

И.Е. Красикова, И.В. Красиков, В.В. Каргузов

**ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУР КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Красикова Ирина Евгеньевна – младший научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, ira@ipms.kiev.ua;
Красиков Игорь Владимирович – старший научный сотрудник, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, kiv@ipms.kiev.ua;
Каргузов Валерий Васильевич – кандидат физико-математических наук, заведующий отделом, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, vvk@ipms.kiev.ua

Разработанное авторами программное обеспечение для вычисления мультифрактальных характеристик изображения структур, получаемых при помощи электронной микроскопии, применено к анализу серии снимков горячепрессованных композитов $AlB_{12}-AlN$. Показана корреляция механических свойств этих композитов с мультифрактальными характеристиками как структуры фаз так и структуры границ фаз.

***Ключевые слова:** мультифрактальность, электронная микроскопия, обработка изображений, горячее прессование, композиционный материал.*

В последнее время в современном материаловедении при описании структурных свойств композиционных материалов все более широко используются их фрактальные характеристики. Для создания технологий производства композиционных материалов необходима возможность получения достоверных сведений об их морфологических, размерных и структурных характеристиках.

Использование таких методов исследования, как электронная микроскопия (просвечивающая, сканирующая, туннельная и т.д.) позволяет визуально оценить размер, форму, степень агломерированности частиц и другие структурные характеристики. Однако изображения структур и характерных поверхностей, получаемые при помощи электронной и оптической микроскопии, обеспечивают исследователя не только качественными характеристиками, но и количественной информацией. Для решения таких задач требуется программное обеспечение анализа изображений, реализующее алгоритмы, основанные на максимально адекватных математических моделях, одним из источников которых является мультифрактальный анализ.

Приведем общее определение мультифрактала. Рассмотрим фрактальный объект, занимающий некую ограниченную область ζ с характерным линейным размером L в евклидовом пространстве размерности d . Пусть на каком-то этапе построения этого объекта он представляет собой множество из $N \gg 1$ точек, некоторым образом распределенных в области ζ . Будем предполагать, что $N \rightarrow \infty$.

Разобьем всю область ζ на кубические ячейки со стороной $\varepsilon \ll L$ и объемом ε^d . Далее нас будут интересовать только занятые ячейки, то есть такие, в которых содержится хотя бы одна точка. Пусть номера занятых ячеек i изменяются в пределах от 1 до $N(\varepsilon)$, где $N(\varepsilon)$ – суммарное количество занятых ячеек, которое, очевидно, зависит от размера ячейки ε .

Пусть $n_i(\varepsilon)$ представляет собой количество точек в ячейке с номером i . Тогда величина

$$p_i(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i(\varepsilon)}{N} \quad (1)$$

представляет собой вероятность того, что наугад взятая точка из нашего множества находится в ячейке i . Другими словами, вероятности p_i характеризуют относительную заполненность ячеек. Из условия нормировки вероятности следует, что

$$\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) = 1. \quad (2)$$

Стандартный метод мультифрактального анализа основан на рассмотрении *обобщенной статистической суммы* $Z(q, \varepsilon)$ в которой показатель степени q может принимать любые значения в интервале $-\infty < q < +\infty$:

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon) \quad (3)$$

Спектр *обобщенных фрактальных размерностей* D_q (*размерностей Реньи*), характеризующих данное распределение точек в области ζ , определяется с помощью соотношения

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}, \quad (4)$$

где нелинейная функция $\tau(q)$ (как правило, она называется *скейлинговой экспонентой*) имеет вид

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln Z(q, \varepsilon)}{\ln \varepsilon}. \quad (5)$$

Таким образом, окончательная формула для D_q имеет следующий вид:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}. \quad (6)$$

В случае, когда $D_q = D = const$ для всех q , исследуемое множество точек представляет собой *монофрактал*, характеризующийся единственной фрактальной размерностью D . Если же D_q является некоторой функцией от q , то рассматриваемое множество точек является мультифракталом.

Математический аппарат мультифрактального анализа гораздо подробнее изложен в работах [1–5]. На основе этого аппарата авторами было разработано программное обеспечение для вычисления мультифрактальных характеристик [6, 7]. В данной работе это программное обеспечение применено к изучению мультифрактальных характеристик горячепрессованных композитов AIB₁₂-AlN.

Предметом настоящего исследования являются композиты системы AIB₁₂-AlN с различным содержанием компонентов, методика получения и некоторые механические свойства которых описаны в [8].

Компоненты рассматриваемой системы между собой не взаимодействуют, а потому а priori можно ожидать, что механические свойства исследуемых

композитных материалов будут подчиняться законам аддитивности. Из тех же соображений можно надеяться на то, что мультифрактальные характеристики данного материала будут демонстрировать монотонное изменение с монотонным изменением количества AlN в составе композитов.

