

УДК 514.18: 678.5.05:004.925.8

Колосова Е.П., Ванин В.В., Колосов А. Е.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ. 1. Моделирование структуры ориентированных макроволоконистых композитов

Проанализированы вопросы геометрического моделирования технических объектов и процессов формования полимерных композитов на примере анализа подходов к моделированию структуры ориентированных макроволоконистых композитов. На базе структурных параметров модели проводится прогнозирование конструкторско-технологических параметров технических средств для получения армированных реактопластов.

Ключевые слова: моделирование, геометрия, структура, макроволокно, полимер, композит, реактопласт, объект, процесс.

Постановка проблемы. К настоящему времени в мире накоплен значительный опыт в области проектирования реактопластичных полимерных композиционных материалов (ПКМ) функционального назначения. Основными структурными элементами таких материалов являются полимерная матрица, выполняющая связующую роль, и армирующий наполнитель, воспринимающий основную нагрузку в силовом композите.

При этом возрастает роль пространственно-армированных ПКМ на основе ориентированных (однонаправленных) (макро)волоконистых наполнителей (ОВН). Преимущественные объекты их применения – легковесные ответственные (высоконагруженные) детали летательных, в том числе космических, аппаратов и механических силовых устройств (сосуды высокого давления, аппараты химических производств и др.); изделия «специального» (двойного) назначения (бронежилеты повышенной степени защиты, костюмы с вплетенными в армирующую ткань нагревателями), перекрестно армированные глубоководные аппараты и др.

Разработка и внедрение пространственно-армированных материалов базируется на развитии и практической реализации соответствующих теорий. Причем эти теории имеют отличительные особенности для моделирования ПКМ на базе макро- и микронаполнителей. В то же время эти теории являются базисом для разработки реализующих их технологий.

Не претендуя на всеобъемлющее исследование, в настоящей работе представлен анализ только некоторых перспективных подходов к решению данной проблемы с точки зрения эффективности применения геометрического моделирования структуры ОВН.

Целью статьи является краткий аналитический обзор особенности применения геометрического моделирования структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формования реактопластов, в частности, процессов капиллярной пропитки и намотки.

Изложение основного материала. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в области проектирования макроволоконистых реактопластичных ПКМ, моделирование их структуры является исключительно сложной научно-технической

проблемой по ряду причин, связанных с особенностями их структурной организации. При этом до сих пор отсутствуют достаточно четкие теоретические представления, включая математические зависимости и соответствующие методики, позволяющие с достаточной степенью точности прогнозировать геометрические параметры адекватных структурных моделей таких материалов.

Ниже рассмотрены некоторые подходы (как существующие, так и разработанные) к решению рассматриваемой проблемы, в т.ч. с применением современной методологии автоматизированного проектного моделирования.

Моделирование структуры однонаправленных макроволоконистых полимерных композитов. Согласно общепринятой концепции, различают два базовых подхода к проектированию конструктивно-технологических параметров технических средств формования и расчету элементов конструкций композитов на основе ОВН: феноменологический и структурный [1].

В рамках реализации первого подхода композит рассматривается как цельный материал с некоторым тензором приведенных упругих (вязко-упругих) характеристик. Второй подход базируется на предположении о гетерогенности свойств анализируемого континуума, который содержит цилиндрические включения (макроволокна) произвольного сечения.

Первый подход из-за простоты его предпосылок более распространен. В то же время он может рассматриваться лишь как приближенный. Это обусловлено тем, что свойства составляющих структурных элементов композитов на основе ОВН различаются между собой весьма значительно (например, на порядок и более). Поэтому приведенные (усредненные) физико-механические константы такой монолитной системы часто теряют физический смысл. В то же время второй подход позволяет более адекватно моделировать параметры технологии, а также прогнозировать напряженно-деформированное состояние конструкций с учетом конкретного вида нагружения. Это обусловлено учетом реальной структуры исследуемых композитов на основе ОВН.

