

На правах рукописи

Бортников Анатолий Юрьевич

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ НАПОЛНЕННЫХ
ПОЛИМЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Барнаул – 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Минакова Наталья Николаевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Сагалаков Анатолий Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор Климкин Виктор Федорович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский политехнический
университет»

Защита состоится 3 июля 2008 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.005.03 в Алтайском государственном
университете по адресу: 656049 г. Барнаул, пр. Ленина 61.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского
государственного университета.

Автореферат разослан «2» июня 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Рудер Д.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Исследования и разработки резистивных композиционных материалов ведутся непрерывно, так как постоянно ужесточаются и усложняются условия их работы в конструкциях. В качестве резистивных успешно применяются дисперсно – наполненные полимерные композиционные материалы благодаря удачному сочетанию приемлемых электрофизических характеристик с возможностью изготовления изделий разнообразных форм и конструкций при экономически оправданных затратах. Использование дисперсного наполнителя (например, технического углерода), обладающего склонностью к агломерированию, которая обеспечивает хорошую воспроизводимость свойств из-за образования развитой сетчатой структуры. Современные методы подбора рецептуры, в том числе модификацией поверхности агломерированного наполнителя, позволяют создавать высокоомные материалы со стабильной величиной объемного электрического сопротивления при внешних воздействиях.

Повышению эффективности работ по созданию новых материалов препятствует недостаточное развитие методов измерения параметров структуры, способных оценивать значимые для практического использования свойства. Традиционные прямые методы изучения структуры во многих случаях практически не работают. Присутствие агломерированного наполнителя делает внешне схожими микрофотографии материалов, имеющих значительную разницу в величине объемного электрического сопротивления [1]. Применение модифицированного агломерированного наполнителя практически не отражается на топологии структуры, значительно влияя на свойства.

Имеющийся инструментарий для изучения структуры неоднородных материалов, особенно допускающих количественную оценку, разработан далеко не в полной мере. Практически отсутствуют методы измерения параметров структуры, работающие для материалов со слабо различающейся топологией структуры. В связи с этим является актуальным разработка новых методов измерения параметров структуры для полимерных композиционных материалов с агломерированным наполнителем.

Цели и задачи работы

Основной целью является разработка метода измерения параметров структуры при регулировании свойств наполненных полимеров в условиях постоянной концентрации агломерированного компонента.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Применить текстурный подход и фрактальную геометрию для разработки метода измерения параметров структуры наполненных полимеров, в том числе и при высоком содержании агломерированного наполнителя.
2. Разработать автоматизированный программный комплекс для измерения параметров структуры и обработки результатов в рамках предложенного метода.
3. Апробировать разработанный метод, применив его для измерения параметров структуры, связанных с величиной объемного электрического сопротивления.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан метод измерения параметров структуры наполненных полимеров, основанный на совместном использовании текстурного подхода и фрактальной геометрии. Метод позволяет повысить чувствительность прямых методов исследования структуры в условиях высокой концентрации дисперсного наполнителя.
2. Развита модель диффузионно-ограниченной агрегации, позволяющая на базе разработанного метода количественно описывать структуру при регулируемых характеристиках процесса агломерации-деагломерации частиц и вязкости расплава полимерной матрицы. На базе предложенного метода и усовершенствованной модели диффузно-ограниченной агрегации разработан виртуальный прибор для измерения геометрических характеристик структур.
3. Предложена методика оценки стабильности величины объемного электрического сопротивления резистивных полимерных материалов с дисперсным наполнителем при внешних воздействиях, основанная на соотношении параметров разветвленности и равномерности распределения межфазных границ.

Практическая значимость диссертационной работы:

Предложенный в работе метод позволяет изучать связи между структурой и свойствами, объяснять результаты экспериментальных исследований по воздействию внешней среды на резистивные композиционные материалы с агломерированными компонентами, в том числе и в условиях высокой концентрации дисперсного наполнителя

Автоматизированный вычислительный комплекс, созданный на базе метода, может быть использован в качестве инструмента для оценки стабильности структур при изменении внешних условий, апробации эффективности предлагаемых приемов получения новых материалов, в том числе и путем направленного изменения свойств поверхности наполнителя.

