами. Функция $F(\alpha_i)$, характеризующая направленность волокон, опре-

деляет вероятность того, что волокна будут расположены под углом α_i :

$$F(\alpha_i) = \sum_{r=0}^R I(\alpha_i, r). \quad (2)$$

Для проверки точности вычислительного эксперимента с использованием разработанного нами программного комплекса и достоверности получаемых результатов был проведен анализ изображений нетканой структуры с заданными параметрами расположения волокон, которые были программно сгенерированы в системе GeoDict 2013 [8] (рис.1...4, А). Структурные характеристики в соответствии с изображениями нетканых структур приведены в табл.1.

Таблица 1

Изображение нетканой структуры	Направление волокон		Плотность нетканой структуры, г/см ³	Диаметр волокон, мкм
	среднее значение, град	отклонение от среднего значения, град		
Образец №1	90	0	1,8	6
Образец №2	90	15	1,8	6
Образец №3	90	30	1,8	6
Образец №4	90	45	1,8	6

Сумма значений интенсивности пикселей для каждого угла α_i от 0 до 180° дает 100%-ную вероятность того, что направленность волокон в нетканой структуре материала будет определена значениями углов α_i в этом диапазоне. Это дает возможность определить процент волокон от их общего количества в образце нетканого материала, которые имеют некоторую на-

правленность в зависимости от угла α_i . В случае для каждого из рассматриваемых образцов нетканой структуры диапазон от 0 до 180° разбивается на 18 интервалов – по 10° и находится процент волокон в каждом интервале. Графическое представление результатов вычисления направленности волокон в структуре анализируемых образцов приведено на рис. 5...8.

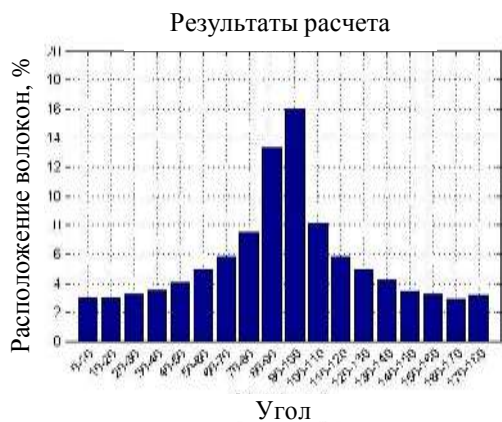


Рис. 5



Рис. 6

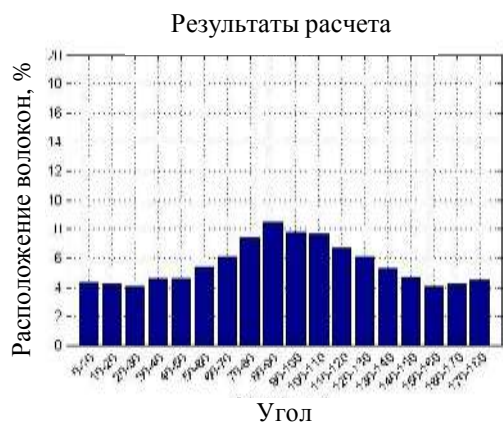


Рис. 7

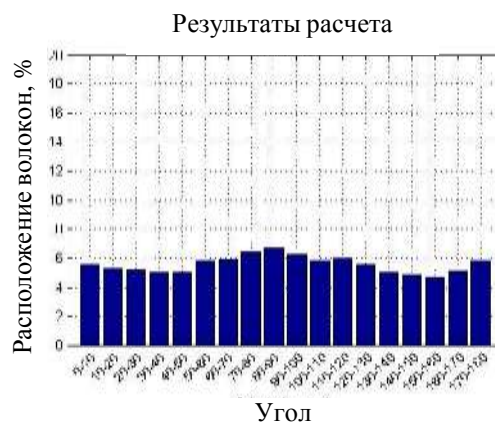


Рис. 8

Из анализа рис. 5...8 следует, что распределение волокон для исследуемых образцов №1, №2 и №3 (табл.1) имеет одну вершину, в то время как распределение для образца №4 не имеет ярко выраженных вершин. В данном случае вершина определяет основное направление расположения волокон в структуре материала, и

в случае образца №4 ее отсутствие свидетельствует о равномерном распределении волокон в структуре нетканого материала под углами в диапазоне от 0 до 180°.

Численные значения результатов определения направленности волокон в рассмотренных нетканых структурах приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изображения нетканой структуры	Максимальное значение распределения волокон, %	Минимальное значение распределения волокон, %	Среднее максимальное значение, %	Среднее минимальное значение, %	Коэффициент анизотропии
Образец №1	16,14	2,94; 3,03	16,14	2,99	5,4
Образец №2	11,03	3,4	11,03	3,4	3,24
Образец №3	8,22; 7,54; 7,44	4,21; 4,28	7,73	4,25	1,82
Образец №4	6,44; 6,45; 6,1	4,79; 4,92; 5,01	6,33	4,91	1,29

Максимальное и минимальное значения распределения волокон определяют наибольшее и наименьшее количество волокон, расположенных в определенном направлении. В свою очередь, коэффициент анизотропии нетканой структуры определяется как отношение среднего максимального значения расположения волокон к среднему минимальному $\frac{F(\alpha_{max})}{F(\alpha_{min})}$ [2]

и является важным структурным параметром, характеризующим физические свойства нетканой структуры материала и технологический процесс ее формирования. Из табл. 2 следует, что образец №1 нетканой структуры имеет наибольший коэффициент анизотропии, и это значение уменьшается для каждого последующего образца. Для образца №4 величина коэф-

фициента анизотропии близка к 1, что позволяет рассматривать структуру данного образца как изотропную с одинаковыми физическими свойствами во всех направлениях силового воздействия.

В Ы В О Д Ы

Таким образом, разработанный нами программный комплекс позволяет генерировать структуру матрицы волокнистого композиционного материала на основе определения направленности волокон и величины коэффициента анизотропии в его структуре. Точность и достоверность полученных результатов при анализе программно-сгенерированных образцов нетканых структур с заданными параметрами расположения волокон позволяют сделать

вывод о возможности использования разработанного программного комплекса для синтеза и анализа реальных образцов конструкционного композиционного материала на волокнистой основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ayres C., Bowlin G.L., Henderson S.C. et al. Modulation of anisotropy in electrospun tissue-engineering scaffolds: Analysis of fiber alignment by the fast Fourier transform // *Biomaterials*. – 2006, №27. P. 5524...5534.
 2. Pourdeyhimi B., Ramanathan R., Dent R. Measurement of Fiber Orientation in Nonwovens Part 1 // *Textile Research Journal*. – 1996, №66 (11). P. 713...722.
 3. Pourdeyhimi B., Dent R. Measurement of Fiber Orientation in Nonwovens Part 3: Fourier Transform // *Textile Research Journal*. – 1997, №67 (2). P. 143...151.
 4. Stolyarov O., Kravaev P., Seide G., Gries T. Influence of Process Parameters on Filament Distribution and Blending Quality in Commingled Yarns Used for Thermoplastic Composites // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2014, №27 (3). P. 350...363.
 5. Stolyarov O.A., Kravaev P., Seide G., Gries T. A method for investigating blending quality of commingled yarns // *Textile Research Journal*. – 2013, №83 (2). P. 122...129.
 6. Черномятов А.В. Опыт использования преобразования Фурье для обнаружения объектов на изображении // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012, №6.
 7. Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. – Dorsing Kindersley, 2004.
 8. <http://www.math2market.de/>
- Рекомендована кафедрой наземных транспортных средств и технологических машин. Поступила 03.06.14.