

УДК 620.186-032.36:620.173

**К.А. Кичигина, А.И. Дегтярев, Д.М. Караваев**  
**K.A. Kichigina, A.I. Degtyarev, D.M. Karavaev**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ФРАКЦИЙ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА  
НА ОСНОВЕ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА  
И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТЬЮ**

**A STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE  
MATERIAL FRACTIONS BASED ON EXPANDED GRAPHITE  
AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE FRACTAL DIMENSION**

Установлено, что частицы терморасширенного графита являются фракталом. Определена фрактальная размерность частиц терморасширенного графита. Найдена взаимосвязь механических характеристик композиционного материала на основе терморасширенного графита с фрактальной размерностью частиц терморасширенного графита.

**Ключевые слова:** фракталы, фрактальная размерность, композиционные материалы, терморасширенный графит, механические испытания.

It was found that the expanded graphite particles are fractal. The expanded graphite particles fractal dimensions are calculated. Found the relationship of mechanical properties of composite materials based on expanded graphite with a fractal dimension of expanded graphite particles.

**Keywords:** fractals, fractal dimension, composite materials, expanded graphite, mechanical tests.

Использование концепции фракталов в металлургии и материаловедении, являющейся научным фундаментом получения материалов с заданными свойствами, способствует прогрессу в этом направлении. Теория фракталов переводит на более высокий уровень понятие о структуре и дает ключ к развитию фрактального материаловедения на основе количественной оценки динамических структур. С помощью данного метода возможно изучение как локальных, так и глобальных свойств рассматриваемых систем, что дает преимущества перед стандартными методами исследования структур [1].

Теория фракталов совсем молода. Она появилась в конце 60-х гг. XX в. на стыке математики, информатики, лингвистики и биологии. Отцом фракталов по праву можно считать Бенуа Мандельброта [2].

Фрактал – структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому. Это рекурсивная модель, каждая часть которой повторяет в своем развитии развитие всей модели в целом. Самоподобие является не единственным основным свойством фрактальных структур. Второе, не менее важное свойство – изменение характеристик (масса, плотность, площадь поверхности, модуль упругости и т.д.) с изменением размера фрактального объекта или пространственного масштаба, в котором этот объект рассматривают, – имеет степенную зависимость, в которой показатель степени – дробное число [2].

Центральное понятие фрактального анализа – фрактальная размерность (хаусдорфова размерность). Понятие фрактальной размерности ( $D$ ) было также введено Мандельбротом. Он предложил назвать кривые, фрактальная размерность которых превосходит топологическую, фрактальными кривыми [3].

Терморасширенный графит (ТРГ) является слоистым материалом со сложной структурой [4], и его проблематично описать традиционными методами исследования структур, фрактальный анализ является оптимальным решением при исследовании.

ТРГ получается путем подвергания термообработке при температуре 900–1500 °С интеркалированных частиц графита. Интеркалированные частицы – это соединение внедрения графита, получаемое внедрением в межслоевое пространство кристаллической решетки графита молекул, и ионов определенных веществ (интеркалантов), иногда в присутствии активаторов (как правило, окислителей). При высоких температурах интеркалированный графит расширяется, расслаивается, т.е. отдельные слои разделяются. Расслоение приводит графит к более чем трехкратному расширению [5].

Расширенный графит проходит стадию размельчения, образуя насыпной порошок. В данной работе в качестве испытуемого материала использовалась насыпная смесь общей размерностью менее 400 мкм. Непосредственно для испытаний были взяты следующие фракции: 400–315, 315–200, 200–160, 160–100, 100–63 и менее 63 мкм. Фракции были получены на лабораторной установке для разделения песчаной основы формовочных песков на фракции по крупности зерен. Количественное распределение фракций из общего объема материала представлено на графике (рис. 1).

