

ФРАКТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА ТИКСОТРОПНЫХ СТРУКТУР ПЕЧАТНОЙ КРАСКИ

Кулак М. И., Анкуд Т. В., Пиотух И. Г.

В настоящее время отсутствуют экспериментальные методы, которые позволяли бы всесторонне исследовать структуру дисперсных систем. Поэтому основным методом теоретического исследования структурированных дисперсных систем является моделирование. В рамках теории эффективной вязкости в работе для описания тиксотропных структур печатной краски предполагается модель, основанная на теории фракталов и теории перколяции [1].

Для описания структуры печатной краски использована модель, аналогичная модели для описания композиционных материалов [2]. Связующее краски представлено как матрица, пигмент — как наполнитель. Взаимное распределение матрицы и наполнителя в композите удобно представить в виде специальной фазовой диаграммы [2].

Верхняя часть диаграммы отражает структурные состояния наполнителя, а нижняя — матрицы. Для обозначения параметров, характеризующих матрицу, используется индекс m , наполнителя — i . На данном этапе исследований можно не конкретизировать вид дисперсного наполнителя. При изменении объемной доли наполнителя n_i от 0 до 1 соответствующую ему часть фазовой диаграммы можно разделить на две области, обозначенные соответственно p_i и k_i . Область p_i соответствует докритическим состояниям наполнителя в материале. Как показали физические эксперименты и математическое моделирование, при малых n_i часть наполнителя находится в виде отдельных частиц и часть его связана в малые агрегаты кластеры. По мере увеличения n_i возрастает объем кластеров и доля агрегированных в них частиц. При достижении n_i некоторого критического порогового значения n_{ic} в материале образуется перколяционный кластер, охватывающий весь его объем, т. е. происходит геометрический фазовый переход. На фазовой диаграмме эта область обозначена k_i . В нижней части диаграммы, отражающей топологические состояния матрицы, также имеются две аналогичных области p_m и k_m .

Таким образом, всю диаграмму можно разделить на три сектора. Сектор I соответствует материалу, в котором наполнитель находится в виде набора агрегатов и не образует непрерывную фазу, матрица представляет собой непрерывный кластер. Сектор II соответствует материалу, в котором наполнитель и матрица представлены проникающими друг в друга перколяционными кластерами. Сектор III является симметричным сектору I относительно перестановки индексов i и m , т. е. матрица представлена набором агрегатов, а наполнитель образует кластер.

Положение границ между секторами определяется пороговыми значениями n_{ic} и n_{mc} , которые зависят от вида перколяционной задачи и типа решетки, в узлах которой находятся частицы наполнителя и матрицы.

Процессы структурообразования в дисперсных системах со сферическими или близкими по геометрии к ним дисперсными наполнителями соответствуют перколяционной задаче уз-

лов. Если упаковка частиц наполнителя соответствует простой кубической решетке, то $n_{ic} = 0,31$.

В результате экспериментальных исследований процесса диспергирования пигментов установлено, что в пигменты диспергируется не до элементарных частиц, а до агрегатов (кластеров) конечных размеров [3]. При этом в процессе диспергирования пигмент проходит несколько стадий структурообразования. На первой стадии образуются структуры с фрактальной размерностью $D \approx 2.50$ характерные для агрегации типа частица — кластер. При дальнейшем диспергировании образуются более сложные разреженные структуры с агрегацией типа кластер — кластер и $D \approx 1.75$. У более мягких пигментов фрактальные структуры появляются раньше и «время жизни» у них больше.

Рассмотрим более подробно процессы в докритической области структурной диаграммы [2]. Общее выражение для числа n агрегатов из s частиц на один узел решетки и средний радиус агрегата R имеют вид

$$n_s = s^{-\lambda} \exp(-cs^\theta), \quad (1)$$

$$R_s = rs^\rho, \quad (2)$$

где λ, θ, ρ — некритические индексы; r — радиус частицы; c — константа, определяемая из условия нормировки n_s на число частиц в системе N_i .

Уравнение для c имеет вид:

$$n_i = \sum_s s^{1-\lambda} \exp(-cs^\theta), \quad (3)$$

где N_i — число частиц в системе; n_i — объемная концентрация наполнителя; λ, θ — некритические индексы.