Изучение мультифрактальных характеристик указанных композитов было проведено как составная часть работы, состоявшей в систематическом исследовании условий компактирования и влияния состава на механические свойства композитов системы AlB₁₂-AlN при содержании AlN 75, 50, 25, 10 и 5 % (массовых процентов). Горячее прессование композитов проводили в графитовых прессформах с обмазкой нитридом бора при давлении 30 МПа.

Подготовка образцов для микроструктурного анализа, измерения твердости и механических свойств (полировка) было выполнено на полировальной машине FORCIMATE фирмы Metkon. На рис. 1 приведены микрофотографии структур горячепрессованных образцов. На них можно видеть изменение фазового состава в исследованных пределах концентраций AlB₁₂ и AlN и оценить наличие пористости в образцах в зависимости от температуры прессования.

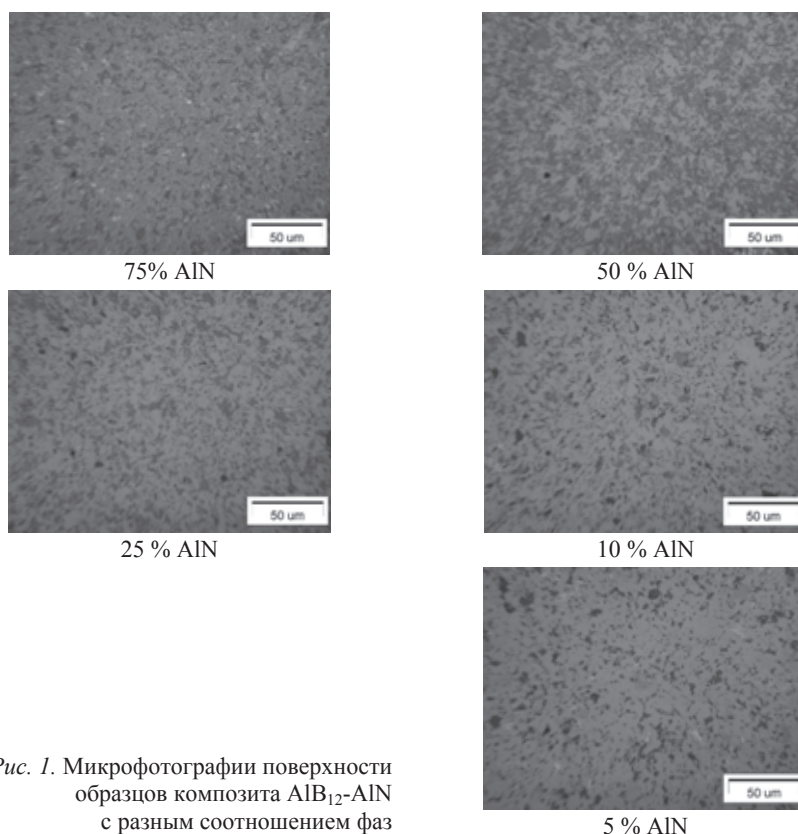


Рис. 1. Микрофотографии поверхности образцов композита AlB₁₂-AlN с разным соотношением фаз

Изучение мультифрактальных характеристик данных изображений, полученных на электронном микроскопе, выполнялось с помощью разработанного авторами программного обеспечения.

Оказалось, что ожидания монотонного изменения фрактальной размерности двумерного изображения поверхности композита при монотонном изменении процентного содержания фазы AlN были оправданы (рис. 2).

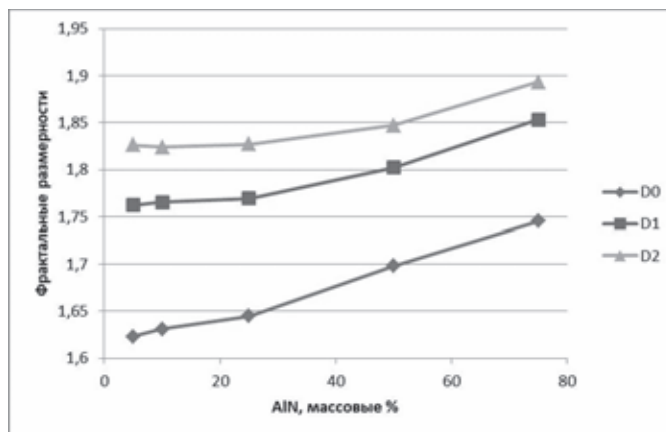


Рис. 2. Зависимости фрактальных размерностей D_0 , D_1 и D_2 от массовой доли AlN в составе композита

Общеизвестно, что физико-химические свойства границ раздела фаз (компонентов) зачастую играют определяющую роль в формировании эксплуатационных характеристик композитов, что в особенности справедливо в отношении материалов с развитыми границами. Следует ожидать, что структура (геометрия) границ, характеризуемая фрактальной размерностью, также немаловажна при оптимизации эксплуатационных свойств материалов.

