

Многофункциональный анализ параметров тканой армирующей структуры по функциональным свойствам элементарной периодической ячейки композитного материала

Multifunctional analysis of the parameters of a woven reinforcing structure based on the functional properties of a periodic unit cell of a composite material

С.В. ЕРШОВ, В.Б. КУЗНЕЦОВ, Е.Н. НИКИФОРОВА,

И.А. СУВОРОВ, Н.Б. КОЗЛОВА, Е.Н. КАЛИНИН

S.V. ERSHOV, V.B. KUZNETSOV, E.N. NIKIFOROVA,

I.A. SUVOROV, N.B. KOZLOVA, E.N. KALININ

Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

enkalini@gmail.com

Исследования параметров армирующей структуры в форме тканого полотна полимерного композитного материала проведены методами численных технологий с целью определения геометрических и упруго-вязких параметров элементарной периодической ячейки наполнителя, регулярно повторяющейся в его архитектуре.

Полученные результаты использованы при разработке компьютерной системы для проектирования и вычисления функциональных параметров элементарной ячейки армирующей тканой структуры полимерного композита.

Созданные численные образы поверхности текстильной армирующей структуры дали возможность внести корректировки результатов модельных решений, повышающие точность программного решения задачи по многофункциональному исследованию параметров наполнителя с целью выделения функциональных свойств элементарной периодической ячейки тканой структуры полимерного композита.

Ключевые слова: полимерный композитный материал, армирующая текстильная структура, параметрическая линзовидная, геометрическая модель структуры переплетения, 3D-модель структуры ткани, твердотельное моделирование, управляющие переменные

Investigations of the parameters of the reinforcing structure in the form of a woven fabric of a polymer composite material were carried out by numerical technologies in order to determine the geometric and elastic-viscous parameters of the elementary periodic cell of the filler, which is regularly repeated in its architecture.

The results obtained were used in the development of a computer system for designing and calculating the functional parameters of the unit cell of a reinforcing woven structure of a polymer composite.

The created numerical images of the surface of the textile reinforcing structure made it possible to make adjustments to the results of model solutions that increase the accuracy of the software solution of the problem of multifunctional study of the filler parameters in order to highlight the functional properties of the unit periodic cell of the woven structure of the polymer composite.

Keywords: polymer composite material, reinforcing textile structure, parametric lenticular, geometric models of weave structure, 3D-model of fabric structure, solid modeling, control variables

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-9-10-31-34

Основная часть

В виде объекта исследования была принята наиболее распространённая в производстве углеродная ткань HP-P195C (рис. 1) полотняного переплетения.

Таблица 1. Техническая спецификация углеродной ткани HP-P195C.

Масса образца 10×20 см, г	3,4±5%
Тип пряжи в основе – карбон	3К 200
Толщина, мм	0,28±5%
Линейная плотность, г/см	1,8±2%
Тип переплетения, HT-fibre	3К 200

Лабораторный образец композитного материала с углеродной армирующей структурой изготовлен с использованием метода вакуумной инфузии. Время пропитки армирующей структуры эпоксидной смолой для однослойного образца композита составило 14 минут 6 секунд 09 миллисекунд. Полученные образцы углеродного материала были подготовлены для получения микроскопических фотоизображений (рис. 2).

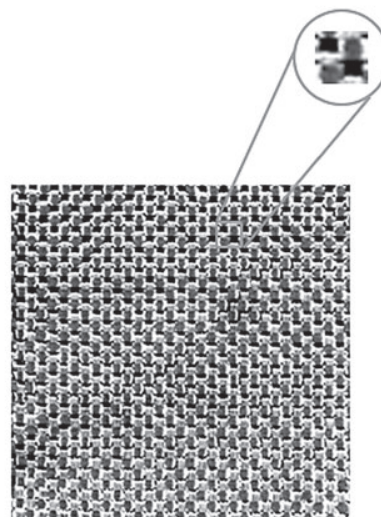


Рис. 1. Образец углеродной ткани HP-P195C.

