УДК 677.017.63

Численная параметризация структурной 3-D геометрии армирующей компоненты композита на волокнистой капиллярно-пористой основе

Numerical parameterization of the structural 3-D geometry of the reinforcing component of a fibrous capillary-porous composite

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

В работе представлены результаты реализации метода модельно-ориентированного проектирования построения структурной 3-D геометрии волокнистой армирующей компоненты с численной параметризацией конструкционных свойств тканой элементарной периодической ячейки композита на основе интегрированных CAD/CAM-систем. Решены задачи кинематики движения вязкого связующего через волокнистую структуру условной тканой системы различной архитектуры в процессе синтеза тканого композита

Ключевые слова: метод модельно-ориентированного проектирования, динамическое моделирование, численное 3D-моделирование композита

The paper presents the results of the implementation of the Model-Based Design method for constructing the structural 3-D geometry of a fibrous reinforcing component with numerical parameterization of the structural properties of a woven elementary periodic cell of a composite based on integrated CAD/CAM systems. The problems of the kinematics of the movement of a viscous binder through the fibrous structure of a conditional woven system of various architectures in the process of synthesis of a woven composite are solved.

Keywords: model-based design method, dynamic modeling, 3D numerical modeling of the composite

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-9-10-12-14

Проблемы синтеза конструкционных композитных материалов связаны с необходимостью прогнозирования и технологического обеспечения их функциональных свойств.

Метод модельно-ориентированного проектирования применительно к обозначенной проблеме сочетает в себе:

- достижение заданных показателей точности функциональных параметров синтезируемого композитного материала; их согласованность с современными стандартами и методологией адаптации этапов проектирования композита к реализуемым производственным технологиям, обусловленным широким спектром задаваемых физико-механических параметров материала-объекта;
- гибкость принятия проектных решений при создании широкого класса компьютерных систем, реализующих технологии численного моделирования, для различных типов композитных объектов на основе разработки научных основ прогнозирования их характеристик с учётом реологии полимерной матрицы и волокнистого наполнителя на макро-, мезо-, и микроуровне с обеспечением качественных параметров синтеза и преемственности результатов, накопленных в ходе решения предшествующих задач.

В связи с этим актуальной задачей является развитие методологии синтеза композитных капиллярно-пористых систем на основе результатов анализа полимерных волокнистых структур с использованием интеллектуальных систем управления процессами в проектно-ориентированном моделировании в интегрированных CAD\CAE-системах с привлечением информационного обеспечения на основе численных технологий, формируемых в определённых областях знаний [1].

Теоретические обоснования и точность результатов численного синтеза композитной системы зачастую основываются на недостоверной информации, полученной в ходе невоспроизводимых экспериментальных аналитических действий. Основываясь на принципах формирования композитных структур, отражающих их функциональные характеристики, отметим три этапа.

Первый этап – геометрический синтез твердотельной модели структуры, с анализом статических и динамических режимов нагружения заданных объёмов армирующей компоненты композита. В основе геометрического синтеза структуры наполнителя по заданным его конструкционным параметрам заложена технология твердотельного моделирования полимерной волокнистой армирующей структуры с возможностью оптимизации её геометрических параметров по заданной топологии волокнистого наполнителя, реализуемая на основе вычислительных процедур программного комплекса [1], и ключевые переменные, получаемые средствами вычислительной системы, а также принципы динамического моделирования с использованием методов модельно-ориентированного проектирования [2].

При решении задачи анализа динамической упруго-вязкой системы, представляющей основные функциональные характеристики армирующей волокнистой компоненты полимерного композитного материала, описываемой системой уравнений, представляющих топологию механической цепи, воспроизводящей характер взаимодействий элементов её структуры [3], представленных в форме пространственно-одномерной механической цепи, анализ которой целесообразно проводить, основываясь на теории линейных графов цепей, которые содержат информацию о сопряжении динамических элементов цепи и о взаимосвязи ее переменных [4].

Второй этап синтеза системы заключается в определении и в анализе направленности волокон реальных волокнистых структур

с учётом влияния пиксельной характеристики цифрового изображения её структуры на точность результатов определения её геометрических параметров [5].

Третий этап синтеза сводится к визуализации адгезионного взаимодействия компонентов композита методами динамического молекулярного моделирования [6], создающего предпосылки к реализации процедур прогнозирования трибомеханических характеристик в слоях препрега, как системы «матрица–наполнитель», формирующих композитный материал в виде единого объекта.