В связи с этим разработанная программа позволяет, помимо получения обычных мультифрактальных характеристик изображений структуры фаз, выделять на них границы и определять мультифрактальные характеристики структуры сформированной системы границ фаз [6].

Примеры обработанных программой и подготовленных для вычисления мультифрактальных характеристик изображений с выделенными на них границами приведены на рис. 3.

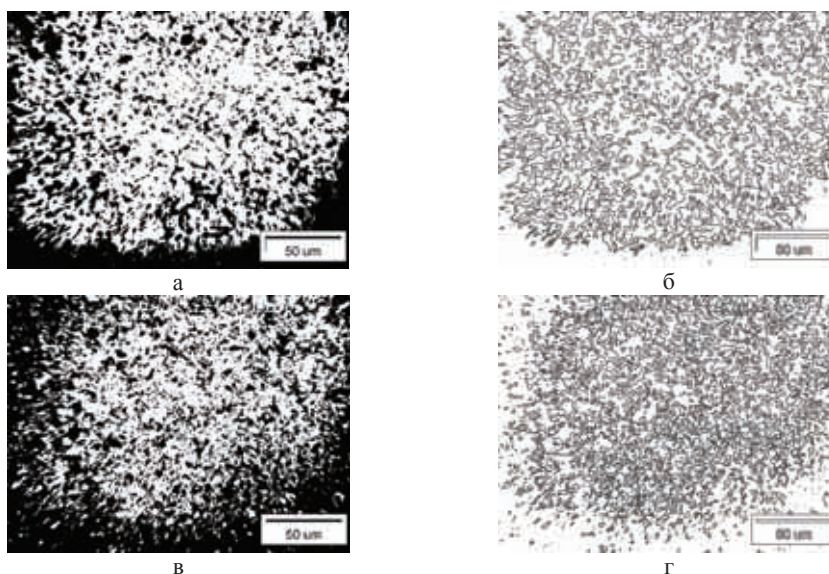


Рис. 3. Примеры обработанных программой и подготовленных для вычисления мультифрактальных характеристик исходных изображений и системы выделенных границ (а, б – 5% AlN, в, г – 75% AlN)

Результаты исследования мультифрактальных характеристик системы выделенных границ показаны на рис. 4.

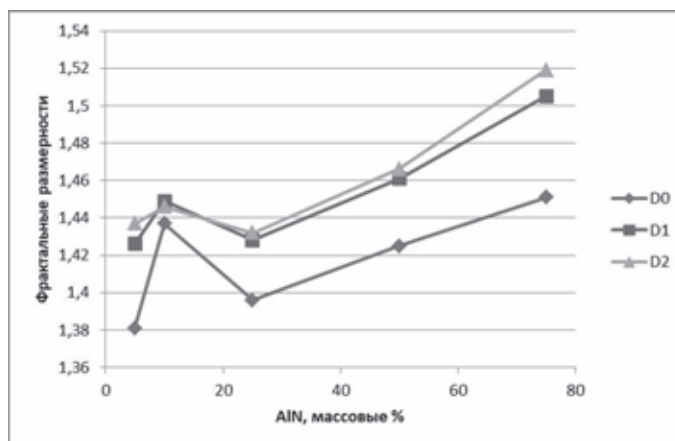


Рис. 4. Зависимости фрактальных размерностей D0, D1 и D2 изображений границ от массовой доли AlN в составе композита

Вычисленные мультифрактальные характеристики носят неаддитивный характер, который коррелирует с характером зависимости микротвердости шлифов рассматриваемого композита от массовой доли AlN в его составе. Результаты исследования микротвердости шлифов, выполненного на микротвердомере ПМТ-3 под нагрузкой 2 Н, показаны на рис. 5.

Композит AlB₁₂ (90%) + AlN (10%) обладает локально минимальной микротвердостью, которая совпадает с локальным экстремумом (максимумом) всех трех фрактальных характеристик изображений границ.