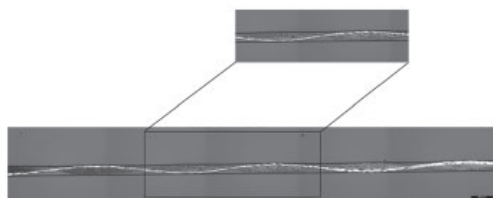


Рис. 2. Микроскопическое изображение полученного образца среза однослойного композитного материала на основе армирующей структуры – углеродной ткани и матрицы – эпоксидной смолы.

На микроскопическом изображении представлен результат пропитки тканой армирующей структуры, пустоты, образовавшиеся в пространстве между нитями, показывающие меру их заполнения вязкой матрицей – эпоксидной смолой. Полученные данные использованы для создания имитационной модели результата пропитки армирующей волокнистой структуры на основе метода конечного объёма.

При моделировании процесса заполнения вязкой матрицей капиллярно-пористой полимерной армирующей структуры использован метод конечного объёма (МКО) системы Solidworks

– метод представления и оценки дифференциальных уравнений в частных производных в форме алгебраических уравнений, описывающих физические законы сохранения. Метод конечного объёма даёт возможность оценить точные выражения для усреднённых значений решения по некоторому заданному объёму и использует эти данные для построения приближённых решений в пределах ячеек сетки [3].

При использовании метода выбирается некоторая замкнутая область течения жидкости на примере матрицы композита, для которой производится определение полей макроскопических величин (например, скорости, гидравлического давления), описывающих состояние среды во времени и удовлетворяющих заданным математически сформулированным физическим законам.

Например, для заданной величины φ в каждой точке $O(x, y, z, t)$ пространства, окруженной некоторым замкнутым конечным объёмом, в момент времени t существует следующая зависимость: общее количество величины φ в объёме может изменяться за счёт следующих факторов:

- перемещение количества этой величины через поверхность, ограничивающую контрольный объём – поток;