В основу завершающего этапа проектирования, определяемого нами как метод динамического синтеза, сопровождаемого анализом численной феноменологической твердотельной модели прототипа изделия, заложены методы идентификации и верификации моделей функциональных параметров изделия с целью формирования массива данных, обеспечиваемых методами интеграции систем модельно-ориентированного проектирования, который принят за основу создания обобщенной стохастической модели синтезируемого объекта по заданным функциональным характеристикам прототипа композитного материала.

В рамках решения задач обозначенной проблемы предметом анализа и синтеза являются следующие технологии:
- формирование армирующей компоненты физического полноразмерного прототипа изделия на основе синтеза 3D-моделей различных вариантов его структуры;
- основы синтеза и анализа результатов компьютерного феноменологического 3D-моделирования полноразмерного изделия из полимерного волокнистого композитного материала.

Идентификация и верификация модели по функциональным параметрам изделия с целью формирования массива данных как основы синтеза обобщенной стохастической модели образца композита заключается в определении технологических аспектов прогнозирования прочностных, адгезионных, трибомеханических характеристик полимерного волокнистого композитного материала (методами молекулярной динамики, структурно-параметрического моделирования на основе методов дискретной математики) средствами разработанной нами методологии прогнозирования общих закономерностей и частных решений по обеспечению конструкционных характеристик объекта.

При этом, принимая во внимание сложную структуру тканого наполнителя, целесообразно учитывать различные пространственные геометрические факторы волокнистого материала, такие как форма поперечного сечения нити, промежутки между ними и между слоями в случае их многослойности [3, 4].

При моделировании процесса заполнения вязкой матрицей капиллярно-пористой полимерной армирующей структуры нами использован метод представления и оценки результата численного решения дифференциальных уравнений в частных производных в форме алгебраических уравнений, описывающих физические законы сохранения, дающий возможность оценить точные выражения для усреднённых значений решения по некоторому заданному объему и использовать эти данные для построения приближённых решений в пределах ячеек сетки [7].

С целью оптимизации топологии структурных параметров геометрической модели композита использованы глобальные управляющие переменные, объединяющие заданные размеры модели посредством системы математических уравнений с возможностью прогнозирования параметров жидкой фазы матрицы в синтезируемом объекте.

Для анализа процесса движения потока вязкой матрицы в капиллярно-пористой тканой армирующей структуре элементарная ячейка была виртуальным образом помещена в четырёхугольную призму, и с двух сторон инициированы виртуальные «заглушки», представляющие собой объекты, имитирующие поток матрицы (подачу, например, эпоксидной смолы) и создание внутреннего гидравлического давления. На входном сечении расчетной области задавалась начальная скорость потока матрицы, равная 0,01 м/с, а на выходном сечении задавалось давление окружающей среды, равное 800 КПа. Для получения более точных результатов численного анализа использована функция «Адаптация сетки», обеспечивающая дробление ячеек сетки таким образом, чтобы общее количество ячеек увеличивалось до достижения заданного разрешения с автоматической адаптацией параметров сетки в вычислительном процессе [7].

При разработке имитационной модели процесса пропитки методом вакуумной инфузии углеродной тканой армирующей структуры эпоксидной смолой RIMR 426 Hexion использованы её параметры: плотность – 1180 кг/м^3, динамическая вязкость – 0,5 Па·с. При этом учтены как внешние параметры, определяющие гидродинамику вязкой матрицы, так и проницаемость армирующей структуры волокнистого материала.

Численное твердотельное моделирование даёт возможность определить скорости заполнения эпоксидной смолой внешних и внутренних областей армирующей структуры. Визуализация поля скоростей движения полимерной матрицы подтверждает необходимость интенсификации процесса ее распределения во внутренних областях армирующего наполнителя [2].

В качестве армирующего объекта для структурного анализа композита нами проанализирована виртуальная тканая структура с поверхностью 12×12 мм, имеющая различное количество нитей основы и утка, что, в свою очередь, приводит к изменению площади промежутков между ними и, как следствие, оказывает существенное влияние на параметры движения наполнителя в ней. Количество нитей основы и утка составляло 3, 4 и 5, а расстояние между ними – 6, 4 и 3 мм, соответственно. Форма поперечного сечения каждой нити представляла собой круг диаметром 1 мм.

На рис. 1 представлена твердотельная модель, позволяющая анализировать кинематику движения вязкой матрицы через тканую структуру наполнителя. Аналогичные модели синтезированы и для двух других вариантов виртуальной армирующей структуры. При численном моделировании процесса движения жидкости в структуре текстильного наполнителя была задана начальная скорость ее движения 5 м/с и гидравлическое давление на выходе, соответствующее нормальному давлению окружающей среды (110325 Pa).