Предложенный алгоритм классификации по спектру фрактальных размерностей позволяет разрабатывать материал под заданную область применения.

На защиту выносятся:

1. Метод измерения параметров структуры наполненных полимеров, использующий текстурный анализ для выделения границ раздела «наполнитель-матрица» и мультифрактальную параметризацию для последующей количественной оценки топологии межфазных границ.
2. Виртуальный прибор на базе модели диффузионно-ограниченной агрегации, в которую введены дополнительные параметры: вероятность прилипания частиц и время формирования структуры.
3. Методика оценки стабильности удельного электрического сопротивления наполненных полимеров к внешним воздействиям, основанная на сравнительной оценке показателя разветвленности межфазных границ D_{1b} и мультифрактального параметра однородности распределения границ по объему материала f_{40} .
4. Алгоритм классификации наполненных полимеров по мультифрактальным спектрам, основанный на методах многомерного анализа.

Достоверность и обоснованность результатов.

Достоверность и обоснованность результатов исследования достигается физической обоснованностью поставленных задач, логической взаимосвязью полученных результатов, объемом экспериментальных данных, применением статистических методов обработки экспериментальных данных и их корреляционного анализа, согласием расчетных и экспериментальных характеристик.

Личный вклад автора диссертационной работы

Диссертационная работа является полностью самостоятельной работой автора и написана по результатам исследований, выполненных лично автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были представлены на 11 научных конференциях, в том числе на 3 международных конференциях, а именно:

1. IX Международная школа-семинар "Эволюция дефектных структур в конденсированных средах", 9-12 октября, 2006. г. Барнаул, АлтГТУ.
2. XXXIII научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов, 2006 апрель, г. Барнаул
3. VI Всероссийской школы-семинара "Новые материалы. Создание, структура, свойства-2006" с международным участием 13-15 июня 2006. г. Томск, ТПУ
4. III Всероссийская научная конференция "Физико - химия процессов переработки полимеров - 2006", 10 - 12 октября 2006. г. Иваново.
5. Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (НТИ-2006) 7-10 декабря 2006. г. Новосибирск НГТУ
6. XIII международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых "Современные техника и технологии" 26-30 марта 2007 г., г. Томск ТПУ
7. XXXIV научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов, 2007 апрель, г. Барнаул
8. VII Всероссийская школа-семинар с международным участием "Новые материалы. Создание, структура, свойства-2007", 13-15 июня 2007. г. Томск
9. 8-я международная конференция "распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии", 7-13 октября 2007. г. Йошкар-Ола
10. XXXV научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов апрель, 2008. г. Барнаул
11. XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2008», 24-28 марта 2008 г., г. Томск

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 работы опубликованы в журналах по перечню ВАК.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав и выводов. Материал изложен на 135 страницах машинописного текста, включая 39 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 116 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, основные положения, выносимые на защиту, изложена научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения о достоверности полученных результатов, данные об апробации работы. Кратко изложено содержание работы по главам.

Первая глава посвящена анализу современного состояния методов исследования структурно-неоднородных материалов._

Описаны методы компьютерного моделирования, позволяющие установить основные закономерности формирования свойств резистивных полимерных композиционных материалов. Выявлено, что при компьютерном имитационном моделировании структуры практически невозможно учесть многие физические эффекты, связанные с влиянием межфазного взаимодействия между наполнителем и полимерной матрицей. Существующие модели также далеко не в полной мере способны отображать изменения в структуре при регулировании степени агломерации дисперсного наполнителя.

Рассмотрены современные методы изучения структуры по микрофотографиям. Установлено, что основное внимание в литературе уделено качественным оценкам изображения структуры. Количественные оценки применяются значительно реже. Показано, что существующие методы количественных оценок изображений структур построены в основном на фрактальном анализе. В качестве объекта исследования рассматриваются материалы при регулировании объемного

электрического сопротивления за счет изменения концентрации наполнителя.

В литературе не обнаружено методов количественного анализа структуры дисперсно-наполненных полимерных композитов в условиях регулирования объемного сопротивления модификацией поверхности наполнителя при его постоянной концентрации. Практически отсутствуют методы и модели, предназначенные для исследования поведения агломерированного наполнителя в композиционном материале.

