

4. Патент RU 2180369 С2 Способ получения термостойкого волокна – 10.03.2002 / Мачалаба Н. Н.; Будницкий Г. А.; Волохина А. В.; Лукашева Н. В.; Кия-Оглу В. Н.; Полеева И. В.; Сокира А. Н.; Щетинин А. М.; Огнева Т. М.; Курьлева Н. Н.; Охлобыстина Л. В.; Андриюк И. А.; Матыцын П. А.; Белов В. П.; Перепелкин К. Е.
5. Патент RU 2476454 С1 Способ получения формованных изделий в виде волокон, нитей, выполненных из гетероциклических полиамидов – 03.10.2011 / Лакунин В. Ю., Склярва Г. Б., Новикова Л. А., Комиссаров С. В., Шаблыгин М. В., Михайлова М. П.
6. Патент RU 2285760 С1 Способ получения термостойких нитей из сополиамидобензимидазола с пониженной степенью усадки – 13.07.2005 / Волохина А. В., Лукашева Н. В., Кия-Оглу В. Н., Сокира А. Н., Педченко Н. В., Будницкий Г. А.
7. Справочник по электротехническим материалам: в 3 Т. 1 [Текст] / под ред. Ю. В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.
8. Патент WO2005059247 Para-aramid fibril film [Текст] / 30.06.2005 / Hendriks Anton Johannes Josef; Wilbers Dennis; Grotendorst Harrie; Journee René; Oldenzeel Mirjam Ellen
9. Демишок, Т. І. Використання пара-арамідних волокон та фібридів у виробництві електроізоляційного матеріалу з підвищеною термостійкістю [Текст] / Т. І. Демишок, Л. П. Антоненко // Вісник НТУУ «КПІ» «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження» Науковий збірник № 2 (10) – 2012. – С. 101 – 107
10. Патент WO/2004/099476 Non-fibrous polymer solution of para-aramid with high relative viscosity [Текст] / 18.11.2004 / Hendriks Anton Johannes Josef; Surquin Jan, M.; Oldenzeel Mirjam Ellen; Journee René; Van Bommel Vincent, A.

Побудована комп'ютерна модель міжволоконних пор в структурі плоскої нитки армуючої тканини з урахуванням випадкового відхилення положення контурів перетину волокон від регулярного положення в поперечному перетині нитки. Отримано гістограму розподілу міжволоконних пор за розмірами. Отримані результати є вихідними для розробки нових технічних рішень вдосконалення процесу просочення армуючої тканини в'язким складом

Ключові слова: розподіл пор за розмірами, міжволоконні пори, моделювання, структура нитки, просочення

Построена компьютерная модель межволоконных пор в структуре плоской нити армирующей ткани с учетом случайного отклонения положения контуров сечения волокон от регулярного положения в поперечном сечении нити. Получена гистограмма распределения межволоконных пор по размерам. Полученные результаты являются исходными для разработки новых технических решений совершенствования процесса пропитки армирующей ткани вязким составом

Ключевые слова: распределение пор по размерам, межволоконные поры, моделирование, структура нити, пропитка

УДК 677.027

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖВОЛОКОННЫХ ПОР ПО РАЗМЕРАМ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ НИТИ

В. В. Сьєс

Соискатель,
младший научный сотрудник
Кафедра химических технологий и
биохимического синтеза
Херсонский национальный
технический университет
Бериславское шоссе, 24,
г. Херсон, Украина, 73008
E-mail: vasilysys@mail.ru

1. Введение

Основу практически всех процессов химической технологии текстильных материалов, а также процессов изготовления композиционных материалов на текстильной основе составляет процесс пропитки текстильного материала обрабатываемым раствором.

Пропитка армирующей ткани составом из смолы и отвердителя с учетом высокой вязкости пропитываемого состава является одним из наиболее сложно реа-

лизуемых процессов пропитки. Поэтому для пропитки армирующей ткани при изготовлении деталей из композитов в авиастроении применяют специальную вакуумную технологию, что обеспечивает относительно высокую скорость и степень полноты пропитки.

Однако, несмотря на высокую степень отработанности технологии пропитки армирующей ткани вязким составом, в структуре пропитываемой ткани могут оставаться пузырьки воздуха [1]. Неоднородность в виде включения пузырьков воздуха в пропитываемой структуре ткани нарушает монолитность

композиционного материала и вызывает уменьшение его прочности [2].

