

ОЦЕНКА ФРАКТАЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА С КЕРАМИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПО МИКРОСКОПИЧЕСКИМ СНИМКАМ

Н.Н. Минакова, А.А. Сивков, А.С. Силютин,
Н.В. Тимощенко, А.С. Ивашутенко

Статья посвящена поиску способов численной оценки характеристик структуры по микроскопическим снимкам. Рассматриваются высокотеплопроводящие электроизоляционные заливочные компаунды на основе эпоксидных смол с керамическими дисперсными наполнителями, применяемые для повышения надежности электротехнических устройств.

Изучались микрофотографии высокотеплопроводящего эпоксидного компаунда с применением нитрида алюминия, синтезированного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Оценивалась возможность применения фрактального подхода к изучению структуры наполненного эпоксидного компаунда по микроскопическим снимкам. Разработана методика анализа снимков. Определялись размерность Минковского и размерности Реньи. Полученные результаты позволили сделать вывод о фрактальности проанализированных структур, возможности на количественном уровне изучать параметры «структура – свойства».

Ключевые слова: наполненные полимеры, высокотеплопроводящие электроизоляционные заливочные компаунды, наночастицы, нитрид алюминия, микроскопические снимки, фрактальная оценка, размерность Минковского, размерности Реньи.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные материалы с дисперсными наполнителями применяются для решения широкого круга практических задач: улучшения механических характеристик, перераспределения тепловой энергии в узлах электрической сети, ограничения перенапряжений и т.д. [1, 2]. Использование наполнителей, способных агломерироваться, позволяет формировать многокомпонентную структуру с широким спектром свойств: от электроизоляционных до электропроводящих [3, 4, 5].

Эпоксидные компаунды с дисперсными наполнителями применяются для повышения удельной тепловой мощности блоков и узлов электротехнических устройств в машиностроении, электротехнических устройствах и т.д. Увеличение их теплопроводности достигается рецептурными приемами, например, применением наноструктурных наполнителей [6]. Подбор наполнителей, позволяющих сформировать структуру с повышенной теплопроводностью, выполняется обычно методом «проб и ошибок», что значительно повышает стоимость разработки. Экспериментально подтверждено, что оценку пространственного распределения наполнителя в полимере количественными харак-

теристиками можно выполнить специальной обработкой изображений макроструктуры с помощью текстурного или фрактального анализа [7, 8].

Была поставлена задача оценки возможности применения к изображениям макроструктуры эпоксидного компаунда с наноразмерными наполнителями фрактального анализа, количественные оценки в рамках которого могут обладать предсказательной силой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Известно, что в формировании свойств композиционных материалов определяющая роль принадлежит границам раздела, особенно при высокой концентрации наполнителя [9, 10]. Поэтому для решения поставленной задачи на первом этапе необходимо было предложить подход к обработке изображений, способный выделять границы раздела компонентов материала.

В качестве объекта исследования выбрана полимерная наполненная композиция на основе эпоксидного компаунда горячего отверждения (смола ЭД-20, отвердитель ИМТГФА, температура отверждения 120°C). Наполнитель – нитрид алюминия, полученный методом самораспространяющегося

высокотемпературного синтеза [11].

Были проанализированы снимки с разным количеством нитрида алюминия - 100, 200, 250, 320 весовых частей и тиксотропной добавкой - 4 весовых частей нанодисперсного аэросила (диоксида кремния) [11]. На рисунках 1-4 в представлены микрофотографии материалов. Микрофотографии даны при кратностях увеличения: а) 200, б) 500, в) 2000, г) 5000.

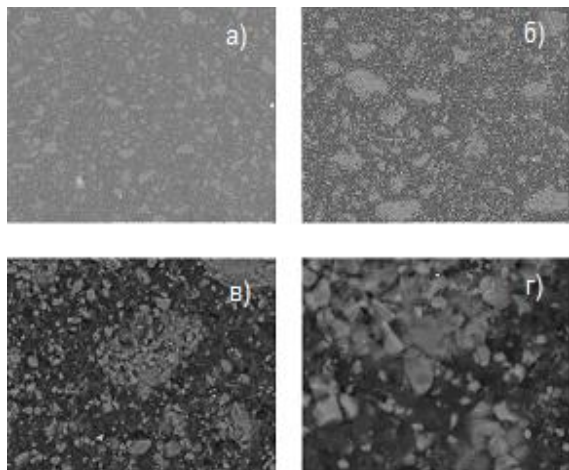


Рисунок 1 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 320 весов. частей нитрида алюминия)