Сделан вывод о том, что разработка методов исследования структуры, допускающих количественную оценку, как при традиционных, так и при современных (например, модификацией поверхности наполнителя) способах регулирования объемного электрического сопротивления является актуальной задачей.

Глава завершается формулированием цели и постановкой задач диссертационной работы.

Вторая глава начинается с физического обоснования метода измерения параметров структуры резистивных полимерных композиционных материалов с агломерированным наполнителем (дисперсно-наполненных полимеров). Показано, что в условиях регулирования величины объемного электрического сопротивления при постоянной концентрации наполнителя (видом матрицы и наполнителя, модификацией поверхности наполнителя) наиболее информативной подструктурой на изображении является контур межфазных границ «матрица - наполнитель».

Выбраны объекты исследования - наполненные техническим углеродом каучуки, которым присущ ряд важных достоинств: относительная простота промышленной технологии переработки, антикоррозионная стойкость, возможность переработки в изделия сложной формы и т.д.

К изображениям структуры высоконаполненных полимеров был применен текстурный и фрактальный подход. Экспериментально установлено, что использование либо текстурного, либо фрактального анализов для выделения контура межфазных границ «матрица - наполнитель» и их численного описания не позволяет выявить по микрофотографиям различий по величине объемного электрического сопротивления.

Описывается предлагаемый метод, в основу которого положена текстурная обработка и фрактальная параметризации изображений. Метод

включает обработку изображений в градациях серого специально подобранным текстурный признаком. Апробировались текстурные признаки: ширина автокорреляционной функции $T(j,k)$ и текстурные признаки, основанные на гистограмме совместного распределения яркости второго порядка, B_E и B_A . Положительные результаты получены с помощью B_A (рис. 1), который вычисляется как автокорреляция гистограммы совместного распределения яркости по формуле:

$$B_A = \sum_{a=1}^{L-1} \sum_{b=1}^{L-1} abP(a,b) \tag{1}$$

где a, b – заданные значения яркости; L – количество градаций оттенков серого цвета на изображении; $P(a,b)$ – гистограмма совместного распределения яркостей второго порядка. Она определяется по следующей формуле:

$$P(a,b) = \frac{N(a,b)}{M} \tag{2}$$

где $N(a,b)$ – число случаев, когда $F(j,k)=a$ и $F(m,n)=b$; $F(j,k)$ и $F(m,n)$ – значения яркостей пикселей с координатами (j,k) и (m,n) ; M – число пикселей в сегменте.

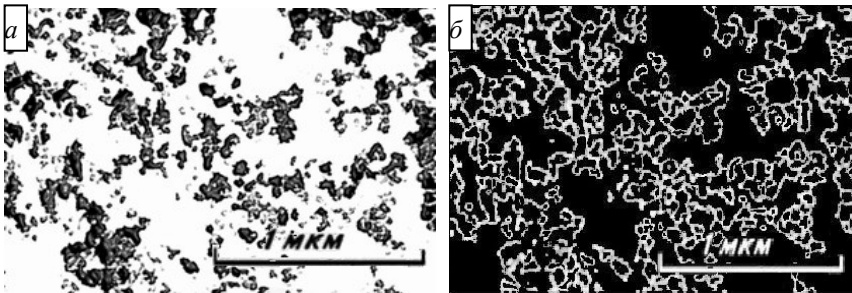


Рис. 1. Макроструктура наполненного полимера (Бутадиен-метилстирольный каучук, техуглерод марки ПМ-100, 40 весовых частей): a - исходное изображение [2]; b - обработанное с помощью текстурного признака B_A на фото

Для количественной оценки структур дисперснонаполненных полимерных материалов была использована фрактальная параметризация.

После текстурной обработки изображения переводились в черно-белый формат. Вычислялись обобщенные фрактальные размерности Реньи:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \left[\sum_i p_i^q(\varepsilon) \right]}{\ln \varepsilon} \quad (3)$$

где p_i – вероятность найти точку фрактала в i -той ячейке; ε – размер ячеек покрывающей сетки; q – порядок размерности $q = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$; N – количество точек, образующих фрактал.