Для применения фрактального анализа в исследовании структур ТРГ необходимо доказать, что терморасширенный графит является фракталом. Для этого нужно определить фрактальную размерность частиц ТРГ и показать,

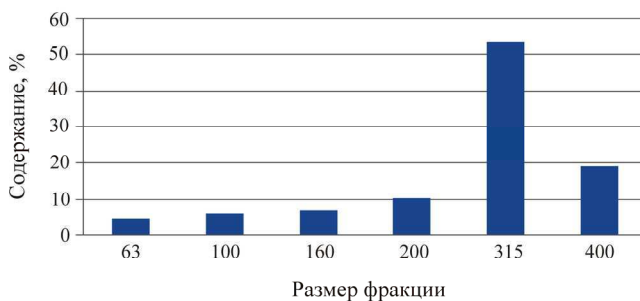


Рис. 1. Количественное распределение фракционного состава ТРГ

что зависимость периметра от площади линейна. Для данного доказательства были проведены исследования частиц ТРГ всех вышеперечисленных фракций. Для практического определения фрактальной размерности принято использовать особенность соотношения периметра и площади фрактальных замкнутых кривых на плоскости. Изображения частиц были получены с помощью оптического микроскопа «Альтами МЕТ 5» при увеличении в 50 раз, с использованием проходящего света со светлым полем, который позволил наиболее отчетливо увидеть границы частиц.

Полученные изображение обрабатывались с помощью пакета MATLAB 7. Обработка изображений осуществлялась с использованием встроенных функций пакета и происходила по следующему алгоритму:

- бинаризация изображения (преобразование изображение в черно-белое);
- преобразование изображения в негатив (выделение границ частиц);
- определение периметров и площадей частиц (размерность в пикселях);
- фильтрация полученных частиц с целью отделения шума (удаление пыли, осколков от частиц);
- преобразование размерности площадей и периметра частиц из пикселей в мкм;
- графическое изображение полученных данных в логарифмических координатах;
- аппроксимация полученных данных линейной зависимостью с помощью метода наименьших квадратов;
- нахождение фрактальной размерности как тангенса угла наклона полученной прямой.

В результате данной обработки была получена линейная зависимость в логарифмических координатах, что свидетельствует о том, что ТРГ является фракталом и к данному материалу применим в дальнейшем фрактальный анализ. Фрактальная размерность для фракций оказалась различной (в диапазоне 0,890–1,598), причем с уменьшением фракции значение фрактальной

размерности увеличивалось. Исключение составила вторая фракция 400–315 – для нее получилась фрактальная размерность меньше топологической размерности линии ( $D_t = 1$ ) и фракция менее 63 мкм. Следовательно, для дальнейших исследований рекомендуется брать размерность частиц в диапазоне 315–63 мкм. Для данного диапазона была построена общая логарифмическая зависимость площади и периметра (рис. 2).

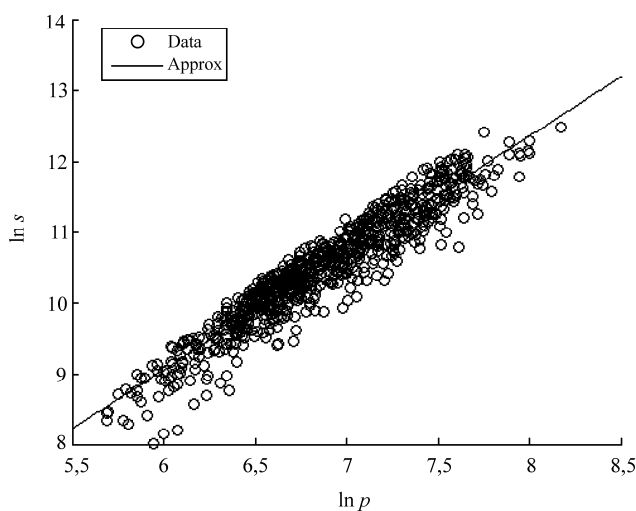


Рис. 2. Логарифмическая зависимость площади и периметра частиц ТРГ для фракции 315–63 мкм

Фрактальная размерность для данного диапазона равна 1,65. Данное значение существенно отличается от фрактальных размерностей для отдельных фракций, что связано с тем, что количество рассматриваемых частиц в разы больше, чем для отдельной фракции, следовательно, точность аппроксимации зависимости будет выше.

Образцы для испытания были получены из композиционного материала, состоящего из частиц разных фракций ТРГ и модифицированной силиконовой смолы в соотношении 60/40. Полученная смесь перемешивалась в емкости. Образцы имели цилиндрическую форму с диаметром 12,30 мм и различными высотами образцов. Различная высота образцов связана с тем, что более мелкие частицы имели лучшую упорядоченность. Изготавливались образцы с помощью одноосного прессования на лабораторной установке.

Прессование представляет собой формование порошка в пресс-форме под действием давления. Сущность процесса прессования заключается в уменьшении начального объема порошка сжатием. Объем порошкового тела при прессовании изменяется в результате заполнения пустот между частицами за счет их смещения и пластической деформации. При прессовании

хрупких материалов деформация проявляется в разрушении и дроблении выступов на поверхности частиц. Все образцы прессовали при одном давлении, равном 85 МПа.