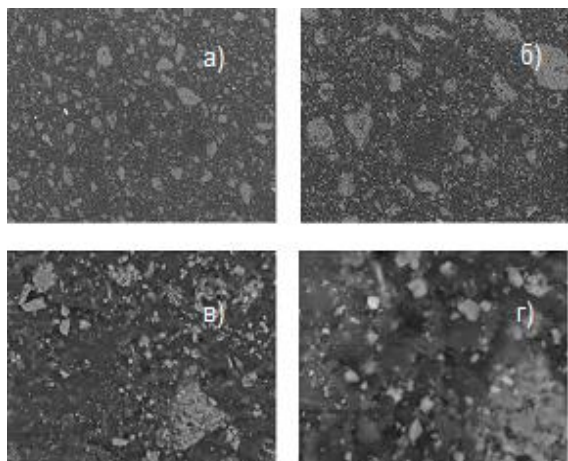


Рисунок 2 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 250 весов. частей нитрида алюминия)

Анализ микроскопических снимков показал:

- компоненты материала имеют различную яркость;

130

- изменение состава материала отражается на яркости;
- при изменении степени увеличения одного и того же изображения яркость также изменяется.

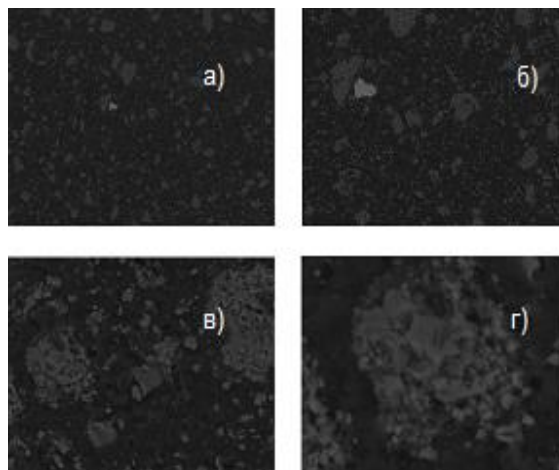


Рисунок 3 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 200 весов. частей нитрида алюминия)

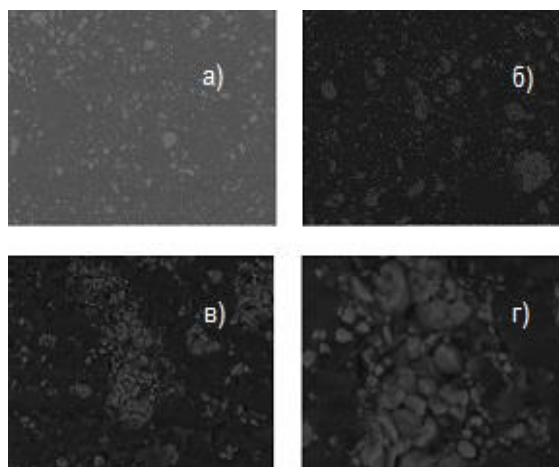


Рисунок 4 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 100 весов. частей нитрида алюминия)

Поэтому подбор значения яркости не дает возможности однозначно разделить на изображении компоненты материала. Затруднительно подобрать величину яркости на основании состава материала, так как отношение светлых и ярких частей изображения во многом зависит от количества компонентов, представленных на изображении.

Был сделан вывод о том, что граница
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2017

ОЦЕНКА ФРАКТАЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА С КЕРАМИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПО МИКРОСКОПИЧЕСКИМ СНИМКАМ

раздела зависит не от абсолютной яркости, а от относительного значения яркости элементов изображения. Поэтому для исследований в рамках поставленной выше задачи необходима предобработка изображений.

На данном этапе гипотеза о самоподобии представленных изображений проверялась путем определения фрактальной размерности. Рассчитывались фрактальные размерности Минковского и Реньи.

Фрактальная размерность Минковского определялась по формуле [12]:

$$D = - \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \left(\frac{\ln(N_\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)} \right),$$

где D – размерность, — минимальное число множеств диаметра ε , которыми можно покрыть исходное множество.