При определении параметров, характеризующих матрицу, необходимо учитывать, что при $n_m = 0,31$ в дисперсной системе образуется перколяционный кластер матрицы. Вероятность частице m принадлежать этому кластеру определяется функцией связности, имеющей следующий вид:

$$Q_m = N_{km} / N_m = B |n_m - n_{mc}|^\beta, \quad (4)$$

где N_{km} — число частиц матрицы, принадлежащих перколяционному кластеру; β — критический индекс; B — постоянная, которая определяется из условия: $B = 1 / |1 - n_{mc}|^\beta$ при $N_m \rightarrow N, Q_m \rightarrow 1$; n_m — величина, вычисляемая по формуле: $n_m = N_m / N$.

Перколяционные кластеры являются подклассом общего класса фрактальных кластеров, для которых определяющим является выражение, связывающее радиус кластера R_{km} и число частиц в нем:

$$R_{km} = rN_{km}^{1/D}, \quad (5)$$

где D — фрактальная размерность кластера.

Далее, используя формулы (4) и (5), можно определить долю частиц матрицы, принадлежащих кластеру. Небольшое количество частиц матрицы, оставшихся свободными, будет

помещено в агрегатах из частиц наполнителя. Таким образом, даже при малых концентрациях наполнителя матрица, в топологическом смысле, не является связной. Объемная доля связующего внутри кластера вычисляется по формуле:

$$g_m = n_m \left(1 - \left| \frac{n_m - n_{mc}}{1 - n_{mc}} \right|^\beta \right), \quad (6)$$

где n_m — объемная доля матрицы; n_{mc} — концентрация, равная 0,31; β — критический индекс.

В представленной работе проводились исследования вязкости краски при значениях концентрации пигмента $< 0,31$ (до критической объемной концентрации). В соответствии с описанной моделью, теория эффективной вязкости для расчета вязкости печатной краски выделила две структурных подсистемы. Первая представляет собой кластеры пигмента и локализованные в них частицы краски. По своей структуре эта подсистема будет представлять собой высококонцентрированную суспензию (ВКС-подсистему). Вторая система представляет собой среду с эффективной вязкостью, наполненную кластерами ВКС-подсистемы.

В соответствии с описанной выше моделью представления дисперсной системы, расчет вязкости краски при заданной концентрации пигмента проводился поэтапно. Эффективная вязкость системы с объемной долей включений пигмента меньше критической рассчитывается с помощью самосогласованного метода, предложенного Хашином. Этот метод наиболее близок к рассматриваемым структурам. В рамках модели эффективной вязкости с помощью этого метода получены выражения для вязкости ВКС-подсистемы и эффективной вязкости, описанные ниже.

На первом этапе определялась относительная вязкость ВКС-подсистемы. При этом была использована формула теории смазки [4]:

$$\eta_{\text{ВКС}} = \left[\frac{3z}{16} \times \frac{2a}{h} \right] = \eta_m \times \frac{18}{8} \times \sqrt[3]{\frac{n_i}{g_m}}, \quad (7)$$

где η_m — эффективная вязкость матрицы (связующего); g_m — объемная доля матрицы (связующего) внутри кластеров, вычисляемая по формуле (6).

В формулу (7) в развернутом виде входит структурный параметр C_1 , равный:

$$C_1 = \left(\frac{a}{b} \right)^3, \quad (8)$$

где a — радиус включения; b — радиус области матрицы, связанной с каждым отдельным включением.

Как видно на диаграмме [2], отношение объемной доли таких включений к объемной доле частиц наполнителя является малым, поэтому в формуле (9) им можно заменить отношение радиусов

$$C_1 = \frac{n_i}{g_m}, \quad (9)$$

На втором этапе для расчета эффективной вязкости краски наиболее пригодной оказалась формула Эйнштейна, модифицированная с учетом структуры материала:

$$\eta = \eta_m (1 + 2,5 \times \eta_{\text{ВКС}} \times C_2), \quad (10)$$

где η_m — эффективная вязкость матрицы; C_2 — параметр, отражающий структуру материала, вычисляемый по следующей формуле:

$$C_2 = 1/n_{km} \sum_{s=1}^{N_s} s^{3\rho} n_s, \quad (11)$$

где n_{km} — объемная доля матрицы вне кластеров; ρ — не критический индекс.

Если рассматривать в качестве включения агрегат из нескольких частиц, то появляется возможность, используя метод поэтапной квазигомогенизации, определить эффективную вязкость краски. При расчете вязкости ВКС-подсистемы на первом этапе формула (9) преобразуется к виду:

$$\eta_{\text{ВКС}_i} = \eta_m \times \frac{18}{8} \times \sqrt[3]{\frac{n_i}{g_m}}, \quad (12)$$

где i — шаг, характеризующий изменение объемной доли наполнителя в системе.