Конечно, это учитывается при конструировании изделия благодаря существующей системе допусков и коэффициентов запаса. Но, если ставить цель дальнейшего совершенствования процесса пропитки, то для этого необходимо предварительно получить сведения о структуре нити в пропитываемой ткани и характере распределения размеров пор в ней.

Получить эти сведения в принципе возможно чисто экспериментальным путем, например, методом рентгеновской компьютерной томографии [3]. Однако такой подход требует использования дорогостоящего оборудования. Поэтому в процессе работы выбран другой подход, который получил широкое распространение в мире. Суть его заключается в предварительном построении компьютерной модели структуры нити и получении необходимых данных по результатам её исследования [4]. Это позволяет изучить распределение пор по размерам на уровне волокон и на этой основе разработать новые технические решения для совершенствования процесса пропитки.

В настоящее время в мире существуют различные варианты систем моделирования структуры текстильных материалов [5]. Однако все они являются достаточно сложными, масштабными и универсальными, что делает их относительно дорогостоящими. Предназначены они, как правило, для коммерческого использования. Для пользователя они являются закрытыми системами, поскольку доступ к их внутреннему содержанию отсутствует и алгоритм работы неизвестен. При работе с подобными системами моделирования пользователь не имеет возможности контролировать ход их работы и вынужден полагаться на правильность выдаваемых системой решений.

С учетом этого, а также с учётом отсутствия необходимости в модели высокой степени универсальности, в настоящей работе поставлена цель создания собственной простой и прозрачной модели. В этой модели главным является геометрический аспект структуры армирующей ткани, важный с точки зрения процесса её пропитки, и учтена трехуровневая иерархическая система «ткань – нить – волокно». В данной работе такая модель построена для уровня межволоконных промежутков нити.

2. Цель работы

Поставим задачу построения модели межволоконного порового пространства нити с целью оценки распределения межволоконных пор по размерам.

3. Существующие подходы к моделированию структуры текстильных материалов

В аэрокосмической промышленности существует процесс получения композитов, экспериментальное определение оптимальных параметров которого является трудоемким и чрезвычайно затратным. Авторы работы [3] предлагают подход, основанный на предварительном моделировании процесса, и показывают экономическую целесообразность этого за счет резко-

го сокращения объема экспериментальных исследований.

Этот подход заключается в получении изображений внутренней структуры образца композиционного материала методом рентгеновской томографии с последующей их компьютерной обработкой. Это позволило вычислить геометрические и транспортные характеристики исследуемого композиционного материала. Недостатком такого подхода является то, что для его реализации требуется сложное и дорогостоящее оборудование.

Результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния нити с учетом её поперечной деформации представлено в работе [6]. Однако в работе не ставилась задача моделирования на межволоконном уровне.

Наиболее интересный подход к моделированию структуры текстильного материала, в том числе ткани, представлен в работах группы «Композиционные материалы», созданной в Католическом университете города Лёвена (Бельгия) [7, 8]. Разработки группы являются продолжением исследований автора работы [9].

Среда моделирования текстильных полотен и текстильных композитов, разработанная группой, имеет название WiseTex [4], демо-версия которой размещена на сайте [10]. Она содержит модель внутренней геометрии текстильного материала и описание волокон в структуре нитей. К недостаткам среды моделирования WiseTex можно отнести отсутствие инструмента для оценки распределения межволоконных пор нити по размерам.

4. Построение модели структуры плоской нити армирующей ткани

Рассмотрим часть поперечного сечения плоской нити, полагая, что все его участки имеют схожие характеристики распределения межволоконного пространства. В плоскости сечения нити все волокна отображаются в виде контуров их сечений, расположенных на некотором расстоянии друг от друга в области прямоугольной формы. Площадь всего прямоугольного участка, за вычетом суммарной площади сечений волокон, представляет собой срез межволоконного пространства.

Определим параметры структуры нити по известной пористости. Эта задача заключается в том, чтобы найти межцентровые расстояния контуров сечения волокон по вертикали и горизонтали, соответствующие заданной пористости структуры нити, если известен радиус волокна. Пористость нити, как следует из источника [3], может достигать 50%. Решение задачи сводится к многократному вычислению по формуле пористости до получения требуемой её величины при изменении межцентровых расстояний.