Для серии вычислений с изменяющимся размером ячейки формулу 1 можно представить следующим образом [12]:

$$D \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) - \ln(N_\varepsilon) = 0,$$

где ε - размер ячейки;

N_ε - количество ячеек размером ε .

Расчет значений N_ε при различных значениях величины ε позволяет построить линию регрессии (рисунок 5):

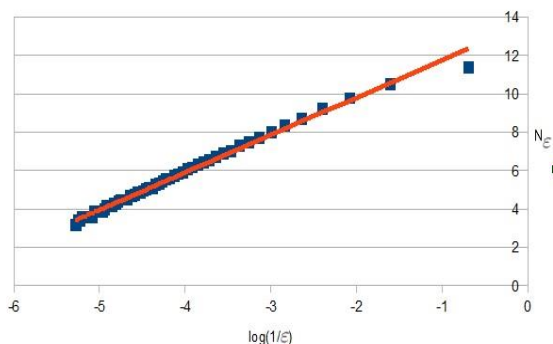


Рисунок 5 – Линия регрессии

Рассматривался спектр размерности Реньи [13]. Рассчитывались нулевая, первая и вторая размерности.

Спектр обобщенных фрактальных размерностей Реньи характеризует распределение точек в области A [12]:

$$d_q = \frac{\tau(q)}{q - 1},$$

где

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\ln Z(q, \varepsilon)}{\ln \varepsilon}$$

Если $d_q = \text{const}$, т.е. не зависит от q , то рассматриваемое множество точек представляет собой регулярный фрактал. Если функция d_q меняется с q , то рассматриваемое множество точек является мультифракталом [13].

Функция d_q показывает, насколько неоднородным является исследуемое множество точек A . Частные случаи обобщенных фрактальных размерностей d_q для некоторых конкретных значений q [12]:

При $q=0$

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon)$$

$$Z(0, \varepsilon) = N(\varepsilon)$$

Эту величину можно определить, как

$$Z(0, \varepsilon) \approx \varepsilon^{\tau(0)} = \varepsilon^{-d_0}$$

Сопоставление указанных соотношений показывает, что $N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-d_0}$, где величина d_0 - хаусдорфова размерность множества A .

Величина d_1 – информационная размерность. Она характеризует информацию, необходимую для определения местоположения точки в некоторой ячейке, показывает, как информация, необходимая для определения местоположения точки, возрастает при стремлении размера ячейки ε к нулю.

Обобщенная размерность d_2 (корреляционная размерность) определяет зависимость корреляционного интеграла $I(\varepsilon)$ от ε . [13]

$$I(\varepsilon) \approx \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^2 \approx \varepsilon^{-d_2}$$

Была написана программа на языке python с использованием библиотеки обработки изображений Python Image Library.

Для нахождения границы компонентов материала контрастность изображения плавно повышалась до тех пор, пока количество оттенков не станет равным двум. Контрастность рассчитывалась как среднеквадратичное отклонение яркости пиксела от средней яркости изображения. Поэтому такой подход позволяет использовать предложенный алгоритм для изображений с различной яркостью.

Были исследованы представленные выше микроскопические снимки при различном увеличении. Результаты расчетов по приведенным выше формулам представлены в таблицах 1-2:

Таблица 1 - Значение размерности Минковского при различном увеличении

Фото	а)	б)	в)	г)
рис. 1	1,89	1,71	1,33	1,29
рис. 2	1,85	1,68	1,41	1,41
рис. 3	1,83	1,65	1,39	1,39
рис. 4	1,90	1,79	1,53	1,38

Таблица 2 - Значение размерностей Реньи при различном увеличении: $d(0)$, $d(1)$ и $d(2)$ – размерности Реньи порядка 0, 1 и 2 соответственно.