Таким образом, с помощью подобранного текстурного признака B_A выделяются границы областей наполнителя с разной плотностью упаковки независимо от угла расположения границы. Фрактальный анализ позволяет учесть даже незначительные изменения «степени изрезанности» границ раздела «наполнитель – матрица».

Было замечено, что в выражении для информационной размерности D_1 (формула 4) при $q = 1$, возникает неопределенность. После раскрытия неопределенности выражение для D_1 примет следующий вид:

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i \ln p_i}{\ln \varepsilon} \quad (4)$$

где $p_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i(\varepsilon)}{N}$ – вероятность найти в i -той ячейке точку фрактала; q – порядок размерности; N – количество точек, образующих фрактал; $n_i(\varepsilon)$ – кол-во точек фрактала в i -ой ячейке;

Установлено, что при постоянном шаге покрывающей квадратной сетки ε для разных материалов, значения числителя дроби монотонно изменяются в соответствии с величиной объемного электрического сопротивления. При вычислении фрактальной размерности D_1 оказалось, что для выбранных объектов исследования меняется и угол наклона прямой и вертикальное смещение прямой. Значение вертикального смещения прямой обозначено как D_{1b} . На рис. 2 приведены результаты измерений по микрофотографиям наполненных полимеров, структуры которых слабо различаются визуально.

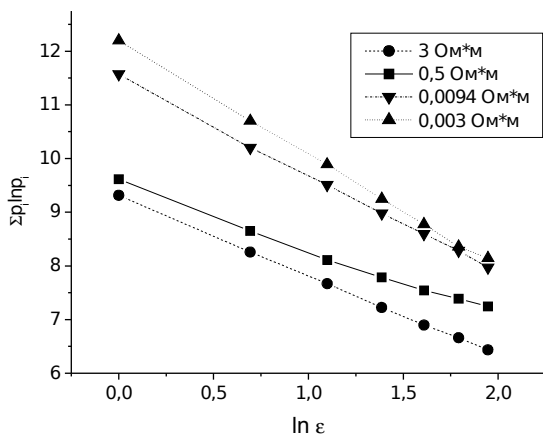


Рис. 2. График зависимости значения числителя дроби (формула 4) от шага покрывающей квадратной сетки

Полученные данные позволяют считать, что фрактальный параметр D_{1b} может быть предложен в качестве параметра, который отражает структурные элементы, отвечающие за формирование величины объемного электрического сопротивления материала.

Достоверность метода проверялась далее на модельных и реальных структурах. Предложенный параметр D_{1b} сравнивался по общеизвестным закономерностям изменения величины объемного электрического сопротивления от количественного и качественного состава наполненных полимеров.

Для оценки чувствительности разработанного метода к изменениям структуры за счет характеристик дисперсного наполнителя исследовались изображения, полученные при компьютерном моделировании процессов агрегации частиц. В модели диффузионно-ограниченной агрегации «частица-кластер» формирование агрегатов происходит на двухмерной прямоугольной решетке. В отличие от стандартной модели предусматривалась возможность не только агломерации, но деагломерации частиц с разной вероятностью. Регулированием времени формирования структуры моделировалось изменение вязкости полимерной матрицы. Модельные изображения обрабатывались с

помощью классического фрактального анализа и по предложенному методу. На рис. 3 представлен график зависимости фрактальной размерности и параметра D_{1b} от вероятности прилипания частиц.

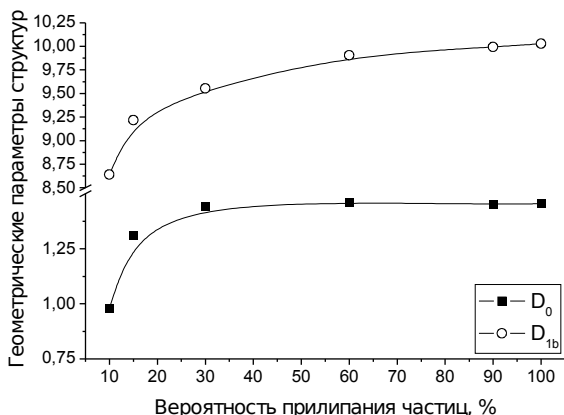


Рис. 3. График зависимости фрактальной размерности и параметра D_{1b} от вероятности прилипания частиц к агрегату. Объемная концентрация частиц 30 % .

