

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ГЕОМЕТРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
СТРУКТУРООБАЗОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ**

А.Д.Портасова, М.А.Чекан, В.А.Яворский, студенты гр. ПСК-455

Научный руководитель - старший преподаватель А.В.Колесников

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

В статье рассматривается метод физического моделирования процессов в композитных материалах с помощью макрочастиц, распределяющихся по поверхности жидкости и взаимодействующих друг с другом. Получаемые в условиях модели агрегаты частиц качественно соответствуют структурам, наблюдаемым в строительных композитах. Для полученных модельных структур методом компьютерной обработки изображений и средствами анализа статистической геометрии точечных образов строится разбиение Вороного и рассматривается его физический смысл. Статистически исследуются распределения площадей и периметров многоугольников Вороного, определяется характер его соответствия свойствам материалов.

Одним из способов исследования процессов в сложных системах и, в частности, композитных материалах, является метод моделей и аналогий. Модель – упрощенная система, служащая для получения информации об оригинале [1]. Используемый здесь метод физических имитационных моделей основан на факте совпадения характера взаимодействий элементов в исходной системе и ее модели вне зависимости от их природы.

В композитных материалах взаимодействие между его составляющими – вяжущим, заполнителем и наполнителем, а также добавками, носит сложный характер [2]. Здесь в качестве «точки отсчета» по степени сложности оказывается возможным принять теорию ДЛФО, учитывающую лишь ван-дер-ваальсовы и кулоновские взаимодействия. Для частиц, подчиняющихся этой теории, уже характерны элементы структурообразования и сложных взаимодействий – формируются периодические коллоидные структуры [3], происходит образование дальних и ближних коагуляционных контактов. Переход к частицам сложной природы, учет возможности образования вблизи них структурно-

механических барьеров, возникновение дипольных и мультипольных моментов на них делает и другие причины значительно усложняют точное рассмотрение взаимодействия частиц в композитном вяжущем тесте.

Одним из путей решения проблем, возникающих при исследовании взаимодействия частиц композита, является переход к упрощенной системе – модели исходной. В качестве такой модели может, в частности, быть использовано распределение частиц макроскопической природы по поверхности и в объеме жидкой фазы. В таких системах несмотря на их относительную простоту и легкость осуществления экспериментальных методик также происходят процессы структурообразования. Благодаря капиллярным силам между макрочастицами (2-5 мм) наблюдается преимущественное притяжение, на близких расстояниях дополнительно следует учитывать их электростатическое, ван-дер-ваальсово и другие типы взаимодействий. Метод физического моделирования процессов в композитах с помощью макрочастиц был использован [4], однако количественные характеристики образующихся при этом структур исследованы недостаточно.

Интерес представляют статистические методы описания образующихся структур и соответствующих процессов их формирования.

Методы статистического анализа точечных образов многочисленны и разнообразны [5]. При случайном расположении точек на плоскости их распределение соответствует двумерному распределению Пуассона (1).

$$P(N_x(B) = k) = \frac{e^{-\mu(B)} \mu^k(B)}{k!} \quad (1)$$

со средним $\mu(B) = \lambda \cdot A_B$, где λ – интенсивность процесса, постоянная или зависящая от координат, A_B – площадь соответствующей подобласти В.

Отклонение распределения частиц от случайного возможно качественно двух видов: уплотнение благодаря образованию кластеров (не обязательно сферической формы), что может быть связано с преобладанием притяжения между частицами, либо образование квазирегулярной (как в кристаллах) структуры за счет взаимного отталкивания частиц. Возможно осуществление суперпозиции двух типов взаимодействий на разных пространственных масштабах (рис.1).

Одним из методов исследования особенностей точечных распределений на плоскости основывается на рассмотрении не координат соответствующих точек, а характеристик заполнения поверхности геометрического характера. На основе точечных распределений удастся построить покрытия плоскости многоугольника с определенными свойст-

вами – разбиений Вороного и Делоне – и исследовать статистические свойства соответствующих многоугольников.