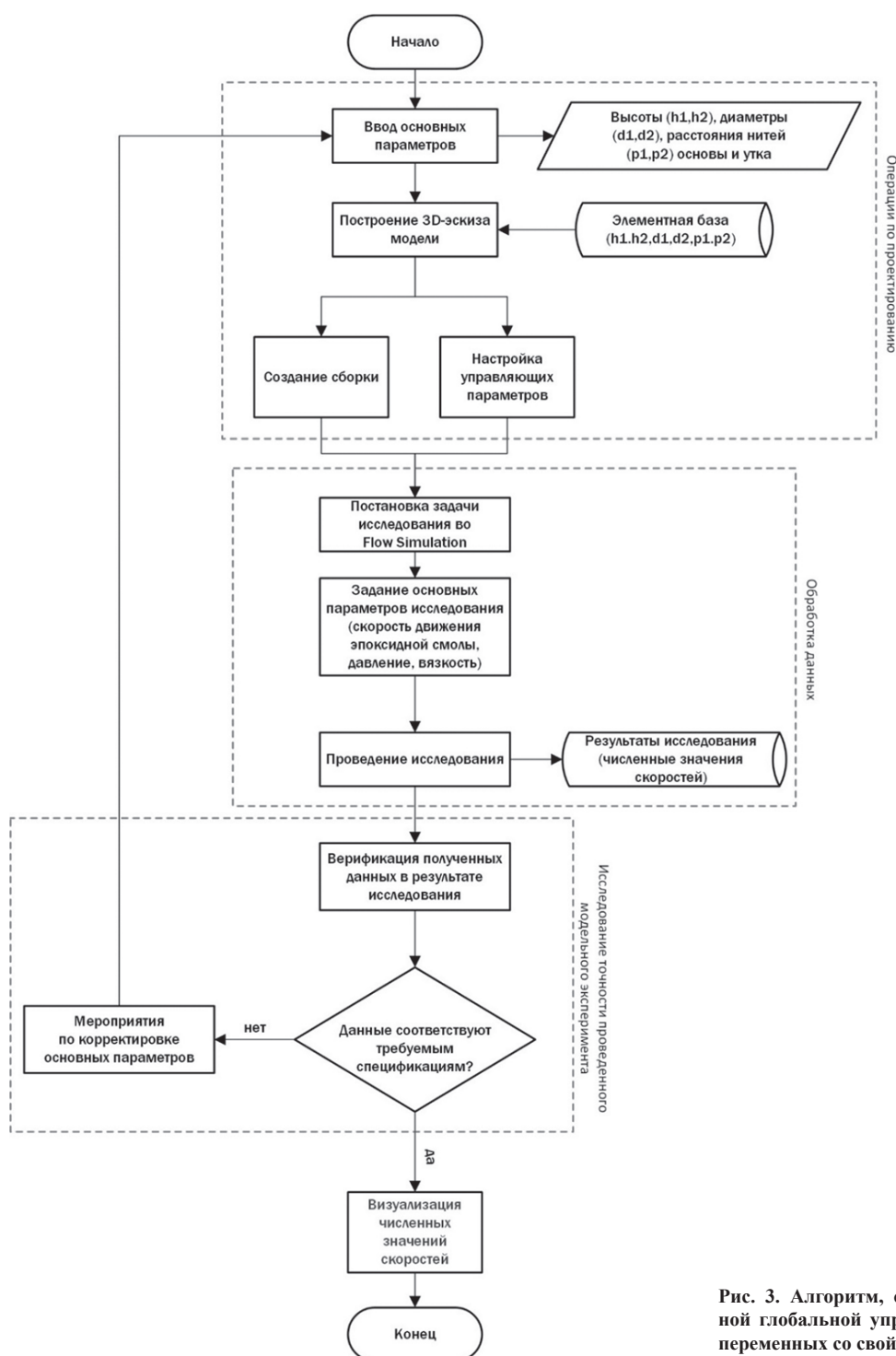


Рис. 3. Алгоритм, обеспечивающий взаимосвязь между заданной глобальной управляющей и величинами соответствующих переменных со свойствами двунаправленности.

- генерирование некоторого количества величины φ внутри контрольного объема – сток.

Таким образом, при постановке задачи с применением МКО используется физическая интерпретация исследуемой величины

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (U\varphi) - \nabla \cdot (D\nabla \varphi) + \varphi = S_\varphi,$$

где: $\partial \varphi / \partial t$ – скорость изменения некоторой физической величины φ ; φ – реактивное слагаемое в абстрактном законе сохранения физической величины φ ;

$\nabla \cdot (U\varphi)$ – конвективное слагаемое в абстрактном законе сохранения физической величины φ ;

$\nabla \cdot (D\nabla \varphi)$ – диффузное слагаемое в абстрактном законе сохранения физической величины φ ;

S_φ – источниковое слагаемое в абстрактном законе сохранения физической величины φ .

С целью реализации возможности оптимизации топологии структурных параметров геометрической модели могут быть использованы глобальные управляющие переменные, объединяющие заданные размеры модели посредством системы математических уравнений с использованием возможностей в системе Solidworks инженерного модуля Flow Simulation для параметрического моделирования гидродинамики потока на основе метода конечного объема (Finite Volume). Модуль позволяет на этапе проектирования системы прогнозировать величины параметров жидкой фазы в синтезируемом объекте.

Глобальные управляющие переменные обеспечивают процедуры управления уравнениями и параметрами измерений, располагая свойством двунаправленности, обеспечивающим взаимосвязь между заданной глобальной переменной и величинами соответствующих переменных в соответствии с разработанным нами алгоритмом [1] (рис. 3).

Для математического описания моделируемой тканой армирующей структуры полимерного композита на данном этапе нами была использована параметрическая модель с линзовидным поперечным сечением нити [2].

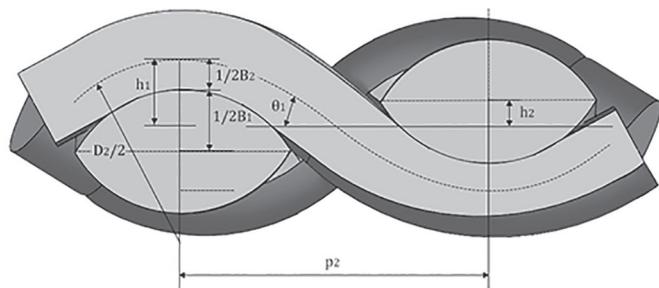


Рис. 4. Параметрическая 3D-модель двумерной элементарной ячейки тканой армирующей структуры