Установлено, что классическая фрактальная размерность различает структуры при невысокой вероятности прилипания частиц (до 30 %), в то время как предложенный параметр D_{1b} способен различить структуры в более широком диапазоне изменения вероятности прилипания частиц. Сделан вывод о том, что предложенный метод измерения параметров позволяет выявлять изменения в структуре при регулировании степени агломерации дисперсного наполнителя.

В третьей главе описан вычислительный комплекс, позволяющий автоматизировать процесс измерений параметров структуры и обработки полученных результатов, разработанные в рамках выполнения поставленных задач.

Разработанный вычислительный комплекс позволяет измерять параметры предложенным методом, а также традиционными текстурным и фрактальным методами. Его передняя панель представлена на рис. 4.

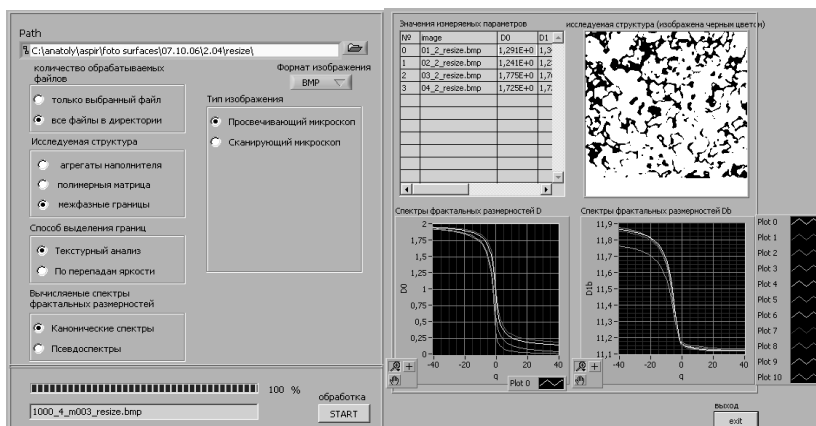


Рис. 4. Передняя панель программного комплекса обработки микрофотографий.

Программный комплекс дает возможность обрабатывать микрофотографии с просвечивающего электронного микроскопа и сканирующего электронного микроскопов; выбирать структурную подсистему для обработки (агрегаты наполнителя, полимерная матрица или межфазные границы); выполнять пакетную обработку графических файлов по заданному алгоритму; переносить результаты измерения параметров структуры в другие программы для решения прикладных задач и т.д. Файл отчета формирует в формате HTML. В нем указывается подструктура, которая выделяется на изображении, приводится таблица со значениями основных параметров структуры и графики мультифрактальных спектров.

В рассматриваемых объектах исследования агрегация частиц во многом определяет структуру и свойства композиционных материалов. Режим ее протекания зависит от характера поверхности частиц и значительно влияет на структурную организацию наполнителя в матрице, особенности упаковки и т.д. Поэтому на базе модели, разработанной выше для оценки чувствительности предлагаемого метода (глава 2), был разработан виртуальный прибор для генерации и исследования модельных структур. Он позволяет измерять параметры модельных структур при регулировании составляющих процесса агломерации – деагломерации высокодисперсного наполнителя. Передняя панель виртуального прибора представлена на рис. 5.