Введём обозначения параметров. Изменяемые параметры для заданного радиуса r – это шаг по горизонтали m и шаг по вертикали h , при этом шаг по вертикали h должен быть выражен через шаг по горизонтали m . В итоге, варьируя шагом по горизонтали m , необходимо подобрать такое его значение, при котором пористость составит 50%.

Зададим систему координат, начало координат O которой совпадает с левым нижним углом сетки. Ось

ОХ направлена горизонтально, а ось ОУ – вертикально. Рассмотрим участок сечения нити, на котором в регулярном шахматном порядке расположены контуры сечения волокон с межцентровым расстоянием $3r$, как это показано на рис. 1.

Тогда пористость нити ϵ_f можно определить как отношение площади, занятой контурами сечения волокон S_{por} к площади всего прямоугольного участка S_a .

Площадь между контурами сечения волокон S_{por} определим как разность площади всего участка S_a и суммарной площади всех контуров сечения волокон S_{sum} на этом участке. С учетом этого можем записать формулу для расчета пористости нити как:

$$\epsilon_f = \frac{S_a - S_{sum}}{S_a} \times 100\% = \left(1 - \frac{S_{sum}}{S_a}\right) \times 100\%. \quad (1)$$

Поставим задачу установить связь между величиной пористости и параметрами структуры нити. Такими параметрами являются радиус нити r , шаг расположения межцентровых расстояний в горизонтальном m и вертикальном h направлениях. Между последними двумя параметрами существует однозначная зависимость, если дополнительно выдвигается требование одинакового расстояния между центрами контуров сечения витков в любом направлении. Для того чтобы установить эту связь, рассмотрим треугольник ABC , вершины которого совпадают с центрами окружностей, а стороны равны межцентровым расстояниям $3r$. Из анализа треугольника следует, что, если шаг по горизонтали $m = 3r$, то шаг по вертикали $h = BD = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) 3r$

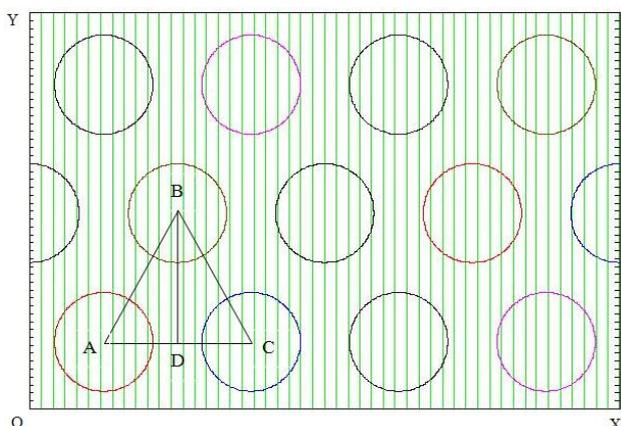


Рис. 1. Распределение контуров сечений волокон в исследуемом участке сечения нити в регулярном шахматном порядке

Значения шага по горизонтали m и вертикали h позволяют определить количество сечений волокон на участке, а известный радиус волокна позволяет определить суммарную площадь сечения волокон, необходимую для расчета пористости нити.

Для найденных значений параметров выполним расчет пористости. Если в процессе итерационных вы-

числений для заданного межцентрового расстояния результат получится близким к 50 %, то завершим работу программы. Если иначе – продолжим вычисления, изменив величину межцентрового расстояния.

Далее поставим задачу получить в пределах такого же прямоугольника, как на рис. 1, картину распределения контуров сечения волокон с учетом случайного отклонения от исходного положения, рассмотренного выше.

Для этого воспользуемся встроенной функцией программы Mathcad $runif(k; a; b)$ с параметрами: первый параметр k задает количество элементов вектора случайных чисел, а второй и третий параметры a и b – границы интервала изменения случайной величины. Размер этого интервала выберем равным $(-0,5r; 0,5r)$, поскольку и по горизонтали и по вертикали максимальное расстояние, на которое может переместиться каждый контур сечения волокна – это то расстояние, которое отделяет поверхность каждого волокна от поверхности другого волокна в регулярной схеме расположения изображения (рис. 1). Это расстояние равно r . Для определения новых координат контуров сечения волокон $(x_n; y_n)$ выполним операцию сложения векторов горизонтальной и вертикальной составляющих исходных координат $(x_{00}; y_{00})$ центров сечения волокон с указанной функцией:

$$x_n := x_{00} + runif(k; -0,5r; 0,5r), \quad (2)$$

$$y_n := y_{00} + runif(k; -0,5r; 0,5r). \quad (3)$$

Отообразим результаты вычислений в виде графика на рис. 2.