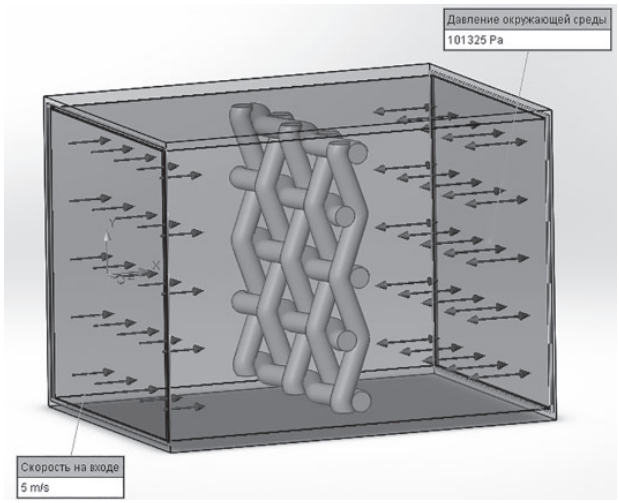

Рис. 1. 3D-модель вычислений кинематики движения жидкости через структуру тканой матрицы.

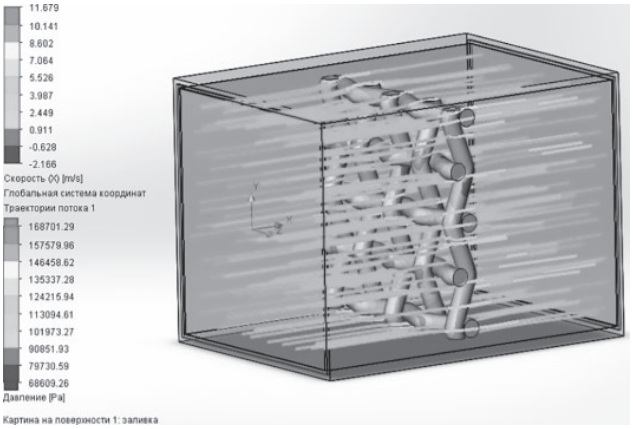

Рис. 2. Визуализация результатов твердотельного моделирования в программном комплексе SolidWorks.

На рис. 2 приведены диаграммы для численного определения изменений скорости потока и гидродинамического давления

матрицы в процессе её движения свозь структуру капиллярно-пористого наполнителя. Кроме того, рисунок позволяет осуществить визуальную оценку возникающих местных сопротивлений движению вязкой матрицы, обусловленных архитектурой тканой армирующей структуры.

В результате реализации численного 3D-моделирования получены зависимости изменения скорости потока (рис. 3а) и гидродинамического давления матрицы (рис. 3б) при её движении для всех трех вариантов тканой структуры наполнителя.

Представленные на рис. 3а данные свидетельствуют о том, что скорость потока матрицы возрастает по мере его приближения к горизонту поверхности наполнителя и достигает максимума при прохождении через структуру образца наполнителя, после чего наблюдается ее монотонное уменьшение.

Следует отметить, что увеличение количества нитей по основе и утку с трех до четырех и, соответственно, уменьшения расстояния между ними с 5 до 4 мм, практически не отражается на изменении скорости потока при прохождении его через тканую структуру. В обоих случаях она составляет 8,5 м/с. В то же время уменьшение количества нитей по основе и утку до трех и увеличение расстояния между ними до 6 мм вызывает резкое падение скорости потока до 7,5 м/с, что примерно на 15% ниже, чем в первых двух случаях.