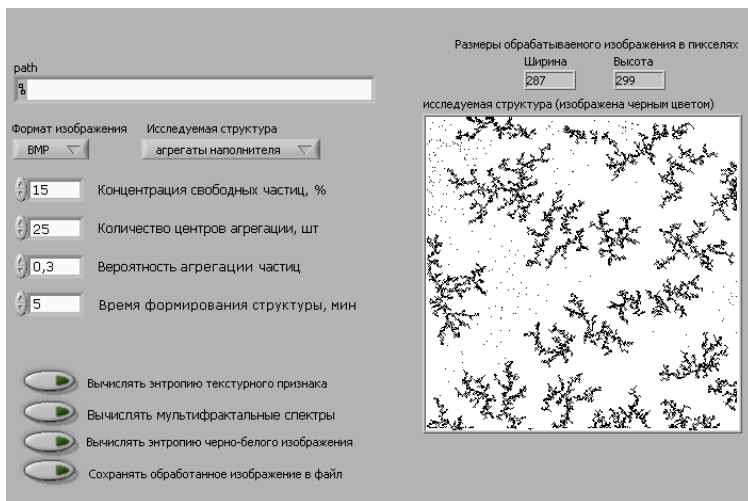


Рис. 5. Передняя панель виртуального прибора.

С помощью виртуального прибора изучалась зависимость предложенного в работе параметра D_{1b} от входных параметров модели (объемной концентрации свободных частиц, вероятности прилипания частиц и т.д.). На рис. 6 в качестве примера приведены результаты сравнения влияния концентрации свободных частиц и вероятности прилипания на параметр D_{1b} .

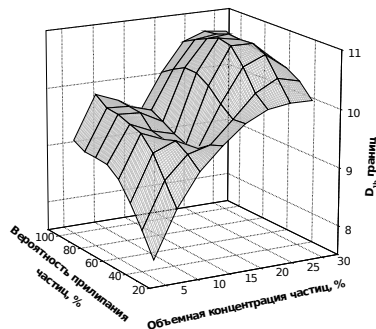


Рис. 6. Зависимость значения параметра D_{1b} от концентрации и вероятности прилипания свободных частиц.

В главе описан алгоритм классификации полимерных композитов по изображениям их макроструктуры, основанный на использовании методов многомерного анализа. Классификация проводится, опираясь на мультифрактальные спектры контура межфазных границ. Мультифрактальные спектры вычисляются по формуле (3) при целых значениях q в диапазоне от -40 до 40 . Были опробованы несколько методов: метод главных компонент, метод линейной регрессии, метод проекции на латентные структуры и т.д. Для классификации был выбран метод проекции на латентные структуры. Предложенный алгоритм позволил разделить на группы выбранные объекты исследования, несмотря на различие анализируемых материалов только по модификации поверхности наполнителя. Погрешность классификации не превышала 10%.

В работе показано, что классификация материалов по макроструктуре дает возможность решения ряда практических задач, например, сравнительной оценки нового материала с уже созданными композициями по комплексу электрофизических свойств.

В четвертой главе диссертационной работы приведены результаты апробации разработанного метода измерения параметров структуры для выбранных объектов исследования. Предложенный выше параметр D_{1b} измерялся для материалов, у которых объемное электрическое сопротивление регулировалось широко распространенными приемами: концентрация дисперсного наполнителя, марка полимерной матрицы, марка технического углерода. Экспериментально

подтверждено, что структурный параметр D_{1b} отражает величину объемного электрического сопротивления. На рис. 7 в качестве примера показаны результаты измерения для материалов, различающихся маркой наполнителя.

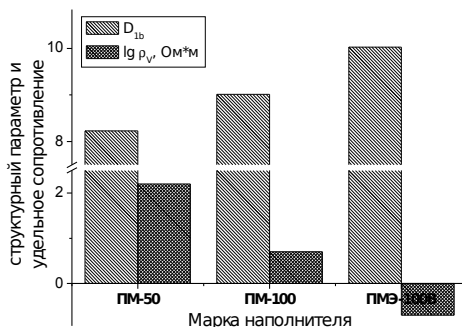


Рис. 7. Структурные параметры и удельное сопротивление наполненных полимеров

Работоспособность параметр D_{1b} проверялась на материалах, у которых величина объемного электрического сопротивления регулировалась одним из современных способов - предварительной модификацией поверхность наполнителя. Экспериментальные исследования показывают, что регулирование структуры в этом случае происходит за счет совместного влияния эффектов межфазного взаимодействия и агломерирования – деагломерирования. При их действии на плоскостном срезе макроструктуры топология меняется незначительно.