Так, например, при моделировании параметров базовых технологических процессов формования ПКМ, в частности, процессов капиллярной пропитки и намотки, для описания переноса пропиточной жидкости в структуре ОВН используются и развиваются новые модельные физико-математические и процедурно-компьютеризованные подходы. Последние реализуются с использованием геометрических (структурных) моделей [2]. В настоящее время это прежде всего:

1) *структурно-сетевые модели* пористых и корпускулярных сред различных структур – «Pore Network Models» (случайные, регулярные и пр. решетки и регулярные упаковки);

2) методология и математический аппарат *теории перколяции* (percolation – пропитка или просачивание жидкостей через пористые материалы); для данных процессов – это рассмотрение условий переноса пропиточной жидкости в зависимости от статистических характеристик решеток, моделирующих дисперсные или пористые среды – аналог ОВН (перколяция по связям, перколяция по узлам) [3, 4];

3) *кластерный анализ* – статистическое выявление обособленных структур [5]; в задачах переноса (пропитка ОВН жидкими полимерными связующими) изучаются объединения – кластеры проводящих (или пропитываемых) участков, частиц, молекул и проч., их размеры, характеристики и связь с переносными свойствами жидкой среды;

4) *фрактальный анализ* – моделирование и изучение свойств геометрических элементов (линий, поверхностей, объемных образований), учитывающее изменение геометрических величин (длины, площади, объема) при изменении масштаба измерения [6]. При этом часто все вышеперечисленные четыре подхода используются совместно.

Волокнистую структуру капиллярно-пористых тел в общем случае нельзя рассматривать как простую сумму линейных капилляров с одинаковым поперечным сечением. На практике капилляры в волокнистых системах существенно отличаются от

цилиндрических трубок [7, 8]. К тому же, как правило, капилляр не является круглым, а его стенки – гладкими.

Капиллярные модели представляют собой пространство пор в виде системы каналов с определенными геометрическими свойствами. На рис.1 приведены некоторые (наиболее часто используемые) структурно-сетевые модели капиллярных тел в виде одномерных моделей [2].

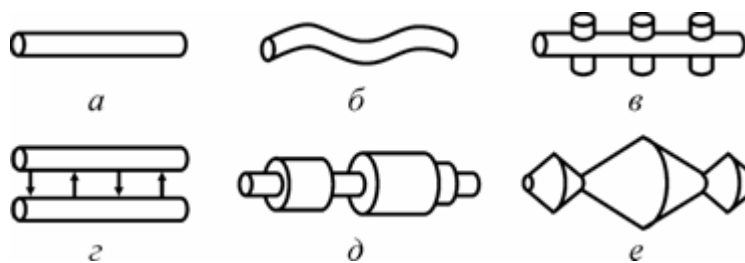


Рис. 1. Простейшие капиллярные модели пористых тел [2]: *a* – прямой канал; *б* – извилистый канал; *в* – канал с отходящими тупиковыми порами; *г* – система параллельных каналов с идеальной связью; *д* – серийная модель; *е* – периодический гофрированный канал

В модели одинаковых *прямых каналов* (рис. 1,*а*) основные параметры модели – объемная доля каналов и их диаметр. В модели одинаковых параллельных *извилистых каналов* (рис. 1,*б*) вводится дополнительный параметр искривленности капилляров – коэффициент извилистости β_0 .

Для учета *застойных (тупиковых) зон* (аналог «бутылочного» эффекта) в пористых материалах и их влияния на дисперсию примеси применяют модель канала с тупиковыми порами-ответвлениями (рис. 1, *в*). А для учета влияния тупиковых пор вводится дополнительная величина – объемная доля тупиковых пор. В тех случаях, когда фильтрация жидкости моделируется неоднородной задачей и возникает дополнительный перенос жидкости поперек каналов, применяют модель каналов, связанных друг с другом развитой системой микропор (рис. 1,*г*). Такая идеализация получила название модели параллельных капилляров с *идеальной связью*.

В *серийных моделях* (рис. 1,*д*) учитывают переменность сечения пор, т.е. наличие сужений и расширений вдоль длины. Диаметр капилляра в серийных моделях меняется скачкообразно. *Гофрированные капилляры* (рис. 1, *е*), в отличие от серийных моделей, имеют диаметр, непрерывно изменяющийся по длине. Заменяя пространство пор системой одномерных каналов, в общем случае можно учесть извилистость, гофрированность пор, их различные размеры и форму, а также наличие застойных зон. В то же время такие важные свойства пористых тел, как взаимосвязь отдельных капилляров и пересеченность пространства пор, практически не учитываются. Поэтому система одномерных капилляров может быть использована для адекватного описания капиллярных явлений только для идеализированных случаев.

Поэтому считается, что решетчатые модели наиболее полно отражают пространственную структуру пористых сред, а также взаимосвязь составляющих их элементов. На рис. 2 представлены некоторые *модели регулярных (квазирегулярных) решеток*.