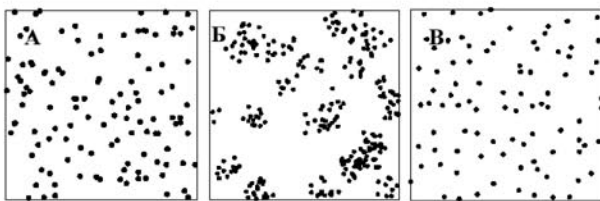


Рис. 1. Основные типы взаиморасположения точечных частиц:

А – полная пространственная случайность, Б – агрегационный процесс, частицы образуют кластеры, В – регуляризованное (квазикристаллическое) распределение частиц с преобладающим взаимным отталкиванием

Для произвольной точки из системы точек $\{A\}$ можно указать область пространства, все точки которой ближе к данному центру, чем к любому другому центру системы [6]. Эта область называется областью Вороного. В трехмерном пространстве область Вороного любого центра i системы $\{A\}$ есть выпуклый многогранник, в двумерном — выпуклый многоугольник. Многогранники Вороного, построенные для каждого центра системы $\{A\}$, дают нам мозаику многогранников, которая называется *разбиением Вороного*.

Воспользуемся пустым шаром, который мы будем перемещать, изменяя его размер так, чтобы он мог касаться точек системы $\{A\}$, но всегда оставался пустым. Найденные четыре точки (i, j, k, l) определяют вершины тетраэдра, который характерен тем, что внутри его описанной сферы нет других точек системы $\{A\}$. Для планарной задачи рассматривается круг, перемещающийся и изменяющий размер, но остающийся пустым. В общем случае планарной задачи три точки (i, j, k) определяют вершины треугольника. Внутри описанной окружности других точек системы $\{A\}$ нет. Такой тетраэдр и, соответственно, треугольник, называется *симплексом Делоне*.

Как методом пустого шара Делоне, так и с помощью разбиений Вороного мы выявляем одну и ту же систему точек. Каждый симплекс (многогранник мозаики Делоне) соответствует некоторой вершине мозаики Вороного, и обратно, каждая вершина многогранника Вороного соотносится с определенным симплексом Делоне. Построения Вороного и Делоне являются дуальными. Поэтому анализ геометрических характеристик структурообразования проводился одними из методов – с помощью разбиения Вороного.



Рис.2. Схема проводимого исследования

Таким образом, статистический анализ структуры, образованной частицами – элементами физической модели, в качестве которых выступали пенополистирольные микросферы с диаметром частиц 3-4 мм, оказывается возможным проводить согласно схеме (рис.2).

На первом этапе исследования была реализована физическая модель процессов структурообразования. Для этого применялись пенополистирольные сферы, моделирующие частицы заполнителя композитного материала и крупные зерна вяжущего (например, гипса), подвергающегося гидратации. Сферы распределялись по поверхности воды, часть из них сближалась и контактировала со стенками прямоугольного сосуда. Рассматривались разные степени заполнения поверхности, что моделирует композиты разной наполненности.

С помощью веб-камеры, связанной с компьютером, получались электронные фотографии разных этапов структурообразования (пример – рис.3). Предварительная обработка изображения заключалась в выравнивании освещенности и фильтрации с помощью двух фильтров-масок разного масштаба, усиливающих контраст. Затем применялось пороговое разделение, бинаризация изображения и выделение точек «пределной эрозии», соответствующих центрам сфер. Определялись их относительные координаты, необходимые для статистического анализа. Обработка производилась с помощью программы «Nih Image 1.62».

Полученные результаты позволили перейти к построению разбиений Вороного (Рис.4).

Для интерпретации общего характера разбиения и его статистических свойств необходимо заметить, что каждый многоугольник Вороного приближенно определяет пространственные области влияния модельных зерен заполнителя и крупных части структурообразующих до-

бавок. Во многих случаях они будут играть роль элементов системы композитных материалов, определяющих динамику и структуру остальных элементов. Это – системные детерминанты структурообразования. В областях, приближенно соответствующих одному многоугольнику Вороного, свойства и структура остальной части материала определяются их природой. Здесь уместна аналогия с государствами и их столицами. Вблизи границ таких областей степень упорядочения материала нарушается, многие частицы находятся под влиянием двух центров.