Модель тканой ячейки с линзовидным поперечным сечением нити имеет более точное математическое описание и соответствие реальной тканой структуре, поэтому через данные уравнения можно получить математическое описание для других видов моделей армирующих структур [5]. Системы уравнений для линзовидной геометрической модели, использованные в настоящей работе, имеют вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= (l_2 - D_2 \theta_2) \cos \theta_2 + D_2 \sin \theta_2; \\ p_2 &= (l_1 - D_1 \theta_1) \sin \theta_1 (1 - \cos \theta_1); \\ D_1 &= 2R_2 + b_1; \\ a_2 &= 2d_2 + \sin \theta_1; \\ b_2 &= 2d_2 + \cos \theta_1; \\ e_2 &= \frac{a_1}{b_1}; \\ \llbracket \sin \phi \rrbracket_{11} &= \llbracket 2e \rrbracket_{11} (1 + e_{11}^2); \\ h_1 + h_2 &= b_1 + b_2; \\ l_2 &= D_1 \theta_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где h_1, h_2 – высота нитей основы и утка; a_1, b_1 – высота линзовидного сечения нити/ширины линзовидного сечения нити;

D – сумма диаметров нитей основы и утка; d_1, d_2 – диаметры нитей основы и утка соответственно; p_1, p_2 – расстояние между нитями основы и уточной нити соответственно; l_1, l_2 – длины нитей основы и утка; θ_1, θ_2 – углы плетения нитей основы и утка, e – степень смятия нити. Индексы '1' и '2' в приведенных выше переменных относятся к деформации основы и утка соответственно [6].

По геометрическим параметрам материала, полученного в ходе реального эксперимента, были синтезированы 3D-модели в системе Solidworks (рис. 4). В качестве основных параметров использовались высота нитей основы и утка; высота линзовидного сечения нити/ширина линзовидного сечения нити; сумма диаметров нитей основы и утка; диаметры нитей основы и утка соответственно; расстояние между нитями основы и уточной нити соответственно; длины нитей основы и утка; углы плетения нитей основы и утка, степень смятия нити. Применение метода геометрического моделирования с использованием глобальных управляющих переменных позволяет изменять параметры модели применительно к конкретно решаемой задаче путем варьирования значений одной или нескольких управляющих переменных, получать подробную информацию о структуре ткани и оценить погрешность 3D-модели параметров тканой структуры после ее наработки на ткацком станке.

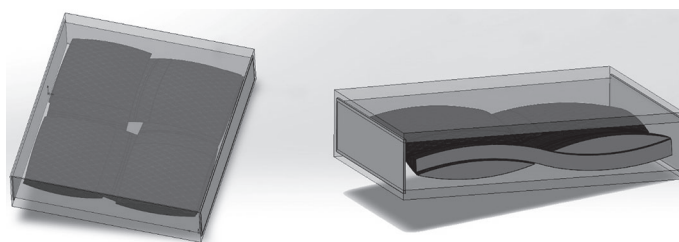


Рис. 5. Проекция твердотельной 3D-модели элементарной ячейки армирующей структуры в элементарном объеме системы Solidworks.

При исследовании движения потока вязкой матрицы в капиллярно-пористой тканой армирующей структуре элементарная ячейка была помещена в четырехугольную призму, и с двух сторон созданы «заглушки», представляющие собой виртуальные объекты, имитирующие поток матрицы (подачу эпоксидной смолы) и создание внутреннего гидравлического давления. На входном потоке матрица, равная 0,01 м/с, а на выходном сечении задавалось давление окружающей среды, равное 800 КПа. Для фиксирования потока задан параметр реальной стенки.

В качестве входных данных выбран внутренний тип моделируемой задачи в виде нестационарного во времени потока, обтекающего твердое тело.

Для получения более точных результатов вычислений использована функция «Адаптация сетки», обеспечивающая дробление ячеек сетки таким образом, чтобы общее количество ячеек увеличивалось до достижения заданного разрешения. Flow Simulation автоматически выполняет адаптацию параметров сетки в вычислительном процессе.

При конструировании имитационной модели процесса пропитки углеродной тканой армирующей структуры эпоксидной смолой RIMR 426 Hexion использованы её параметры: плотность – 1180 кг/м³, динамическая вязкость – 0,5 Па·с.