Изучались материалы на основе бутилкаучука. Модификация поверхности технического углерода выполнялась экстракцией растворителями, прокаливанием в окислительной и инертной средах, нанесением на поверхность органических соединений. Концентрация наполнителя составляла 80 весовых частей теуглерода на 100 весовых частей полимера. Полученные результаты приведены на рис. 8. Установлено, что параметр D_{1b} следует за величиной объемного сопротивления: при увеличении объемного электрического сопротивления он уменьшается.

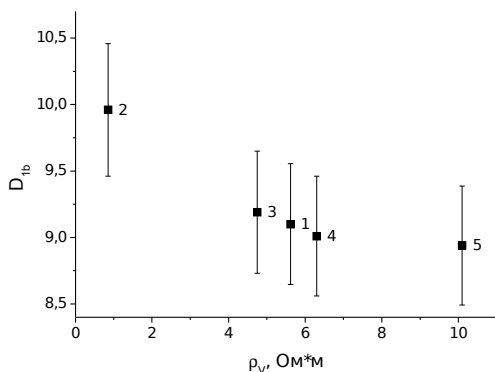


Рис. 8. Закономерность изменения геометрических параметров структуры при возрастании величины удельного объемного электрического сопротивления. (модификации 1 - окисление; 2 - нанесение углеводов и термообработка; 3 - обработка ацетонитрилом; 4 - немодифицированный; 5 - обработка ацетоном).

Предложенный в рамках метода параметр D_{1b} межфазных границ позволяет выделить структурные элементы, определяющие электропроводность резистивного композиционного материала, и при использовании в материале модифицированного наполнителя.

Разработанный метод применен для оценки стабильности объемного электрического сопротивления наполненных полимеров при внешних воздействиях (повышенной температуре, сжимающей механической нагрузке, набухании в среде трансформаторного масла). В результате сопоставления данных экспериментов по стабильности материалов при воздействии внешних эксплуатационных факторов и обработки мультифрактальных спектров исследуемых структур выявлен общий параметр f_{40} (равномерность распределения фрактального множества межфазных границ), который отражает стабильность структуры (рис. 9).

На основе изучения соотношения мультифрактального параметра равномерности распределения границ f_{40} и параметра разветвленности структуры D_{1b} показана возможность оценки интенсивности межфазного взаимодействия и стабильности структуры и свойств дисперснонаполненных полимерных композиционных материалов с

углеродным наполнителем. На этой базе предложена методика сравнительной оценки стабильности величины объемного электрического сопротивления резистивных полимерных материалов с дисперсным наполнителем при внешних воздействиях.

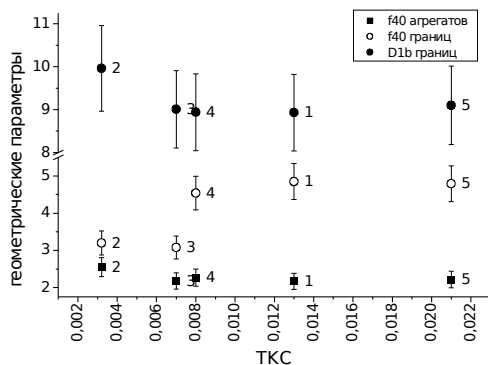


Рис. 9. Закономерность изменения геометрических параметров структуры при возрастании величины температурного коэффициента сопротивления (TKC, 1/°C).

Проведенные эксперименты подтвердили, что разработанный метод позволяет измерять параметры структуры, отражающие величину объемного электрического сопротивления и его стабильность при внешних воздействиях, как при традиционных, так и современных способах регулирования свойств наполненных полимеров.

В заключении кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

1. Разработан метод измерения параметров структуры наполненных полимеров, основанный на совместном использовании текстурного подхода и фрактальной геометрии. Метод может быть использован для резистивных полимерных композиционных материалов, в том числе и высоконаполненных с агломерированными компонентами.