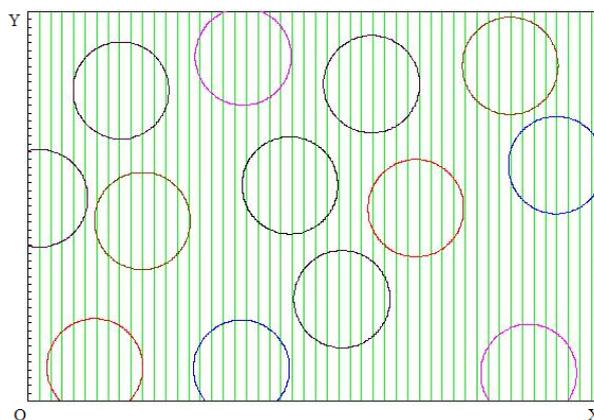


Рис. 2. Распределение контуров сечения волокон по исследуемому участку сечения нити с учетом случайной составляющей

Из рис. 2 видно, что контуры сечения волокон заняли новое, случайное положение, и между ними расстояние неодинаково: некоторые из них находятся между собой на расстоянии большем, чем на рис. 1, а некоторые – на меньшем. Данные о новых координатах центров сечения волокон хранятся в векторах x_n и y_n .

На рисунке видны также вертикальные прямые, равноотстоящие друг от друга. Каждая вертикальная

прямая последовательно пересекает контуры сечения волокон, расположенные на ее пути.

Для определения вертикальных координат точек пересечения с контурами сечений волокон воспользуемся функцией *trace*. Будем копировать значения координат точек попарно в двухстолбцовую матрицу *AA*, вычитая значения координат второго столбца из значений первого столбца, и определим расстояние между контурами сечения волокон, равные межволоконным промежуткам, и сохраним полученные расстояния в виде элементов вектора *bb*.

После этого приступим к построению гистограммы частот распределения межволоконных расстояний по размерам. Для этого определим максимальное и минимальное значения вектора *bb*, элементами которого являются межволоконные расстояния, с помощью соответствующих встроенных функций *max* и *min* системы *Mathcad*:

$$v_{max1} := \max(bb), \tag{4}$$

$$v_{min1} := \min(bb). \tag{5}$$

Затем определим шаг гистограммы как:

$$h1 := \frac{v_{max1} - v_{min1}}{n}. \tag{6}$$

Пользуясь этими величинами, определим границы интервалов для построения гистограммы:

$$int1_i := v_{min1} + h1 \cdot i. \tag{7}$$

После этого воспользуемся встроенной функцией *hist* (*int1*; *v1*), параметрами которой являются *int1* и *v1*, которому присваиваются значения элементов вектора *bb*:

$$f1 := \text{hist}(int1, v1). \tag{8}$$

5. Анализ полученных результатов

Изобразим график функции *f1* от аргумента *int1*, отображающий картину частот распределения межволоконных расстояний по интервалам (рис. 3).

Из гистограммы на рис. 3 видно, что размеры пор 0,721 и 2,900 имеют наибольшее количество повторов, что позволяет считать эти размеры характерными, особенно 0,721. Учитывая, что радиус кевларового волокна составляет 6 мкм, а в результатах расчета это соответствует относительной единице, получим эти же значения максимумов, выраженные в микрометрах как 4,44 мкм и 17,4 мкм.

На рис. 4 представлена схема алгоритма вычисления межволоконных пор по размерам в компьютерной модели структуры нити.

Таким образом, задача построения компьютерной модели межволоконного порового пространства нити в структуре ткани и оценки распределения межволоконных пор по размерам успешно решена.

