

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев А.Н. Нанотехнология и наноструктурные материалы // Индустрия. 2002. № 1. С. 12.
2. Гуняев Г.М., Комарова О.А., Ильченко С.И., Алексакин В.М., Пономарев А.Н., Деев И.С., Никитин В.А. Фуллероидные наноматериалы – активные структурные модификаторы полимеров и полимерных композитов // Пластические массы. 2003. № 10. С. 15.
3. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексакин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 5.

А.Е. РАСКУТИН, В.А. ГОНЧАРОВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПКМ МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ

Одним из основных преимуществ полимерных композиционных материалов (ПКМ) является то, что материал, технология и конструкция создаются одновременно. Этим определяется высокая степень инноваций на всех этапах жизненного цикла материала и конструкции из него. В связи с этим требуется применение новых подходов к проектированию и созданию конструкций из ПКМ на основе сложных математических моделей и IT технологий. Для получения новых знаний о моделируемом объекте или для приближенной оценки поведения математических систем, слишком сложных для аналитического исследования, применяют компьютерное моделирование.

Компьютерные модели проще и удобнее исследовать в силу их возможности проводить так называемые вычислительные эксперименты в тех случаях, когда реальные эксперименты затруднены из-за финансовых или физических препятствий либо могут дать непредсказуемый результат. Компьютерные модели позволяют выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта – оригинала, в частности, исследовать «отклик» моделируемой физической системы на изменения ее параметров и начальных условий.

Моделирование технологии получения конструкций из ПКМ является эффективным инструментом решения многих актуальных задач, стоящих перед промышленностью сегодня, и позволяет значительно снизить материальные и временные затраты на создание и отработку новых изделий и технологий.

Первоначально композиционные материалы применялись в оборонной промышленности – авиа- и ракетостроении. Применение деталей из КМ ограничивалось высокой трудоемкостью проектирования и изготовления методами ручной выкладки, что, в свою очередь, обуславливало высокую стоимость изделий. По мере развития вычислительной техники стали возможны методы изготовления конструкции из КМ на укладочных и намоточных станках с ЧПУ. Стоимость изделия существенно снизилась, что привело к резкому росту применения КМ в самых различных областях: военная и гражданская авиация, космос и ракетостроение,

военное и гражданское судостроение, автомобилестроение и сельскохозяйственная техника, спортивные товары, энергетика, строительные технологии.

Исторически в развитии методов проектирования изделий из КМ условно можно выделить три этапа:

- ручное проектирование;
- проектирование с применением универсальных САД систем;
- проектирование с применением специализированных САД систем.

«Ручная» разработка сводится к представлению изделия в виде комплекта чертежей, таблиц слоев и спецификации, выполненных на кульмане. После чего проводилась отработка конструкции и технологии в опытном производстве, что вело к увеличению срока запуска в серию и росту стоимости проекта.

Применение появившихся в 90-х годах программ трехмерного моделирования позволило ускорить процесс разработки и решить ряд проблем, характерных для традиционного метода проектирования:

- определение и задание на чертеже границ зон армирования;
- взаимная увязка элементов конструкции в пространстве;
- подготовка данных для расчета на прочность;
- передача в производство описания оснастки сложной формы;
- позиционирование вкладышей внутри детали.

Недостатки данного подхода:

- в чертеж передается только геометрия детали, но не структура;
- в конечно-элементную модель передается только геометрия детали, но не структура и не свойства материалов;
- сложности с программированием укладочных машин.

Таким образом, применение универсальных систем оставляет достаточно большой объем неавтоматизированных работ.

Современные специализированные программы позволяют вести комплексную разработку изделия. В процессе проектирования решаются следующие задачи:

- формирование слоевой структуры;
- генерация твердого тела для представления в электронном макете и выпуска чертежной документации;
- уравнивание структуры слоев относительно нейтрального слоя;
- анализ слоев на корректность облегаия оснастки и формирование подрезов;
- разделение слоя на ленты в проблемных для выкладки местах;
- формирование сотовых заполнителей;
- генерация разверток слоев;
- массово-инерционный анализ конструкции;
- двусторонняя интеграция с программами конечно-элементного анализа;
- генерация чертежей с возможностью получения сечений и видов со структурой слоев.

Изготовление изделий из ПКМ в зависимости от требований, предъявляемых к конечному продукту формования, может быть реализовано различными методами: формование в прессе, автоклаве, вакуумный способ формования, RTM, вакуумная инфузия и другие. В настоящее время в качестве одного из перспективных методов для реализации получения

изделия из ПКМ с требуемыми эксплуатационными характеристиками, а также с учетом экономической и экологической составляющих, рассматривают метод вакуумной инфузии. Данный технологический процесс предполагает использование вакуумного мешка для создания разрежения в рабочем объеме при формовании и процесса инъекции в него связующего с последующей пропиткой наполнителя за счет разницы давлений в вакуумном мешке и атмосферным [1].