2. Разработана методика оценки величины удельного объемного электрического сопротивления и его стабильности при внешних воздействиях путем сравнения результатов измерений мультифрактальных параметров изображений структур.
3. На базе предложенного метода и усовершенствованной модели диффузно-ограниченной агрегации разработан виртуальный прибор для измерения геометрических характеристик структур при задаваемых количественных параметрах агломерированного наполнителя. Прибор апробирован для изучения процессов агломерации высокодисперсного наполнителя по фрактальным характеристикам модельных структур.
4. Создан вычислительный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме измерять текстурные и фрактальные параметры, обрабатывать и выдавать результаты измерений по запросу пользователя. Комплекс дает возможность выполнять исследования структур полимерных композитов по заданному алгоритму, изучать различные подсистемы (наполнитель, матрица, граница раздела «наполнитель- матрица»).
5. Предложена и реализована автоматизированная классификация резистивных композиционных материалов по мультифрактальным характеристикам их структуры, которая опирается на методы многомерного анализа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Минакова Н.Н., Бортников А.Ю. Моделирование макроструктуры дисперсно-наполненных систем с учетом их детерминированно-стохастической природы // Известия вузов. Физика. - 2005. № 11 С. 48 – 53.
2. Минакова Н.Н., Бортников А.Ю. Влияние углеродного наполнителя на стабильность электропроводности наполненных полимеров при контакте с жидкими средами // Известия Томского политехнического университета — 2006. - Т. 309, № 1, С. 125 – 129.
3. Бортников А.Ю., Минакова Н.Н. Текстурно-фрактальный анализ микроскопических срезов образцов композиционных материалов, наполненных техническим углеродом // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - Т. 309, № 6. – С. 64 – 67.

4. Бортников А.Ю., Минакова Н.Н. Анализ структуры электропроводящих полимеров с агломерированными наполнителями // Известия ВУЗов Физика. - 2006. № 11. С. 13-18.
5. Бортников А.Ю. Методика оценки уровня агломерирования наполнителя в структурно-неоднородных материалах // Труды VI всероссийской школы-семинара «Новые материалы, создание, структура, свойства — 2006», - Томск. – 2006. – С. 197 — 201.
6. Бортников А.Ю. Методика изучения структурообразования высоконаполненных полимеров // Труды III Всероссийской научной конференции «Физико-химия процессов переработки полимеров — 2006» - Иваново. – 2006. – С. 57.
7. Бортников А.Ю. Распознавание и классификация неоднородных структур по данным фрактального анализа // Труды Всероссийской научной конференций студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации. (НТИ-2006)" - Новосибирск. – 2006.
8. Бортников А.Ю., Минакова Н.Н. Многомерный анализ в классификации фрактальных структур высоконаполненных полимеров // Известия Алтайского государственного университета. - 2007. №1. – С. 90 – 92.
9. Бортников А.Ю. Оценка параметров композиционных материалов электротехнических изделий по данным анализа изображений макроструктуры // Труды XIII Международной научно-практической конференций студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2007» - Томск. - 2007 – С. 29
10. Бортников А.Ю. Мультифрактальный формализм при исследовании стабильности структур полимерных композитов // Труды VII всероссийской школы-семинара с международным участием «Новые материалы. Создание, структура, свойства-2007» - Томск. - 2007 – С. 104
11. Бортников А.Ю. Тектурный подход к формированию исходных данных для фрактального анализа изображений // Сборник трудов тезисов 8-ой международной конференции «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» - Йошкар-Ола. - 2007. – Т. 3. – С. 61 – 62
12. Бортников А.Ю., Минакова Н.Н. Компьютерное моделирование процесса образования агрегатов наполнителя в расплаве полимерной матрицы // Известия Алтайского государственного университета. - 2008. № 1. - С. 94 — 97.

13. Бортников А.Ю., Минакова Н.Н. Стабильность структуры и свойств полимерных композитов с модифицированным дисперсным наполнителем. // Труды XIV Международной научно-практической конференций студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2008» - Томск. – 2008.

Цитированная литература:

1. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. - М.: Химия, 1984. - 240 с.
2. Шуплецов В.Г., Орехов С.В., Кулезнев В.Н. // Высокомолекулярные соединения. -1981. - Т. XXIII, № 6. - С. 1192 - 1196.

Подписано к печати
Формат 60x84/16
Бесплатно
Тираж 100 экз.

Печать офсетная
Объем 1 п.л.
Заказ

Типография Алтайского государственного университета
656049, г. Барнаул, ул. Димитрова, 66