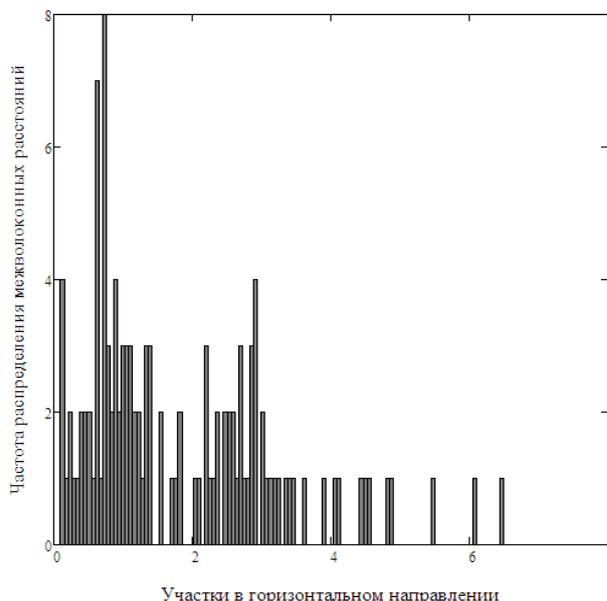


Рис. 3. Гистограмма частот распределения межволоконных расстояний по их значениям



Рис. 4. Схема алгоритма вычисления межволоконных пор по размерам в компьютерной модели структуры нити

6. Выводы

1. Построена модель межволоконного порового пространства с учетом случайных отклонений контуров сечения волокон в плоскости

- сечения нити от исходного регулярного положения.
2. Определены геометрические параметры структуры нити, выраженные через единичный радиус волокна.
 3. Получена функция распределения межволоконных пор по размерам для плоской нити в структуре армирующей ткани.
 4. Для нитей из кевларовых волокон радиусом 6 мкм наибольшее количество межволоконных пор имеют размеры 4,44 мкм и 17,4 мкм.
 5. Выполненная оценка распределения межволоконных промежутков по размерам предназначена для разработки новых технических решений по совершенствованию процесса пропитки структуры нити армирующей ткани.

Литература

1. Сыс, В. В. Особенности пропитки арамидной ткани вязким составом при изготовлении деталей из композитного материала [Текст] / В. В. Сыс, Ю. Н. Бардачев // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – 2012. – №2(20). – С. 74-78.
2. Городнищенский, П. Л. Ультразвуковая пропитка стеклоткани конструкций из стеклопластиков [Текст]: материалы IX Всесоюзной акустической конф./ П. Л. Городнищенский, В. А. Косенков, В. Ш. Статников, Е. С. Тростянецкий. – М., 1978. – С. 103-106.
3. Vignoles, G. L. Contribution of X-ray CMT image processing to the modelling of pyrocarbon Chemical Vapour Infiltration [Электронный ресурс] / G. L. Vignoles, C. Mulat, C. Germain, O. Coindreau, S. Delettrez, G. Chollon // Carbon 2009, Biarritz : France. – Режим доступа : \www/ URL: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00399521/en/>. – 06.11.2013 г. – Загл. с экрана.
4. Ломов, С. В. WiseTex – виртуальный мир и реальное прогнозирование структуры и свойств текстильных полимерных композитов [Электронный ресурс] / С. В. Ломов, И. Ферпуст // Технический текстиль. – 2006. – №13. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.rustm.net/catalog/article/140.html>. – 07.11.2013 г. – Загл. с экрана.
5. Яблочников, Е. И. Интеграция процессов проектирования и подготовки производства изделий из полимерных композиционных материалов [Текст] / Е. И. Яблочников, С. Д. Васильков, И. А. Волков // Композитный мир. – 2012. – №2(41). – С. 54-57.
6. Сыс, В. Б. Развитие научных основ создания низкомолекулярной технологии жидкостной обработки нитей в паковках [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / В. Б. Сыс. – Херсон, 2008. – 328 с.
7. Lomov, S. V. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites [Текст] / S. V. Lomov, A. V. Gusakov, G. Huysmans, A. Prodromou, I. Verpoest // Composites Science and Technology. – 2000. – Vol. 60. – P. 2083-2095.
8. Lomov, S. V. Hierarchy of textile structures and architecture of fabric geometric models [Текст] / S. V. Lomov, G. Huysmans, I. Verpoest // Textile Research Journal. – 2001. – Vol.71, №6. – P. 534-543.
9. Ломов, С. В. Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С. В. Ломов. – СПб, 1995. – 486 с.
10. WiseTex suit demo version [Электронный ресурс] / KU Leuven, Belgium. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex>. – 05.11.2013 г. – Загл. с экрана.