Использование давления (избыточное – в случае РТМ; пониженное – вакуумирование – в случае инфузии) позволяет получать изделия из ПКМ с достаточно высокой степенью воспроизводимости характеристик и геометрических параметров. Но при изготовлении изделий с использованием РТМ требуется наличие достаточно дорогого оборудования: мощные компрессоры, насосные станции, жесткие (в основном металлические) формы. Этот метод рекомендован для изготовления серийной или мелкосерийной продукции. В случае использования вакуумной инфузии требуется только наличие простой формы (в основном стеклопластиковой), формирующей требуемую поверхность изделия; вакуумный насос; расходные материалы для создания системы пропитки и вакуумирования; материалы для создания вакуумного мешка. С использованием данного метода возможно изготовление различных по размерам изделий (площадью от нескольких сантиметров до сотен квадратных метров) и объемам – от одного изделия до серийного производства.

Лучшее соотношение связующего и наполнителя, реализуемое в данном методе, позволяет обеспечить достижение требуемых механических свойств и оптимальное содержание связующего. Так как формование проходит в закрытом вакуумном мешке, снижается эмиссия вредных веществ, что повышает экологичность процесса. Кроме того, в отличие от изготовления в автоклаве, вакуумная инфузия более энергосберегающий метод.

Использование компьютерного моделирования для оптимизации технологического процесса вакуумной инфузии позволяет определить параметры формования еще на стадии проектирования, снизить риски, связанные с разработкой нового изделия. Для реализации в компьютерном моделировании данного метода используется математический аппарат, отражающий взаимосвязь критичных параметров технологического процесса. На основании математической модели разрабатывается алгоритм реализации ее с целью получения результата компьютерного моделирования, максимально приближенного к реальным условиям.

Основные процессы, которые проходят при вакуумной инфузии и должны учитываться при моделировании, можно разделить на несколько категорий: реология процесса, термическая составляющая, химия процесса. К реологической категории относится движение связующего через среду наполнителя с учетом проницаемости, а также изменение вязкости связующего. Теплофизика процесса формования включает в себя учет теплопроводности оснастки, теплоемкости и теплопроводности компонентов ПКМ, конвекции тепла от одной области изделия к другой с помощью движущейся среды, в данном случае – связующего. При определении химической составляющей должны быть учтены диффузия и полимеризация в процессе формования. Кроме того, на механические свойства изготовленного ПКМ будет сказываться пористость в материале.

С учетом процессов, протекающих при формировании методом вакуумной инфузии, определены требования, предъявляемые к исходным данным, для реализации компьютерного моделирования. К ним относятся характеристики связующего и наполнителя: физико-механические, упруго-прочностные, теплофизические. Для наполнителя – градиент проницаемости, плотности, теплоемкость и теплопроводность, поверхность начальной площадь, а также начальная толщина пакета. Для связующего – функция вязкости от температуры, теплоемкость и теплопроводность связующего, плотность. Необходимо отметить, что для наполнителя необходимо учитывать изменение проницаемости в результате процесса предварительной формовки и связанного с этим смещения его волокон относительно первоначального положения (рис. 1).

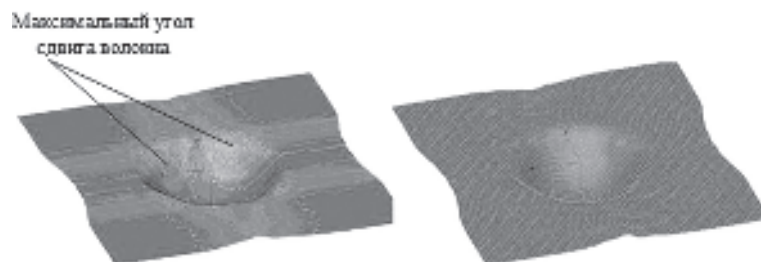


Рис. 1. Угол смещения и новая ориентация волокон в процессе предварительного формообразования

Моделирование процесса вакуумной инфузии сводится к решению задач гидродинамики и теплообмена. Решение задачи гидродинамики при моделировании описывается законом Дарси, определяющим расход однородной жидкости через пористую среду при ламинарном режиме потока. Основа для выполнения закона Дарси – обеспечение закона сохранения масс [2]. Так как масса связующего в выделенном объеме со временем не меняется, то полный поток этого вектора через замкнутую поверхность обязательно равен нулю.

Если выделить элементарный объем с фиксированными координатами, то появляется возможность реализовать подход Эйлера к описанию сплошной среды. При этом можно наблюдать за изменениями в этом объеме, связанными с протеканием через выделенный объем все новых и новых частиц. Данный подход отличается от приема предложенного Лагранжем, который предлагает выделять элементарный объем в пространстве и следить за частицами объема, двигаясь вместе с ним [3].

В данном случае выполняется стационарное уравнение неразрывности потока – одно из основных уравнений динамики сплошной среды. Критическими параметрами, влияющими на процесс инфузии, являются проницаемость наполнителя, вязкость связующего, градиент давления. Чем больше проницаемость наполнителя и скорость подачи связующего, тем быстрее пройдет полная пропитка армирующего материала. Обратное влияние на процесс оказывает вязкость связующего.