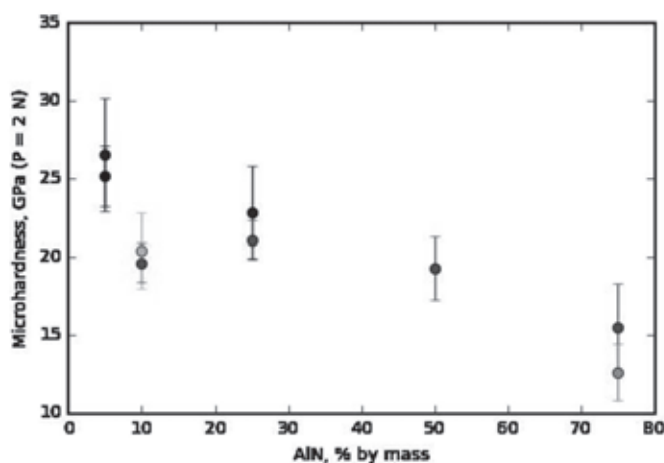


Рис. 5. Микротвердость композита AlB₁₂-AlN в зависимости от содержания нитрида алюминия [8]

Сопоставление полученных мультифрактальных и физических характеристик горячепрессованного композита AlB₁₂-AlN позволяет сделать важный вывод о том, что с физическими характеристиками могут быть связаны не только мультифрактальные характеристики изображений структуры фаз, но и мультифрактальные характеристики выделенных на них границ (границ зерен,

границ фаз – в зависимости от исследуемого материала). Кроме того, эти мультифрактальные характеристики границ могут даже иметь большую информативную ценность, чем характеристики необработанных изображений, в первую очередь для композитов, обладающих развитыми границами.

ВЫВОДЫ

В работе показана методология применения мультифрактального анализа изображений структур при изучении физико-механических свойств композитных материалов; при этом важную роль играют как мультифрактальные характеристики изображений собственно структур материала, так и программно сформированные изображения систем границ фаз композиционного материала.

Розроблене авторами програмне забезпечення для обчислення мультифрактальних характеристик зображення структур, отриманих за допомогою електронної мікроскопії, застосовано до аналізу серії знімків гарячепресованих композитів $AlB_{12}-AlN$. Показана кореляція механічних властивостей цих композитів з мультифрактальними характеристиками як структури фаз, так і структури границь фаз.

Ключові слова: мультифрактальність, електронна мікроскопія, обробка зображень, гаряче пресування, композиційний матеріал.

The authors' software for calculating the multifractal characteristics of images of structures obtained using electron microscopy, is applied to the analysis of a series of images of hot-pressed $AlB_{12}-AlN$ composites. The correlation of the mechanical properties of these composites with the multifractal characteristics of both the phase structure and phase boundary structure is shown.

Key words: multifractality, electron microscopy, image processing, hot pressing, composite material.

1. *И.Е. Красикова, И.В. Красиков, В.В. Картузов.* Определение фрактальных характеристик структуры материалов методом мультифрактального анализа изображений. Вычислительный эксперимент на модельных объектах. // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. – К.: Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. – 2007. – Вып. 9. – С.79–84.
2. *И.Е. Красикова, В.В. Картузов, И.В. Красиков.* Компьютерная реализация алгоритма вычисления фрактальной размерности структуры материала по изображениям, полученным при помощи электронной микроскопии. // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. – К.: Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. – 2011. – Вып. 13. – С.82–89.
3. *И.Е. Красикова, В.В. Картузов, И.В. Красиков.* Характеристики компьютерной реализации алгоритма вычисления фрактальной размерности двумерных изображений. // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. – К.: Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. – 2013. – Вып. 15. – С.69–73.
4. *И.Е. Красикова, В.В. Картузов, И.В. Красиков.* Компьютерная реализация алгоритма вычисления мультифрактальных характеристик структуры материала по двумерным изображениям. // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. – К.: Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. – 2014. – Вып. 16. – С.74–79.
5. *И.Е. Красикова, В.В. Картузов, И.В. Красиков.* Компьютерная реализация алгоритма определения мультифрактальных характеристик материаловедческих структур по их двумерным изображениям. // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. – К.: Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. – 2016. – Вып. 18. – С.30–36.
6. *И.Е. Красикова, И.В. Красиков, В.В. Картузов.* Корреляция значений фрактальных характеристик структуры материала по электронно-микроскопическим фотографиям

II. РЕЗУЛЬТАТИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

- поверхности образцов со значениями их физико-механических характеристик. – В сб. Электронная микроскопия и прочность материалов. Вып. 22.: Труды Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. Серия “Физическое материаловедение, структура и свойства материалов”. – Киев, 2016, с. 3–9.
7. *И.Е. Красикова, И.В. Красиков, В.В. Картузов.* Определение мультифрактальных характеристик изображений структур материалов. – Межвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2017. Випуск №57. С.102-110.
 8. *Мазур П.В., Васільєв О.О., Муратов В.Б., Прихна Т.О., Барвіцький П.П., Гарбуз В.В., Картузов В.В.* Композиційна кераміка на основі додекабориду та нітриду алюмінію. – Межвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2017. Випуск №58. С. 232–237.