Фото	а)	б)	в)	г)	
рис. 1	$d(0)$	1,89	1,71	1,33	1,29
	$d(1)$	1,86	1,68	1,38	1,38
	$d(2)$	1,83	1,65	1,40	1,43
рис. 2	$d(0)$	1,85	1,68	1,41	1,41
	$d(1)$	1,82	1,66	1,47	1,52
	$d(2)$	1,79	1,63	1,50	1,58
рис. 3	$d(0)$	1,83	1,65	1,39	1,39
	$d(1)$	1,79	1,63	1,49	1,52
	$d(2)$	1,76	1,61	1,54	1,57
рис. 4	$d(0)$	1,90	1,79	1,53	1,38
	$d(1)$	1,86	1,74	1,60	1,49
	$d(2)$	1,83	1,72	1,64	1,54

Проведенные эксперименты показали:

- размерности не являются целочисленными;
- размерность Минковского совпадает с размерностью $d(0)$ - размерностью Хаусдорфа;
- размерности Реньи с различным параметром q не совпадают между собой, поэтому можно предположить, что граница раздела представляет собой мультифрактал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Предложенный подход позволяет оценить фрактальность структур эпоксидных смол, наполненных нитридом алюминия.

2. Расчет размерностей Хаусдорфа и Минковского по микрофотографиям позволяет сделать вывод о фрактальности анализируемых структур

3. По фрактальным размерностям можно количественно оценивать закономерности «структура – свойства».

4. Выявленное самоподобие структур наполненного эпоксидного компаунда дает возможность определять фрактальные закономерности формирования их свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов В.П., Пугачев Г.А., Минакова Н.Н. и др. Способ изготовления композиционных резисторов. Патент на изобретение. RUS 993342 30.01.1983.

2. Гладких С.Н. Разработка эпоксидных клеящих и герметизирующих материалов с высокой теплопроводностью / С.Н. Гладких, Н.Н. Векшин, Е.В. Колесникова и др. //Клеи, герметики. технологии. – 2012. - № 4, - С. 15 – 20.

3. Анисимов В.А., Голицын В.П., Минакова Н.Н. Влияние состояния поверхности графита на электропроводность композиционного материала. Электротехническая промышленность. Серия 21. Электротехнические материалы. 1983. № 7 (156). С. 8-10.

4. Абелиов Я.Л. Наполнители для теплопроводящих клеев //Клеи, герметики. технологии. – 2005. - № 8, - С. 26 – 27.

5. Горелов В.П., Минакова Н.Н., Грунин В.К. Применение электропроводящего технического углерода для резисторов энергетического назначения //Получение и свойства электропроводящего технического углерода: Сб. научных трудов. - Москва, 2008. - С. 113-119.

6. Петрова А.П., Абелиов Я.Л., Зуев А.В. Влияние наполнителей на теплофизические свойства клеев //Клеи, герметики. технологии. – 2013. - № 8, - С. 2 – 4.

7. Бортников А. Ю. Анализ структуры электропроводящих высоконаполненных полимеров с агломерированными компонентами / А. Ю. Бортников, Н.Н. Минакова //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. - Т. 49. - № 11. - С. 13-18.

8. Абраменко Е.А. Исследование свойств полиэтилена с наноразмерными наполнителями специальной обработкой изображений макроструктуры //Е.А. Абраменко, Н.Н.Минакова, В.Я. Ушаков //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. - № 7. – С. 39 – 42.

9. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции. – М.: Химия, 1984. – 334 с.

10. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. - М.: Химия, 1991. - 260 с.

11. Сивков А.А., Ивашутенко А.С., Тимощенко Н.В., Закоржевский В.В. Разработка наполненного заливочного компаунда с высокой теплопроводностью //Клеи, герметики. технологии. – 2016. - № 10, - С. 6 – 14.

12. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М., 2000. — 352 с.

13. Божокин С.В., Паршин Д.А. Фракталы и мультифракталы. М. 2001. – 219 с.

Минакова Н. Н. - д.физ.-м.н., профессор кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности Алтайский государственный университет (Барнаул) **ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2017**

ОЦЕНКА ФРАКТАЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА
С КЕРАМИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПО МИКРОСКОПИЧЕСКИМ СНИМКАМ

наул, Россия), [e-mail: minakova@asu.ru](mailto:minakova@asu.ru)

Сивков А. А. - д.т.н., профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета (Томск, Россия),

e-mail: SivkovAA@mail.ru

Силютин А. С. - аспирант физико-технического факультета Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия), e-mail: iskander1348@yandex.ru

Тимощенко Н. В., аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета (Томск, Россия),

e-mail: timoschenko1982@mail.ru

Ивашутенко, А. С., к.т.н., доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета (Томск, Россия), e-mail: ivaschutenko@mail.ru