

## 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 характеристиками можно дополнить 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.

## ОЦЕНКА ФРАКТАЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА С КЕРАМИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПО МИКРОСКОПИЧЕСКИМ СНИМКАМ

В качестве объекта исследования выбрана полимерная наполненная композиция на основе эпоксидного компаунда горячего отверждения (смола ЭД-20, отвердитель ИМ-ТГФА, 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].

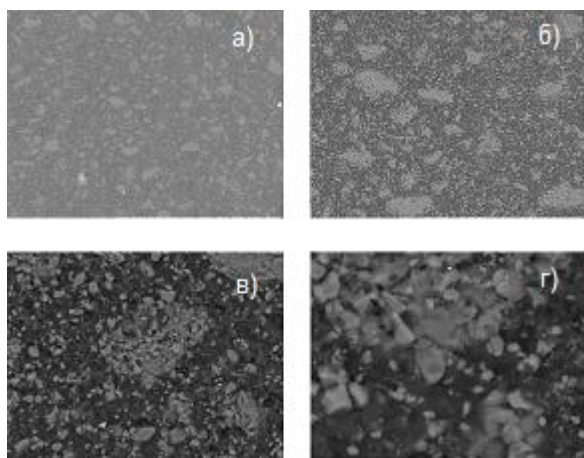


Рисунок 1 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 320 весов. частями нитрида алюминия).

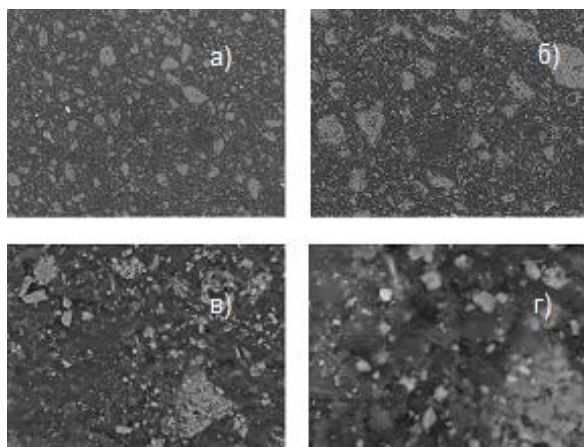


Рисунок 2 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 250 весов. частями нитрида алюминия).

На рисунках 1 - 4 в представлены микрофотографии материалов. Микрофотографии даны при кратностях увеличения: а) 200, б) 500, в) 2000, г) 5000. Анализ микрофотографических снимков показал:

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

Поэтому подбор значения яркости не дает возможности однозначно разделить на изображении компоненты материала.

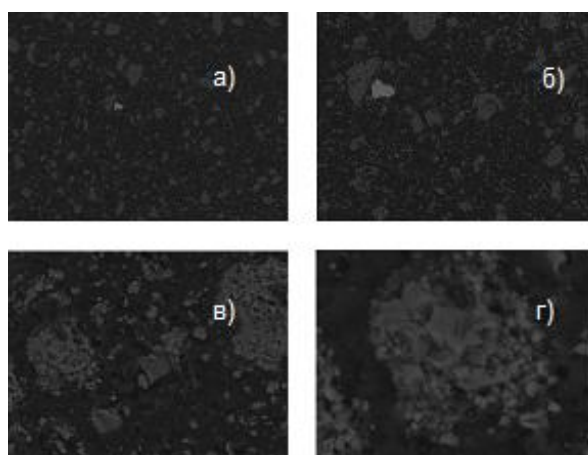


Рисунок 3 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 200 весов. частями нитрида алюминия).

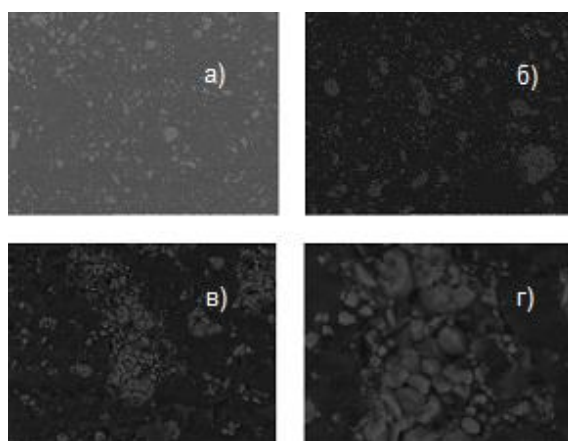


Рисунок 4 - Микрофотографии шлифа образца заполимеризованного эпоксидного компаунда, наполненного 100 весов. частями нитрида алюминия).

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 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]:

$$D = -\lim_{\epsilon \rightarrow \infty} \left( \frac{\ln(N_\epsilon)}{\ln(\epsilon)} \right) \quad (1)$$

где  $D$  – размерность,  $N_\epsilon$  — минимальное число множеств диаметра  $\epsilon$ , которыми можно покрыть исходное множество.

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

$$D \ln\left(\frac{1}{\epsilon}\right) - \ln(N_\epsilon) = 0(2),$$

где  $\epsilon$  - размер ячейки;

$N_\epsilon$  - количество ячеек размером  $\epsilon$ .

Расчет значений  $N_\epsilon$  при различных значениях величины  $\epsilon$  позволяет построить линию регрессии (рисунок 5):

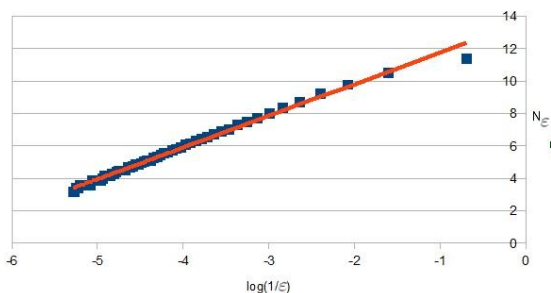


Рисунок 5 – Линия регрессии

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

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

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  $q=0$

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

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

Эту величину можно определить, как

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

Сопоставление указанных соотношений показывает, что  $N(\epsilon) \sim \epsilon^{d_0}$ , 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  $\epsilon$  к нулю.

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

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

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. Контраст-  
**ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2017**

## ОЦЕНКА ФРАКТАЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА С КЕРАМИЧЕСКИМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПО МИКРОСКОПИЧЕСКИМ СНИМКАМ

ность 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:

**ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2017**

- 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 Наталья Николаевна** - доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики, электроники и информационной безопасности Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия),

E-mail: [minakova@asu.ru](mailto:minakova@asu.ru)

**Сивков Александр Анатольевич** - доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета (Томск, Россия),

E-mail: [SivkovAA@mail.ru](mailto:SivkovAA@mail.ru)

**Силютин Александр Сергеевич** - аспирант физико-технического факультета Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия),

E-mail: [iskander1348@yandex.ru](mailto:iskander1348@yandex.ru)

**Тимощенко Надежда Викторовна**, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета (Томск, Россия),

E-mail: [timoschenko1982@mail.ru](mailto:timoschenko1982@mail.ru)

**Ивашутенко, Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета (Томск, Россия),

E-mail: [ivaschutenko@mail.ru](mailto:ivaschutenko@mail.ru)