Каким же образом одним и тем же законом можно описать процессы изготовления различных по размерам и геометрии изделий? Данная проблема решается посредством применения метода конечных элементов



Рис. 2. Закон Дарси применительно к методу конечных элементов (v – скорость пропитки; K – проницаемость армирующего наполнителя; μ – вязкость связующего; ΔP – перепад давления; L – длина конечного элемента)

к спроектированной геометрии изделия. Вся область, в которой проходит инъекция связующего, разбивается на конечное число подобластей (элементов). Для каждого такого элемента определяется скорость пропитки связующим армирующего наполнителя (рис. 2).

Алгоритм процесса вакуумной инфузии для моделирования на компьютере реализуется изначально для одной подобласти. После определения расхода для первого конечного элемента распространение связующего идет непосредственно в

близлежащие к нему элементы моделируемого изделия. И так до тех пор, пока алгоритм процесса не будет реализован для всех подобластей (рис. 3).

Реализованный численный алгоритм по моделированию пропитки обладает следующими преимуществами:

- позволяет моделировать процесс пропитки для любой геометрии изделия и любого дробления на конечные элементы;
- может моделировать подачу связующего точечными и линейными источниками;
- прогнозирует распределение давления, продолжительность и распространение фронта пропитки.

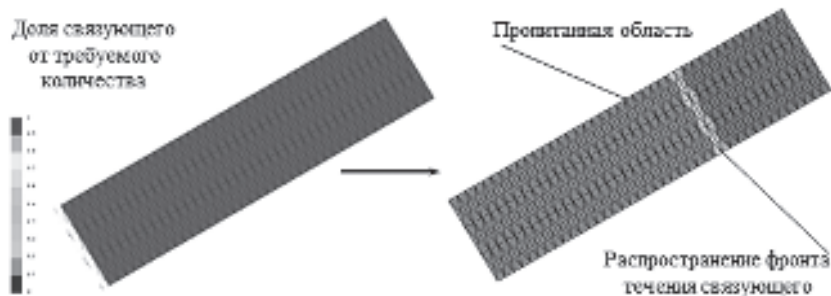


Рис. 3. Компьютерное моделирование процесса вакуумной инфузии

На основании данного алгоритма и математической модели появляется возможность оптимизации технологического процесса при моделировании метода вакуумной инфузии:

- расположение и количество зон подачи связующего;
- расположение зон подачи вакуума и отвода связующего;
- температура формования и параметры связующего;
- управление открытием и закрытием каналов подачи и отвода связующего;
- давление и скорость подачи связующего.

По результатам моделирования могут быть спрогнозированы параметры технологического процесса:

- образование возможных участков непропитки – зон, где оказался замкнут воздух или давление было недостаточно для процесса формования;

- необходимый объем связующего для процесса формования, а также величина его потерь;
- продолжительность заполнения и полимеризации (рис. 4);
- скорость и направление фронта заполнения;
- плотность материала при моделировании процесса вакуумной инфузии.

Для реализации моделирования с помощью разработанных алгоритмов для ввода исходных данных целесообразно иметь электронную базу данных, где будут храниться характеристики ПКМ и его компонентов, которые будут использоваться при проектировании изделий, что позволит снизить расходы на их изготовление при сохранении характеристик ПКМ на уровне расчетных.

Формирование и хранение данных с подробной информацией об упруго-прочностных, технологических и теплофизических свойствах ПКМ и его компонентов с указанием на методы и стандарты, по которым они получены, определяют требования к библиотеке базы данных. К тому же информация о марках и типах ПКМ и его компонентов с указанием их производителя максимально структурируют базу данных.

Использование сложных математических моделей, реализующих возможность спрогнозировать не только свойства ПКМ и конструкций из них, но и возможное образование дефектов формования (пористость, утолщения, недоформовка, коробление), позволит создавать отечественную конкурентоспособную продукцию из ПКМ как по упруго-прочностным, так и по экономическим показателям.

Кроме того, применение математического моделирования в процессе изготовления изделий из ПКМ методом вакуумной инфузии позволит снизить энерго- и материалоемкость, а вследствие этого и негативное влияние на состояние окружающей среды за счет уменьшения количества циклов по отработке технологического процесса формования с использованием технологического оборудования.

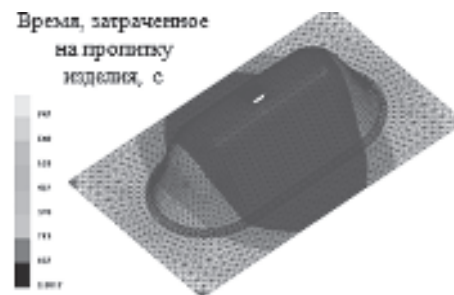


Рис. 4. Продолжительность заполнения области изделия в процессе вакуумной инфузии

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mastbergen D.B.* Simulation and Testing of Resin Infusion Manufacturing Processes for Large Composite Structures: SAND2006-7856P Unlimited Release Printed October. 2007. P. 12–53.
2. *Koefoed M.S.* Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades // Industrial Ph.D. Dissertation. 2003. P. 5–10.
3. *Weitzenbock J.R., Sheno R.A., Wilson P.A.* Radial flow permeability measurement. Part a: Theory. Composites Part A // Applied Science and Manufacturing. 1999. № 30 (6). P. 781–796.