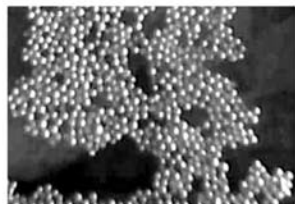


Рис.3. Физическая модель структурообразования на основе пенополистирольных сфер (фрагмент)

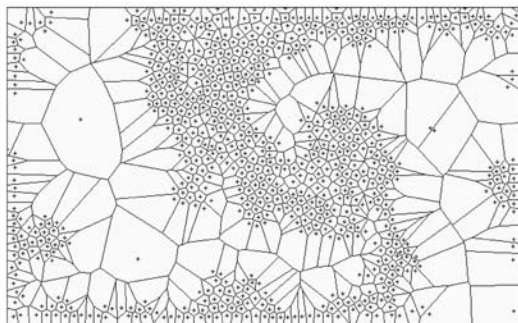


Рис.4 Пример разбиения Вороного. Крестиками отмечены центры сфер

Статистическое распределение площадей многоугольников Вороного полимодально (рис. 5). Появление локальных максимумов в случае значительных площадей свидетельствует о существенной неравномерности распределения частиц и образовании пустот и дефектов. При образовании структурных кластеров [2] соответствующий максимум отображает межкластерные границы раздела.

Характерно, что распределение существенно отличается от случайного. На малых расстояниях преобладает отталкивание, что соответствует процессам «с твердой сердцевиной», далее имеет место взаимопритяжение сфер под влиянием капиллярных и других сил.

Рассмотрим распределение многоугольников Вороного по периметрам (рис.6). Здесь также наличествуют локальные максимумы при значительной общей длине границ. Распределение площадей и периметров многоугольников Вороного качественно согласованы, что позволяет говорить о применимости приближения границ влияния окружно-

тиями, а в объеме – сферами, что соответствует отсутствию анизотропии макроскопических свойств.

Многочисленные локальные максимумы при значительных длинах границ свидетельствуют о нарушении структуры материала. Такой материал будет, в частности, воздухо- и водопроницаем, неустойчив при периодическом замораживании-оттаивании, его прочностные характеристики будут низки.

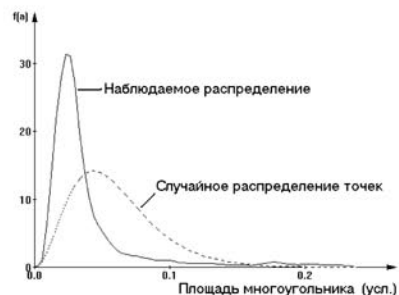


Рис. 5. Функция распределения многоугольников Вороного по площадям

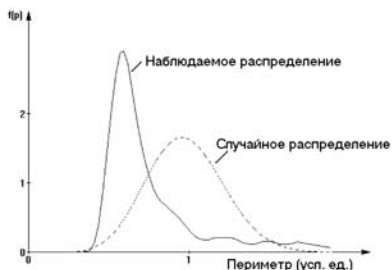


Рис. 6. Распределение многоугольников по периметрам

Выводы. Таким образом, при переходе от моделей к реальным материалам представляет интерес, в частности, распределение очагов гидратации, возникающих в цементном камне и бетоне. Их пространственную структуру легко проявит с помощью некоторых химических индикаторов и, в частности, фенолфталеина, реагирующего на образующуюся известь. Этот и другие подобные аспекты пространственного строения будут тесно коррелировать с эксплуатационными свойствами материала и могут быть использованы для их определения.

1. Я.А. Дубров, В.Г. Штелик, Н.В. Маслова «Системное моделирование и оптимизация в экономике», Киев, «Наукова думка», 1976, 250 с. 2. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Одесса, 2010, 168с. 3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии, М.,Химия, 1982, 400с. 4. В.Н. Выровой, И.В. Довгань, С.В. Семенова. «Особенности структурообразования и формирования свойств полимерных композитных материалов», Одесса, «ТЭС», 2004, 168 с. 5. А.А. Савельев, С.С. Мухарамова, Н.А. Чижикина, А.Г. Пилюгин «Теория пространственных точечных процессов в задачах экологии и природопользования», Казань, Изд Казанского университета, 2014, 146 с. 6. Медведев Н.Н. «Метод Вороного-Делоне в исследовании структуры неупорядоченных систем», Автореф. Дисс. Докт. Ф-м наук, Новосибирск, 1996, 23 с.