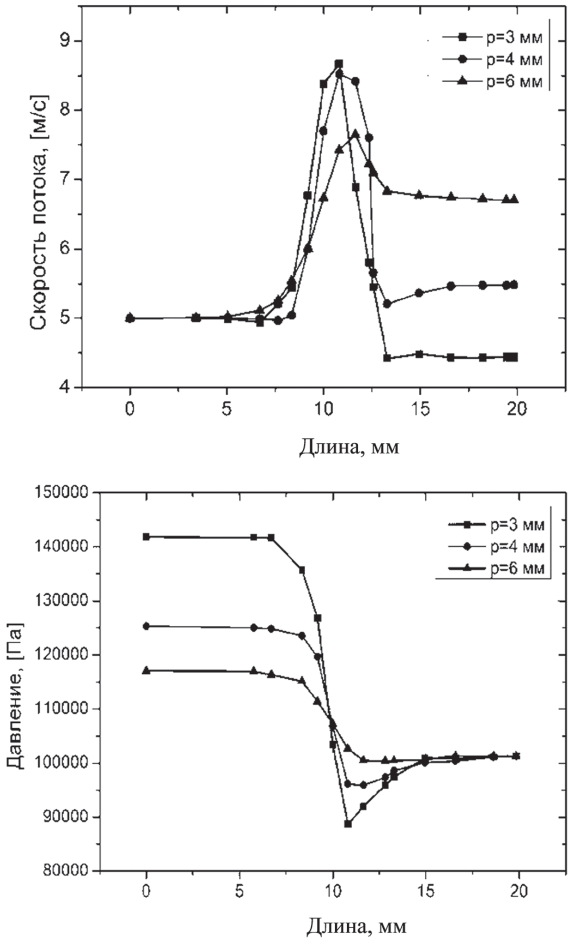

Рис. 3. Изменение скорости потока и давления жидкой матрицы при движении ее в тканой структуре наполнителя.

Представленные на рис. 3б данные по изменению гидравлического давления потока матрицы при движении через тканую структуру наполнителя демонстрируют явную конгруэнтность с результатами, представленными на рис. 3а.

Однако необходимо обратить внимание на то, что в данном случае прослеживается более ярко выраженное влияние геометрии тканой структуры наполнителя – расстояние между нитями.

Заключение

Наибольший перепад гидродинамического давления в потоке жидкой матрицы наблюдается при его движении через образец наполнителя, имеющего по 5 нитей по основе и утку, и при расстоянии между нитями 3 мм составляет 36%. При уменьшении количества нитей в наполнителе до четырех и увеличении расстояния между ними до 4 мм перепад давления составляет 24%. И, наконец, для последнего варианта с тремя нитями по основе и утку перепад давления не превышает 13%.

Полученные результаты численного моделирования позволяют осуществлять качественную и количественную оценку влияния архитектуры ткани на параметры движения жидкой матрицы в капиллярно-пористой структуре композитного наполнителя.

Дальнейшее развитие методологии синтеза композитных материалов из полимерных капиллярно-пористых структур методами интеграции систем в технологии модельно-ориентированного проектирования, в основу которых заложены принципы численного анализа структурных, молекулярных, динамических и стохастических моделей, является основой успешного решения задач создания композитной структуры, с возможностью исключения погрешностей, обусловленных наличием упрощений, допущений, заложенных в универсальных CAD/CAM -системах.

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. Синтез 3D-модели тканой армирующей структуры текстильного композита средствами методологии численного объектно-ориентированного моделирования / С.В. Ершов, И.А. Суворов, В.Б. Кузнецов, Е. Н. Никифорова, Е. Н. Калинин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. №1. С. 114–119.
2. Влияние динамического воздействия на кинетику процесса импрегнирования в синтезе полимерного композитного материала / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин, В.Б. Кузнецов, С.А. Кокшаров И.А. Суворов // Известия высших учебных заведений. Технологиятекстильнойпромышленности. 2021. №6. С. 195–204.
3. Numerical model of the mass transfer transition states in the vacuum infusion process of the polymer matrix and the reinforcing filler structure / S. Ershov, E. Kalinin, V. Kuznetsov, A. Baranov, S. Koksharov // Key Engineering Materials. New Polymer Composite Materials II. 2020. Vol. 869. P. 196–201.
4. Щербаков В.П. Прямое определение параметров функции влияния в наследственной механике текстильных материалов методами нелинейного программирования // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1997. №1. С. 6–10.
5. Method for measuring the braid angle and its deviation from the specified value in braided preforms using image analysis / S.V. Ershov, V. Reimer, T. Zastrow, E.N. Kalinin, T. Gries // Fibre Chemistry. 2022. Vol. 53, No.5. P. 346–354.
6. Блинов О.В., Годлевский В.А., Калинин Е.Н., Стулов С.А. Перспективы применения и ограничения методов молекулярной динамики для описания межфазной границы в дисперсных системах – объектах текстильных технологий //Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. №2 (362). С. 202–206.
7. Многофункциональный анализ параметров тканой армирующей структуры по функциональным свойствам элементарной периодической ячейки композитного материала / С.В. Ершов, В.Б. Кузнецов, Е.Н. Никифорова, И.А. Суворов, Н.Б. Козлова, Е.Н. Калинин // Пластические массы. 2022. №9–10. С. 31–34.