Модель квадратной решетки, в узлах которой расположены частицы различной формы (рис. 2,*а*), может быть использована, например, для описания процессов пропитки и фильтрации в пористых средах, образованных дисперсными макрочастицами

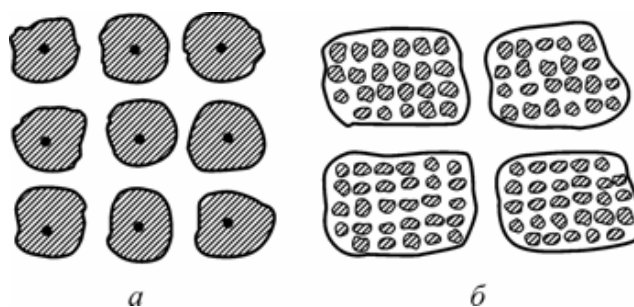


Рис. 2. Решетчатые регулярные модели [2]:
a – система частиц в узлах решетки; *б* – бидисперсная модель

Для описания подобных процессов в пористых средах, состоящих из частиц, применяют бидисперсные модели пористых сред (рис. 2,*б*). Такие модели применимы, например, для описания процессов, протекающих в зернах катализатора (микропористых тел в зернистом слое). Еще одним примером применения таких моделей является описание процесса экстрагирования растительных тканей, характеризующихся регулярной структурой микро- и макропор.

При изготовлении ПКМ на базе перекрестно-армированных ОВН, например, стеклотекстолитов, в качестве стекловолоконного армирующего наполнителя применяют различные виды стеклотканей сатинового, саржевого и полотняного переплетения [10] (см. рис. 3).

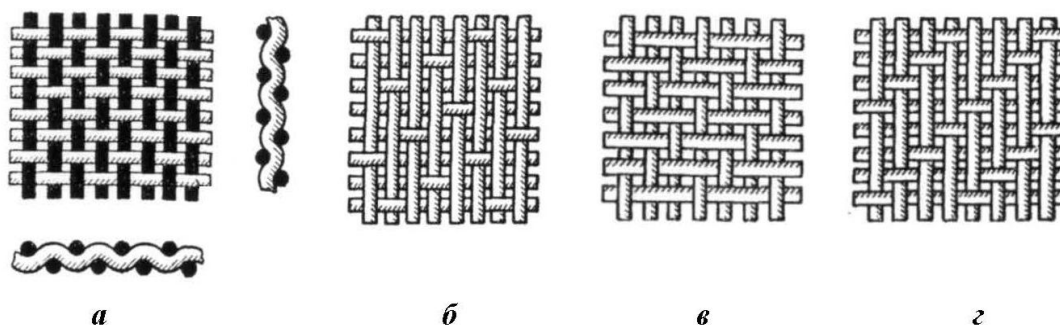


Рис. 3. Некоторые виды переплетения тканей [10]: *a* – полотняное; *б* – сатиновое; *в* и *г* – саржевое (ткани типа 1/2 и 3/1).

Структуру переплетения таких тканей можно представить как линейной моделью (в случае пропитки только одного слоя ткани, что наиболее часто и происходит на практике), так и регулярной решетчатой моделью (в случае одновременной пропитки нескольких расположенных один над другим слоев ткани либо стекломата). Также следует отметить, что для структуры таких армирующих тканей (см. рис. 3) характерна *симметрия*.

В общем случае представления о капиллярно-пористых средах намного шире описанных выше. Причем чем сложнее структурная модель таких тел, тем сложнее ее геометрическая модель и математическое моделирование процессов переноса жидкой среды в ней. Поэтому следует находить некий баланс при выборе адекватной геометрической (структурной) модели капиллярно-пористых тел для конкретного технологического процесса. При этом необходимо учитывать как структуру реально используемого капиллярно-пористого тела, так и свойства пропитывающей жидкости.

Некоторые подходы к определению параметров адекватной геометрической модели ОВН.

Например, при детерминировании параметров кинетического уравнения процесса «свободной» капиллярной пропитки [2 – 4, 9] необходимо корректное нахождение структурных характеристик ОВН на базе его адекватной геометрической модели. В

качестве таких характеристик рассматривают пористость ε , удельную внутреннюю поверхность $S_{уд}$, а также эффективный (гидравлический) капиллярный радиус $r_{эф}$ ОВН.