На втором этапе квазигомогенизации определяется эффективная вязкость кластера матрицы с включениями, имеющими распределение по размерам, характерное для агрегатов наполнителя, но с определенной на первом этапе вязкостью. При этом формула (3.19) приобретает следующий вид:

$$\eta_i = \eta_m (1 + 2,5 \times \eta_{\text{ВКС}_i} \times C_2), \quad (13)$$

Была составлена программа на языке Паскаль для вычисления относительной вязкости при заданных значениях концентрации пигмента. Для вычисления вязкости были использованы перечисленные выше формулы. За основу была взята теория эффективной вязкости.

Расчет вязкости печатной краски с заданным значением концентрации пигмента проводилась в следующей последовательности.

В первую очередь рассчитывалась вязкость системы при минимальной концентрации наполнителя. Для этого: 1) определялась вязкость кластеров пигмента — ВКС-подсистемы; 2) определялась эффективная вязкость среды, наполненной кластерами пигмента.

Затем в среду с рассчитанной эффективной вязкостью вводится дополнительная порция пигмента и опять рассчитывается эффективная вязкость среды. Тем самым, определяется вязкость краски с большей концентрацией пигмента. Затем процесс повторяется.

Результатом программы является график зависимости $\eta_r(\varphi)$, представленный на рис. 1. В качестве экспериментальных данных для сравнения с теорией были использованы значения вязкости модельных красок на основе льняной олифы, с различной концентрацией пигмента [5]. Как видно из рис. 1, теоретические данные близки к экспериментальным при концентрации пигмента до 0,2.

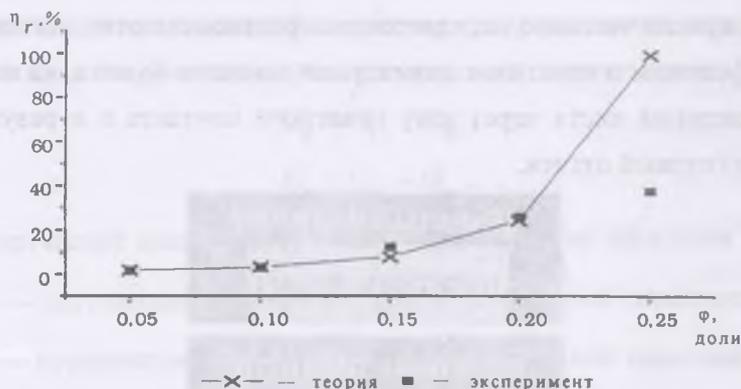


Рис. 1. График зависимости $\eta_r(\phi)$, сравнение с экспериментом

ЛИТЕРАТУРА

1. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. — 254 с.
2. Кулак М. И. Закономерности структурообразования в полимерных композитах с дисперсными наполнителями // Доклады Академии наук БССР. — 1990. — Т. 34, № 9. — С. 819–822.
3. Кулак М. И., Мотолько А. П. Фрактальные структуры агрегатов пигментов печатных красок // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. / БГТУ. — Минск, 2000. — С. 215–217.
4. Бибик Е. Е. Реология дисперсных систем. — Л.: Наука, 1981. — 172 с.
5. Козаровицкий Л. А. Бумага и краска в процессе печатания. — М.: Книга, 1965. — 367 с.

МЕХАНИКА КРАСКОПЕРЕНОСА В ОФСЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ

Кулак М.И., Медяк Д.М.

Способ плоской офсетной печати занимает доминирующее положение в современной полиграфии. Однако качество печатной продукции, которое может быть обеспечено офсетной технологией печати в настоящее время, уже не удовлетворяет запросы широкого круга потребителей. В связи с этим возникает необходимость либо разрабатывать совершенно новые способы печати, что достаточно долго и дорого, либо искать новые подходы и решения в уже апробированных технологиях. Поиск такого рода решений возможен на основе новых взглядов и подходов к процессу печатания и разработке более реалистичной модели процесса краскопереноса в офсетном способе печатания.

В офсетной технологии печати получение оттиска происходит по способу, принципиальная схема которого отражена на рис. 1. Печатная краска из красочного ящика, пройдя через систему раскатно-накатных валиков, наносится на печатные элементы печатной формы, которая неподвижно закреплена на формном цилиндре. Далее при контакте формного и оф-