При этом учтены как внешние параметры, определяющие гидродинамику вязкой матрицы, так и проницаемость армирующей капиллярно-пористой структуры волокнистого материала. Для численного воспроизведения свойств проницаемости углеродного материала – прохождения эпоксидной смолы через капиллярно-пористую структуру углеродной ткани в разделе «Пористая среда» – нами была смоделирована виртуальная структура с заданными фильтрующими параметрами, дающая возможность прохождения жидкости через виртуальные поры элементарной ячейки наполнителя с создаваемыми гидравлическими сопротивлениями.

По визуализации результатов моделирования можно сделать вывод о скорости заполнения эпоксидной смолой внешних и внутренних областей армирующей структуры (рис. 6). Визуализация поля скоростей движения полимерной матрицы указывает на необходимость интенсификации процесса ее распределения во внутренних областях армирующего наполнителя.

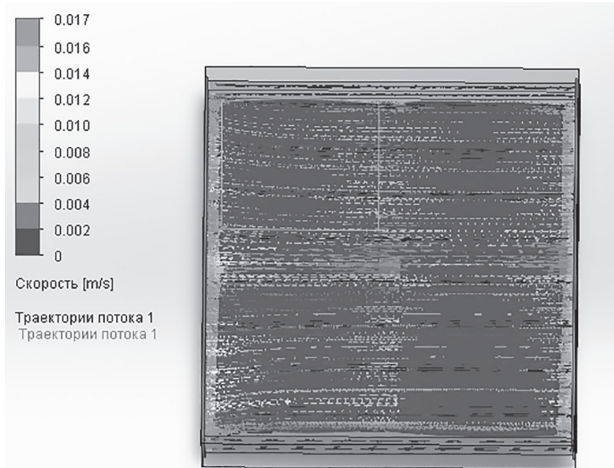


Рис. 6. Визуализация динамики скорости потока вязкой матрицы в модели элементарной ячейки капиллярно-пористой армирующей структуры.

Выводы

Полученные системные в Solidworks цветные (здесь чёрно-белые на рис. 6) диаграммы позволяют визуальнo охарактеризовать динамику изменения скорости, траектории потоков вязкой матрицы в капиллярно-пористой армирующей структуре.

Визуально потоковая скорость матрицы по краям анализируемого образца, представляющего элементарную периодическую ячейку, численно может быть оценена как меньшая по величине, чем в его центре, где заполняемость армирующей структуры матрицей – эпоксидной смолой – происходит более интенсивно.

Результаты моделирования процесса пропитки углеродной волокнистой структуры вязкой матрицей дают возможность использовать разработанную трехмерную параметрическую модель в широком спектре задач прогнозирования заданных выходных параметров проектируемого изделия – препрега – на примере сложных геометрических структур как основы полимерного композитного материала.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ по проекту 20-43-370007 р_а_Ивановская область: «Развитие научных основ прогнозирования функциональных и конструкционных параметров синтезируемых полимерных волокнистых композитных систем».

Литература

1. Ершов С.В., Суворов И.А., Кузнецов В.Б., Никифорова Е.Н., Калинин Е.Н. Синтез 3D-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021, № 1 (391). С. 114–119.
2. Суворов И.А., Ершов С.В., Кузнецов В.Б. Разработка параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры полимерного композиционного материала: сборник Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-технической конференции ПОИСК-2019. 2019. С. 310–312.
3. Суворов И.А., Ершов С.В., Кузнецов В.Б., Калинин Е.Н. Создание параметрической 3D-модели тканой армирующей структуры композиционного материала: сборник XXII Международного научно-практического форума SMARTEX. 2019. С. 194–198.
4. Кожевников С.О., Кузнецов В.Б., Малов М.С. Анализ технических возможностей SolidWorks при моделировании движения жидкости в устройствах для механоактивации коллоидных систем. Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов 5-й Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. в 2-х томах, Т.1., Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 335–341.
5. Chen X. Modelling and predicting textile behavior – 2010. С. 25–29.
6. Vassiliadis S. Mechanical Analysis of Woven Fabrics: The State of the Art // Advances in Modern Woven Fabrics Technology – 2011. С. 41–61.