Так, было разработано четыре подхода к определению параметров геометрической модели структуры ОВН, в том числе эффективного (гидравлического) капиллярного радиуса $r_{эф}$ [7, 8]. Краткое описание вышеупомянутых подходов (№3 – №4) можно найти в работах [7, 8]. В то же время первый из указанных подходов заслуживает отдельного рассмотрения, что и делается далее.

Первый подход применим для определения структурных характеристик как для оптически прозрачных, так и оптически непрозрачных (например, металловолокнистых) ориентированных композиционно-волоконистых сред. Этот подход базируется на экспериментальном исследовании микроструктуры этих затвердевших сред и построении соответствующих кривых распределения, характеризующих эту микроструктуру.

Прежде всего адекватная модель структуры ОВН должна учитывать *стохастический характер* распределения волокон в структуре композита [11, 12]. По найденным параметрам геометрической модели структуры ОВН в оптимуме проводится выбор оптимальной схемы армирования и отработка рациональной технологии на этапе проектирования конструкции. Также осуществляется прогноз напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом характера действующей нагрузки [11 – 13].

Вариантом представлений структуры ОВН является геометрическая модель структуры капиллярно-пористого тела, которая состоит из системы параллельно-извилистых капилляров различных радиусов. Ее можно формализовать с помощью функции распределения пор радиусом ρ по размерам $\varphi(\rho)$.

Разработанный подход к определению эффективного капиллярного радиуса $r_{эф}$ ОВН состоит в следующем. Делают микрошлиф сечения ПКМ в поперечном к волокнам направлении и экспериментально исследуют распределение длин экстхорд волокон или функцию распределения $\varphi(\rho) = G(\ell)$ пор по размерам ℓ . При этом «экстхорды» обозначают расстояния между волокнами в сечении композита (т.е. эквивалентный диаметр, или удвоенный радиус $r_{эф}$ пор). В общем случае длины экстхорд носят случайный характер.

При выполнении условия наилучшего приближения теоретической и экспериментальной кривых распределения вычисляют пористость ε , удельную внутреннюю поверхность $S_{уд}$ и эффективный (эквивалентный) капиллярный радиус $r_{эф}$ искомого ОВН как капиллярно-пористого тела с помощью функции распределения длин экстхорд $\varphi(\rho) = G(\ell)$.

Для предельно армированных ПКМ на основе ОВН применяется геометрическая модель среды Г.А. Ванина. Последняя репрезентована системой круговых цилиндрических волокон, оси которых параллельны и расположены в узлах элементарной ячейки (двойкопериодической решетки параллелограммов). Пространство между волокнами заполнено связующей средой, а сечения волокон не должны накладываться друг на друга [11].

Геометрические схемы пространственно армированных макроволоконными структурами с различной структурой армирования представлены в справочнике [21]. В частности, рассмотрено влияние структурных (схем армирования) и технологических параметров (свойств арматуры и полимерной матрицы) на характеристики (эксплуатационные свойства) отвержденных композиционных материалов на их основе.

Отметим также, что при геометрическом моделировании таких структур, а также характера приложенных усилий и возникающих при этом напряжений в зависимости от напряженно-деформированного состояния, эффективным методом является использование *принципов симметрии* [22].

Выводы. Выполнен краткий аналитический обзор особенности применения геометрического моделирования структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формования реактопластов, в частности, капиллярной пропитки и намотки. Перспективы дальнейших исследований заключаются в диссеминации описанных подходов на типичные структурные модели ориентированных композитов.

Список литературы:

1. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 336 с.
2. В.И. Коновалов. Современные вопросы теории переноса при сушке / В.И. Коновалов, Т. Кудра, Н.Ц. Гатапова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т. 14. – № 3. – С. 538–559.
3. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И.Хейфец, А.В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
4. Чизмаджев Ю.А. Макрокинетика процессов в пористых средах / Ю.А. Чизмаджев, В.С. Маркин, М.Р. Тарасевич и др. – М.: Наука, 1971. – 364 с.
5. Ким Дж. О. Кластерный анализ/Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. / Дж.О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка, М.С. Олдендерфер, Р. К. Блэшфилд. – Под. ред. И. С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
6. Федер Е. Фракталы / Е. Федер– М.: Мир, 1991. – 254 с.
7. Колосов О.Є. До вибору фізичної моделі капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волоконистих наповнювачів / О.Є. Колосов //Вісник НТУУ КПІ. Сер. «Машинобудування». – 2010. – №59. – С. 96 – 101.
8. Колосов О.Є. Аналіз структурних моделей капілярно-пористих тіл / О.Є. Колосов // Вісник НТУУ «КПІ», Сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – №1(5). – С.13–16.
9. Аксельруд Г. А. Введение в капиллярно-химическую технологию / Г. А. Аксельруд, М. А. Альтшулер. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
10. Шалун Г. Б. Слоистые пластики / Г.Б. Шалун, Е. М. Сурженко. – Л.: Химия, 1978. – 232 с.
11. Ван Фо Фы Г. А. Теория армированных материалов с покрытиями / Г. А. Ван Фо Фы. – К.: Техніка, 1971. – 232 с.
12. Иванченко Ф.К. Принципы построения модели структуры в теории армированных композиционных сред / Ф.К.Иванченко, В.В. Клявлин, А.Е. Колосов // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1987. – № 8. – С. 25 – 29.
13. Kolosov A. E., Klyavlin V. V. Several aspects of determination of the adequate model of the structure of oriented fiber-reinforced composites. Mech. of Compos. Mater. 1989, Vol. 24, Is. 6, pp. 751–757. DOI: 10.1007/BF00610779
14. Колосова О.П. Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волоконистих матеріалів [монографія] / О. П. Колосова, В. В. Ванін, Г. А. Вірченко, О. Є. Колосов. – К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. – 164 с.
15. Кендалл М.Дж. Геометрические вероятности / М. Дж. Кендалл, П. Моран. – М.: Наука, 1972. – 192 с.
16. Сантало Л.А. Интегральная геометрия и геометрические вероятности / Сантало Л.А. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
17. Колосов О.Є. Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: [монографія] / О.Є. Колосов. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 227 с.
18. Колосов О. Є. Одержання волоконисто-наповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: монографія / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. П. Колосова. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 295 с.
19. Колосова О. П. Моделювання процесів та обладнання для виготовлення

реактопластичних матеріалів: [монографія] / О.П. Колосова, В. В. Ванін, О. Є. Колосов, В. І. Сівецький. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 235 с.

20. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. Chem. and Petrol. Eng. 2015, Vol. 51, Is. 7–8. Pp. 493–500. DOI: 10.1007/s10556-015-0075-3

21. Тарнопольский Ю.М. Пространственно-армированные композиционные материалы. Справочник / Ю.М. Тарнопольский, И.Г. Жигун, В.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

22. Стюарт Иэн. Истина и красота. Всемирная история симметрии. Пер. с англ. Ал. Семихатова / Иэн Стюарт. – М.: Астрель, Корпус, 2010. – 461 с.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ. 1. Моделирование структуры ориентированных макроволоконистых композитов.

Проанализированы вопросы геометрического моделирования технических объектов и процессов формования полимерных композитов на примере анализа подходов к моделированию структуры ориентированных макроволоконистых композитов. На базе структурных параметров модели проводится прогнозирование конструкторско-технологических параметров технических средств для получения армированных реактопластов.

Ключевые слова: моделирование, геометрия, структура, макроволокно, полимер, композит, реактопласт.

Колосова О.П., Ванін В.В., Колосов О.Є. ДЕЯКІ АСПЕКТИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ. 1. Моделювання структури орієнтованих макроволоконистих композитів.

Проаналізовано питання геометричного моделювання технічних об'єктів і процесів формування полімерних композитів на прикладі аналізу підходів до моделювання структури орієнтованих макроволоконистих композитів. На базі структурних параметрів моделі проводиться прогнозування конструкторсько-технологічних параметрів технічних засобів для одержання армованих реактопластів.

Ключові слова: моделювання, геометрія, структура, фрактал, дисперсний наповнювач, полімер, композит, реактопласт, термопласт, об'єкт, процес.

Kolosova E.P., Vanin V.V., Kolosov A.E. SOME ASPECTS OF GEOMETRICAL MODELING OF TECHNICAL OBJECTS AND PROCESSES FOR FORMING POLYMER COMPOSITES. 1. Modeling of the structure of oriented macro-fiber composites.

The problems of geometrical modeling of technical objects and processes of forming polymer composites on the example of analysis of approaches to modeling the structure of oriented macro-fiber composites are analyzed. On the basis of structural parameters of the model, forecasting of design and technological parameters of technical means for obtaining reinforced thermosets is carried out.

Keywords: modeling, geometry, structure, fractal, disperse filler, polymer, composite, thermoset, thermoplastic, object, process.