Прессование происходило по следующей схеме (рис. 3). При прессовании графита следует учитывать его структурные особенности (чешуйчатое строение). При действии внешнего давления графит укладывается слоями. Графитовые слои обладают тенденцией перераспределяться в плоскость, перпендикулярную направлению действия сил, следовательно, сжатие приводит к более упорядоченной ориентации в материале. При прессовании были замечены следующие явления: высота образца фракции менее 63 мкм значительно отличалась от всех остальных образцов (около 4 мм), далее – увеличение на 0,1–0,2 мм для последующих фракций. Это связано как раз с тем, что более мелкие частицы имеют лучшую упорядоченность в материале.

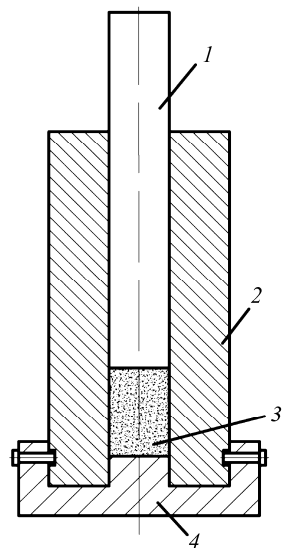


Рис. 3. Схема одноосного прессования: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – засыпаемый материал; 4 – нижний пуансон

Для исследования взаимосвязи механических свойств с фрактальными характеристиками были произведены испытания на сжатие по методике и на оборудовании, подробнее описанных в работах [6, 7].

Средний предел прочности для образцов из композиционного материала на основе ТРГ 23,8 МПа. С учетом отсеявшихся фракций была получена зависимость механической характеристики (модуля упругости) от фрактальной характеристики. Зависимость является линейной (рис. 4).

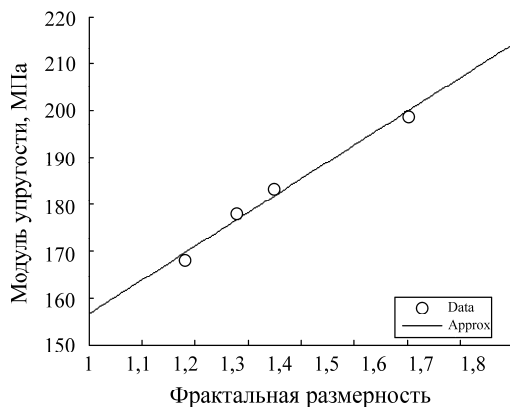


Рис. 4. Зависимость модуля упругости от фрактальной размерности

Алгоритм, предложенный для нахождения фрактальной размерности, может быть применен не только для исследования образцов, полученных прессованием ТРГ и композиций на его основе, но и полученных методом экструзии [7].

### **Список литературы**

1. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова [и др.]. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
2. Ролдугин В.И. Фрактальные структуры в дисперсных системах // Успехи химии. – 2003. – Т. 10. – С. 931–959.
3. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260 с.
4. Особенности строения и использования терморасширенного графита / А.М. Ханов, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев, Д.М. Караваев, В.А. Москалев, А.А. Нестеров, Д.В. Смирнов, О.Ю. Исаев // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2012. – Т. 14, № 1. – С. 92–106.
5. Белова М.Ю. От «черного мела» к уплотнениям из ТРГ // Арматуростроение. – 2008. – № 1. – С. 42–49.
6. Караваев Д.М., Русин Е.С. Разработка метода механических испытаний композиционных материалов на основе терморасширенного графита в диапазоне рабочих температур // Master's Journal. – Пермь, 2012. – № 1. – С. 55–57.
7. Нестеров А.А., Москалев В.А., Макарова Л.Е. Получение полимерных композиционных материалов с ТРГ-наполнителем методом экструзии // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 37–40.

Получено 18.10.2012

**Кичигина Ксения Анатольевна** – магистрант, ПНИПУ, МТФ, ТМК-11м, e-mail: ksisha\_@mail.ru.

**Дегтярев Александр Иванович** – кандидат технических наук, профессор, ПНИПУ, МТФ, КМиТОМ, e-mail: detali@pstu.ru.

**Караваев Дмитрий Михайлович** – ассистент, ПНИПУ, МТФ, КМиТОМ, e-mail: kmcm@ya.ru.